



Programa de Doctorat en Tecnologies Industrials i
Materials

ESCOLA DE DOCTORAT DE LA UNIVERSITAT JAUME I

**MODELIZACIÓN, SIMULACIÓN Y CONTROL
INDUSTRIAL DEL TAMAÑO FINAL DURANTE EL
PROCESO DE FABRICACIÓN DE BALDOSAS DE
GRES PORCELÁNICO**

Memòria presentada per

Juan Boix Palomero

per a optar al grau de doctor per la Universitat Jaume I

Doctorand:

Juan Boix Palomero

Directors:

Gustavo Mallol Gasch

Eliseo Monfort Gimeno

Castelló de la Plana, 27 d'octubre de 2022



Licencia Creative Commons BY-NC-SA:

Puede reutilizarse el contenido de la obra con reconocimiento expreso de la autoría, pero sin hacer uso comercial. Pueden crearse otras obras a partir de esta con la obligación de licenciar las nuevas creaciones bajo las mismas condiciones.

Financiación recibida

La realización de este proyecto de investigación ha contado con la financiación de diferentes instituciones y organismos:

- Generalitat Valenciana, a través del Institut Valencià de Competitivitat Empresarial (IVACE).
- Ministerio de Economía, Industria y Competitividad, a través del Centro para el Desarrollo Tecnológico Industrial (CDTI).
- Institut de Tecnologia Ceràmica - Associació d'Investigació de les Indústries Ceràmiques (ITC-AICE).

*Als meus pares.
A Émilie, Marc i Estel.*

Agraïments

El treball que ací es presenta ha estat portat a terme a l'Institut de Tecnologia Ceràmica de la Universitat Jaume I de Castelló, dins del marc de diferents projectes d'investigació i innovació tecnològica promoguts per l'Associació de Investigació de les Indústries Ceràmiques (AICE). Primer de tot, voldria transmetre el meu agraïment a estes institucions per deixar-me desenvolupar el treball en total llibertat, ficant a la meua disposició tots els mitjans tecnològics i personals disponibles a les seues instal·lacions.

En segon lloc, voldria també agrair la col·laboració proporcionada per la empresa ZIRCONIO, S.A., i especialment pels tècnics José Antonio Cerisuelo i Juanjo Gargallo, que des d'un primer moment van confiar plenament en l'Institut per a dur a terme el desenvolupament experimental en les seues instal·lacions industrials.

Vull també reconèixer el paper del Centro para el Desarrollo Tecnológico Industrial (CDTI) i de la Generalitat València, a través de l'Institut Valencià de Competitivitat Empresarial, els quals han aportat finançament per al desenvolupament d'aquest treball.

De la mateixa manera, cal reconèixer la tasca feta per la empresa MACER, S.L. la qual ha permès l'extensió dels resultats de la investigació per a que, a dia de hui, diverses empreses estiguen gaudint a les seues instal·lacions de les avantatges competitives aportades pel desenvolupament. En especial, m'agradaria agrair a Agustín Poyatos, Ramiro Bonaque i Javier Adell la seua disposició i implicació en la promoció i transferència de la tecnologia desenvolupada. Sense la seua contribució és molt probable que els resultats del projecte no hagueren pogut convertir-se en una realitat industrial.

Mostre també el meu agraïment als meus directors de tesis: Gustavo Mallol, per totes les seues valuoses aportacions i les oportunitats concedides, tant per al desenvolupament d'aquest treball, com de la meua carrera professional en el si de l'Institut; i a Eliseo Monfort, per les seues contribucions tècniques i pel seu suport i impuls.

Finalment, però no menys important, no voldria deixar de reconèixer la ajuda de tots els meus companys de l'Institut de Tecnologia Ceràmica i, especialment, del actual Àrea de Processos Industrials. A Mingo Llorens, per apostar des d'un principi pel concepte tecnològic desenvolupat en esta tesis, per "contagiar-nos" la seua passió pel coneixement i estar sempre disponible per a resoldre qualsevol entrebanc tècnic. A Nacho Cantero i Nèstor Paqual pels seus desenvolupaments de software i de les comunicacions industrials. A Vicent Cantavella, per les seues contribucions matemàtiques

i establir els fonaments de la aplicació informàtica de control. A Miguel Aquilella, María José Sánchez i Ana Mezquita per la seua ajuda en les sempre complicades tasques d'experimentació industrial. I per últim, a Lilian Foucard i Amadeo Olmedilla, pel seu suport en la configuració i ús dels transductors d'humitat.

Resumen

El conformado por prensado uniaxial en semi seco de un polvo granulado es una de las etapas más importantes del proceso de fabricación de baldosas cerámicas, ya que en ella se define la porosidad de los soportes, de la cual depende el correcto desarrollo de prácticamente todas las etapas del proceso de fabricación y muchas de las propiedades físico-químicas del producto final. La densidad aparente es la propiedad macroscópica utilizada a nivel industrial para controlar la porosidad alcanzada durante el conformado.

El prensado de soportes para baldosas de gres porcelánico es especialmente crítico, pues condiciona en gran medida la estabilidad dimensional alcanzada al final del proceso. De hecho, aunque el control de la operación de prensado basado en la medida de la densidad aparente de los soportes recién prensados es un procedimiento muy extendido en las empresas cerámicas desde hace años, la variabilidad dimensional en la producción de productos de gres porcelánico es un problema endémico del sector. La existencia de los coloquialmente conocidos como calibres, que implican diferencias de tamaño medio entre piezas de una misma referencia de producto, ha obligado a establecer sistemas de gestión del almacén, de los pedidos y de los clientes que tengan en consideración el calibre a la hora de comercializar el producto con los consiguientes costes intangibles de gestión que ello implica.

Una de las principales causas de la aparición de los calibres son las variaciones que experimenta a lo largo del tiempo la humedad del polvo alimentado a las prensas. Para una misma presión de prensado, las perturbaciones de humedad provocan cambios en la compresibilidad del polvo que se traducen en variaciones significativas de la porosidad de los soportes, las cuales se propagan en el proceso de fabricación dando como resultado diferencias de contracción durante la cocción, que originan la aparición de calibres.

En el presente trabajo, se ahonda en la definición de las causas de aparición de los calibres, estudiando todos los cambios dimensionales que experimentan las piezas a lo largo de su procesado y estableciendo un modelo de comportamiento del material capaz de estimar la variabilidad dimensional del producto a partir de las condiciones de operación. El modelo ha sido incorporado en un programa de simulación, basado en la técnica DES, que permite predecir la evolución del tamaño final de las piezas fabricadas en lotes completos de producción. Tras su validación industrial, el modelo de comportamiento ha permitido evaluar la incidencia que tendrían sobre la estabilidad dimensional del producto diferentes estrategias de control anticipativas basadas

en la compensación de las fluctuaciones de la humedad del polvo, a través de cambios en la presión máxima de prensado.

El estudio ha permitido también identificar la importancia de cambios dimensionales tradicionalmente considerados como poco influyentes desde el punto de vista de la estabilidad dimensional. Especialmente, la expansión post-prensado de los soportes ha demostrado ser una variable crítica, que reduce la efectividad de las acciones de control en el prensado al incrementar la dispersión de las clasificaciones dimensionales de producto, principalmente en composiciones de soporte poco plásticas y grandes tamaños de pieza. Estas conclusiones han permitido definir y simular la efectividad que tendrían estrategias de control fundamentadas en el control directo del tamaño final de pieza, lo cual no había sido propuesto con anterioridad.

En base a los resultados de las simulaciones realizadas para composiciones porcelánicas de diferente naturaleza, se ha seleccionado, para su implementación en una prensa hidráulica a nivel industrial, una estrategia de control basada en mantener constante la densidad aparente en seco de los soportes recién prensados. Para ello, ha sido imprescindible poner a punto una metodología de medida, basada en la espectrometría NIR, que determina en continuo y sin contacto la humedad de los soportes recién prensados justo a la salida de la prensa. El bucle de control automático desplegado ha sido validado en condiciones reales de operación, demostrando su efectividad para la mejora de la estabilidad dimensional en la fabricación de lotes de baldosas de gres porcelánico en múltiples tamaños de pieza.

La tecnología desarrollada en el trabajo ha sido implementada con éxito en diferentes empresas fabricantes de baldosas cerámicas en varios países del mundo. La aceptación de la tecnología en el tejido industrial demuestra las ventajas aportadas por la misma para mejorar la estabilidad dimensional del gres porcelánico, sobre todo para los grandes tamaños de pieza producidos en los últimos años, en cuya fabricación un estricto control del conformado únicamente puede conseguirse con sistemas de control automático como el puesto a punto en esta investigación.

El trabajo de tesis se postula para recibir la Mención de Doctorado Industrial al suponer un desarrollo experimental que potencia la interacción entre el ámbito empresarial y el académico, fomentando la transferencia de conocimiento desde la investigación a su aplicación práctica en un entorno industrial real. De hecho, los resultados se han transferido a la industria cerámica en forma de un nuevo sistema de control del conformado de baldosa cerámicas, que permite mejorar el proceso de fabricación e incrementar la competitividad de las empresas que lo utilizan.

Abstract

Forming by semi-dry uniaxial pressing of a powder is one of the most important stages in the ceramic tile manufacturing process, since it defines the porosity of the bodies, on which depends the correct development of practically all the stages of the manufacturing process and many of the physicochemical properties of the final product. Bulk density is the macroscopic property used at industrial level to control the porosity achieved during forming.

The pressing of porcelain tile bodies is particularly critical, as it largely conditions the dimensional stability achieved at the end of the process. In fact, although the control of the pressing operation based on the measurement of the bulk density of the green bodies has been a widespread procedure in ceramic companies for years, dimensional variability in the production of porcelain tiles is an endemic problem in the sector. The existence of the colloquially known as calibers, which imply differences in average size between tiles of the same product reference, has made it necessary to establish warehouse, order and customer management systems that take into consideration the size when marketing the product, with the consequent intangible management costs that this implies.

One of the main causes of the appearance of calibers is the variation over time experienced by the humidity of the powder fed to the presses. For the same pressing pressure, moisture disturbances cause changes in the compressibility of the powder that result in significant variations in the porosity of the pressed bodies. These variations are later propagated in the manufacturing process resulting in differences in shrinkage during firing, leading to the appearance of calibers.

In the present work, the causes of the appearance of calibers are defined in depth, studying all the dimensional changes that the tiles undergo during their processing and establishing a material behavior model capable of estimating the dimensional variability of the product from the operating conditions. The model has been incorporated into a simulation program, based on the DES technique, which allows predicting the evolution of the final size of the tiles manufactured in complete production batches. After its industrial validation, the simulation model has been used to evaluate the impact on the dimensional stability of the product of different feedforward control strategies based on the compensation of powder moisture fluctuations through changes in the maximum pressing pressure.

The study has also identified the importance of some dimensional changes traditionally considered as having little influence from the point of view of dimensional sta-

bility. In particular, the pressing springback has proved to be a critical variable, which reduces the effectiveness of press control actions by increasing the dispersion of the product's final size distributions. This is specially critic when working with low plasticity body compositions and large size tiles. These conclusions have allowed defining and simulating the effectiveness of control strategies based on the direct control of the final tiles size, which had not been proposed before.

Based on the results of the simulations carried out for porcelain compositions of different nature, a control strategy based on keeping constant the dry bulk density of the pressed bodies has been selected for implementation in an industrial hydraulic press. For this purpose, it has been essential to develop a measurement methodology, based on NIR spectrometry, which determines continuously and without contact the moisture content of the ceramic bodies as soon as they leave the press. The automatic control loop deployed has been validated in real operating conditions, demonstrating its effectiveness in improving dimensional stability in the manufacture of porcelain tile batches in multiple tile sizes.

The technology developed in the work has been successfully implemented in different ceramic tile manufacturing companies in several countries around the world. The acceptance of the technology in industry demonstrates the advantages provided by it to improve the dimensional stability of porcelain tile, especially for the large sized products produced in recent years. In these cases, a strict control of the forming can only be achieved with automatic control systems such as the one developed in this research.

The thesis work is postulated to receive the Industrial Doctorate Mention because it is an experimental development that enhances the interaction between the business and academic fields, promoting the transfer of knowledge from research to its practical application in a real industrial environment. In fact, the results have been transferred to the ceramic industry in the form of a new ceramic tile forming control system, which improves the manufacturing process and increases the competitiveness of the companies that use it.

Índice general

1. Introducción	1
1.1. Baldosas cerámicas	3
1.1.1. Clasificación y tipologías	3
1.1.2. Proceso de fabricación	5
1.1.2.1. Preparación de la composición del soporte	6
1.1.2.2. Prensado	8
1.1.2.3. Secado	10
1.1.2.4. Esmaltado y decoración	12
1.1.2.5. Cocción	13
1.1.2.6. Clasificación final	15
1.2. Defectos dimensionales en baldosas cerámicas	17
1.2.1. Curvaturas	19
1.2.1.1. Curvaturas inmediatas	20
1.2.1.2. Curvaturas en diferido	22
1.2.2. Falta de ortogonalidad: descuadres	23
1.2.2.1. Definición, determinación y causas de los descuadres .	23
1.2.2.2. Acciones para minimizar la incidencia de los descuadres	26
1.2.2.2.1. Mejora de la distribución de la densidad aparente en el seno de los alveolos	26
1.2.2.2.2. Reducción de los gradientes transversales de temperatura en el horno	28
1.2.3. Variabilidad del tamaño medio: calibres	30

1.2.3.1.	Definición y determinación de los calibres	30
1.2.3.2.	Causas de aparición de los calibres	31
1.2.3.2.1.	Relación entre la contracción lineal y las variables de operación	32
1.2.3.2.2.	Efecto de las condiciones de cocción sobre la aparición de calibres	36
1.2.3.2.3.	Efecto de las condiciones de conformado sobre la aparición de calibres	43
1.2.3.3.	Acciones destinadas a reducir la incidencia de los calibres en la clasificación final	52
1.2.3.3.1.	Uso de sistemas isostáticos de homogeneización	53
1.2.3.3.2.	Control manual de la densidad aparente de los soportes recién prensados	54
1.2.3.4.	Incidencia habitual de los calibres en la clasificación final	56
1.3.	Cambios dimensionales durante el procesado	61
1.3.1.	Nomenclatura	61
1.3.2.	Ecuaciones de comportamiento	64
1.3.2.1.	Llenado del molde y compactación	65
1.3.2.2.	Expansión post-prensado	66
1.3.2.3.	Contracción de secado	66
1.3.2.4.	Contracción de cocción	67
1.3.2.5.	Resumen de las ecuaciones de comportamiento	68
2.	Motivación, objetivos y alcance	69
2.1.	Motivación	71
2.2.	Objetivos	73
2.3.	Alcance	74
3.	Materiales, equipos y procedimiento experimental	77
3.1.	Materiales	79
3.1.1.	Selección de materiales	79

3.1.2. Técnicas de caracterización y equipamiento de laboratorio . . .	81
3.1.3. Leyes de comportamiento en laboratorio	83
3.2. Equipamiento, instrumentación y procedimientos industriales	86
3.2.1. Conformado, cocción y caracterización dimensional de soportes industriales	87
3.2.2. Procedimientos industriales de experimentación	90
3.2.2.1. Muestreos de polvo atomizado en planta	91
3.2.2.2. Medida de la densidad aparente de los soportes indus- triales	92
3.2.2.3. Seguimiento de los lotes productivos a lo largo del proceso de fabricación	93
3.2.3. Medida en continuo de la humedad de los soportes industriales recién prensados	95
3.2.3.1. Tecnología de medida de la humedad por espectrome- tría de reflexión en el infrarrojo cercano	95
3.2.3.2. Instalación del dispositivo en planta	97
3.2.3.3. Calibración del equipo	100
3.2.3.4. Evaluación del funcionamiento del equipo y precisión de la medida	103
3.2.3.4.1. Correlación entre las medidas de humedad realizadas sobre los soportes y la humedad del polvo atomizado	103
3.2.3.4.2. Evaluación de la incidencia de algunas varia- bles externas sobre la medida	105
3.3. Simulación del comportamiento del material en el proceso	110
3.3.1. Simulación dinámica mediante eventos discretos	111
3.3.2. Implementación del modelo de simulación	112
3.3.3. Simulación experimental del proceso	117
3.3.3.1. Simulación de maniobras en proceso y funcionamien- to convencional	117
3.3.3.2. Simulación de estrategias de control	118
4. Resultados y discusión	125
4.1. Validación del modelo de comportamiento a escala industrial	127

4.1.1.	Evaluación de la estimación de los cambios dimensionales . . .	127
4.1.1.1.	Estimación de la expansión post-prensado (S_2) y de la contracción de secado (S_3)	128
4.1.1.2.	Estimación de la densidad aparente en seco (D_3) me- diante el diagrama de compactación	132
4.1.1.3.	Estimación de la contracción de cocción (S_4) median- te el diagrama de gresificación	134
4.1.1.4.	Resumen de las ecuaciones de comportamiento vali- dadas industrialmente	135
4.1.1.5.	Estimación del tamaño final de los soportes (L_4 y W_4) mediante el modelo escalado	136
4.1.2.	Influencia sobre la precisión del modelo de algunas variables industriales	137
4.1.2.1.	Variabilidad en la estimación de la densidad aparente en seco	137
4.1.2.2.	Variabilidad en la estimación de la contracción de coc- ción	141
4.1.3.	Estimación del tamaño final de pieza en lotes completos	143
4.1.3.1.	Evaluación del efecto de las modificaciones de la pre- sión a lo largo de un lote de fabricación	144
4.1.3.2.	Estimación de la densidad aparente en seco y del ta- maño final de las piezas de un lote completo en con- diciones de fabricación	150
4.2.	Simulación de estrategias de control industrial	155
4.2.1.	Simulación de una estrategia de control basada en la densidad aparente en húmedo	155
4.2.2.	Simulación de una estrategia de control basada en la densidad aparente en seco	161
4.2.3.	Simulación de una estrategia de control basada en el tamaño final de pieza	163
4.2.4.	Selección de la estrategia de control industrialmente implantada	166
4.2.4.1.	Comparativa entre estrategias de control	166
4.2.4.2.	Simulación de estrategias de control incorporando la variabilidad de proceso	168

4.2.4.2.1.	Evolución de las variables operando a una presión máxima constante	169
4.2.4.2.2.	Evolución de las variables con un control de la densidad aparente en seco	173
4.2.4.2.3.	Evolución de las variables con un control basado en el tamaño final de pieza	177
4.2.4.2.4.	Influencia del tamaño de la pieza y selección de la estrategia para automatizar el control .	181
4.3.	Implementación y evaluación del funcionamiento de un bucle de control automático del prensado	185
4.3.1.	Descripción de la aplicación de control desarrollada	186
4.3.1.1.	Modo de funcionamiento del sistema	187
4.3.1.2.	Interfaz de usuario	189
4.3.2.	Evaluación del funcionamiento del sistema de control implementado	191
4.3.2.1.	Modificación controlada de la densidad aparente en seco de los soportes conformados	191
4.3.2.2.	Control automático de un lote completo de baldosas .	194
4.3.3.	Procedimiento de verificación del funcionamiento del sistema de control	197
4.3.4.	Impacto del sistema de control sobre las clasificaciones finales de producto	201
4.3.4.1.	Mejora de la estabilidad dimensional del producto final	201
4.3.4.1.1.	Análisis de los lotes de tamaño nominal de las piezas 675 mm x 450 mm	203
4.3.4.1.2.	Análisis de los lotes de tamaño nominal de las piezas 450 mm x 450 mm	205
4.3.4.1.3.	Análisis global de los lotes fabricados	206
4.3.4.2.	Adecuación de las tolerancias dimensionales de las baldosas a las condiciones de procesado	209
4.3.5.	Transferencia de los resultados de la investigación a empresas fabricantes de baldosas cerámicas	216
5.	Conclusiones	221

6. Líneas futuras de investigación	227
A. Apéndice	235
A.1. Datos experimentales y parámetros de ajuste de las ecuaciones constitutivas	237
A.1.1. Diagramas de compactación	237
A.1.2. Expansión postprensado	238
A.1.3. Contracción de secado	239
A.1.4. Diagramas de gresificación	240
A.2. Datos experimentales de validación de la tecnología de medida de la humedad por espectrometría NIR	241
A.3. Error en la estimación de la densidad aparente en seco mediante el diagrama de compactación	244
A.4. Cálculo de la acción de control para una estrategia de control basada en el tamaño final de la pieza	246
A.5. Patente de invención	247
A.6. Empresas en las que se ha implementado la tecnología desarrollada en el trabajo	255
Nomenclatura	257
Glosario	263
Bibliografía	267

1

Introducción

En este primer capítulo se realiza una revisión de las diferentes tipologías de baldosas cerámicas existentes y del proceso empleado en la fabricación de las baldosas prensadas. Además, se exponen los tipos de defectos dimensionales que pueden aparecer en el producto final y las causas de su aparición. Finalmente, se describen las leyes fenomenológicas que explican el comportamiento del producto a lo largo de las etapas del proceso, desde el punto de vista de su variación dimensional.

1.1 Baldosas cerámicas

1.1.1 Clasificación y tipologías

Las normas UNE-EN 14411 e ISO 13006 [1][2] describen las baldosas cerámicas como placas de poco espesor fabricadas a partir de composiciones constituidas por arcillas y otras materias primas inorgánicas. Las baldosas suelen conformarse por extrusión o prensado en seco a temperatura ambiente para, a continuación, ser secadas, decoradas y cocidas a temperaturas lo suficientemente elevadas como para que adquieran las propiedades requeridas para su uso: el revestimiento de suelos y paredes tanto interiores como exteriores.

Tabla 1.1. Clasificación normalizada de baldosas cerámicas según UNE-EN 14411 (*los grupos AIIa y AIIb se subdividen en 2 subgrupos con diferentes especificaciones de producto).

Método de conformado	Absorción de agua (% masa)				
	Ia	Ib	IIa	IIb	III
	Muy baja (<0,5 %)	Baja (0,5 - 3,0 %)	Media-baja (3,0 - 6,0 %)	Media-alta (6,9 - 10,0 %)	Alta (>10,0 %)
A: Extrusión	Grupo AIa	Grupo AIb	Grupo AIIa*	Grupo AIIb*	Grupo AIII
B: Prensado	Grupo BIa	Grupo BIb	Grupo BIIa	Grupo BIIb	Grupo BIII

La clasificación normalizada de las baldosas cerámicas, según las normas previamente indicadas, tiene en cuenta, fundamentalmente, el método de conformado empleado en su fabricación y el nivel de absorción de agua (*AA*) del producto final:

- Grupos de baldosas clasificados según el método de conformado

Las baldosas pueden ser conformadas por extrusión o por prensado en seco. Las baldosas extruidas forman el grupo A de las normas y las prensadas en seco el grupo B.

- Grupos de baldosas clasificados según la absorción de agua

La absorción de agua se define como el porcentaje (en masa) de agua que absorbe una baldosa cerámica, determinado según un ensayo normalizado [3]. La absorción de agua está relacionada con la porosidad abierta de la pieza y, por lo tanto, con algunas de sus propiedades técnicas. Un valor de absorción de agua de hasta el 3 % se considera bajo (grupo I) y como muy bajo por debajo del 0,5 % (grupo Ia). Entre 3 % y 6 %, la absorción de agua es media-baja (grupo IIa) y media-alta entre 6 % y

10 % (grupo IIb). Finalmente, la absorción se considera alta por encima del 10 % (grupo III).

La aplicación de los criterios de clasificación anteriores conduce a la creación de distintos grupos normalizados de baldosas cerámicas, tal y como se detalla en la tabla 1.1. Además, más allá de la utilización de la tipología normalizada, existen unas denominaciones más extendidas de los tipos de baldosas cerámicas basadas principalmente en criterios técnicos y comerciales. Esta tipología viene resumida en la tabla 1.2 [4]. Este trabajo se centra en el estudio del comportamiento durante su procesado de los productos fabricados por prensado en seco y, dentro de estos, especialmente de las baldosas de baja y muy baja absorción de agua, las cuales suelen calificarse como gresificadas. Seguidamente se describen con más de detalle las características generales de las baldosas conformadas por prensado.

Tabla 1.2. Tipología de baldosas cerámicas más usuales según [4].

Tipología	Conformado	Soporte	Esmalte	Grupo UNE-EN 14411
Azulejo	Prensado	Poroso	Sí	BIII
Gres esmaltado	Prensado	No poroso	Sí	B1b - BIIa
Gres porcelánico	Prensado Extruido	No poroso	Sí/No	BIa - AIIa
Baldosín catalán	Extruido	Poroso	No	AIIb - AIII
Gres rústico	Extruido	No poroso	Sí/No	A1b - AIIa
Barro cocido	Extruido	Poroso	No	AIIb - AIII

■ **Azulejo**

Es el nombre tradicionalmente dado a las baldosas cerámicas con absorción de agua alta (superior al 10 %, grupo BIII), conformadas por prensado en seco y esmaltadas. Se trata de una tipología de baldosas con una elevada estabilidad dimensional gracias a la baja contracción que experimenta durante la cocción la mezcla de materias primas empleada en la preparación de sus soportes. Debido a sus características, los azulejos se utilizan exclusivamente para revestir paredes interiores, por lo que en ocasiones se les denomina, simplemente, baldosas de revestimiento.

■ **Gres esmaltado**

Son baldosas cerámicas de absorción de agua baja o media-baja (entre 0,5 y 6 %, grupos B1b y BIIa), prensadas en seco y esmaltadas. Presentan una resistencia mecánica superior a la de los azulejos, gracias a la menor porosidad alcanzada por

los soportes durante la cocción. En cambio, su estabilidad dimensional es significativamente más complicada de controlar, ya que experimentan contracciones de cocción muy superiores. Las baldosas de gres esmaltado son adecuadas para su uso en suelos interiores, en locales residenciales o comerciales, por lo que se les suele denominar pavimento de gres. Estas baldosas, cuando reúnen las características pertinentes (resistencia a la helada y alta resistencia a la abrasión, entre otras), pueden ser también utilizadas para revestir suelos exteriores o fachadas.

■ Gres porcelánico

Es la denominación habitual de las baldosas cerámicas con muy baja absorción de agua (inferior a 0,5 %, grupo BIa). Esta baja absorción de agua está asociada con una porosidad prácticamente nula que proporciona al gres porcelánico una elevada resistencia mecánica y muy baja permeabilidad [5]. Estas características de las baldosas de gres porcelánico, unidas a su elevada resistencia a la helada, las hacen adecuadas para múltiples usos como: suelos interiores en edificación residencial, comercial e incluso industrial, revestimientos de paredes interiores y uso en suelos exteriores y fachadas. En la última década este tipo de baldosas han sido las que han experimentado un mayor incremento por su versatilidad, siendo en la actualidad el producto más fabricado en la industria europea de baldosas cerámicas.

1.1.2 Proceso de fabricación

En el esquema recogido en la figura 1.1 se representa, de manera simplificada, el proceso de fabricación de las baldosas cerámicas prensadas, objeto de esta investigación.



Figura 1.1. Esquema del proceso de fabricación de baldosas cerámicas prensadas.

Las principales etapas que constituyen dicho proceso de fabricación son: la preparación de la composición del soporte, que puede efectuarse siguiendo una ruta en “vía seca” o un procedimiento por “vía húmeda”, el conformado de la pieza, el secado, el esmaltado o decoración (opcional en las baldosas de gres porcelánico) y la cocción [6].

Aunque por simplicidad no se representan en el esquema de la figura 1.1, de forma complementaria, las baldosas pueden someterse a un proceso de rectificado de sus bordes [7][8] y, en el caso de las baldosas de gres porcelánico, a un proceso de pulido superficial [9]. En todos los casos, el producto terminado es sometido a una etapa de inspección final durante la cual se agrupa en clases atendiendo a una serie de criterios de clasificación, generalmente referidos a la tonalidad [10] y las dimensiones de las piezas. A continuación, se describe como se llevan a cabo estas etapas del proceso de fabricación, indicando brevemente las variables que intervienen en cada una de ellas y que presentan mayor interés desde el punto de vista del trabajo desarrollado.

1.1.2.1 Preparación de la composición del soporte

La fabricación de baldosas cerámicas se inicia con la etapa de preparación de la composición del soporte, comúnmente denominada “preparación de pastas”. La finalidad de esta etapa es adecuar la morfología y composición de las materias primas, procedentes principalmente de yacimientos naturales, para que puedan ser correctamente procesadas [11]. Actualmente, la preparación de la composición del soporte puede realizarse siguiendo dos procedimientos diferentes [12]. Bien mediante un procedimiento conocido como “vía seca”, consistente en la molienda en seco de la mezcla de materias primas en molinos pendulares y la posterior aglomeración con agua del polvo resultante. O bien mediante la denominada como “vía húmeda”, que implica la molienda en húmedo de las materias primas en molinos continuos de bolas [13] y el posterior secado por atomización de la suspensión obtenida [14] (ver figura 1.2).



Figura 1.2. Molino continuo de bolas (izquierda) y atomizador (derecha) empleados en la preparación de la composición del soporte por “vía húmeda”.

Ambos procesos permiten fabricar polvos granulados de elevada fluidez, que son empleados en el conformado de los soportes de las baldosas. Ahora bien, la preparación de la composición por atomización de una suspensión previamente molturada pro-

porciona granulados de mayor fluidez [15] y minimiza la incidencia en el producto de las impurezas presentes en las materias primas, como consecuencia de la mayor dilución de las mismas alcanzada con la molienda en húmedo. En cualquiera de los dos casos, el polvo de prensas generado debe tener una distribución de tamaños de gránulo adecuada para garantizar un buen llenado de los alveolos o cavidades del molde metálico en el que se lleva a cabo el conformado de los soportes. Del mismo modo, las partículas que constituyen los aglomerados del polvo han de presentar una distribución de tamaños concreta, pues de ella dependerá en gran medida la porosidad y distribución de poros obtenida en los soportes crudos. Sin una adecuada porosidad en los soportes, las reacciones físico-químicas posteriormente experimentadas durante la cocción del material, no tendrían lugar correctamente y el producto final no presentaría las propiedades técnicas y estéticas deseadas [16].

La preparación de la composición del soporte por “vía húmeda” ha sido la más extendida en los *clusters* cerámicos de España e Italia. Ambos países han impulsado el desarrollo tecnológico de la fabricación de baldosas cerámicas desde los años 80 del siglo pasado, hasta convertirse, a principios del presente, en unos de los principales exportadores mundiales. Los productos fabricados en estos dos distritos cerámicos se han caracterizado históricamente por tener una gran calidad y valor añadido, alcanzados gracias al énfasis puesto en la innovación, el diseño, la tecnología y la imagen de marca [17][18]. Puesto que la fabricación de esta tipología de productos presenta ciertas limitaciones, si se emplean procedimientos de preparación de la composición por “vía seca”, la “vía húmeda” ha sido la tecnología habitualmente utilizada en estos países. Pese a ello, los nuevos requisitos medioambientales están llevando a desarrollar proyectos para mejorar el proceso “vía seca”, dado que implica un menor consumo energético y menos emisiones asociadas de dióxido de carbono [19].

Las etapas propias de la preparación de la composición presentan características típicas de la industria de proceso. Por un lado, requieren del trasiego de grandes cantidades de materias primas a granel. Por otro lado, producen un producto semielaborado, el polvo de prensas, el cual no constituye en sí un producto acabado, sino que sirve de materia prima para las siguientes etapas de la fabricación. Y finalmente, implican un flujo continuo y altamente automatizado de materiales, lo cual es habitual en las plantas de proceso químico. Estas características las diferencian considerablemente del resto de etapas del proceso de fabricación de baldosas cerámicas, las cuales muestran particularidades más bien propias de la manufactura en masa de productos. De hecho, la fabricación de las baldosas a partir del polvo supone el procesado discreto de piezas cerámicas, comúnmente agrupadas en lotes de fabricación, las cuales deben cumplir, de manera individualizada, una serie de especificaciones técnicas y estéticas al finalizar el proceso de manufactura, con el fin de satisfacer las exigencias de los mercados a los que van destinadas.

Estas diferencias operacionales tan acusadas motivan que la molienda y atomización/granulación estén claramente separadas del resto de las etapas del proceso en los *lay-outs* de las plantas cerámicas. Es más, en zonas geográficas con especial acumulación de empresas productoras de baldosas cerámicas, tal y como sucede en los *clusters* cerámicos de España e Italia, dicha separación llega hasta el punto de exis-

tir compañías dedicadas exclusivamente a fabricar polvo atomizado con diferentes composiciones y a suministrarlo a empresas productoras de baldosas.

Independientemente de que la fabricación del polvo de prensas se realice en la propia planta o que este sea suministrado mediante camiones por un proveedor externo tras su producción, el polvo es almacenado en baterías de silos con el objetivo de homogeneizar sus propiedades. Generalmente, se requiere un tiempo de reposo en los silos no inferior a los dos días, con vistas a homogeneizar, sobre todo, el contenido en humedad del polvo, el cual, como se comprobará a lo largo de este trabajo, es una de las variables clave en el proceso de fabricación de baldosas cerámicas [20].

1.1.2.2 Prensado

Tras la preparación de la composición, el proceso de fabricación continúa con la operación de conformado, la cual tiene por objetivo dar forma a los soportes de las baldosas y definir su microestructura interna. Esta etapa tiene lugar en prensas hidráulicas a las cuales se alimenta, mediante un sistema de cintas de transporte, el polvo procedente de los silos de almacenamiento [21]. El polvo se vierte en un pequeño silo ubicado en la parte superior de la prensa, desde el cual, a través de un sistema de dosificación y reparto, se hace llegar al interior de un tolván de reducidas dimensiones situado abordo del propio sistema de alimentación de la prensa. Este dispositivo de alimentación, conocido vulgarmente como “carro” de la prensa, se encuentra adosado a la parte trasera de esta. El sistema dispone de una rejilla metálica, sobre la cual, al inicio de cada ciclo de prensado, el tolván deposita el polvo para, a continuación, transportarlo hacia la bancada de la prensa y verterlo en los alveolos del molde (ver figura 1.3). Este proceso de alimentación del polvo de prensado se conoce comúnmente como “carga” del molde.

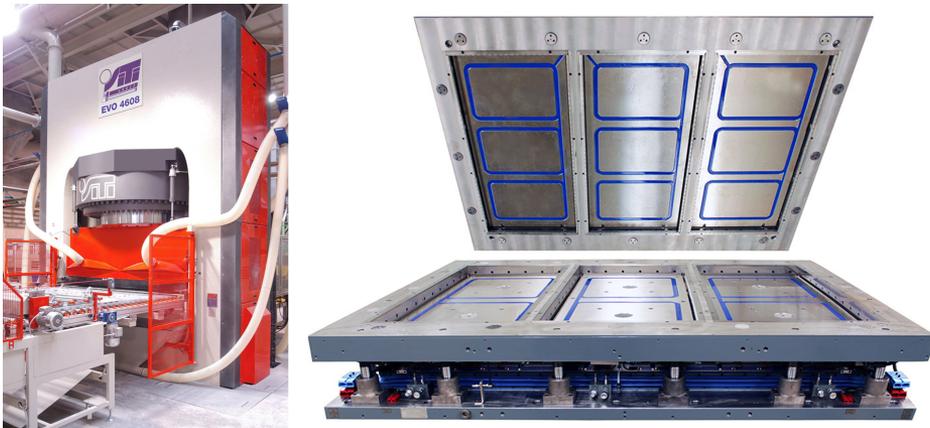


Figura 1.3. Prensa hidráulica (izquierda, cortesía de Siti - B&T) y molde (derecha, cortesía de MACER S.L.) empleados en el conformado de soportes de baldosas cerámicas.

En su retroceso, la rejilla de alimentación enrasa el lecho de polvo contenido en el molde, con el fin de garantizar su homogeneidad. Finalizado el retroceso del sistema de alimentación, la prensa ejerce el ciclo de compactación, propiamente dicho, mediante el desplazamiento de los punzones superiores del molde.

El ciclo de compactación comprende, generalmente, de una primera prensada a baja presión, seguida de un lapso de tiempo durante el que se detiene la aplicación de la fuerza para permitir la evacuación del aire contenido en el lecho de polvo. Tras este periodo de desaireación se lleva a cabo la segunda prensada hasta alcanzar una presión máxima, la cual se fija en función de las características de la composición del producto que se esté fabricando y del grado de porosidad que se desee alcanzar en el soporte. El ciclo de prensado termina con la extracción de los soportes compactados, mediante el accionamiento del sistema de extracción del molde, y el posterior empuje de las piezas cerámicas hacia una línea de transporte de rodillos situada en la parte delantera de la prensa. El desplazamiento de los soportes recién prensados se lleva a cabo gracias al empuje de la parte frontal del propio sistema de alimentación, durante el llenado de las cavidades en el siguiente ciclo de prensado [22].

La etapa de conformado es una de las más importantes de todo el proceso de fabricación, ya que en ella se fija la porosidad (p) de los soportes crudos. Dicha porosidad afecta al desarrollo de prácticamente todas las etapas del proceso de fabricación y de ella dependen gran cantidad de las propiedades físico-químicas del producto terminado [23]. Puesto que en la práctica industrial es muy complicado medir directamente la porosidad de los soportes recién prensados, esta se controla de manera indirecta mediante la medida de su densidad aparente, la cual puede determinarse más fácilmente.

La densidad aparente de un material es una magnitud aplicada a cuerpos de constitución heterogénea, como es el caso de las baldosas, los cuales incorporan intersticios o poros de aire en su interior, de tal manera que la densidad aparente de un volumen de material es menor que la densidad del sólido que lo compone. Puede decirse que la densidad aparente es una propiedad macroscópica directamente relacionada con la porosidad del soporte y que proporciona información sobre la microestructura interna de este. La porosidad se relaciona con la densidad aparente del soporte a través de su compacidad o densidad relativa (ϕ), la cual se calcula como el cociente entre su densidad aparente (ρ_{ap}) y la densidad teórica del sólido (ρ_t) que constituye la pieza (ver ecuaciones (1.1) y (1.2)).

$$p = 1 - \phi \quad (1.1)$$

$$\phi = 1 - \rho_{ap}/\rho_t \quad (1.2)$$

Durante la fabricación de baldosas cerámicas es imprescindible controlar tanto la densidad aparente media de los soportes recién prensados, como la distribución de la densidad en el seno de los mismos, pues ambas variables son clave para obtener productos cerámicos de elevada calidad. La densidad aparente media de los soportes recién prensados es función, para una determinada composición de polvo atomizado, de la presión máxima aplicada sobre el polvo durante el ciclo de prensado y de su contenido en humedad en el momento de efectuar el conformado.

La distribución de la densidad aparente en el seno de cada una de las piezas conformadas en los diferentes alveolos de la prensa depende, exclusivamente, de cómo haya sido repartido el polvo en cada alvéolo durante su alimentación. Este reparto guar-

da, a su vez, relación con, por un lado, la fluidez del polvo y, por otro lado, con los parámetros de funcionamiento del sistema de alimentación. En efecto, la cantidad de polvo depositada en el seno de las cavidades del molde puede modificarse mediante la regulación de las velocidades y aceleraciones de avance/retroceso de la rejilla y la sincronización entre el avance/retroceso de esta y el movimiento de los punzones inferiores, cuya posición respecto a la matriz del molde, en el momento de verter el polvo en sus alveolos, define el espesor de este depositado en su interior.

La compactación del polvo por efecto de la presión aplicada por la prensa implica una disminución de la cantidad de aire ocluido en el lecho del mismo contenido en los alveolos. Esta reducción de la cantidad de aire va acompañada de una disminución de la porosidad del lecho y, por tanto, de un incremento de la densidad aparente. La reordenación de los gránulos de atomizado a bajas presiones y la posterior deformación de los mismos a presiones más elevadas, son los principales mecanismos que intervienen en la densificación del material durante su conformado.

La deformación que experimentan los gránulos de atomizado presenta dos contribuciones. Por una parte, una deformación plástica y permanente del material, asociada a la presencia de minerales arcillosos en la composición del polvo, que desarrollan su plasticidad gracias a la presencia de agua. Y, por otra parte, una deformación elástica y, por tanto, no permanente, que se traduce en una expansión post-prensado del soporte tras cesar la aplicación de presión sobre el mismo. La causa de la deformación elástica del lecho de polvo compactado se encuentra en la presencia de materias primas desgrasantes y agua en la composición. La magnitud de la expansión post-prensado experimentada por los soportes depende, por una parte, de variables propias del polvo como son la naturaleza de las materias primas presentes en su composición, el tamaño medio de las partículas que constituyen sus gránulos y su contenido en humedad. Y, por otra parte, de variables propias de la operación de conformado como la presión máxima aplicada durante el ciclo de prensado y el tiempo de aplicación de la misma.

La operación de prensado se considera correctamente ejecutada cuando permite obtener soportes cerámicos con la forma geométrica deseada, tanto en sus caras, como en sus bordes laterales y libres de defectos tales como rayas, roces o desprendimientos, sobre todo, en su cara vista. Además, como se ha expuesto anteriormente, es imprescindible que la densidad aparente media de los soportes conformados y la distribución de densidad aparente en el seno de estos se mantenga constante, dentro de unos límites máximos de variación, para garantizar el correcto desarrollo del proceso y la obtención de un producto terminado con las especificaciones deseadas.

1.1.2.3 Secado

Tras su conformado, los soportes húmedos son extremadamente frágiles. Por ello, son sometidos a un proceso de secado con vistas a incrementar su resistencia mecánica, permitiendo así que mantengan su integridad durante las diferentes operaciones de decoración y manipulación a las que son sometidos previamente a su cocción. La operación de secado se realiza generalmente mediante secaderos verticales u horizontales, como los mostrados en la figura 1.4, en los que el secado se efectúa por

convección al poner en contacto los soportes con aire caliente generado por una serie de quemadores de gas natural.

Los tiempos de secado varían sensiblemente dependiendo de la composición, el espesor y la porosidad del producto procesado, así como de la tecnología de secado empleada. En los secaderos horizontales, los ciclos de secado presentan habitualmente una duración de entre 20 y 40 minutos, mientras que en los secaderos verticales, con una circulación de aire que no favorece tanto la evacuación del agua contenida en los soportes, los ciclos de secado se sitúan, prácticamente siempre, por encima de 1 h de duración, llegando, en ocasiones, a tiempos de secado superiores a 2 h.



Figura 1.4. Secadero vertical (izquierda, cortesía de SACMI Coop.) y horizontal (derecha, cortesía de Siti-B&T) empleados en el secado de los soportes de baldosas cerámicas.

Las cantidades de agua a eliminar de los soportes fabricados por prensado en seco son mucho menores que las extraídas durante el secado de productos fabricados por extrusión, de ahí que el secado de baldosas cerámicas prensadas tenga lugar con contracciones muy reducidas, comparadas con las que experimentan los productos extruidos [24]. Por esta razón, los cambios dimensionales que sufren los soportes prensados durante el secado son muy pequeños, permitiendo fabricar baldosas cerámicas con tolerancias dimensionales muy restrictivas. Pese a esto, el control de la operación de secado debe ser adecuado para evitar defectos asociados a un secado incorrecto del material, tales como la aparición de grietas en el producto o la rotura de piezas [25].

A la salida del secadero, los soportes deben contener una cierta cantidad de humedad residual (en torno al 0,5%). De este modo, las piezas crudas disponen de la elasticidad suficiente para absorber los posibles impactos que pueden recibir durante su transporte sobre las líneas de decoración y en los pulmones intermedios en los que habitualmente se almacenan, una vez decoradas, a la espera de ser cocidas. Del mismo modo, en la fabricación de piezas esmaltadas, el secadero debe garantizar que la temperatura de la superficie de los soportes a la salida del mismo se sitúe alrededor de 100°C y se mantenga lo más estable posible entre piezas distintas con el fin de garantizar un correcto desarrollo de la etapa de esmaltado. En efecto, la velocidad de secado del conjunto de capas decorativas aplicadas sobre el soporte depende, en gran medida, de la porosidad del soporte y de su temperatura en el momento de realizar la aplicación del esmalte.

1.1.2.4 Esmaltado y decoración

El esmaltado y la decoración de los soportes se realiza inmediatamente después de su secado. Tiene por objeto principal depositar sobre la superficie de los soportes las capas de esmalte y decoraciones que confieren a las baldosas cerámicas, una vez cocidas, su aspecto estético final y gran parte de sus propiedades físico-químicas superficiales. La mayor parte de las tipologías de producto, para las cuales tienen aplicación los resultados de este trabajo de investigación, requieren la aplicación de una o varias capas de naturaleza vítrea sobre su superficie. La única excepción son ciertos productos de gres porcelánico, generalmente denominados como gres porcelánico "técnico", que no requieren de una capa superficial de esmalte y/o decoración. El aspecto de estos productos viene dado por la propia coloración del soporte y las decoraciones que sobre este hayan podido realizarse mediante el uso de polvos atomizados de diferentes colores o incluso mediante la deposición, durante la alimentación de los alveolos de la prensa, de otros materiales micronizados o en forma de escamas.

El esmaltado se realiza en líneas de transporte, típicamente de correas, sobre las que discurren individualmente las piezas fabricadas. A lo largo de las líneas de esmaltado se sitúan los diferentes sistemas de aplicación encargados de depositar aditivamente las capas de materiales que constituyen la decoración de la baldosa.

Tradicionalmente, el esmaltado de las baldosas se ha venido realizando mediante la deposición sobre su superficie de una capa de esmalte de naturaleza vítrea, sobre la que posteriormente podía aplicarse un motivo gráfico, empleando para ello sistemas de serigrafía o huecograbado. Entre la capa de esmalte y el soporte se aplica una capa de engobe, con propiedades intermedias a las de estos materiales, cuya función era servir de interfase entre ambos. Finalmente, en caso de ser necesario, puede aplicarse una última capa protectora para dotar a la baldosa de mejores propiedades superficiales como, por ejemplo, resistencia al desgaste o carácter anti-deslizante.

Esta forma de proceder sufrió un cambio disruptivo con la incorporación a partir del año 2000 de sistemas de decoración basados en la impresión por chorro de tinta [26], que fueron desplazando rápidamente a los sistemas tradicionales de decoración. Así, hoy en día, lo habitual es aplicar sobre el soporte seco una capa base de esmalte sobre la que directamente se realiza la decoración mediante impresión de tintas con disolventes orgánicos que contienen pigmentos cerámicos inorgánicos, los cuales desarrollan su color durante la posterior cocción. El control digital ofrecido por estos sistemas de impresión (ver figura 1.5) ha permitido innovar considerablemente en el desarrollo de nuevos productos y, sobretodo, simplificar la gestión de su diseño y su puesta en fabricación. Los últimos avances en este campo están permitiendo aplicar incluso las capas protectoras y ciertos materiales decorativos en estado sólido mediante sistemas de impresión [27].

Si bien el conformado, el secado, el esmaltado y la decoración de los soportes se realiza siempre siguiendo un flujo tenso productivo, la posterior operación de cocción de los soportes decorados no siempre se lleva a cabo inmediatamente después de la decoración. En este sentido, tras ser esmaltados y decorados, los soportes pueden transportarse directamente hasta un pequeño pulmón de almacenamiento, con capacidad para unas centenas de piezas, desde el cual se lleva a cabo directamente

la alimentación del horno. O bien, pueden ser cargados en una serie de vagonetas móviles, gestionadas por un sistema de vehículos guiados por láser (LGV, Laser Guided Vehicle), que son almacenadas en un pulmón intermedio de gran capacidad, para efectuar la cocción de las piezas horas o incluso días después de haber sido decoradas.



Figura 1.5. Aplicación de esmalte a cortina (izquierda) y decoración mediante impresión por chorro de tinta (derecha, cortesía de System Ceramics).

1.1.2.5 Cocción

La etapa de cocción permite llevar a cabo, tanto en el soporte, como en los materiales decorativos aplicados sobre su superficie, las transformaciones físico-químicas necesarias para que la baldosa adquiera sus propiedades finales. La cocción de las tipologías de producto objeto de este trabajo se realiza mediante una cocción única en hornos monoestrato de rodillos siguiendo un determinado ciclo térmico cuyas especificaciones dependen, básicamente, de la composición del material procesado, de la naturaleza de la decoración aplicada y de la masa de material procesado. El calor necesario para la cocción es aportado por quemadores de gas natural, colocados, como puede verse en la imagen de la figura 1.6, en las paredes del horno, en la parte superior e inferior del plano de rodillos. Sobre estos rodillos se transportan las piezas procesadas agrupándolas en filas de varias unidades para aprovechar la máxima anchura del canal de cocción.

El conjunto de reacciones que permiten transformar durante la cocción la microestructura abierta propia del material crudo en una microestructura de mayor resistencia mecánica, constituyen el proceso de sinterización. En función de la naturaleza de las materias primas empleadas en la preparación de la composición, dicha sinterización tiene lugar de manera diferente [11].

En el caso de las composiciones de azulejo, la sinterización del material se origina en presencia de las fases cristalinas resultantes de la reacción que se produce entre las fases amorfas procedentes de la deshidroxilación de los minerales arcillosos y los óxidos de calcio y de magnesio originados en la descomposición de los carbonatos cálcicos y magnésicos presentes en las materias primas empleadas. Las fases silicoaluminosas generadas en estas reacciones son muy estables hasta temperaturas del orden de los 1100°C, lo que origina una contracción del material durante la cocción prácticamente nula y la obtención de una porosidad abierta por encima del 10%. Además, estas fases cristalinas, debido a su estabilidad frente a la acción de la humedad, minimizan la hidratación que puede sufrir el material tras su colocación, evitando la expansión

del soporte cocido y los posibles problemas de curvatura y/o cuarteo del esmalte asociados a la misma.



Figura 1.6. Horno monoestrato de rodillos a gas natural empleado en la cocción de baldosas cerámicas (cortesía de Siti-B&T).

Por su parte, la sinterización de los productos gresificados, como el gres esmaltado o el gres porcelánico, tiene lugar en presencia de fase líquida procedente de la fusión de materias primas fundentes existentes en la composición [28][29]. En el caso del gres esmaltado el efecto fundente se consigue con la incorporación de materias primas que aporten óxidos alcalinos (principalmente arcillas con contenidos en carbonatos inferiores al 5 %) y en el caso del gres porcelánico, mediante la incorporación de feldespatos. Estas composiciones, al ser más refractarias, deben cocerse a temperaturas superiores a las temperaturas de cocción de las de azulejo. Así, habitualmente, una composición de gres esmaltado suele cocerse a temperaturas máximas en torno a 1130-1150°C y un gres porcelánico a temperaturas máximas alrededor de los 1200°C. La reducción de la porosidad en estos productos va acompañada de una alta contracción de cocción, tanto mayor cuanto mayor es la porosidad inicial de la pieza, lo cual dificulta el control de su estabilidad dimensional.

A medida que avanza el proceso de cocción, las materias primas fundentes presentes en este tipo de composiciones generan inicialmente una fase líquida que se sitúa en los puntos de contacto entre las partículas sólidas. La formación de meniscos líquidos en dichos puntos de contacto provoca la aproximación progresiva de las partículas sólidas lo cual contribuye a la densificación del material y a la reducción de su porosidad abierta. A las temperaturas máximas de cocción, la cantidad de fase líquida generada es muy elevada, llegando a rellenar por completo gran parte de la porosidad inicialmente presente en el material crudo. Cuando el material llega a la zona de enfriamiento del horno, este se somete a un enfriamiento brusco gracias a la inyección de aire frío en el interior del canal del horno a través de una serie de tubos perforados situados en la parte superior e inferior del plano de rodillos. Como consecuencia de este enfriamiento súbito, la fase líquida presente en el material vitrifica dando como resultado una microestructura compleja formada por una abundante cantidad de fase vítrea en la que están inmersas, aparte de la porosidad remanente, fases cristalinas residuales, como el cuarzo, y nuevas fases cristalinas, cuya naturaleza depende de la composición del soporte [30][31].

La densificación, y con ello, la contracción lineal alcanzadas por los productos gresificados es función, tanto de la temperatura máxima de cocción, como de la porosidad inicial de los soportes crudos. Si bien es cierto que, como se comprobará en el desarrollo de este trabajo, la incidencia de la temperatura de cocción, con respecto a la porosidad inicial del soporte, es mucho más significativa en las composiciones de gres esmaltado, que en las composiciones de gres porcelánico [32].

El enfriamiento rápido del material en el interior del horno debe ralentizarse a temperaturas próximas a los 573°C para evitar la rotura de las piezas debido al conocido como defecto de “desventado”. Estas roturas son consecuencia del brusco cambio de volumen originado por la transformación cristalográfica β a α que experimenta, a esa temperatura, el cuarzo presente en las composiciones cerámicas empleadas, tanto en la fabricación de azulejos, como de gres esmaltado y porcelánico. Esta parte del enfriamiento, llamada generalmente enfriamiento lento, tiene lugar de manera indirecta haciendo pasar aire a temperatura ambiente por el interior de unos tubos metálicos situados en la bóveda y la solera del horno. Finalizado este tramo de enfriamiento lento, la velocidad de enfriamiento puede volver a incrementarse hasta reducir la temperatura de las piezas a valores próximos a los de la temperatura ambiente.

Como se ha explicado previamente, la alimentación de los hornos de cocción puede realizarse directamente desde las líneas de esmaltado o desde las vagonetas almacenadas en un pulmón intermedio. La incorporación en el proceso de manufactura de dicho almacén intermedio permite independizar el proceso de cocción del proceso de esmaltado, asegurando una mayor constancia en la alimentación del horno y, por ende, de la calidad de los productos fabricados. En efecto, la alimentación directa de los soportes decorados desde las líneas de esmaltado reduce los requerimientos de espacio y la inversión, pero va en detrimento de la calidad del producto, ya que cualquier incidencia en las líneas de esmaltado o en la propia etapa de conformado, se traduce en la interrupción de la alimentación de material al horno. Como consecuencia de estas interrupciones se producen huecos de material dentro del canal de cocción que dificultan el control del ciclo térmico debido a los cambios repentinos de la masa térmica que es procesada en el horno.

En cualquiera de estas dos modalidades de funcionamiento de una planta cerámica, con cocción directa o tras el almacenamiento de los soportes crudos, a la salida del horno se desea obtener baldosas cerámicas que hayan alcanzado una determinada porosidad, medida a través de su absorción de agua, acorde con la tipología del producto. Además, dichas baldosas cerámicas deben cumplir unas tolerancias dimensionales concretas, tanto desde el punto de vista de su tamaño medio y de las desviaciones de tamaño entre lados, como de las desviaciones de planaridad. De la misma forma, el producto debe tener el acabado superficial esperado, según el diseño de producto, y una tonalidad específica.

1.1.2.6 Clasificación final

Aunque en esta última etapa del proceso de manufactura de baldosas cerámicas no se lleven a cabo transformaciones de las propiedades de los productos procesados, se trata de una etapa muy importante dentro del proceso de fabricación. En ella se inspeccionan y clasifican las piezas cocidas de acuerdo a unos criterios de selección

previamente establecidos [33]. Esto permite minimizar la incidencia de la variabilidad de cada una de las etapas productivas sobre las características del producto finalmente distribuido en los mercados, al segregar el producto acabado en diferentes clases de características homogéneas.



Figura 1.7. Sistema telemétrico para medida dimensional (izquierda) y línea de clasificación de baldosas cerámicas (derecha)(cortesía de System Ceramics).

Las líneas de clasificación (ver figura 1.7) están habitualmente constituidas por una primera máquina de visión artificial que permite detectar de manera automática gran parte de los defectos superficiales generados durante el proceso de fabricación, tales como, despuntados, rayas en la decoración, gotas de tinta o pinchados en el esmalte, entre otros [34] [35]. A continuación suele existir una cabina de inspección visual en la que un operario evalúa de nuevo la calidad superficial del producto, comparándola con la de un patrón. Esta segunda inspección sirve para corroborar los resultados proporcionados por el equipo de inspección y para detectar otros defectos para los cuales la inspección automática no proporciona todavía detectabilidad. En este sentido, los operarios de selección realizan en la mayoría de las empresas un seguimiento exhaustivo de la tonalidad del producto fabricado.

Una vez realizada la inspección superficial, aquellas baldosas que no han sido descartadas, como consecuencia de presentar defectos en su superficie excesivamente graves, son caracterizadas dimensionalmente. Para ello, en primer lugar, se emplea un sistema de telemetría que permite determinar las dimensiones de todos los lados de la pieza. Basándose en estas medidas, el equipo clasifica cada una de las piezas dentro de una clase de tamaño, comúnmente llamada calibre. Cada calibre tiene una tolerancia máxima de variación, fuera de la cual se considera que las piezas son de una clase o calibre diferentes. De forma similar se procede para evaluar la falta de ortogonalidad de los lados de la baldosa, generando clases de producto en función de esta falta de ortogonalidad.

Las variaciones de dimensión media entre piezas de un mismo lote, aunque no son un defecto en si, siempre que no se superen unos límites de variación razonables, suponen un incremento significativo de las referencias de producto en una compañía. Por este motivo, se busca obtener lotes productivos con el menor número posible de calibres con el fin de simplificar la logística y gestión del producto. Por su parte, la falta de ortogonalidad entre los lados de las piezas, en cambio, se considera un defecto cuando dichas diferencias superan una determinada tolerancia.

Finalmente, los equipos de clasificación disponen de un sistema, también basado en el uso de telémetros láser, que permite determinar la planaridad de las piezas procesadas. Al igual que sucede con los descuadres, existen unas tolerancias máximas por encima de las cuales la curvatura de las piezas puede ser considerada como un defecto. El origen de estas curvaturas, como se verá más adelante, es muy variado, dependiendo, tanto de la composición del soporte, como de ciertas variables de operación del proceso de fabricación.

Al igual que sucede con la etapa de cocción, las líneas de clasificación pueden situarse justo a la salida de los hornos o ser alimentadas desde un pulmón intermedio de almacenamiento en el que los lotes de producto cocido esperan a ser clasificados. Una vez que el producto ha sido debidamente seleccionado en las distintas clases, este se encaja en paquetes de varias piezas y se colocan sobre palés de madera para su almacenamiento o distribución logística.

1.2 Defectos dimensionales en baldosas cerámicas

Durante la fabricación de las baldosas cerámicas pueden aparecer diferentes defectos en las piezas que merman su calidad, lo cual repercute negativamente en la competitividad de las empresas productoras. En el mejor de los casos, los defectos pueden generarse y detectarse previamente a la cocción del material. Cuando esto sucede, la retirada de las piezas defectuosas de las líneas de fabricación tiene una incidencia negativa sobre los costes productivos, en la medida en que disminuye el rendimiento de la instalación y supone un consumo de recursos en el procesado de producto que finalmente no será comercializable.

En otras ocasiones, los defectos, aunque pueden tener su origen en el incorrecto desarrollo de etapas previas a la cocción, no se hacen aparentes hasta que el producto ha sido cocido y sometido a la etapa de clasificación. Esta situación es todavía más perjudicial para las empresas, ya que con ella se incurre en el sobrecoste de tratar térmicamente en el horno producto que finalmente debe ser desechado. En el caso de los defectos detectados en crudo, el material descartado puede ser reintroducido en el proceso, incorporándolo de nuevo en el flujo productivo durante la etapa de preparación de la composición del soporte. El material cocido que presenta defectos puede ser considerado como un residuo inerte, aunque también suele reintroducirse en el proceso, tras un proceso de molienda previa, destinado a acondicionar su tamaño de partícula. Hoy en día, para productos de coloración blanca, la recuperación del material cocido defectuoso es la opción mayoritariamente retenida, dado que el mayor coste de las materias primas empleadas en su fabricación justifica el sobrecoste originado por la molienda [36].

La peor de las situaciones se da cuando los defectos asociados a un incorrecto desarrollo de alguna de las etapas de fabricación no son detectados en la clasificación final, o se manifiestan tiempo después de esta, como sucede con algunos tipos de curvaturas. Si esto sucede y el producto es finalmente puesto en el mercado, existe la posibilidad de que el cliente final detecte el defecto a la recepción del producto o en el momento de su colocación, con los consiguientes sobrecostes y la pérdida de imagen asociados a la reclamación correspondiente.

Aunque los defectos que pueden darse en la fabricación de baldosas cerámicas son de muy diversa índole, unos de los más recurrentes en la fabricación por prensado de azulejos, gres esmaltado y gres porcelánico son los defectos dimensionales. Esta tipología de defectos implica que alguna dimensión o contorno geométrico de la pieza no cumple las especificaciones del producto. La norma ISO 10545-Parte 2 [37] define los métodos establecidos para determinar las características dimensionales más importantes de las baldosas cerámicas, tales como, longitud, anchura, espesor, rectitud de lados, ortogonalidad y planitud de la superficie o curvatura.

Dentro de este grupo de defectos se distinguen las curvaturas o falta de planitud, la falta de ortogonalidad entre lados, o “descuadre”, y la variabilidad del tamaño medio entre piezas de un mismo lote, comúnmente conocida como presencia de “calibres”. De manera general, la falta de planitud pueden afectar, tanto a los azulejos, como a los productos de gres, sin embargo, la falta de estabilidad dimensional asociada a la presencia de calibres y descuadres en la clasificación final, aunque también pueden aparecer en composiciones de azulejo, tiene una mayor incidencia en productos gresificados. En efecto, en piezas de azulejo la falta de estabilidad dimensional [38] se debe fundamentalmente a heterogeneidades en la distribución de temperaturas en la zona de calentamiento del horno, entre los 800 y 950°C, momento en el cual tiene lugar una expansión del material, como consecuencia de la descomposición de los carbonatos presentes en su composición. Dicho cambio dimensional es prácticamente independiente de la porosidad en crudo del soporte, por lo que, industrialmente, es posible obtener piezas de azulejo sin defectos dimensionales si se realiza un adecuado control de la composición del soporte y de la distribución transversal de temperaturas en la zona de calentamiento del horno.

En la figura 1.8 se muestra un diagrama de la distribución típica de defectos que pueden generarse durante la fabricación de baldosas cerámicas de gres porcelánico esmaltado. Como puede observarse, los defectos que mayor incidencia presentan son los denominados como defectos de “liner”, nombre con el que se conoce habitualmente al sistema de telemetría existente en las máquinas de clasificación y que es empleado para detectar la presencia de calibres y descuadres en el producto acabado.

Los defectos definidos como defectos de “planar”, que es el sistema empleado para determinar la planitud o curvatura de las piezas, son los segundos en cuanto a grado de incidencia. El conjunto de estos defectos dimensionales constituye aproximadamente el 50 % del total de defectos detectados. A estos les siguen aquellos relacionados con la rotura y el deterioro superficial de las piezas, “despuntados” y “rozaduras”, los cuales suponen alrededor de un 30 % del total. Finalmente, existen una serie de defectos de menor incidencia pero gran variedad, los cuales hacen referencia a la presencia de defectos en el acabado superficial de las piezas y que constituyen aproximadamente el 20 % del total.

Los defectos superficiales en la capa de esmalte son en su gran mayoría originados por unas inadecuadas propiedades reológicas de los esmaltes y las tintas de impresión o por unas condiciones de aplicación incorrectas. Los defectos de “despuntado” y “rozadura” se deben básicamente a una falta de resistencia mecánica de los soportes en crudo que impide que estos puedan soportar los esfuerzos mecánicos y pequeños golpes a los que son sometidos durante su transporte y decoración. Por último, los

defectos dimensionales, tal y como se expondrá a continuación, están relacionados con un inadecuado desarrollo de las etapas de conformado y/o cocción.

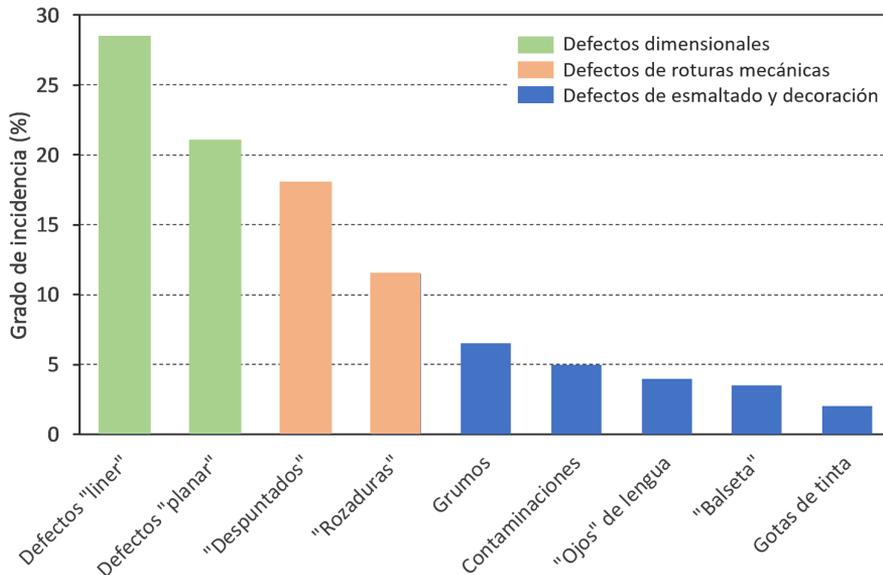


Figura 1.8. Incidencia típica de defectos en la fabricación de baldosas cerámicas de gres porcelánico esmaltado.

1.2.1 Curvaturas

La curvatura se define como la falta de planitud de las baldosas. La norma que marca la máxima curvatura permisible en las piezas para poder ser clasificadas con la misma referencia es la norma UNE-EN 14411 [1]. La curvatura se determina midiendo la desviación del centro de una baldosa cerámica respecto al plano definido por tres de sus vértices. Para piezas de dimensiones nominales superiores a 150,0 mm, la máxima curvatura central permitida es la más restrictiva entre $\pm 0,5\%$ del tamaño nominal o $\pm 2,0$ mm. Como se ha expuesto anteriormente, los equipos industriales de clasificación disponen de unos sistemas de telemetría que permiten medir de forma rápida y precisa la curvatura de todas las piezas de un lote productivo dado.

Las curvaturas en el producto acabado son un defecto muy común en la fabricación por prensado en seco de baldosas cerámicas. Se distinguen, generalmente, dos tipos de curvaturas. Las curvaturas inmediatas, detectadas justo a la salida del horno y las diferidas, que se manifiestan tiempo después de haber finalizado la cocción. Las razones por las cuales se generan estas curvaturas y las formas de proceder para evitarlas han sido objeto de múltiples trabajos de investigación en los últimos años [39][40][41][42]. Seguidamente, se describen brevemente las causas de aparición de curvaturas en el producto acabado.

1.2.1.1 Curvaturas inmediatas

Las baldosas cerámicas pueden presentar curvaturas tanto convexas como cóncavas a su salida del horno. Esta falta de planaridad es generalmente considerada como un defecto en el producto acabado y tiene tres causas principales asociadas a la etapa de cocción [43]. La existencia de gradientes de temperatura en el seno de la baldosa durante su cocción, la falta de acoplamiento entre el esmalte y el soporte y la deformación pirop lástica experimentada por el soporte a alta temperatura.

■ Curvaturas por gradientes de temperatura

Durante la cocción de baldosas cerámicas se produce inicialmente una expansión del soporte, como consecuencia, principalmente, de la dilatación del material. Posteriormente tiene lugar su contracción debido a los fenómenos de sinterización y al enfriamiento experimentado.

Este proceso de expansión y contracción depende fuertemente de la temperatura y se suele cuantificar con los diagramas dilatométricos, que son una representación de la dilatación-contracción que sufre un material en función de la temperatura.

En estos diagramas se representan los cambios dimensionales que sufre una probeta al ser sometida a un tratamiento térmico, sin que actúe sobre ella ningún tipo de fuerza. Estos cambios dimensionales se conocen como “deformación libre”. Cabe mencionar que los diagramas de expansión-contracción se modifican con la velocidad de calentamiento y enfriamiento a la que se realiza el ensayo de forma que, al aumentar esta velocidad, el diagrama se desplaza hasta temperaturas superiores [44].

A modo de ejemplo, en la figura 1.9 se representa el diagrama de expansión-contracción típico de un soporte de gres porcelánico para tres porosidades iniciales diferentes [45]. Durante la cocción de una baldosa cerámica, cualquier diferencia de aporte de calor entre la parte superior e inferior del plano de rodillos conduce a la aparición de un gradiente de temperatura entre la cara superior e inferior o entre las superficies y el interior de la pieza. De acuerdo con los diagramas de expansión-contracción, esta diferencia de temperatura provoca una variación de la contracción lineal entre las dos superficies de la pieza, que tiende a curvarla.

■ Curvaturas por falta de acoplamiento entre el esmalte y el soporte

La falta de ajuste entre las curvas de dilatación térmica del esmalte y del soporte ocasiona curvaturas cóncavas o convexas en las piezas cocidas (figura 1.10).

En efecto, a la temperatura máxima de cocción, los dos componentes que forman una baldosa esmaltada (esmalte y soporte) tienen las mismas dimensiones, ya que el esmalte se acomoda a cualquier cambio de tamaño que experimente el soporte, puesto que el primero está en un estado viscoso. A medida que se va enfriando la pieza, el esmalte aumenta su viscosidad hasta convertirse en un material rígido que está íntimamente adherido al soporte. La temperatura a la que ocurre este fenómeno se conoce como temperatura de acoplamiento efectivo del esmalte (T_a). A partir de esta temperatura, si se sigue enfriando, el esmalte y el soporte pueden experimentar contracciones térmicas diferentes, lo que originará tensiones entre ambos materiales y curvaturas en las piezas [46].

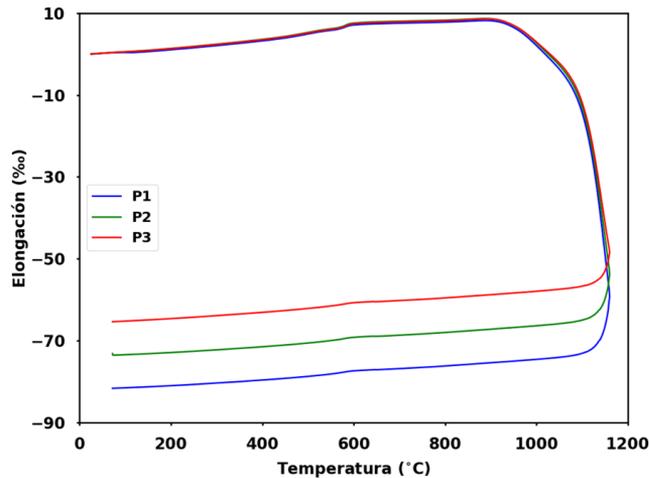


Figura 1.9. Curvas dilatométricas típicas de una composición de gres porcelánico para tres densidades aparentes en crudo diferentes ($P1 < P2 < P3$) [45].

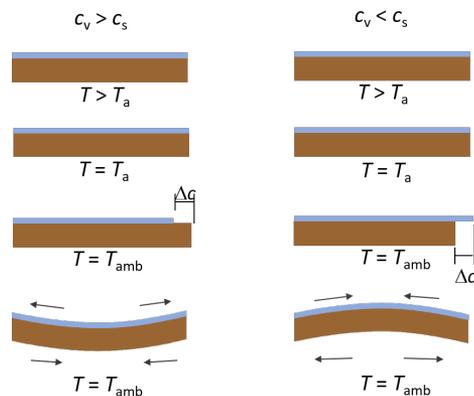


Figura 1.10. Curvatura y tensión esmalte-soporte durante el enfriamiento en el horno. Izquierda: contracción del soporte (c_s) menor que la del esmalte (c_v). Derecha: contracción del soporte (c_s) mayor que la del esmalte (c_v) [43].

■ Curvaturas por deformación pirolástica

Durante la etapa de cocción, a alta temperatura, muchas composiciones cerámicas desarrollan una fase líquida viscosa responsable de la vitrificación. Como consecuencia de este hecho, el material deja de comportarse como un sólido rígido y la aplicación de cualquier tensión produce una deformación permanente, conocida como “deformación pirolástica”.

Mientras la baldosa se desplaza en un horno de rodillos, se produce un esfuerzo de flexión sobre la pieza causado por la gravedad. Como consecuencia, puede haber curvaturas cóncavas en el producto final [43].

Debido a su relación con la viscosidad, la deformación pirop lástica solo se produce a temperaturas elevadas. Su magnitud depende de la cantidad de fase líquida, de su viscosidad y de la tensión aplicada [47]. Este fenómeno se produce más fácilmente en la cocción de productos altamente vitrificados (como el gres porcelánico), al formarse una cantidad más elevada de fase líquida [48]. Sin embargo, con las composiciones y temperaturas utilizadas industrialmente, y con el plano de rodillos en buen estado de mantenimiento, no suelen producirse deformaciones pirop lásticas.

1.2.1.2 Curvaturas en diferido

Un porcentaje significativo de baldosas cerámicas, independientemente de su porosidad, experimentan el fenómeno conocido como curvaturas diferidas. Este consiste en el cambio de curvatura de las piezas después de su salida del horno durante un periodo de tiempo que puede llegar a alcanzar varias semanas e incluso meses.

La aparición de curvaturas diferidas tras el proceso de fabricación de baldosas es conocida desde hace tiempo. Sin embargo, sólo con el aumento del tamaño de las baldosas fabricadas, que comenzó a producirse a finales de los años 90, estas empezaron a suponer un serio problema de fabricación. La presencia de curvaturas diferidas origina problemas durante la fase de clasificación y sobre la calidad del producto final, por lo que es necesario conocer la curvatura final que alcanzará la baldosa con el objeto de establecer con qué curvatura deben de salir del horno, así como los criterios para su clasificación [49].

Las curvaturas diferidas en las baldosas porosas o azulejos presentan una tendencia a la concavidad con el tiempo, como consecuencia de la expansión que presentan los soportes debido a su elevada porosidad (que los hace accesibles por el agua) y a la presencia de fases que expanden al hidratarse [50][51].

En gres porcelánico, tanto esmaltado como no esmaltado, este comportamiento es sensiblemente más complejo, ya que la curvatura en diferido suele mostrar una evolución en un sentido (habitualmente hacia el sentido cóncavo) para, después de transcurrido cierto tiempo, invertir esta tendencia. El cambio en la evolución de la curvatura, unido a la muy baja porosidad de las baldosas de gres porcelánico y a la baja proporción de fases hidratables presentes en las piezas cocidas, indican que la causa de este comportamiento no es exactamente la misma que en los azulejos.

Aunque durante cierto tiempo se defendió la hipótesis de que las curvaturas en diferido en gres porcelánico podrían ser debidas a la relajación de las tensiones residuales adquiridas por el producto durante su enfriamiento en el horno, varios trabajos de investigación [52][53] han demostrado que las tensiones residuales apenas tienen incidencia sobre este fenómeno. Estos mismos trabajos han puesto de manifiesto que el origen de las curvaturas diferidas en estos productos reside en una expansión diferencial de los soportes, la cual, a su vez, es posiblemente debida a la difusión de humedad ambiental dentro de estos.

Por esta razón, la solución actualmente retenida a nivel industrial para prevenir la aparición de curvaturas diferidas en gres porcelánico es asegurar un elevado grado de sinterización del producto. Para ello puede actuarse directamente aumentando la

temperatura de cocción de las composiciones, lo cual en ocasiones puede ser problemático si conduce a un aumento de la deformación pirolástica del material, o bien, de manera más efectiva, aumentando el grado de molienda de la composición o la densidad aparente de los soportes crudos. Una reducción del tamaño de partícula durante la preparación de la composición permite la obtención de una microestructura en crudo sin presencia de poros de gran tamaño e incrementa la reactividad de la composición. Del mismo modo, un incremento de la densidad aparente del soporte supone la obtención de una microestructura de menor porosidad. Todo ello, facilita la sinterización de las baldosas durante la cocción, conduciendo a la obtención de productos sin curvatura diferida a menor temperatura.

1.2.2 Falta de ortogonalidad: descuadres

1.2.2.1 Definición, determinación y causas de los descuadres

Los defectos de descuadre hacen referencia a la falta de rectangularidad u ortogonalidad de los lados de una pieza. La norma UNE-EN 14411 [1] establece la máxima desviación admisible en la ortogonalidad de una baldosa cerámica mediante la comparación de los ángulos formados por los bordes contiguos de la pieza, con los de una placa patrón perfectamente ortogonal. Se expresa como la relación entre la desviación (δ) en el extremo exterior del lado de la baldosa respecto al lado interior de la placa patrón (L_p). En la figura 1.11 se representan esquemáticamente las dimensiones a determinar para la medida de la ortogonalidad en baldosas cerámicas, la cual, para piezas de dimensiones superiores a 150,0 mm, no puede ser superior al valor más restrictivo entre $\pm 0,5\%$ del tamaño nominal del producto o $\pm 2,0$ mm, de manera similar a como sucede con la curvatura.

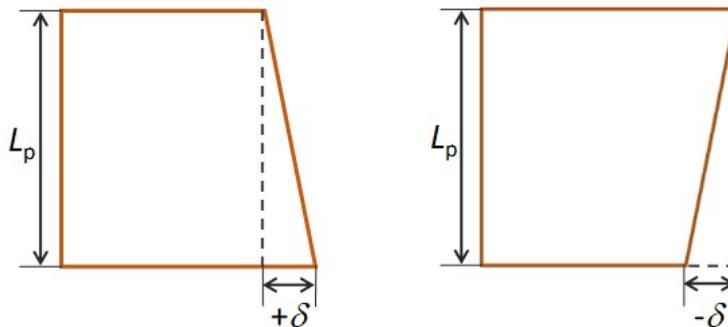


Figura 1.11. Determinación de la ortogonalidad (descuadre) en baldosas cerámicas según Norma UNE-EN 14411:2013.

Este grupo de defectos tienen su origen, principalmente, en las diferencias de densidad aparente en seco que pueden existir en el seno de una misma pieza cerámica y en los posibles gradientes transversales de temperatura que puedan existir en el interior del horno [32]. Su incidencia es especialmente alta en los productos de gres esmaltado y gres porcelánico, dada la gran contracción que experimentan durante la cocción. Aunque también pueden presentarse problemas de estabilidad dimensional en piezas de azulejo [38], como se ha explicado previamente, el origen en estas composiciones

es diferente y su incidencia en el proceso de fabricación de las baldosas mucho menos significativa.

Según lo apuntado en el apartado 1.1.2.5, la sinterización de las composiciones de pavimento tiene lugar en presencia de una gran cantidad de fase líquida, mientras que la formación de fase líquida durante la sinterización de las composiciones de azulejo es minoritaria [11]. Esta diferencia en los mecanismos de sinterización hace que la contracción lineal de las piezas de pavimento, entre el 5 y el 8 %, sea mucho mayor que la de las composiciones de azulejo, que raramente se sitúa por encima del 1 %. De la misma forma, la influencia de la temperatura máxima de cocción y de la densidad aparente en seco de los soportes sobre el tamaño final de las piezas es mucho menor en el caso de las composiciones de azulejo [20][54].

Si la densidad aparente en seco entre dos zonas de una determinada pieza es diferente, durante la cocción, la contracción lineal que experimentan ambas zonas también será distinta. Si las diferencias de contracción son muy acusadas, las piezas contraerán de forma no homogénea, presentando a la salida del horno una geometría no rectangular o incluso con lados o zonas curvadas, dependiendo de donde se localicen las diferencias de densidad aparente. Este tipo de defectos de descuadre que llevan asociada además una pérdida de rectitud de los lados de las piezas suelen conocerse como “lunetas” cóncavas o convexas, en función del sentido adquirido por la desviación. La desviación de la rectitud de los lados de las baldosas cerámicas (C) se determina tal y como se indica esquemáticamente en la figura 1.12.

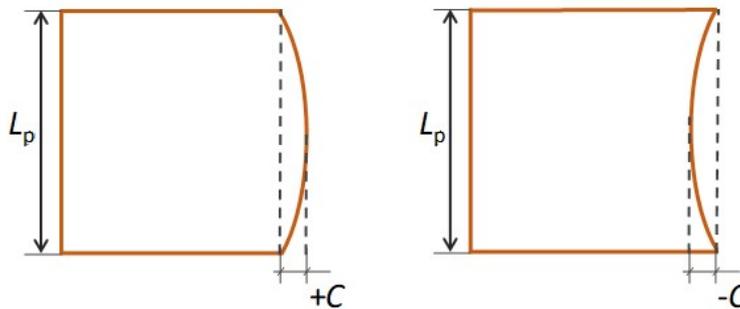


Figura 1.12. Defectos dimensionales de “luneta” que dan lugar a desviaciones de la ortogonalidad y de la rectitud de lados en las baldosas cerámicas.

Tradicionalmente, la determinación de la distribución de la densidad aparente de los soportes crudos se ha llevado a cabo mediante el método destructivo de la inmersión en mercurio [55]. Puntualmente, a la salida de la prensa, los operarios encargados del control productivo recogían soportes recién prensados que troceaban en pequeñas porciones cuadradas de dimensiones aproximadas 50 mm x 50 mm. La densidad aparente media de algunos trozos, homogéneamente distribuidos en el seno de las piezas, era posteriormente calculada como el cociente entre su masa y su volumen aparente. La masa de cada porción de pieza se obtenía directamente por pesada en una balanza, mientras que el volumen se determinaba, basándose en el principio de Arquímedes, al sumergir cada uno de los trozos en un recipiente conteniendo mercurio y medir el empuje resultante. El procedimiento de medida podía realizarse manualmente o em-

pleando equipos industriales automáticos a los que únicamente había que alimentar una pila de trozos de pieza cuya densidad aparente quería determinarse.

Esta forma de proceder presentaba varios inconvenientes, dado su carácter destructivo y el hecho de emplear mercurio, el cual es un material tóxico, tanto para las personas, como para el medio ambiente [56]. Por esta razón, más recientemente, empezaron a utilizarse otros métodos de medida de la densidad aparente que no empleasen mercurio para determinar el volumen de los trozos de pieza. Sin embargo, estos métodos basados, por ejemplo, en la reconstrucción del volumen de las piezas mediante telemetría láser o en la obtención del volumen por desplazamiento del volumen de un fluido (aire o agua) contenido en una celda polimérica de medida que envolvía la pieza, presentaban también el inconveniente de ser destructivos. Así, el método actualmente más aceptado para determinar la distribución de la densidad aparente de los soportes es la medida no destructiva por absorción de rayos X [57][58]. Este método, a diferencia de los anteriores, permite obtener mapas completos de la distribución de la densidad aparente de las piezas enteras.

En la figura 1.13, a modo de ejemplo, se muestra el mapa completo, obtenido por absorción de rayos X, de la distribución de la densidad aparente en seco de un soporte crudo de gres porcelánico destinado a la fabricación de un producto de tamaño nominal en cocido 900,0 mm x 900,0 mm. En la misma figura se representan, de manera cualitativa, las dimensiones del soporte tras haber sido sometido al proceso de cocción. Como puede apreciarse, la zona central, con una densidad aparente media de 1948 kg/m³, durante la cocción contrae sensiblemente más que la zona superior e inferior de la pieza, con densidades aparentes medias de 1956 y 1968 kg/m³, respectivamente. Como resultado de estas diferencias de densidad, la pieza cocida presenta, según las especificaciones de la norma UNE-EN 14411 [1], una falta de ortogonalidad (δ) de 0,8 mm y una desviación de la rectitud de los lados (C) de -1,4 mm.

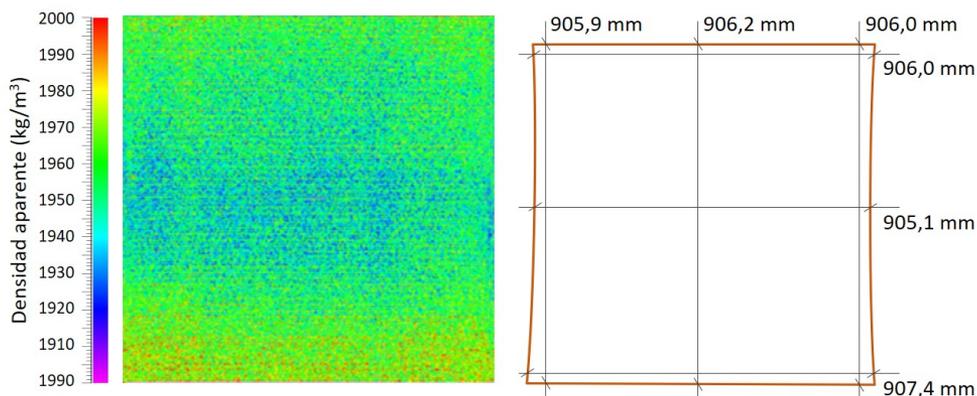


Figura 1.13. Mapa de distribución de la densidad aparente en seco de un soporte de gres porcelánico de tamaño nominal cocido 900,0 mm x 900,0 mm (izquierda) y dimensiones del mismo tras la cocción (derecha).

1.2.2.2 Acciones para minimizar la incidencia de los descuadres

1.2.2.2.1 Mejora de la distribución de la densidad aparente en el seno de los alveolos

Las diferencias de la densidad aparente en el seno de las piezas conformadas tienen su origen, principalmente, en una alimentación heterogénea de polvo de prensado a las cavidades del molde. Las diferencias de densidad aparente y/o espesor del lecho de polvo generado en la fase de carga del ciclo de prensado, conducen a la aplicación de una presión heterogéneamente distribuida sobre la superficie del polvo, que se traduce en la aparición de gradientes de densidad aparente en el seno de los soportes recién prensados. La variable del polvo que más condiciona el reparto del mismo en los alveolos es su fluidez, la cual está íntimamente relacionada con la distribución del tamaño de los gránulos del material [59][60].

A nivel industrial se emplean básicamente tres estrategias para minimizar el efecto de la distribución heterogénea del polvo en los alveolos de la prensa sobre la falta de ortogonalidad del producto fabricado. En muchas ocasiones se hace necesario emplear simultáneamente varias de estas acciones para conseguir un producto conformado con una buena distribución de la densidad aparente en seco homogénea.

■ Regulación del sistema de alimentación del polvo

Tradicionalmente, la estrategia más adecuada para conseguir una buena distribución del polvo atomizado en el interior de los alveolos de la prensa ha sido el tener una correcta regulación del sistema de alimentación del polvo. El grado de automatización de las prensas actuales permite modificar múltiples parámetros del sistema de alimentación para garantizar que el polvo quede homogéneamente distribuido en el molde, previamente a la ejecución de cada ciclo de compactación. Las variables sobre las que se puede actuar, en referencia a los elementos del sistema de alimentación mostrado en la figura 1.14 son básicamente [22]:

- Velocidad de avance y posiciones de reposo del dosificador (a) que vierte el polvo en el tolvin del sistema de alimentación.
- Velocidad de avance del tolvin de dosificación (b) respecto a la rejilla (siempre que este no sea fijo).
- Velocidad de avance y retroceso de la rejilla de alimentación (c).
- Posición de los punzones inferiores durante el desplazamiento de la rejilla sobre la matriz del molde.

La regulación de estas variables la efectúan los operarios de prensa basándose en la información proporcionada por los controles de la densidad aparente realizados puntualmente en producción, mediante alguno de los métodos anteriormente expuestos. Dependiendo del tamaño de las piezas conformadas, de su espesor y de las distribuciones de la densidad aparente, los operarios modifican las condiciones de alimentación para tratar de conseguir un reparto de polvo lo más homogéneo posible. Gracias a la robustez de la operación de prensado, en condiciones normales de operación, estos parámetros tan sólo es necesario modificarlos cuando se producen cambios significativos en la fluidez del polvo alimentado o cuando se modifican las dimensiones y/o espesor de los soportes conformados.

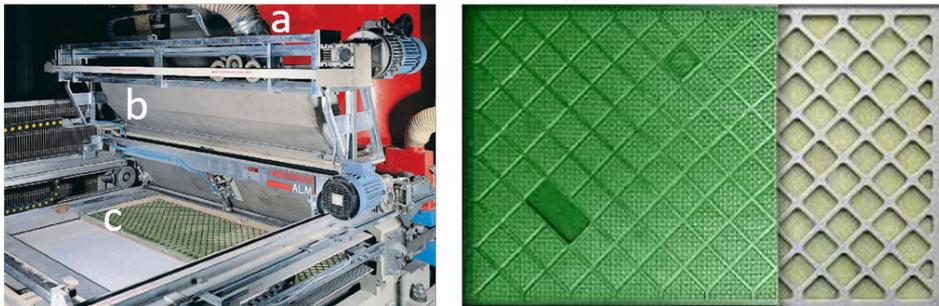


Figura 1.14. Izquierda: sistema de alimentación de polvo a la prensa, dosificador (a), tolván (b) y rejilla (c) (cortesía de SACMI Coop.); derecha: punzón isostático, detalle de las cámaras alveolares de aceite (cortesía de MACER S.L.).

■ **Compensación de punzones mediante láminas metálicas**

La regulación del sistema de alimentación de polvo es fundamental para obtener soportes con una densidad aparente homogéneamente distribuida, sobre todo cuando se trata de mejorar el reparto entre la parte frontal y posterior de las piezas. Sin embargo, en ocasiones, es necesario homogeneizar diferencias de densidad aparente en el seno de las piezas en el sentido perpendicular al avance de la rejilla.

Muchas de estas heterogeneidades transversales no están asociadas a cambios de la fluidez del polvo o a un reparto irregular del mismo, sino a posibles deformaciones de la estructura de la prensa y/o de los utillajes del molde, como consecuencia de los grandes esfuerzos a los que son sometidos durante el ciclo de prensado. Para contrarrestar estos fenómenos, tradicionalmente, se han colocado láminas metálicas de diferente espesor entre los punzones superiores del molde y la placa metálica a la que van sujetos magnéticamente.

La colocación de estos suplementos metálicos se realiza a partir del análisis de los resultados de los controles de distribución de la densidad aparente realizados. Basándose en la experiencia de operarios cualificados se define en cada caso el espesor y forma de los suplementos metálicos que es necesario colocar en diferentes puntos de los alveolos para obtener una densidad aparente homogénea [61].

Esta forma de proceder está prácticamente en desuso hoy en día, gracias a las mejoras realizadas en la regulación de los sistemas de alimentación de polvo y a la aparición de los conocidos como punzones isostáticos. De hecho, la colocación de suplementos metálicos está completamente contraindicada debido a que puede ser fuente de graves averías al comprometer el anclaje de los punzones a la placa superior del molde. Se trata de un solución actualmente utilizada sólo en casos muy concretos.

■ **Uso de punzones isostáticos**

La solución actualmente más extendida para minimizar las diferencias de densidad aparente en el seno de los soportes recién prensados es el empleo de los punzones isostáticos [21]. Esta tipología de punzones apareció a mediados de la década de los años 90, coincidiendo con el inicio de la producción de baldosas de gran tamaño.

Se diferencian de los punzones convencionales, generalmente constituidos por un bloque metálico macizo recubierto de goma, en que entre su superficie engomada y el bloque metálico existe una fina cámara llena de aceite hidráulico. Al entrar la superficie del punzón en contacto con el lecho de polvo, si este no se encuentra homogéneamente distribuido, por el principio físico de Pascal, el aceite se desplaza ligeramente en el interior del punzón para que la presión se aplique por igual en toda la superficie del polvo. Como resultado de esta compensación isostática, las piezas conformadas presentan espesores ligeramente inferiores en las zonas en las que inicialmente existía una falta de polvo.

Los punzones isostáticos sólo pueden utilizarse para dar forma a la cara posterior de las piezas, en la que habitualmente se conforman una serie de enervaduras conocidas como “costillas”. En efecto, si el punzón isostático se empleara para prensar la cara noble de las piezas, las diferencias de espesor generadas por la compensación hidráulica podrían producir ondulaciones y deformaciones que deteriorarían el acabado superficial del producto.

Existen diferentes configuraciones internas de punzón isostático, cuya aplicación depende de las características del producto que se desea fabricar [21]. A modo de ejemplo, en la imagen de la figura 1.14 se muestra un punzón isostático con cámara interna alveolar. Es importante destacar que el efecto de los punzones isostáticos tiene sus limitaciones al no poder compensar deficiencias de carga muy acusadas. Por esta razón, su uso debe ir siempre acompañado de una buena regulación del sistema de alimentación de polvo, para garantizar un producto con mínimas diferencias de densidad aparente.

1.2.2.2 Reducción de los gradientes transversales de temperatura en el horno

En lo referido a la presencia de gradientes térmicos en una o varias secciones transversales del horno, estos pueden provocar que las piezas, a pesar de tener una distribución de la densidad aparente homogénea, experimenten contracciones heterogéneas en su seno, dependiendo de su posición en las filas de piezas alimentadas al horno. Si las diferencias de temperatura a las que son sometidas distintas partes de la pieza son lo suficientemente acusadas, las variaciones de la contracción generadas podrían conducir a la aparición de descuadras en el producto cocido.

Dichos gradientes térmicos tienen diversos orígenes, prácticamente todos relacionados con una incorrecta regulación del horno. Entre los parámetros más importantes que pueden incidir sobre la presencia de gradientes en las secciones transversales del horno destacan [62]:

- La presión estática absoluta y su perfil longitudinal en el interior del canal de cocción [63].
- El caudal y la presión del aire de combustión y del gas natural y el índice de exceso de aire en los quemadores [64].
- La forma de la llama emitida por los quemadores, generalmente relacionada con la morfología y diseño de sus toberas [65].

Para minimizar la incidencia de los gradientes transversales de temperatura sobre la presencia de descuadres en la clasificación final del producto, es necesario disponer de una correcta regulación de los parámetros anteriormente expuestos. Esta regulación es especialmente importante en la actualidad, puesto que los hornos de gran capacidad instalados hoy en día suelen tener canales de cocción con anchuras superiores a los 2,5 m, lo cual dificulta el conseguir una buena homogeneidad transversal de temperaturas.

Desafortunadamente, pese a los avances tecnológicos incorporados durante los últimos años en los sistemas de cocción, estos no disponen de instrumentación suficiente para evidenciar la presencia de dichos gradientes térmicos. La instrumentación térmica existente se limita al control de las temperaturas registradas por una serie de termopares, ubicados generalmente a lo largo del eje longitudinal de la bóveda y la solera del horno. En base a la temperatura de consigna prefijada para cada termopar, se regula el funcionamiento de los diferentes grupos de quemadores asociados a un determinado termopar de control (coloquialmente denominados anillos de gas). Por esta razón, para conocer el estado real de funcionamiento de un horno, desde el punto de vista de su homogeneidad de temperaturas en el canal de cocción, se requieren de instrumentos de medida adicionales.

En primera instancia, pueden realizarse medidas de temperatura a través de las mirillas existentes en las paredes laterales de los hornos, empleando termopares lo suficientemente largos como para registrar la temperatura de la atmósfera del horno en diferentes puntos de su sección transversal. Este tipo de medida puede dar una idea de la existencia de gradientes térmicos, sin embargo, en muchas ocasiones, para poder realizar un ajuste más riguroso de la regulación del horno, es necesario realizar medidas de mayor precisión, lo cual implica utilizar una instrumentación específicamente desarrollada para tal fin.

Entre estos equipos destacan, por un lado, el uso de rodillos metálicos sensorizados que pueden sustituir a uno o varios rodillos del horno para tener una medida continua de la temperatura en varios puntos a lo largo del rodillo [62]. Y, por otro lado, el uso de sistemas de adquisición de datos especialmente aislados, que se hacen pasar por el interior del horno sustituyendo una o varias piezas cerámicas, para registrar la temperatura medida por varios termopares conectados al mismo y situados en diferentes puntos a lo ancho del canal [51].

Independientemente del dispositivo de medida empleado, la forma de actuar para realizar los ajustes en el horno es similar. Una vez se dispone del resultado de las medidas realizadas, los técnicos de la sección de cocción deben regular, en las zonas con presencia de gradientes, parámetros tales como la presión del aire comburente y del gas natural de los quemadores y la forma y orientación de sus toberas. La eficacia de las acciones realizadas puede evidenciarse directamente en una mejora de las propiedades del producto cocido o mediante la realización de nuevas medidas.

1.2.3 Variabilidad del tamaño medio: calibres

1.2.3.1 Definición y determinación de los calibres

Uno de los principales defectos ocasionados por la falta de estabilidad dimensional de las baldosas cerámicas es la heterogeneidad del tamaño final medio entre piezas de un mismo producto. Según se ha descrito en el apartado 1.1.2.6, en la etapa de clasificación, las baldosas que constituyen cada uno de los lotes productivos deben agruparse en clases dentro de las cuales el tamaño final de las piezas no difiera entre sí más de un pequeño valor denominado tolerancia. Cada una de las clases definida por tamaño se conoce comúnmente con el nombre de calibre, de ahí que, habitualmente, se hable también de la presencia de calibres en la clasificación final, al hacer referencia a la variabilidad del tamaño medio de las piezas de un lote.

El tamaño final de las baldosas cerámicas, considerado como longitud (L , lado más largo) o anchura (W , lado más corto), en las piezas rectangulares, o simplemente como longitud, en el caso de las cuadradas, es junto con el aspecto superficial, la planaridad y la tonalidad, uno de los criterios más importantes empleados por la industria para clasificar el producto final. Mantener una elevada constancia en la longitud de los lados de las baldosas es fundamental para evitar problemas en su colocación, tanto cuando estas se colocan directamente sin separación entre ellas, como cuando se deja una pequeña junta distanciadora de algunos milímetros. Pequeñas diferencias de tamaño entre piezas pueden provocar que los vértices de las baldosas acaben no coincidiendo tras la colocación de varias de ellas, no alcanzándose el efecto estético deseado.

La norma UNE-EN 14411 [1] establece la máxima diferencia de longitud permisible entre baldosas cerámicas para ser consideradas del mismo tamaño o calibre. Para piezas de dimensiones nominales mayores de 150,0 mm, la norma indica que la máxima tolerancia aceptable debe ser la más restrictiva entre $\pm 0,6\%$ de su tamaño nominal o $\pm 2,0$ mm.

De este modo, para baldosas de tamaño nominal igual o superior a 333,0 mm x 333,0 mm, la máxima tolerancia permitida según norma es de 4,0 mm. Sin embargo, estas tolerancias dimensionales definidas por la normativa de referencia, con respecto a los estándares de calidad exigidos actualmente por los mercados, son muy poco restrictivas, lo cual obliga a adoptar industrialmente unas tolerancias mucho más pequeñas. Así, en general, desde el punto de vista de la comercialización del producto europeo, existe bastante consenso en aceptar que la máxima diferencia de tamaño entre piezas para ser consideradas de un mismo calibre es de 1,0 mm, hasta tamaños nominales de 800 mm x 800 mm. Excepcionalmente, para tamaños superiores la tolerancia de calibre puede ampliarse hasta 1,2 o 1,5 mm, dependiendo del fabricante considerado.

Según la norma UNE-EN 14411 [1], el tamaño medio de una baldosa cuadrada se determina como la media aritmética de las longitudes de los cuatro lados, medidas por el dorso de la pieza a 5 mm de cada lado. Si la baldosa es rectangular, la media aritmética de las medidas de cada par de lados paralelos proporcionan la longitud

(lados más largos) y la anchura (lados más cortos) de la baldosa, es decir, el tamaño medio viene dado por dos medidas medias.

Industrialmente, los equipos de selección automática, realizan la clasificación del producto por calibres de una forma algo más compleja. En concreto, para cada baldosa inspeccionada se determina la longitud de cada uno de sus lados y la longitud de la pieza en su parte central, tal y como se muestra en el ejemplo de la figura 1.15. Posteriormente, se calculan las diferencias, en valor absoluto, de las seis medidas realizadas con respecto a la medida central de los diferentes calibres en los que podría clasificarse la pieza. El calibre finalmente asignado a la pieza es aquel para el que se obtiene la más pequeña de las máximas diferencias entre las seis medidas y el valor central del calibre.

Para el ejemplo de la figura 1.15, la pieza considerada, con un tamaño nominal de 330,0 mm x 330,0 mm, se clasificaría dentro del calibre B, cuya medida central, l_c o w_c , sería de 330,5 mm. En efecto, la más pequeña de las diferencias máximas obtenidas, con respecto al centro de cada calibre (celdas sombreadas), es la de 0,6 mm, correspondiente a la diferencia entre el lado l_3 y el centro del calibre B.

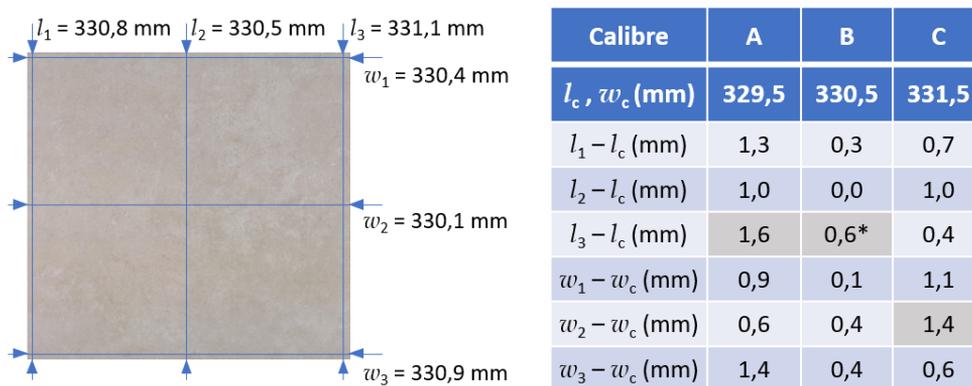


Figura 1.15. Ejemplo de asignación del calibre en un equipo industrial de selección automática para una pieza de tamaño nominal 330,0 mm x 330,0 mm.

Junto con la asignación del calibre, los equipos industriales de selección también definen el parámetro “fuera de calibre” que permite desclasificar las piezas cuyas dimensiones se alejan en un valor superior a la tolerancia respecto al centro del calibre en el cual hayan sido incluidas. Así, por ejemplo, la pieza mostrada en la figura 1.15 sería considerada como defectuosa, y generalmente desclasada, si se hubiese fijado un umbral de fuera de calibre de 0,5 mm. En ese caso, puesto que el lado l_3 distaría del centro del calibre en un valor superior a dicho umbral, se consideraría que la pieza no presenta una calidad adecuada a las exigencias de la empresa.

1.2.3.2 Causas de aparición de los calibres

Los calibres se ponen de manifiesto durante la etapa de cocción, como consecuencia de que los soportes cerámicos sufren contracciones lineales diferentes, que conducen a la obtención de baldosas de distinto tamaño final. El origen de los calibres puede estar relacionado con una diferencia entre los valores medios de la densidad aparente

en seco de los soportes, o con variaciones en la temperatura de cocción, especialmente en la zona de máxima temperatura de los hornos. A continuación, se expone la relación existente en la contracción lineal y estas variables de operación, propias del conformado y de la cocción de las baldosas cerámicas.

1.2.3.2.1 Relación entre la contracción lineal y las variables de operación

La contracción lineal de cocción, CL , se define como la variación porcentual de tamaño que experimenta el soporte esmaltado al cocerse, con respecto a su tamaño en estado crudo y seco. La magnitud de esta contracción puede calcularse mediante la ecuación 1.3, en la que L_s es la longitud de la pieza cruda y seca y L_c es la longitud tras su cocción.

$$CL = \frac{L_s - L_c}{L_s} 100 \quad (1.3)$$

Por las mismas razones que se han anotado en el punto 1.2.2.1 en referencia a la falta de ortogonalidad de las baldosas, la presencia de calibres es mucho más acusada en composiciones de gres esmaltado y gres porcelánico, que en las de azulejo. Por ello, se considera más interesante referirse, a partir de este punto, a la influencia que tienen las variables de operación sobre la contracción lineal, exclusivamente en composiciones de pavimento gresificado.

Tal y como se ha estado exponiendo, la contracción lineal experimentada por las piezas depende de su composición, de su porosidad inicial, caracterizada por una determinada densidad aparente en seco (ρ_s) y de la temperatura máxima de cocción (T_{\max}). Para una composición determinada, el diagrama de gresificación permite relacionar la contracción lineal de cocción (CL) con dichas variables de operación, adoptando, de acuerdo con la bibliografía, la forma de la ecuación 1.4, en la que los términos A , B , C , E , F y G son parámetros empíricos de ajuste propios de la composición del soporte [20].

$$CL = (A \rho_s + B) T_{\max}^2 + (C \rho_s + E) T_{\max} + (F \rho_s + G) \quad (1.4)$$

Según esta ecuación, la dependencia de la contracción lineal de la pieza con la temperatura de cocción se ajusta adecuadamente bien a una ecuación cuadrática en la que, a su vez, los coeficientes dependen linealmente de la densidad aparente en seco del soporte. De este modo, para una densidad aparente dada, la contracción lineal aumenta progresivamente con la temperatura máxima de cocción hasta alcanzar un valor máximo, coincidente con el punto de máxima densificación del material. Por encima de este punto, la contracción comienza a disminuir, como consecuencia del hinchamiento experimentado por el soporte. Este hinchamiento, descrito en la bibliografía consultada [66], es un fenómeno complejo que se produce porque los gases resultantes de la descomposición y fusión de las materias primas a altas temperaturas quedan retenidos en el interior del soporte, al estar la superficie de la pieza ya gresificada, provocando su expansión. Para una temperatura máxima de cocción dada, la contracción lineal se incrementa con la disminución de la densidad aparente. Finalmente, el punto de máxima contracción se desplaza hacia valores de temperatura

máxima más elevados, a medida que disminuye la densidad aparente en seco. Con todo ello, los diagramas de gresificación representados por una expresión con la forma de la ecuación 1.4 describen aceptablemente bien, desde un punto de vista macroscópico, los mecanismos de sinterización de los materiales cerámicos empleados en la fabricación de baldosas cerámicas, permitiendo estudiar su comportamiento.

La forma concreta que adopte el diagrama de gresificación dependerá precisamente del modo en el que se produzcan las reacciones físico-químicas propias de dichos mecanismos de sinterización. En los gráficos de la figura 1.16 se han representado los diagramas de gresificación de dos composiciones típicas de pavimento gresificado recogidas en la bibliografía [32]. Concretamente, el correspondiente a una composición de gres esmaltado, que permite obtener baldosas cerámicas tipificadas dentro del grupo BIIa, con una absorción de agua en torno a 4,0 %, y el de una de gres porcelánico, con la que se fabrican baldosas cerámicas del tipo BIa, con una absorción de agua inferior a 0,5 %. Para cada diagrama se muestran las curvas de gresificación a tres densidades aparentes en seco diferentes, equivalentes a tres compacidades muy similares en ambos casos. En particular, como se indica entre paréntesis en la leyenda de los gráficos, para la composición de gres esmaltado, del 72,9 % al 75,8 %, y para la de gres porcelánico, del 73,2 % al 76,2 %. La zona sombreada en los diagramas muestra el intervalo de temperatura máxima de cocción en el cual las baldosas cocidas alcanzarían la absorción de agua fijada, en cada caso, por la tipología de producto.

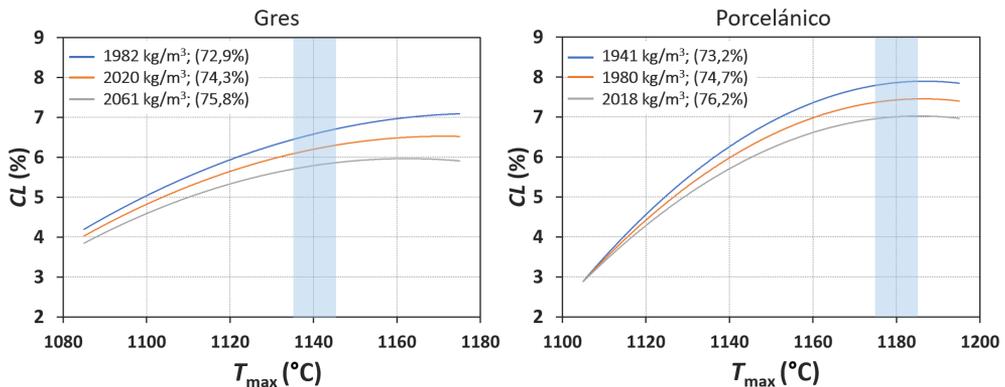


Figura 1.16. Diagramas de gresificación típicos de una composición de gres esmaltado y de gres porcelánico.

Combinando la ecuación 1.3 y la ecuación 1.4 puede obtenerse la relación entre el tamaño final de la pieza (L_s), la temperatura máxima de cocción (T_{max}) y la densidad aparente en seco (ρ_s). La ecuación 1.5 indica que para una determinada temperatura máxima de cocción (T_{max}), el tamaño final de la pieza (L_s) depende linealmente de su densidad aparente en seco (ρ_s). Esto es cierto, siempre y cuando el tamaño de la pieza cruda y seca a la entrada del horno (L_s) sea constante. Como se demostrará en el desarrollo de este trabajo, debido a las variaciones de expansión post-prensado experimentadas por los soportes a la salida de la prensa (ver apartado 1.1.2.2), en la práctica industrial, el tamaño de los soportes esmaltados a la entrada del horno varía ligeramente. Desde el punto de vista de la estabilidad dimensional del producto, estas

variaciones del tamaño en crudo pueden llegar a ser significativas, sin embargo, con el fin de simplificar la exposición, en una primera aproximación se considerará que L_s permanece constante, para un tamaño nominal dado.

$$L_c = L_s \left[\left(1 - \frac{BT_{\max}^2 + ET_{\max} + G}{100} \right) - \left(\frac{AT_{\max}^2 + CT_{\max} + F}{100} \right) \rho_s \right] \quad (1.5)$$

Empleando los diagramas de gresificación mostrados en la figura 1.16, se han calculado los parámetros empíricos de ajuste de la ecuación 1.5 para cada composición. Con ellos se han obtenido las líneas $L_c = f(\rho_s)$, para un valor constante de L_s y tres temperaturas máximas de cocción, en concreto, $1140 \pm 5^\circ\text{C}$, para el gres esmaltado, y $1180 \pm 5^\circ\text{C}$, para el gres porcelánico. Con la finalidad de que los tamaños de pieza cocida estuvieran centrados en torno a un tamaño nominal de 330,0 mm, el valor de L_s considerado para la composición de gres esmaltado, 351,8 mm, ha sido ligeramente inferior al utilizado para la composición de gres porcelánico, 356,6 mm. Los resultados de estos cálculos quedan recogidos en las gráficas de la figura 1.17.

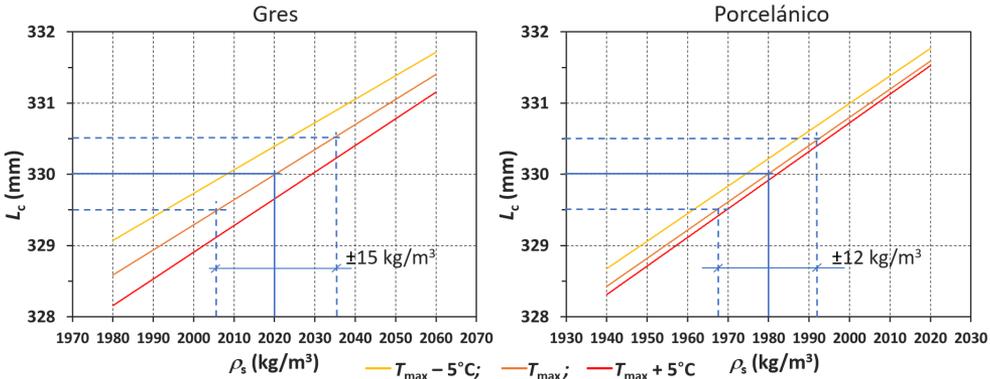


Figura 1.17. Relación entre el tamaño de la pieza cocida y la densidad aparente en seco para una composición de gres esmaltado y de gres porcelánico, para tres temperaturas de cocción diferentes.

En los gráficos se aprecia que la pendiente de las líneas $L_c = f(\rho_s)$ es positiva, lo cual indica que, para una misma temperatura máxima de cocción, al aumentar la densidad aparente en seco se incrementa el tamaño final de la pieza cocida. Este comportamiento está relacionado con los mecanismos de sinterización en presencia de fase vítrea que habitualmente se dan en este tipo de baldosas para pavimento [28][67].

Para una misma densidad aparente en seco, el tamaño final de la pieza disminuye al aumentar la temperatura máxima de cocción, debido al incremento que experimenta la contracción lineal de esta. Sin embargo, como puede observarse, para la misma variación de temperatura, este comportamiento no es exactamente igual en ambas composiciones, lo cual queda reflejado en una mayor proximidad entre las líneas $L_c = f(\rho_s)$ de la composición de gres porcelánico. Mientras que para la composición de gres esmaltado un cambio de 10°C en la temperatura máxima de cocción supone

un cambio dimensional de 0,7 mm en el tamaño final de la pieza, para la composición de gres porcelánico, un mismo cambio de temperatura sólo implica un cambio de tamaño de 0,3 mm.

Esta diferencia de comportamiento es motivada por la diferente naturaleza de las materias primas presentes en cada composición. La composición de gres porcelánico contiene arcillas esencialmente caoliníticas y, por lo tanto, más refractarias, que motivan una cocción a mayor temperatura para alcanzar la absorción de agua propia del producto ($AA < 0,5\%$). La composición de gres esmaltado está constituida por arcillas principalmente ilitico-caoliníticas, que requieren de una cocción a menor temperatura máxima para alcanzar la porosidad deseada ($AA = 4,0\%$). En consecuencia, como puede observarse en los diagramas de la figura 1.16, el gres porcelánico se procesa en una zona de su diagrama de gresificación en el que la variación de la contracción lineal con la temperatura es menos acusada que la que muestra la composición de gres esmaltado, procesada a menor temperatura máxima en una parte del diagrama de gresificación de mayor pendiente.

Otro fenómeno importante, que destaca de la observación de los gráficos de la figura 1.17, es el hecho de que, al incrementarse la densidad aparente en seco, el efecto de la temperatura máxima de cocción sobre el tamaño final se reduce, ya que las rectas convergen progresivamente. Aunque el fenómeno se aprecia en ambas composiciones, es más acusado para la composición de gres esmaltado. En ambos casos, el origen de este comportamiento está en la menor contracción lineal experimentada por la pieza, al incrementarse la densidad aparente del soporte. En efecto, como consecuencia de la menor porosidad de partida del soporte, la sinterización tiene lugar de una forma más contenida en una pieza de mayor densidad aparente, y por lo tanto, la contracción experimentada por esta es menor.

Es interesante destacar como al aumentar la temperatura máxima de cocción, se incrementa la pendiente de las rectas, aumentando con ello el efecto que la variación de densidad aparente en seco tiene sobre la estabilidad dimensional del producto. De hecho, en la práctica industrial, para las composiciones de productos gresificado, una forma habitual de tener más controlada la estabilidad dimensional de las piezas, para una determinada porosidad en cocido, es disminuir la temperatura máxima de cocción, pero aumentando, al mismo tiempo, la densidad aparente en seco de los soportes, ya que, de lo contrario, se produciría un incremento de la porosidad final.

Utilizando las representaciones de $L_c = f(\rho_s)$, puede determinarse la variación máxima de densidad aparente en seco, generalmente representada como $\Delta\rho_s^*$, que podría tolerarse en las piezas previamente a su cocción, para no tener problemas de calibres en la clasificación final. Con tal fin, se sitúa en los gráficos, alrededor del valor nominal del tamaño final de pieza considerado (330,0 mm x 330,0 mm), la tolerancia dimensional típicamente empleada a nivel industrial ($\pm 0,5$ mm) para dicho tamaño nominal. Independientemente de la temperatura máxima de cocción, puede comprobarse que la variación máxima permitida en la densidad aparente en seco, para mantener el tamaño final de pieza dentro de la tolerancia establecida, es muy baja para ambas composiciones. Para la temperatura central del intervalo de cocción propuesto, la composición de gres esmaltado presentaría un intervalo de variación máxima de densidad de únicamente ± 15 kg/m³, respecto a una densidad aparente

en seco objetivo de 2020 kg/m^3 . Por su parte, la de gres porcelánico obligaría a mantener una variación de densidad aparente en seco aún más restrictiva, concretamente, $\pm 12 \text{ kg/m}^3$ referidos a una densidad objetivo de 1980 kg/m^3 . La mayor sensibilidad de la composición de gres porcelánico está relacionada con la mayor pendiente de las líneas $L_c = f(\rho_s)$, motivada por un proceso de sinterización con mayor generación de fase líquida que en las composiciones de gres esmaltado.

Como ha podido apreciarse, las variaciones máximas de la densidad aparente tolerable implican cambios, respecto al valor objetivo de la densidad, de únicamente el 0,7%, para el gres esmaltado, y el 0,6%, para el gres porcelánico, respectivamente. Este estrecho margen de variación permitido de la densidad aparente en seco refleja la gran importancia de esta variable, la sensibilidad del proceso a sus cambios y la precisión requerida en su control industrial. Puede decirse, por tanto, que la variación de la densidad aparente en seco máxima permitida ($\Delta\rho_s^*$) es un parámetro clave en este trabajo, puesto que determina la precisión que debe exigirse al método de control empleado en la regulación de los parámetros de fabricación.

1.2.3.2.2 Efecto de las condiciones de cocción sobre la aparición de calibres

A diferencia de lo observado para los descuadres, en la tendencia a la aparición de calibres no tiene incidencia únicamente la presencia de gradientes transversales de temperatura en el interior del horno. Las posibles variaciones temporales de temperatura máxima que puedan tener lugar, por ejemplo, como consecuencia de interrupciones imprevistas de la alimentación del horno, también son críticas para garantizar la homogeneidad del tamaño final medio de las baldosas.

Tal y como se ha explicado anteriormente, la solución a los problemas de gradientes transversales de temperatura requiere de la actuación sobre los parámetros de regulación del horno, utilizando instrumentación adicional a la proporcionada por este. En cambio, para minimizar las fluctuaciones de temperatura máxima de cocción es imprescindible garantizar una alimentación al horno con el menor número de interrupciones posibles, con el fin de mantener constante, en todo momento, la masa de material que está siendo procesada. Si la constancia de la alimentación no se garantiza, se producen huecos de piezas en el tapete de baldosas introducido en el canal de cocción, de mayor o menor tamaño dependiendo de la duración de los paros en la alimentación. A medida que estos huecos avanzan sobre el plano de rodillos, los sistemas de control de los diferentes grupos de quemadores, que controlan la temperatura en el interior del horno, van regulándose para tratar de mantenerla en un valor de consigna prefijado. Sin embargo, debido al súbito cambio experimentado en la masa térmica del material procesado, se producen oscilaciones transitorias en las temperaturas durante el tiempo en el que los sistemas de control adaptan su regulación. Esto hace que, sobre todo las piezas procesadas justo antes y después de un paro en la alimentación, no se cuezan con exactamente el mismo ciclo térmico que el aplicado a las piezas, cuando el horno está funcionando en un régimen completamente estacionario. Estas baldosas experimentarán necesariamente una contracción lineal diferente, aumentando la probabilidad de que aparezcan calibres en la clasificación final.

Atendiendo a lo reflejado en los gráficos de la figura 1.17, la influencia de la temperatura máxima de cocción es mucho más marcada en las composiciones de gres esmaltado, que en las de gres porcelánico, debido al diferente comportamiento de estos materiales durante su sinterización. Ahora bien, con vistas a comprender mejor esta diferencia, es interesante obtener la expresión que relaciona la variación máxima de contracción lineal permisible, representada por ΔCL^* , con las respectivas variaciones máximas permitidas de la temperatura máxima de cocción (ΔT_{\max}^*) y de la densidad aparente en seco ($\Delta \rho_s^*$), para una temperatura de cocción y densidad aparente en seco dadas. Para ello, es necesario aplicar la teoría de la propagación de errores a la ecuación 1.4, de manera que el error en la estimación de la contracción lineal, expresado como la derivada absoluta dCL , puede determinarse, a partir de los errores absolutos correspondientes a la temperatura máxima de cocción, dT_{\max} , y a la densidad aparente en seco, $d\rho_s$, según la expresión 1.6:

$$dCL = \left| \frac{\partial CL}{\partial T_{\max}} \right|_{\rho_s} dT_{\max} + \left| \frac{\partial CL}{\partial \rho_s} \right|_{T_{\max}} d\rho_s \quad (1.6)$$

en la cual:

$$\left. \frac{\partial CL}{\partial T_{\max}} \right|_{\rho_s} = (A\rho_s + B) 2 T_{\max} + (C\rho_s + E) \quad (1.7)$$

$$\left. \frac{\partial CL}{\partial \rho_s} \right|_{T_{\max}} = AT_{\max}^2 + CT_{\max} + F \quad (1.8)$$

De este modo, sustituyendo las ecuaciones 1.7 y 1.8 en la ecuación 1.6 y transformando los términos referidos a las derivadas absolutas en incrementos finitos, se obtiene la ecuación 1.9.

$$\Delta CL^* = \left| (A\rho_s + B) 2 T_{\max} + (C\rho_s + E) \right| \Delta T_{\max}^* + \left| AT_{\max}^2 + CT_{\max} + F \right| \Delta \rho_s^* \quad (1.9)$$

En los gráficos de la figura 1.18 se evalúa, para las dos composiciones anteriormente tratadas, la sensibilidad de las mismas frente a las variaciones de la temperatura máxima de cocción. Para ello se ha representado, en función de la temperatura máxima, la derivada parcial de la contracción lineal con respecto a la temperatura a densidad aparente en seco constante, la cual, según la ecuación 1.7, depende de la propia densidad aparente en seco y de la temperatura máxima de cocción. Los valores de compacidad considerados en la obtención de estos gráficos son los mismos que los utilizados en los diagramas de gresificación mostrados en la figura 1.16.

Para las dos composiciones, a medida que aumenta la temperatura máxima, se produce una disminución de la variación de la contracción lineal con la temperatura, es decir, los cambios dimensionales en la pieza son menos sensibles frente a las variaciones de la temperatura máxima de cocción, cuanto mayor es esta. Además de esto, dicha sensibilidad se reduce a medida que aumenta la densidad aparente en seco de las piezas. La mayor pendiente de las rectas obtenidas para la composición

de porcelánico indica que, en este material, el cambio dimensional experimentado por las piezas durante la cocción tiene lugar más rápidamente que en el gres esmaltado. Nótese también que, para el caso de la composición porcelánica, por encima de aproximadamente 1185°C, los valores de la derivada parcial de la contracción respecto de la temperatura se vuelven negativos. Este hecho indica que, a partir de esta temperatura, un incremento de la temperatura máxima de cocción supondrá una reducción de la contracción lineal de la pieza, para cualquier densidad, cosa que, en la composición de gres esmaltado, solo se observaría, en el rango de temperaturas estudiado (1080-1180°C), para la densidad más elevada y la intermedia a temperaturas superiores a, aproximadamente, 1165 y 1170°C, respectivamente. Los puntos de intersección de las líneas con la ordenada 0,0 indican, por tanto, la temperatura a la que se produce la máxima densificación del material para una densidad aparente en seco dada. A partir de este punto se produce el hinchamiento de la pieza, con la consiguiente disminución de la contracción lineal alcanzada.

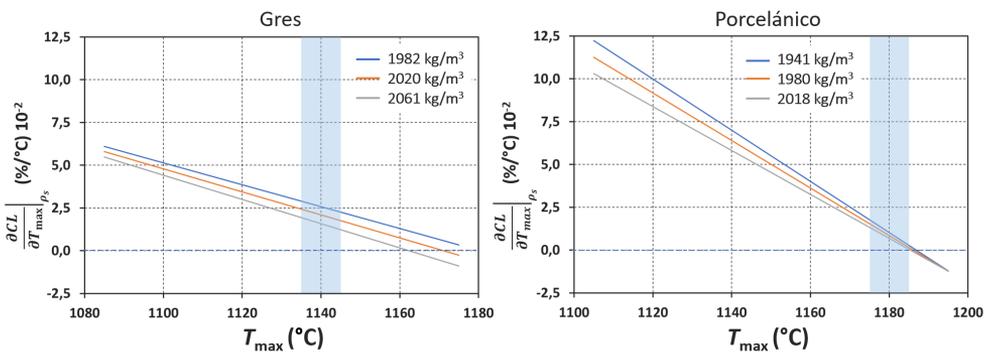


Figura 1.18. Sensibilidad de la contracción lineal frente a los cambios de la temperatura máxima de cocción para una composición de gres esmaltado y una de gres porcelánico, a tres densidades aparentes en seco diferentes.

Pese a las similitudes observadas en los gráficos de la figura 1.18, puede decirse que el comportamiento de ambas composiciones frente a la cocción, dentro de sus respectivos intervalos de cocción (áreas sombreadas), es bastante distinto. Mientras que la composición de gres porcelánico muestra una sensibilidad frente a la temperatura máxima de cocción prácticamente nula y muy similar para las tres densidades aparentes representadas, la de gres esmaltado es más sensible a las variaciones de temperatura máxima de cocción y además, dicha sensibilidad muestra una dependencia más acusada con la densidad aparente, que para el caso del porcelánico. Esto viene a significar básicamente que, en las composiciones de gres esmaltado es posible modificar la contracción lineal alcanzada durante la cocción y, por tanto, el tamaño final de las baldosas, modificando ligeramente la temperatura máxima de cocción para cualquier densidad aparente en seco. Sin embargo, no puede decirse lo mismo para las de porcelánico puesto que, en el intervalo de cocción del soporte, la composición presenta una sensibilidad a los cambios de temperatura muy baja, de manera que el tamaño final de la pieza apenas se modificará al cambiar la temperatura máxima de cocción, dentro de ese intervalo.

Una última conclusión que puede extraerse del análisis de estos gráficos es que, para este tipo de composiciones, y especialmente en las de gres esmaltado, es conveniente trabajar a las mayores densidades aparentes posibles, para una temperatura máxima de cocción dada, con el fin de tener una mejor estabilidad dimensional del producto.

Con el fin de evaluar la incidencia de las variables industriales sobre ΔT_{\max}^* y, posteriormente en el siguiente apartado, sobre $\Delta \rho_s^*$, se considera oportuno incorporar en la ecuación 1.9 la tolerancia dimensional o tolerancia de calibre, t (mm), definida por la ecuación 1.10. En esta ecuación, L_c^* (mm) es la máxima longitud en cocido permitida que puede presentar una baldosa, de un tamaño nominal dado, para que sea considerada de un cierto calibre y L_{c*} (mm) es la longitud mínima permitida, dentro del mismo calibre.

$$t = L_c^* - L_{c*} \quad (1.10)$$

Además, si se combinan las ecuaciones 1.3 y 1.10 es posible obtener una expresión como 1.11, la cual permite calcular la diferencia máxima de contracción lineal (ΔCL^*) que puede existir entre dos baldosas, para ser consideradas del mismo tamaño o calibre.

$$\Delta CL^* = \frac{t}{L_s} 100 \quad (1.11)$$

Sustituyendo en la ecuación 1.9 la máxima variación permisible de contracción lineal, proporcionada por la ecuación 1.11, y empleando de nuevo la definición de contracción lineal (ecuación 1.3), se obtiene finalmente la expresión 1.12, que relaciona la máxima variación permitida de la temperatura máxima de cocción, con entre otras variables, el tamaño final de la pieza, la tolerancia del calibre y la densidad aparente en seco objetivo, ρ_s^o (kg/m³), a fijar durante la operación de conformado.

$$\Delta T_{\max}^* = \frac{(100 - CL)t - |AT_{\max}^2 + CT_{\max} + F| L_c \Delta \rho_s^*}{|(A\rho_s^o + B) 2 T_{\max} + (C\rho_s^o + E)| L_c} \quad (1.12)$$

De las variables que afectan a la variación máxima permitida de la temperatura máxima de cocción, las que presentan una mayor importancia desde el punto de vista del control industrial del proceso son la tolerancia, el tamaño final de la pieza, la densidad aparente en seco objetivo y la variación máxima de esta que pueda producirse durante el prensado. Del resto de variables, la temperatura máxima de cocción vendrá condicionada por la absorción de agua que deba presentar el producto y definirá, a su vez, la contracción lineal de este.

Para estudiar el efecto de estas variables sobre el comportamiento de las composiciones de soporte anteriormente expuestas, se ha fijado para cada una de ellas en la ecuación 1.12, la variación máxima de la densidad aparente en seco ($\Delta \rho_s^*$) en el valor de la precisión típica del método de inmersión en mercurio, tradicionalmente empleado, la cual se sitúa en ± 4 Kg/m³ [55]. Y además, se han establecido en los valores que quedan recogidos en la tabla 1.3, la densidad aparente en seco objetivo, la temperatura máxima de cocción y la contracción lineal, referentes a tres condiciones

de operación diferentes. Dichos valores corresponden a los normalmente empleados en la industria, para alcanzar absorciones de agua entre el 3,5 y el 4,5 %, en gres esmaltado, e inferiores a 0,5 %, en porcelánico, según los diagramas de gresificación de la figura 1.16.

Tabla 1.3. Condiciones de procesado empleadas en la evaluación de la incidencia de la cocción sobre la variabilidad dimensional en composiciones de pavimento gresificado.

Composición	AA (%)	ρ_s^o (kg/m ³)	T_{max} (°C)	CL (%)
Gres esmaltado (GE)	3,5 a 4,5	2000	1140	6,1
		2020		5,9
		2040		5,8
Gres porcelánico (GP)	<0,5	1960	1180	7,7
		1980		7,4
		2000		7,2

En la figura 1.19 se muestra, para las dos composiciones analizadas, la influencia que tiene el tamaño final de pieza fabricada sobre la variación máxima permitida de la temperatura de cocción, considerando una tolerancia de calibre de 1,0 mm y operando en las tres condiciones recogidas en la tabla 1.3.

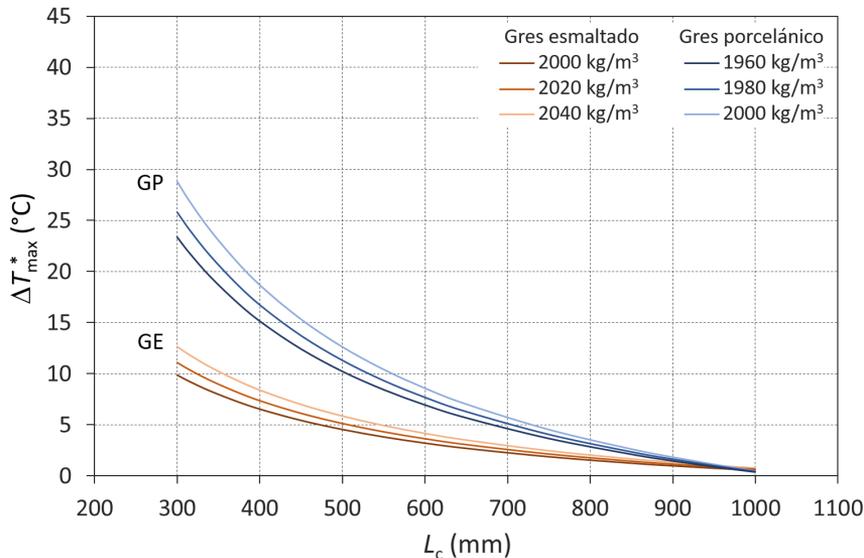


Figura 1.19. Relación entre la máxima variación permitida de la temperatura de cocción y el tamaño final de las piezas para distintas densidades aparentes en seco objetivo, considerando una tolerancia de 1,0 mm ($\Delta\rho_s^* = 8 \text{ kg/m}^3$).

Como puede observarse, a medida que se incrementa el tamaño de las piezas fabricadas, para las dos composiciones y en cualquier condición de conformado, se reduce la variación máxima de temperatura de cocción, que puede permitirse sin que se ge-

neren calibres en la clasificación final. Esto quiere decir que, independientemente de la composición del soporte, cuanto mayor es el tamaño final de las piezas, más complicado es mantener su tamaño dentro de las tolerancias. De acuerdo con lo discutido anteriormente, la composición de gres porcelánico tolera unas variaciones máximas de temperatura sensiblemente superiores a las permitidas para la composición de gres esmaltado. Así, teniendo en cuenta que oscilaciones de la temperatura máxima de cocción de 5°C son comunes en los hornos monoestrato empleados en la cocción de las baldosas [68], no es técnicamente viable la fabricación de piezas de gres esmaltado de tamaños superiores a 450,0 mm, sin que aparezcan calibres en la clasificación final. Por el contrario, para productos de gres porcelánico, un cambio de la temperatura máxima de cocción de 5°C sería tolerable hasta tamaños de pieza de 700,0 mm.

En el mismo gráfico puede analizarse el efecto de la densidad aparente en seco sobre la variación máxima permitida de la temperatura de cocción. Se evidencia que, para un tamaño final de pieza determinado, a medida que se incrementa la densidad aparente en seco objetivo de los soportes, mayor es la máxima variación permisible de temperatura máxima de cocción, lo cual significa que es más sencillo mantener las piezas dentro de la tolerancia establecida. Este comportamiento es más significativo para tamaños de pieza pequeños y en la composición de gres porcelánico, tal y como refleja la mayor separación de las curvas del gráfico.

Es importante poner de manifiesto que, para cualquiera de las dos composiciones, es altamente complejo conseguir una buena estabilidad dimensional del producto acabado para tamaños de pieza de 900,0 mm y superiores [69]. Según los resultados de los cálculos presentados, gradientes u oscilaciones térmicas por encima de 1-2°C no permitirían obtener piezas con un tamaño contenido dentro de una tolerancia de 1,0 mm.

Este hecho está condicionado, en parte, por la incertidumbre de 8 kg/m³ introducida en la estimación de la propia variación máxima permisible de la densidad aparente en seco. Así, en el gráfico de la figura 1.20, se ha representado como se modificaría la dependencia de la variación máxima de la temperatura permitida con el tamaño final de pieza si se mejorara la precisión del método de control de la densidad y su variación máxima permitida se redujese a 4 kg/m³. Como puede observarse, con una variación máxima de la densidad aparente en seco más restrictiva, la composición de gres porcelánico tolera variaciones térmicas mayores, permitiendo incluso la fabricación de piezas de 1000,0 mm con variaciones máximas de la temperatura de cocción ligeramente superiores a 5°C. Esto muestra la gran influencia que tienen las condiciones de conformado sobre la estabilidad dimensional de este tipo de productos, en comparación con las composiciones de gres esmaltado. En efecto, en este último caso, la reducción de la variación máxima permitida de la densidad aparente en seco apenas supone un incremento de la tolerancia a las variaciones térmicas, lo cual denota una influencia más pareja de las condiciones de conformado y de cocción en los productos de gres esmaltado.

Finalmente, en la figura 1.21 se ha representado como influye, sobre la variación máxima permitida de la temperatura de cocción, el tamaño de la baldosa cocida, para diferentes tolerancias dimensionales. Por simplicidad, los gráficos se han obtenido

para un único valor de la densidad aparente objetivo, concretamente, 1980 kg/m^3 , para la composición de gres porcelánico, y 2020 kg/m^3 , para la de gres esmaltado.

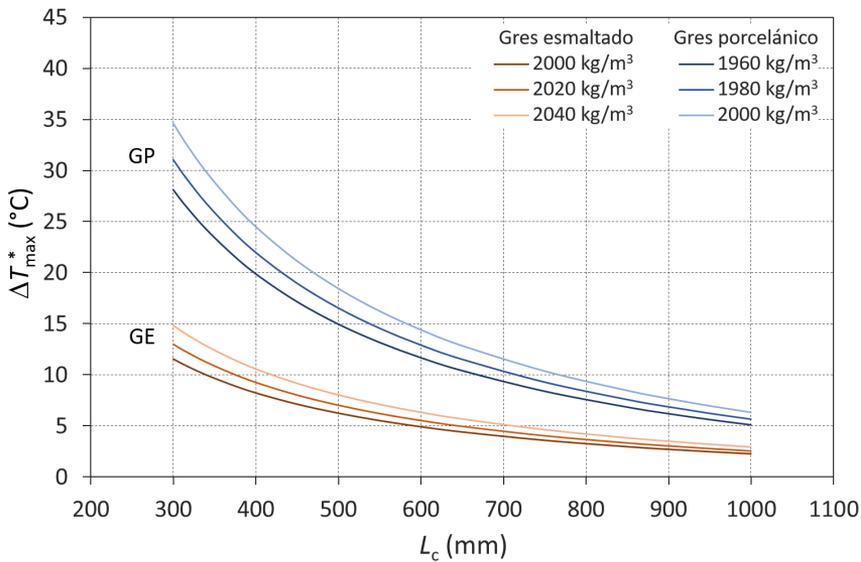


Figura 1.20. Relación entre la máxima variación permitida de la temperatura de cocción y el tamaño final de las piezas para distintas densidades aparentes en seco objetivo, considerando una tolerancia de $1,0 \text{ mm}$ ($\Delta\rho_s^* = 4 \text{ kg/m}^3$).

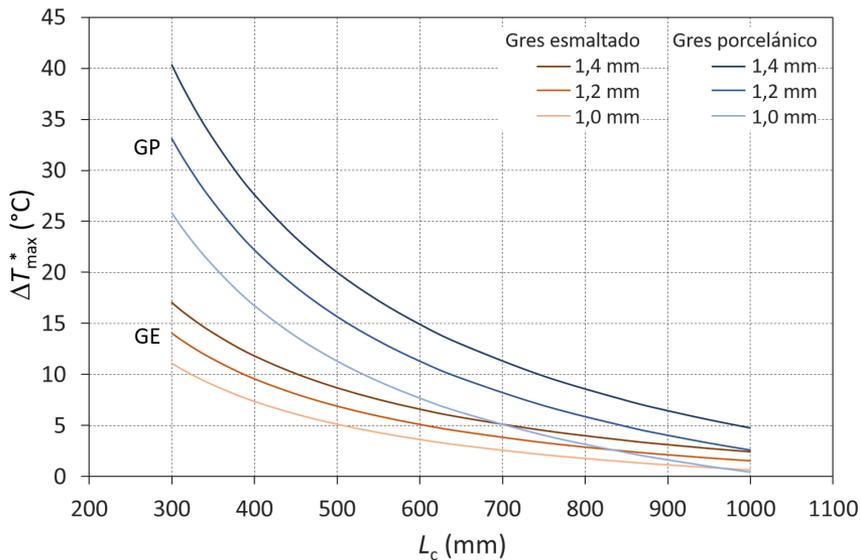


Figura 1.21. Relación entre la máxima variación permitida de la temperatura de cocción y el tamaño final de las piezas para distintas tolerancias de calibre ($\Delta\rho_s^* = 8 \text{ kg/m}^3$).

De nuevo, se observa en el gráfico la dificultad de fabricar piezas de gran tamaño pues, para una misma tolerancia, al aumentar el tamaño de las piezas procesadas se

reduce la variación máxima de temperatura permitida. De la misma manera, para un tamaño final de pieza dado, al incrementarse la tolerancia, la variación máxima de temperatura permitida aumenta, lo cual facilita el procesado de las piezas.

Las observaciones efectuadas en base a los cálculos realizados mediante la ecuación 1.12 ponen de manifiesto la influencia que presentan las variaciones de la temperatura máxima de cocción sobre la tendencia a la aparición de calibres. Al mismo tiempo, muestran la incidencia que tiene la variabilidad de la densidad aparente en seco, la cual es estudiada en más detalle en el siguiente apartado, sobre dicha variación máxima permitida de la temperatura, y por ende, sobre la estabilidad dimensional del producto.

1.2.3.2.3 Efecto de las condiciones de conformado sobre la aparición de calibres

Las diferencias de densidad aparente en seco entre soportes, como origen de la presencia de calibres en las clasificaciones finales de producto, pueden ser debidas a dos motivos. En primer lugar, a las diferencias de presión máxima aplicada en las diferentes cavidades del molde, que provocan que el lecho de polvo contenido en cada alveolo adquiera diferente grado de densificación al finalizar el ciclo de prensado. Y en segundo lugar, a las variaciones del contenido en humedad, que puede experimentar a lo largo del tiempo el polvo de prensas, las cuales provocan cambios significativos en la densidad aparente media adquirida por los soportes para una presión máxima de pensado dada.

Las diferencias de presión máxima aplicada entre alveolos se producen como consecuencia, por un lado, de un reparto heterogéneo de la carga de polvo entre las cavidades del molde y, por otro lado, por las deformaciones que puede experimentar la estructura de la prensa, al ejercer la fuerza máxima de prensado. Actualmente, las prensas más modernas, empleadas en la fabricación de piezas de tamaños cada vez mayores, disponen de una estructura mecánica optimizada que permite ejercer sobre el polvo grandes presiones con deformaciones muy bajas. Este hecho ha reducido considerablemente las diferencias de presión que pueden generarse sobre las distintas cavidades del molde. Así, aunque existen todavía en la industria prensas operativas en las que las diferencias de densidad aparente entre alveolos pueden ser motivadas por las deformaciones estructurales de la prensa, en la mayoría de los casos, hoy en día, las heterogeneidades generadas en la carga del polvo entre alveolos son realmente la principal causa de la presencia de calibres asociada a este motivo. Además, en muchos casos, dicha presencia de calibres viene acompañada por la aparición de descuadras debido a que las heterogeneidades de carga se dan, tanto entre alveolos, como en el seno de cada una de las piezas conformadas.

Las diferencias de humedad experimentadas por el polvo atomizado alimentado a la prensa tienen gran incidencia sobre la densidad aparente en seco media de los soportes, en la medida en que modifican la compactabilidad del polvo. Dentro de los rangos habituales de trabajo, un aumento de la humedad del polvo atomizado implica, para una misma presión máxima de prensado, una reducción de la porosidad de los soportes y, por tanto, un incremento de su densidad aparente en seco. Y al contrario, una disminución de la humedad del polvo supone una reducción de la densidad aparente. Este comportamiento es debido a que la plasticidad de las materias primas arcillosas

contenidas en las composiciones de soporte desarrollan mayor plasticidad en presencia de contenidos de agua más elevados, lo que se traduce en una mayor deformación plástica del material durante el prensado y, con ello, en la consecución de una menor porosidad del soporte [70]. Las variaciones de humedad del polvo de prensas pueden ser debidas a múltiples causas. Las más importantes son un inadecuado control de la operación de secado por atomización, durante la preparación de la composición del soporte, un reducido tiempo de reposo del polvo en el silo de almacenamiento antes del prensado y las segregaciones producidas durante el manejo del mismo antes de la operación de conformado [71][72][73][74].

A continuación se analizará cual es la variación máxima que se puede tolerar, por un lado, en la densidad aparente en seco de los soportes recién prensados y, por otro lado, en la humedad del polvo de prensas, para garantizar la estabilidad dimensional del producto terminado.

■ Variación máxima permitida en la densidad aparente en seco ($\Delta\rho_s^*$)

En los gráficos de la figura 1.22 se evalúa, para las dos composiciones anteriormente tratadas, la sensibilidad de las mismas frente a la variación de la densidad aparente en seco, la cual, como se acaba de exponer, puede verse fácilmente alterada en el proceso de fabricación debido a las heterogeneidades generadas durante la carga de molde y/o a las variaciones de humedad del polvo de prensado. Para ello se ha representado, en función de la temperatura máxima de cocción, la derivada parcial de la contracción lineal con respecto a densidad aparente en seco, a temperatura constante, la cual, según la ecuación 1.8, para una determinada composición depende únicamente de la temperatura máxima de cocción.

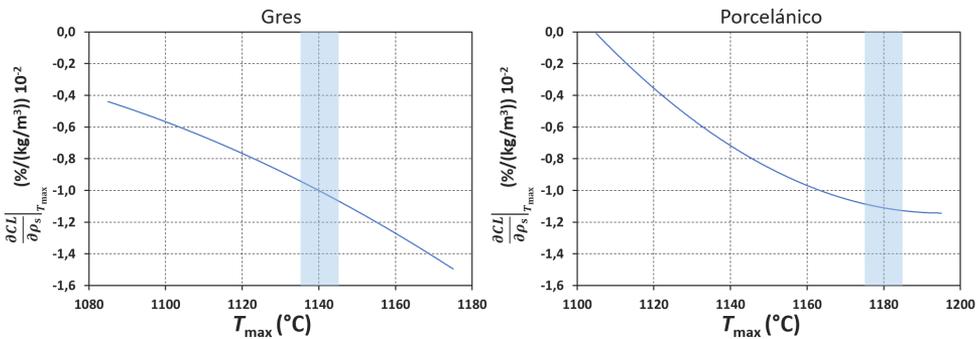


Figura 1.22. Sensibilidad de la contracción lineal frente a cambios de densidad aparente en seco para una composición de gres esmaltado y una de gres porcelánico.

Como puede observarse, la variación de la contracción lineal con respecto a la densidad aparente en seco adquiere valores negativos para ambos materiales. Esto significa que la contracción lineal se reduce a medida que aumenta la densidad aparente en seco de la pieza cruda. Independientemente de la tipología de producto, el proceso de sinterización tiene lugar en presencia de fase vítrea, viéndose menos favorecido y, por tanto, reduciendo la contracción lineal alcanzada, cuanto menor es la porosidad de los soportes crudos.

A pesar de las similitudes observadas, el comportamiento de ambas composiciones, en sus respectivos intervalos de cocción (zonas sombreadas en los gráficos), es diferente. Mientras que el gres porcelánico es procesado en un intervalo de temperaturas en el que la variación de la contracción lineal con la densidad presenta un valor prácticamente constante, como consecuencia de la proximidad del mínimo presente en la curva representada, el gres esmaltado se procesa a unas temperaturas en las que se observa una variación significativa de este parámetro. Por lo tanto, para el gres porcelánico, en un intervalo de temperaturas relativamente amplio, la sensibilidad de la contracción lineal y, con ello, de la estabilidad dimensional frente a los cambios de densidad aparente en seco, presentará muy poca variación. En cambio, para el gres esmaltado, pequeños cambios en la temperatura máxima de cocción afectarán a la variación de la contracción lineal con la densidad aparente en seco. Estas observaciones están de acuerdo con lo expuesto en el apartado 1.2.3.2.2 en referencia a la menor influencia de la temperatura máxima de cocción sobre la tendencia a la aparición de calibres en las composiciones de gres porcelánico.

Partiendo de la ecuación 1.12 es sencillo obtener la expresión 1.13, que relaciona la máxima variación permitida de densidad aparente en seco ($\Delta\rho_s^*$), con entre otras variables, el tamaño final de la pieza (L_c), la tolerancia del calibre (t) y la densidad aparente en seco objetivo, (ρ_s^o), para una determinada variabilidad térmica en la cocción (ΔT_{\max}^*).

$$\Delta\rho_s^* = \frac{(100 - CL)t - |(A\rho_s^o + B)2T_{\max} + (C\rho_s^o + E)|L_c \Delta T_{\max}^*}{|AT_{\max}^2 + CT_{\max} + F|L_c} \quad (1.13)$$

En la figura 1.23 se muestra, para las condiciones de operación registradas en la tabla 1.3, la influencia del tamaño final de la pieza sobre la variación máxima permitida de la densidad aparente en seco, considerando una tolerancia de 1,0 mm, para las dos composiciones analizadas. Los cálculos han sido realizados aplicando la ecuación 1.13 y suponiendo una variabilidad máxima permitida en la temperatura máxima de cocción de 5°C.

Puede comprobarse que, de forma similar a como sucedía con la variación máxima permitida de la temperatura de cocción, a medida que se incrementa el tamaño final de las baldosas, la máxima variación permisible de la densidad aparente en seco para obtener piezas de un mismo calibre se reduce, tanto en la composición de gres porcelánico, como en la de gres esmaltado. Esto viene a significar de nuevo que, cuanto mayor es el tamaño de las piezas fabricadas, más complicado es obtener piezas dentro de la tolerancia establecida. Las variaciones de densidad aparente en seco permitidas para la composición de gres porcelánico son sensiblemente superiores a las toleradas para la de gres esmaltado, como consecuencia de la mayor sensibilidad de esta última a las variaciones de temperatura.

De hecho, variaciones de densidad del orden de la precisión de los métodos empleados en la determinación de la densidad aparente en seco, 8 kg/m³, permitirían fabricar piezas de gres porcelánico de hasta, aproximadamente, 700,0 mm, manteniéndose dentro de la tolerancia. Por el contrario, para la composición de gres esmaltado, piezas de tamaño superior a 500,0 mm empezarán a presentar problemas de estabilidad dimensional asociados a la presencia de calibres.

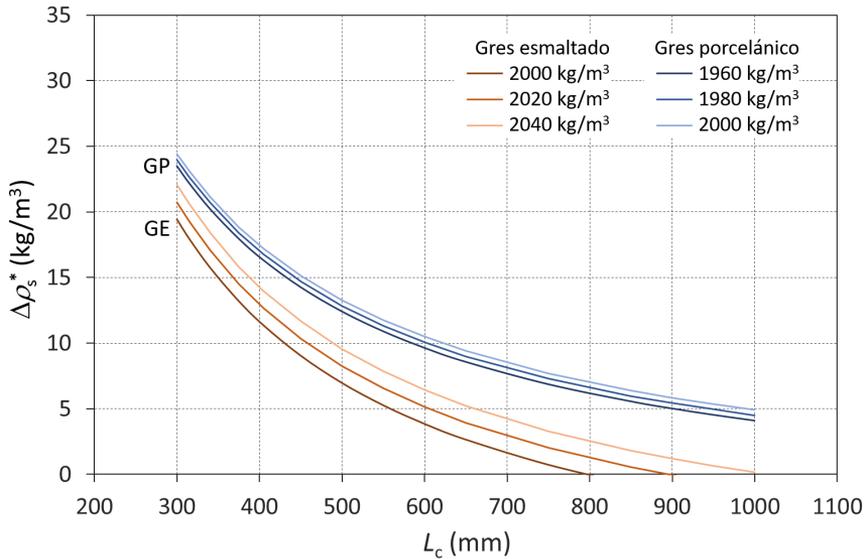


Figura 1.23. Relación entre la máxima variación permitida de la densidad aparente en seco y el tamaño final de las piezas para distintas densidades aparentes en seco objetivo, considerando una tolerancia de 1,0 mm ($\Delta T_{\max}^* = 5^\circ\text{C}$).

En la misma gráfica puede analizarse el efecto que tiene la densidad aparente en seco objetivo sobre su variación máxima permitida. Si bien en ambas composiciones, trabajar a mayores densidades aparentes en seco aumenta la máxima variación de densidad tolerable, este efecto es mucho más marcado en la composición de gres esmaltado y para tamaños grandes de pieza. Esto es debido a que, al aumentar la densidad aparente de los soportes, se reduce la contracción lineal experimentada, lo cual disminuye la influencia de las variables de cocción sobre el tamaño final. En el caso de la composición de gres esmaltado la influencia es más acusada porque, en el intervalo de temperaturas de trabajo, la variación de la contracción con la densidad aparente es mucho más grande que la experimentada por la de porcelánico, en su intervalo de cocción (ver figura 1.18).

En la figura 1.24, se representa el cambio que experimenta la máxima variación permitida de la densidad aparente en seco, en función del tamaño final de la pieza, para diferentes tolerancias. Por simplicidad, la representación se ha realizado únicamente para los valores intermedios de densidad aparente objetivo anteriormente presentados en la tabla 1.3. Al igual que sucede para la temperatura de cocción, para un determinado tamaño de pieza, la variabilidad de la densidad aparente en seco es tanto menos crítica cuanto mayor es la tolerancia de calibre permitida. Esto significa que el procesado de las piezas se ve facilitado a medida que se incrementa la tolerancia. Evidentemente, la tolerancia industrial no puede incrementarse indefinidamente, sino que debe ser la adecuada para satisfacer las exigencias del mercado. Ahora bien, el gráfico refleja que para poder minimizar la incidencia de los problemas de calibres es imprescindible trabajar con tolerancias mayores en piezas de grandes dimensiones, de lo contrario, será técnicamente imposible con-

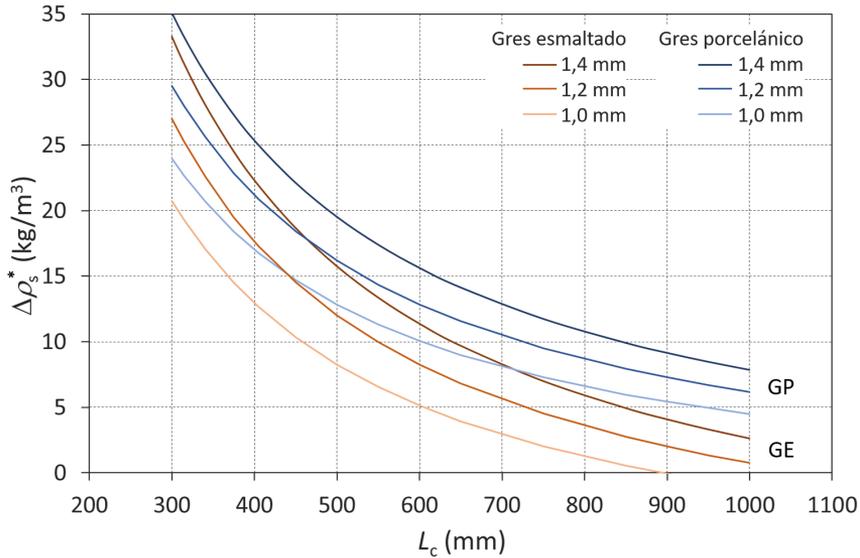


Figura 1.24. Relación entre la máxima variación permitida de la densidad aparente en seco y el tamaño final de las piezas para distintas tolerancias de calibre ($\Delta T_{\max}^* = 5^\circ\text{C}$).

seguir piezas dentro de una misma tolerancia, especialmente en piezas de gres esmaltado.

El principal interés de estos gráficos radica en que permiten calcular, para un determinado tamaño de baldosa y tolerancia, la variación máxima de densidad aparente en seco que puede tolerarse en la etapa de conformado, sin que se presenten problemas de estabilidad dimensional en el producto terminado. Cuanto menor sea este valor, más complicado será fabricar piezas de ese tamaño dentro de las tolerancias establecidas, hasta el punto de que, si es muy bajo, deberán aumentarse las tolerancias o asumirse que existirán calibres en la clasificación final.

Por ejemplo, para obtener piezas de gres porcelánico de tamaño final 600,0 mm, con una tolerancia de 1,0 mm, según el gráfico de la figura 1.24, sería necesario mantener la densidad aparente en seco de los soportes recién prensados en unos márgenes máximos de variación de $\pm 5 \text{ kg/m}^3$. Para la composición de gres esmaltado, dicho margen máximo de variación de la densidad sería todavía más restrictivo, situándose en $\pm 2,5 \text{ kg/m}^3$. Teniendo en cuenta la precisión de los métodos empleados en la determinación industrial de la densidad aparente, la cual se sitúa en torno a $\pm 4 \text{ kg/m}^3$ [55], puede entenderse la dificultad existente en mantener las dimensiones de las piezas de gres porcelánico fabricadas en la tolerancia definida y la imposibilidad de hacerlo en el caso de las de gres esmaltado.

■ Variación máxima permitida en humedad del polvo de prensas (ΔX^*)

Para una composición dada, el diagrama de compactación relaciona la densidad aparente en seco (ρ_s) de los soportes recién prensados con la presión específica máxima (P_{\max}) aplicada sobre el polvo durante el ciclo de prensado y la humedad del mismo (X). Generalmente, el diagrama de compactación adopta la forma de

la ecuación 1.14, en la que los términos a , b , c y d son parámetros empíricos de ajuste propios de la composición del soporte [70]. Según esta ecuación, la densidad aparente en seco de la pieza conformada guarda una relación logarítmica con la presión específica máxima alcanzada durante el ciclo de prensado. A su vez, la pendiente y la ordenada en el origen de dicha ecuación dependen linealmente de la humedad del polvo atomizado con el que se conforma la pieza.

$$\rho_s = (aX + b) \ln P_{\max} + (cX + d) \quad (1.14)$$

En el gráfico izquierdo de la figura 1.25, se muestra el diagrama de compactación de la composición de gres esmaltado considerada como ejemplo hasta el momento, y en el de la derecha, el correspondiente a la de gres porcelánico. Como se evidencia, existen diferencias significativas entre ambos diagramas. La composición de gres esmaltado, para una determinada presión de prensado, permite obtener densidades aparentes más elevadas que la de gres porcelánico, debido, por una parte, a la mayor densidad del sólido que presentan las materias primas habitualmente empleadas en su fabricación, las cuales contienen proporciones elevadas de óxido de hierro, y por otra parte, a la mayor proporción de partículas coloidales [59] [20]. Además, la pendiente de las curvas de compactación de la composición porcelánica es menor que la de las de gres esmaltado, como consecuencia de la mayor plasticidad de estas últimas composiciones, lo cual motiva un cambio de densidad mayor para un mismo cambio de la presión de prensado. Finalmente, el aumento de la humedad en el polvo de gres esmaltado implica un aumento de la densidad aparente en seco más acusado que el observado en la composición de gres porcelánico para el mismo cambio de humedad. De nuevo, este hecho está motivado por la mayor plasticidad de las composiciones de gres esmaltado. La ecuación 1.14, junto con el diagrama de gresificación de la composición (ecuación 1.4), es muy útil para conocer la variación máxima de la humedad y de la presión máxima de prensado que pueden permitirse sin que tengan lugar cambios en la densidad aparente en seco que conduzcan a la aparición de calibres en la clasificación final.

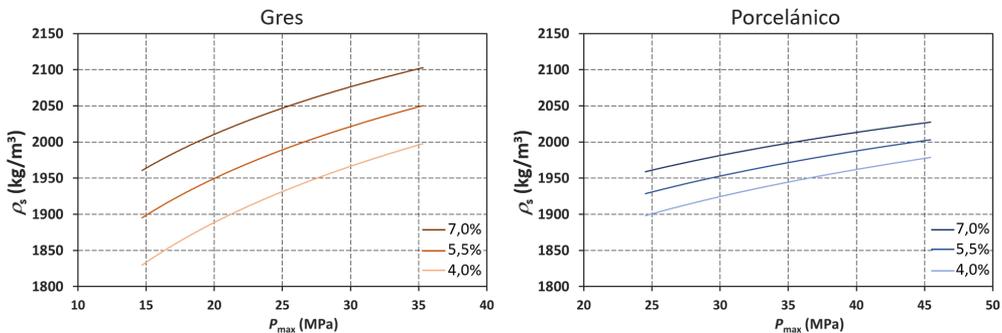


Figura 1.25. Diagramas de compactación de una composición de gres esmaltado y de una composición de gres porcelánico, a tres humedades diferentes.

Con la finalidad de ilustrar la incidencia que tienen sobre la estabilidad dimensional del producto las variaciones de humedad que experimenta el polvo atomizado,

es interesante obtener la expresión que relaciona la variación máxima de densidad aparente en seco permisible ($\Delta\rho_s^*$), con las respectivas variaciones máximas permitidas de la humedad del polvo (ΔX^*) y de la presión máxima de prensado (ΔP_{\max}^*). Para ello, es necesario aplicar la teoría de la propagación de errores a la ecuación 1.14, de manera que el error absoluto cometido en la estimación de la densidad aparente en seco, expresado como la derivada absoluta $d\rho_s$, puede determinarse, a partir de los errores absolutos correspondientes a la humedad del polvo, dX , y a la presión máxima de prensado, dP_{\max} , según la expresión 1.6:

$$d\rho_s = \left| \frac{\partial\rho_s}{\partial X} \right|_{P_{\max}} dX + \left| \frac{\partial\rho_s}{\partial P_{\max}} \right|_X dP_{\max} \quad (1.15)$$

en la cual:

$$\left. \frac{\partial\rho_s}{\partial X} \right|_{P_{\max}} = a \ln P_{\max} + c \quad (1.16)$$

$$\left. \frac{\partial\rho_s}{\partial P_{\max}} \right|_X = \frac{(aX + b)}{P_{\max}} \quad (1.17)$$

De este modo, sustituyendo las ecuaciones 1.16 y 1.17 en la ecuación 1.15, transformando los términos referidos a las derivadas absolutas en incrementos finitos y despejando la variación máxima permitida de la humedad, se obtiene la ecuación 1.18.

$$\Delta X^* = \frac{\Delta\rho_s^* - \left| \frac{(aX + b)}{P_{\max}} \right| \Delta P_{\max}^*}{|a \ln P_{\max} + c|} \quad (1.18)$$

Conocidos los parámetros empíricos de ajuste a , b , c y d , puede utilizarse la ecuación 1.18 y los valores de variación máxima permitida de la densidad aparente en seco mostrados en la figura 1.23, para determinar cual es la variación máxima que puede tolerarse en la humedad del polvo de prensas sin que las piezas fabricadas rebasen una tolerancia de 1,0 mm. En la figura 1.26 se ha representado, para las dos tipologías de pavimento analizadas, como cambia la variación máxima permitida de la humedad del polvo con el tamaño final de la pieza. Por simplicidad, se muestran únicamente los gráficos correspondientes a las densidades aparentes en seco de 1980 y 2020 kg/m³, conseguidas, respectivamente, a una presión máxima de prensado de 37,5 MPa, para la composición de porcelánico, y de 30 MPa, para la de gres esmaltado, ambas a una humedad de 5,5%. La variación máxima de la presión de prensado, (ΔP_{\max}^*), se ha establecido en los dos casos en 1,0 MPa, valor que contemplaría, tanto las posibles oscilaciones de la presión máxima originadas entre ciclos de prensado, consecuencia de las imprecisiones del sistema de control del circuito hidráulico de la prensa, como las diferencias de presión máxima alcanzadas entre los alveolos de la prensa en un mismo ciclo de prensado. Cabe indicar que este valor de (ΔP_{\max}^*) es meramente orientativo, pues su magnitud va a depender del número de cavidades del molde y de la propia regulación de la carga de polvo.

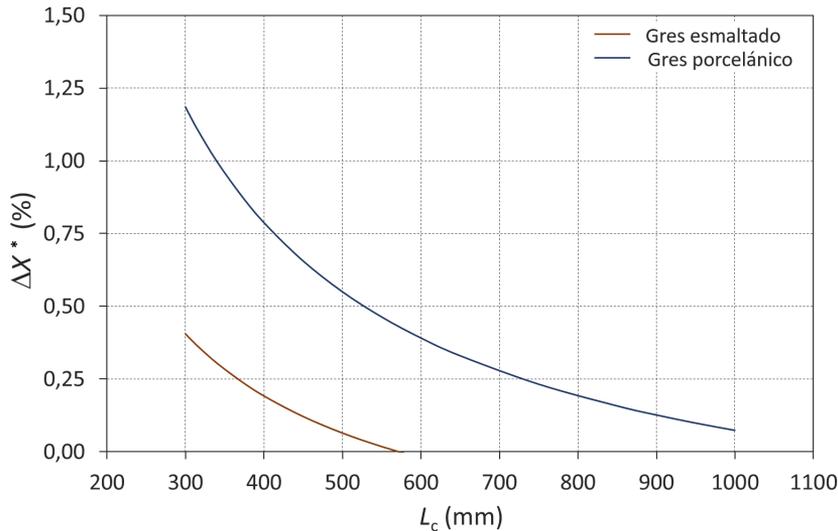


Figura 1.26. Variación máxima permitida de la humedad del polvo atomizado en función del tamaño final de pieza fabricada, para una composición de gres esmaltado y otra de gres porcelánico ($\Delta T_{\max}^* = 5$ °C, $\Delta P_{\max}^* = 1$ MPa).

Como podría esperarse, atendiendo a la mayor sensibilidad frente a las variaciones de la densidad aparente en seco y de la temperatura máxima de cocción de las composiciones de gres esmaltado, esta composición es la que muestra también valores más restrictivos de la variación máxima permitida de la humedad del polvo de prensado. Según la figura 1.26, aunque para ambas composiciones la variación máxima de humedad tolerable disminuye con el aumento del tamaño de la pieza, la composición de gres porcelánico muestra valores sensiblemente superiores a la de gres esmaltado. Así, por ejemplo, para las condiciones de operación evaluadas, no podría tolerarse ninguna variación de humedad del polvo, para poder fabricar piezas de gres esmaltado de tamaño superior a, aproximadamente, 550,0 mm. En cambio, para este mismo tamaño de pieza, la composición de gres porcelánico permitiría cambios de humedad de hasta 0,4% manteniendo las piezas fabricadas dentro de una tolerancia de 1,0 mm. En cualquier caso, incluso para el gres porcelánico, las variaciones máximas de humedad permitidas son muy restrictivas y esta es la razón por la que el control de la humedad del polvo atomizado es crítico para asegurar una buena estabilidad dimensional del producto terminado.

Para concluir con este apartado, seguidamente, en la figura 1.27, a modo de ejemplo, se recogen los mapas de distribución de densidad aparente en seco, obtenidos por absorción de rayos X [57][58], de cuatro soportes de gres porcelánico destinados a la fabricación de piezas de tamaño nominal en cocido de 600,0 mm x 300,0 mm, conformados en una prensa industrial en dos condiciones de operación distintas. En concreto, se muestran los mapas de densidad aparente en seco de soportes compactados en dos ciclos de prensado efectuados a la misma presión máxima (35 MPa), pero a diferente humedad del polvo de prensado, 5,5% (ciclo A) y 6,5% (ciclo B), respectivamente. Los valores indicados en la parte baja de cada soporte corresponden a la densidad aparente en seco media de cada uno de ellos.

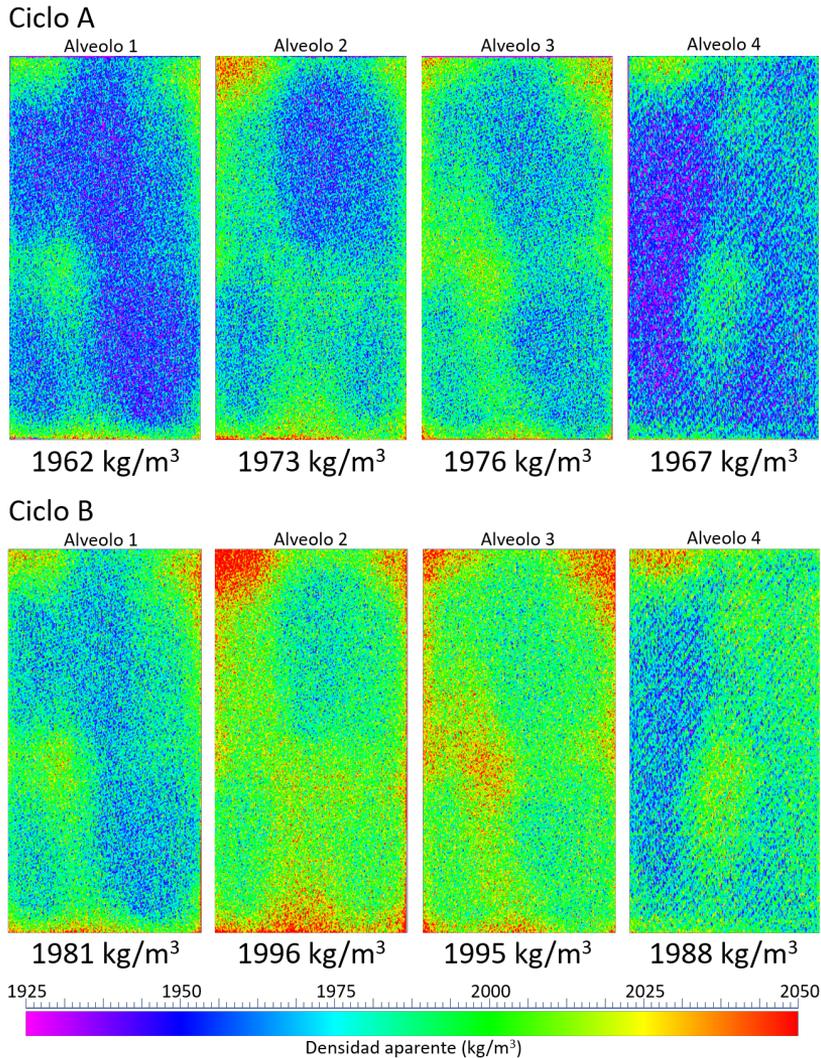


Figura 1.27. Mapas de la distribución de la densidad aparente en seco de varios soportes de gres porcelánico conformados en una misma prensa industrial en diferentes condiciones de operación. Ciclo A: $P_{\max} = 35$ MPa, $X = 5,5\%$; Ciclo B: $P_{\max} = 35$ MPa, $X = 6,5\%$.

Como puede apreciarse, el aumento de humedad del 1,0% experimentado en el ciclo B, con respecto al ciclo A, supone un aumento de la densidad aparente media de todos los soportes. El valor promedio de la densidad aparente en seco de los soportes conformados a baja humedad resulta ser de 1970 kg/m³, mientras que el de los conformados a mayor humedad es de 1990 kg/m³. Atendiendo a los datos plasmados en la figura 1.23, para piezas de tamaño final 600,0 mm, la variación de densidad aparente que podría tolerarse sin superar una tolerancia de 1,0 mm en una composición de gres porcelánico, para una densidad aparente media de 1970

kg/m^3 , sería, aproximadamente, de 10 kg/m^3 . Así pues, con total seguridad, podría afirmarse que las piezas correspondientes al ciclo B serían de un calibre mayor que las conformadas en el ciclo A, dado que la diferencia de densidades aparentes (20 kg/m^3) supera este límite de variación máxima permitida.

Las diferencias de tamaño entre las piezas obtenidas en cada ciclo de prensado, también podría justificarse en base a los datos mostrados en la figura 1.24, según la cual un cambio de humedad de únicamente 0,4 % sería el origen de la fabricación de piezas fuera de tolerancia. En el caso mostrado, la diferencia de humedad es algo más de dos veces superior, lo que justifica una diferencia de densidades aparentes medias de 20 kg/m^3 , también el doble de la variación máxima tolerada.

Además, también puede decirse que, para un mismo ciclo de prensado, la diferencia de densidad aparente media entre las piezas conformadas en los alveolos 1 y 4, con respecto a la de las piezas conformadas en los alveolos centrales 2 y 3, supera también el valor de variación máxima permisible. Los soportes conformados en el ciclo de prensado A muestran una diferencia de densidad aparente en seco máxima de 14 kg/m^3 , entre la pieza del alveolo 1 y 3, y los conformados en el ciclo B una diferencia de 15 kg/m^3 entre la del alveolo 1 y la del 2. Por lo tanto, las propias piezas obtenidas dentro de un mismo ciclo de prensado presentarán tamaños finales con diferencias que superarán la tolerancia de 1,0 mm y serán de distinto calibre. En este caso, los calibres estarían originados por una distribución de la presión máxima de prensado, bien sea por deformaciones diferenciales de la estructura de la prensa o por una deficiente distribución del polvo de prensas en los alveolos. Un comportamiento similar se aprecia en las piezas conformadas en el ciclo B.

1.2.3.3 Acciones destinadas a reducir la incidencia de los calibres en la clasificación final

Las acciones expuestas en el apartado 1.2.2.2.2, las cuales permiten minimizar la influencia de los gradientes térmicos sobre la tendencia a la aparición de descuadras, gracias a la adecuada regulación de las condiciones de funcionamiento de los hornos, son también aplicables a la reducción de la tendencia a la aparición de calibres en la clasificación final.

Respecto a las variaciones de la temperatura máxima de cocción que puedan tener lugar como consecuencia de las interrupciones de alimentación del horno, las acciones de mejora se limitan a garantizar la mayor continuidad posible del flujo de soportes alimentado al horno. Entre las medidas empleadas industrialmente para minimizar la incidencia de estas fluctuaciones destacan, por un lado, el trabajar con un pulmón intermedio de vagonetas entre las secciones de esmaltado y el horno, que permite independizar el funcionamiento de este último de las interrupciones que puedan darse en las etapas de conformado, secado y decoración. Y por otro lado, también está bastante extendido el uso de sistemas de acumulación de piezas a la entrada del horno, conocidos comúnmente en el argot industrial como “compensers”, los cuales garantizan la alimentación del horno durante un cierto tiempo (del orden de los minutos) para minimizar el efecto de las interrupciones que puedan tener lugar “aguas arriba” de la boca del horno, incluso cuando se trabaja con pulmones intermedios de vagonetas.

De cualquier modo, las acciones encaminadas a garantizar la homogeneidad y constancia de las condiciones de cocción están básicamente relacionadas con el estado de mantenimiento y regulación de los hornos, así como con la gestión operacional del proceso. Por ello, se considera más oportuno exponer a continuación con mayor detalle, únicamente las acciones que se han venido empleando en los últimos años para intentar mantener constante la densidad aparente en seco media de todos los soportes conformados, con vistas a mantener el tamaño final medio de las piezas dentro de unos límites de variación lo más estrechos posible. Como podrá comprobarse, estas intervenciones guardan mayor relación con el control de las propiedades del producto semielaborado, que las propiamente realizadas en la cocción, pudiéndose considerar como el estado del arte previo a la realización de este estudio.

1.2.3.3.1 Uso de sistemas isostáticos de homogeneización

Tradicionalmente, las diferencias de la densidad aparente generadas entre los alveolos del molde se han compensado mediante el uso de pletinas metálicas, tal y como se ha comentado anteriormente que puede realizarse, puntualmente, para solventar problemas de descuadre. Sin embargo, dadas las limitaciones de dicha técnica, se han ido paulatinamente desarrollando soluciones de compensación de la densidad aparente entre los alveolos de los moldes basadas en el uso de sistema isostáticos.

Así, en un principio, se planteó el uso de sistemas de punzones isostáticos interconectados entre sí, de tal manera que la compensación hidráulica aportada por el aceite se efectuase, no únicamente en el seno de cada pieza, sino también entre los alveolos del molde. Al aplicar la presión, el aceite homogeneizaba la distribución de presión en cada cavidad, pero también igualaba las posibles diferencias de presión que pudieran darse entre piezas. Este sistema tuvo escasa aceptación por presentar un mantenimiento complejo y por el hecho de estar asociado al funcionamiento del útil del molde (el punzón) que está sometido a mayores tasas de desgaste, requiriendo de una reposición frecuente.

Por esta razón, más recientemente se han empezado a utilizar las conocidas como placas porta-punzones isostáticas para llevar a cabo la compensación de las posibles diferencias de densidad entre alveolos y minimizar su incidencia sobre la falta de estabilidad dimensional del producto. Estas placas, a diferencia de las convencionales en las que los punzones del molde se anclan a su superficie directamente mediante un sistema de electro-imanés, disponen de un sistema hidráulico interno que conecta los diferentes bloques magnéticos en los cuales se colocan los punzones. Esta forma constructiva permite que las diferencias de carga entre los alveolos del molde sean compensadas a través de la cámara isostática común a todos los punzones, al asegurar que la presión máxima aplicada sobre el polvo en cada alveolo sea muy similar.

El uso de placas isostáticas, junto con una buena regulación del sistema de alimentación de polvo al molde, es la solución tecnológica más adecuada para garantizar una buena homogeneidad de las densidades aparentes medias entre soportes obtenidos en un mismo ciclo de prensado. Su utilización es especialmente importante en moldes con múltiples cavidades, como el que podría equiparse con la placa isostática mostrada en la figura 1.28, la cual alberga siete punzones de forma rectangular.



Figura 1.28. Placa porta-punzones isostática para un molde dotado de siete cavidades (cortesía de MACER S.L.).

1.2.3.3.2 Control manual de la densidad aparente de los soportes recién prensados

Dada la incidencia que tienen las variaciones de la humedad del polvo alimentado a las prensas y de la densidad aparente en seco sobre el comportamiento de los soportes durante su procesado, su control es esencial para garantizar la estabilidad dimensional del producto fabricado. El control de las variables de operación críticas de la etapa de conformado, se realiza de manera manual. Este consiste en la medida regular (una o dos veces por turno productivo) de la densidad aparente en húmedo de los soportes recién prensados y la determinación de la humedad del polvo atomizado (generalmente, una vez cada hora) haciendo uso de una termobalanza.

En base a los controles realizados, los operarios de las secciones de conformado actúan sobre los parámetros de la prensa para tratar de mantener, dentro de unos límites máximos de variación preestablecidos, la densidad aparente de los soportes fabricados. Por una parte, los controles de densidad aparente en húmedo son empleados para homogeneizar la distribución de densidades aparentes dentro de cada pieza y entre las piezas conformadas en un mismo ciclo de prensado. Por otro parte, los controles de humedad permiten regular la presión máxima de prensado para tratar de mantener constante en el tiempo la densidad aparente de los soportes.

En el gráfico de la figura 1.29 se muestra, para un periodo de tiempo de 8 horas, la evolución de la humedad de los soportes recién prensados a la salida de una prensa industrial dotada de un molde de 4 salidas destinado a la fabricación de piezas de gres porcelánico de tamaño nominal final 300,0 mm x 600,0 mm. Dicha evolución fue registrada con un transductor de humedad por absorción de infrarrojos utilizado en el desarrollo de este trabajo de investigación. Junto a la humedad medida de manera continua (línea azul), se representan los datos referentes a los controles manuales de humedad (cuadrados naranja) realizados de forma horaria y en base a los cuales se actúa sobre la presión máxima de prensado alcanzada durante el ciclo de compactación. Además, también se recogen en el gráfico dichos cambios en la presión máxima de consigna efectuados por los operarios (línea roja).

Como puede apreciarse, el control manual de la operación de prensado, aunque permite actuar ante los cambios de la humedad del polvo atomizado, es excesivamente lento, debido a su carácter discontinuo. Esto origina que pese a los cambios efectuados

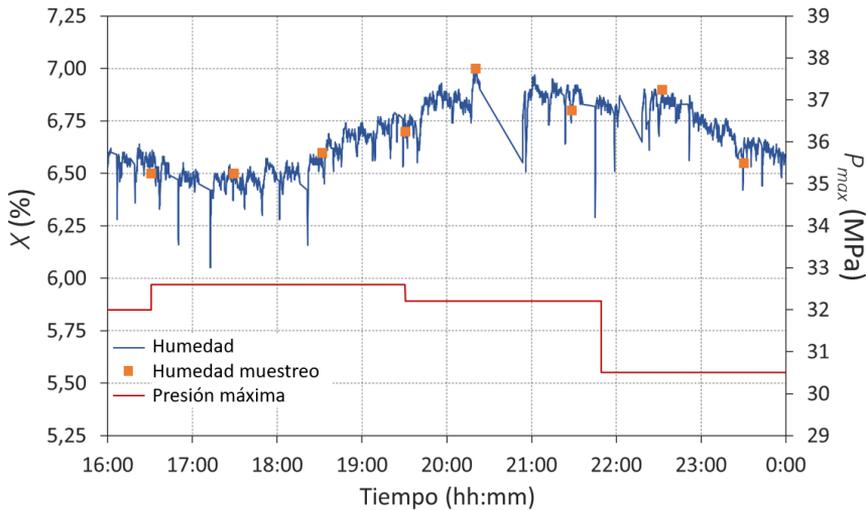


Figura 1.29. Evolución de la humedad de los soportes recién prensados y de la presión de prensado según una metodología de control manual de la densidad aparente.

en la presión máxima de prensado, para compensar las variaciones de humedad, la densidad aparente en seco media de los soportes presente variaciones muy próximas e incluso superiores a la variación máxima permitida para garantizar la estabilidad dimensional del producto. En efecto, en la figura 1.30 se muestra la evolución estimada de la densidad aparente en seco, para el mismo periodo de tiempo, obtenida mediante el diagrama de compactación de la composición de trabajo. Como consecuencia de los cambios de humedad experimentados por el polvo entre cada uno de los muestreos de humedad horarios, la densidad aparente en seco se modifica rebasando, puntualmente, los límites de variación máxima marcados por las líneas discontinuas (10 kg/m^3 para un tamaño nominal de $600,0 \text{ mm}$ y una densidad aparente en seco de consigna de 1980 kg/m^3). Esto provoca, necesariamente, la aparición de piezas en la clasificación final fuera de las tolerancias del calibre, en este caso establecida en $1,0 \text{ mm}$.

Hay que tener en consideración que la estimación de densidad realizada corresponde al valor medio de la densidad aparente en seco de todos los soportes obtenidos en cada ciclo de prensado. Puesto que en la práctica industrial es muy probable que existan diferencias de densidad aparente media entre los soportes obtenidos en un mismo ciclo de prensado, la dispersión de la densidad de los soportes conformados será aún más grande, situándose un mayor número de piezas fuera de las tolerancias de variación permitidas.

El principal inconveniente de esta forma de proceder reside en el hecho de que, además de ser un control manual, en la mayoría de los casos, se realiza tratando de mantener constante un valor de la densidad aparente en húmedo de los soportes, lo cual es un grave error. Si bien es cierto que la densidad aparente en húmedo es de gran utilidad para controlar las diferencias de densidad que puedan darse en el seno de las piezas y entre las piezas obtenidas en las diferentes cavidades del molde, esta

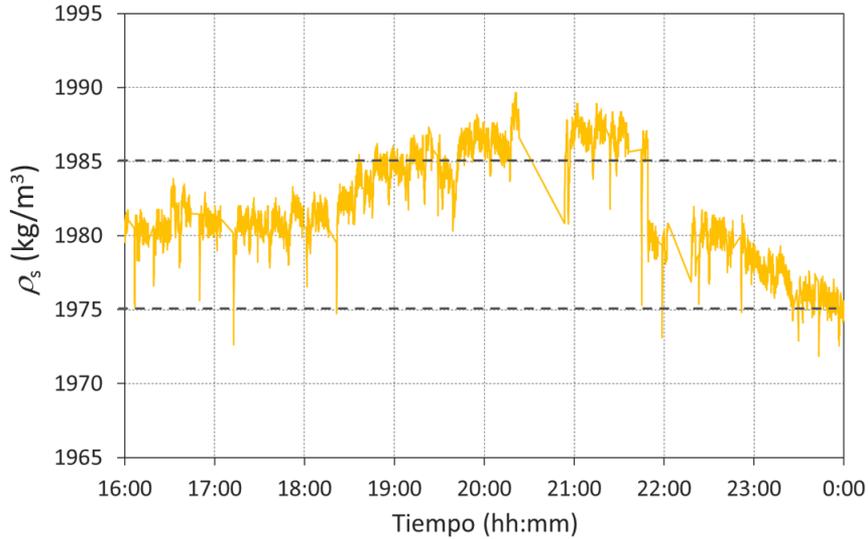


Figura 1.30. Estimación de la evolución de la densidad aparente en seco de los soportes recién prensados según una metodología de control manual de la densidad aparente.

variable no puede tomarse como variable de control para garantizar la ausencia de calibres en la clasificación final. En efecto, la variable directamente relacionada con la porosidad del soporte es la densidad aparente en seco y no la densidad aparente en húmedo, ya que esta última depende, además de la porosidad del soporte, de su propio contenido en humedad, el cual, como se ha explicado, sufre variaciones significativas a lo largo del tiempo.

En el mejor de los casos, el control del prensado se realiza estimando la densidad aparente en seco media de los soportes recién prensados, a partir de la medida de la densidad aparente en húmedo y de la humedad del polvo atomizado. Procediendo de este modo, el control de la operación de conformado es mucho más riguroso, pero sigue mostrando inconvenientes relacionados con su carácter discontinuo y con las posibles imprecisiones asociadas a su ejecución manual, tal y como ha quedado comprobado en el ejemplo de la figura 1.29.

1.2.3.4 Incidencia habitual de los calibres en la clasificación final

Como se ha expuesto en los apartados anteriores, en los últimos 30 años se han producido importantes avances en el conocimiento del comportamiento del producto a lo largo de su proceso de fabricación y se han implementado acciones, tanto en la operación de conformado, como en la etapa de cocción, para tratar de estabilizar la variabilidad dimensional de las baldosas cerámicas. Sin embargo, pese a estos avances tecnológicos, la falta de estabilidad dimensional del producto sigue siendo un problema acuciante en la gran mayoría de las empresas fabricantes.

Un sondeo realizado entre varias empresas del sector cerámico español ha revelado que para baldosas de tamaño nominal cocido inferior a 500,0 mm, la cantidad de piezas en la clasificación final que presentan descuadre es relativamente baja, inferior

al 0,05 % de la producción total. Sin embargo, la cantidad de piezas con defecto de descuadre aumenta a medida que se incrementa el tamaño nominal de las piezas, como consecuencia de la mayor dificultad de mantener una buena homogeneidad de la distribución de densidad aparente y/o de minimizar la incidencia de los gradientes transversales en el horno. De este modo, para baldosas cerámicas de tamaño nominal cocido superior a 500,0 mm, los defectos de descuadre pueden llegar a afectar a entre un 0,5 y un 1 % de la producción.

Según estos datos, el grado de incidencia de los descuadres, en el conjunto de la producción, es relativamente bajo y, además, se ve constantemente reducido gracias a las mejoras tecnológicas realizadas en los sistemas de fabricación (desarrollo de nuevas tipologías de punzones isostáticos, mejoras en los sistemas de alimentación de polvo, mejoras en los sistemas de prensado y cocción, etc). En cambio, no puede decirse lo mismo respecto a la incidencia de los calibres, los cuales son un problema de fabricación cotidiano, tal y como puede comprobarse a continuación en base al análisis de datos recopilados de varias empresas del sector.

En la figura 1.31 se recoge una distribución de calibres obtenida durante 5 meses de producción en una empresa del sector cerámico español, para baldosas de gres porcelánico de tamaño nominal cocido 330,0 mm x 330,0 mm. Esta clasificación corresponde a aproximadamente una producción total de 250.000 m² de producto para una tolerancia entre calibres de 1,0 mm.

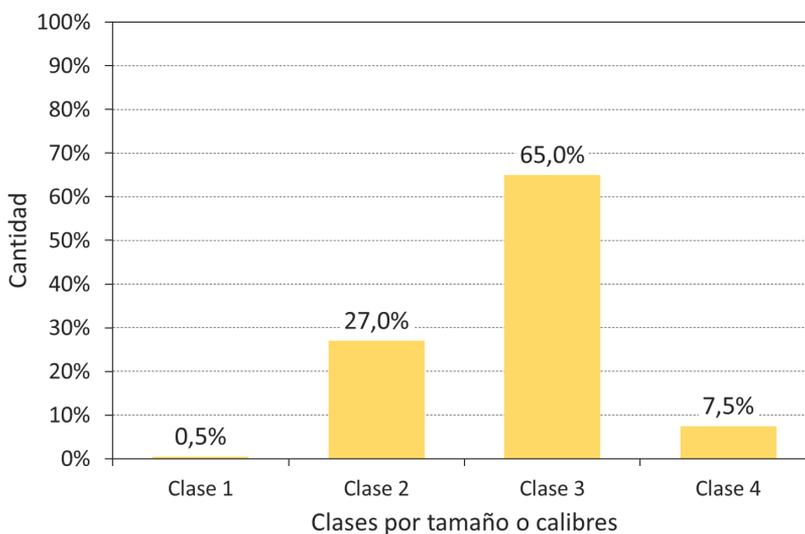


Figura 1.31. Distribución típica de tamaños de baldosas de gres porcelánico de tamaño nominal 330,0 mm x 330,0 mm.

Se observa que la producción se distribuye en dos calibres mayoritarios, entre los cuales constituyen el 92 % de la producción, y otros dos calibres minoritarios. Aunque estos calibres minoritarios supongan únicamente un 8 % del total, al tratarse de una cantidad de piezas considerable, las clasificadas dentro de estos dos calibres residuales suponen un total de 20.000 m² de producto. Esta misma situación, con entre

tres y cuatro calibres, se ha comprobado que suele darse en otras empresas para el tamaño nominal de pieza considerado.

Al realizar el mismo tipo de análisis para piezas de tamaño superior, se comprueba que el número de calibres se sitúa siempre por encima de cuatro, llegando, en muchas ocasiones, a seis. En la figura 1.32 se representa la cantidad de piezas de cada calibre obtenida durante un periodo de tiempo de tres meses en una empresa de tamaño medio del sector cerámico español, para piezas de gres porcelánico de tamaño nominal cocido 300,0 mm x 600,0 mm. En este caso, la tolerancia de calibre se sitúa en 1,2 mm y la producción total asciende a 60.000 m².

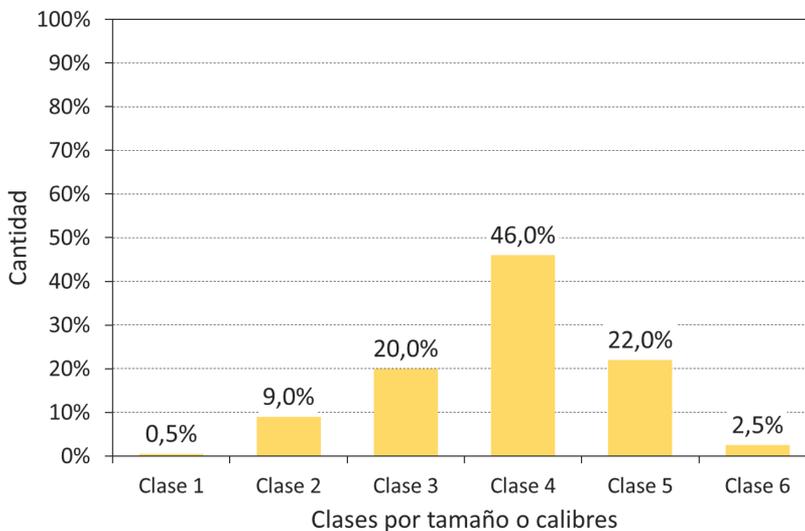


Figura 1.32. Distribución típica de tamaños de baldosas de gres porcelánico de tamaño nominal 300,0 mm x 600,0 mm.

A pesar de que la tolerancia respecto al ejemplo anterior es superior, el número de clases de producto obtenidas en la clasificación final se incrementa hasta un total de seis, debido a la mayor dificultad de mantener la estabilidad del producto en piezas de mayor tamaño nominal. Igualmente, sigue presentándose un calibre mayoritario, pero en este caso, incluye menos del 50 % de la producción, distribuyéndose un 88 % de las piezas fabricadas en tres calibres distintos. El resto de la producción, 7.200 m², se clasifica dentro de otros tres calibres minoritarios. Para la tolerancia de calibre de 1,2 mm considerada, la existencia de seis calibres supone unas diferencias de tamaño máximas entre las piezas producidas de hasta 7,2 mm.

De manera generalizada, para los tamaños mayoritariamente fabricados en las empresas del sector cerámico español, entre 300 y 1200 mm, las clasificaciones finales de producto presentan entre 3 y 6 calibres distintos. Además, cuanto mayor es el tamaño de las piezas fabricadas, mayor es el número de calibres generados, incluso cuando las tolerancias dimensionales se incrementan en consonancia. En este sentido, en la tabla 1.4 se resumen los datos recopilados de tres empresas distintas para una producción total de 1,5 millones de metros cuadrados de producto porcelánico

en cuatro tamaños nominales distintos, 330 mm x 330 mm, 450 mm x 450 mm, 300 mm x 600 mm y 600 mm x 600 mm. Como puede comprobarse, en promedio, las empresas del sector presentan para esta tipología de productos 5 calibres por lote, de los cuales 2 o incluso 3 suelen ser los mayoritarios, lo cual implica, para las tolerancias medias habitualmente empleadas, una variación máxima del tamaño de las piezas de 5,5 mm.

Tabla 1.4. Incidencia típica de calibres en la producción de gres porcelánico de tres empresas del sector cerámico español para un total de 1,5 millones de metros cuadrados fabricados en 4 tamaños de pieza diferentes.

Empresa	Número de calibres	Calibres mayoritarios	Variación máxima de tamaño (mm)
A	5	2	5,0
B	6	3	6,0
C	5	2	5,5
Promedio	5 ó 6	2 ó 3	5,5

Los problemas asociados a la generación de piezas de distinto tamaño se ponen de manifiesto en la etapa de clasificación y embalado final del producto y tienen gran incidencia en su posterior almacenamiento y distribución. Las piezas inspeccionadas y consideradas como no defectuosas son clasificadas por clases en función de su calibre y tonalidad, asignándoles una referencia concreta mediante la cual se gestiona su almacenamiento y comercialización. Así, cuanto mayor es el número de calibres que se generan para un determinado producto, mayor es también el número de referencias que se hace necesario manejar y el espacio requerido para el almacenamiento de las baldosas. Para una empresa de tamaño grande, con un catálogo de productos del orden de los 1000 modelos diferentes, esto supone tener que gestionar como mínimo entre 10.000 y 13.000 referencias distintas [75].

Aunque existen empresas que trabajan con una clase única de producto asociada a su tonalidad y acabado superficial, lo habitual es que se definan al menos dos clases referidas a la tonalidad y otras dos correspondientes al acabado superficial, las cuales, unidas a las diferencias de tamaño, dan como resultado, en muchos casos, la existencia de entre 10 y 13 referencias comerciales distintas por modelo. La gestión de un número de referencias tan elevado dificulta considerablemente todas las operaciones relacionadas con el almacenamiento, comercialización y logística de las baldosas cerámicas. En efecto, una vez encajadas, las piezas cerámicas se apilan en palets de madera de forma que, en cada uno de ellos, únicamente se colocan cajas con la misma referencia de tonalidad y calibre. Cuanto mayor es el número de referencias de producto generadas durante la producción de un determinado modelo o lote, más grande es el espacio requerido para almacenar los palets previamente a su comercialización. Del mismo modo, es muy habitual que las últimas cajas de baldosas clasificadas en cada clase no consigan completar un palet, de tal forma que suelen producirse excedentes productivos que por corresponder a pequeñas cantidades de producto son difícilmente comercializables.

Junto con los problemas relacionados con el espacio requerido para el almacenamiento, otro inconveniente provocado por la falta de estabilidad dimensional del producto terminado es la necesidad de fabricar lotes más grandes que lo realmente necesario. Tanto si lo que se requiere es reponer una cierta cantidad de stock, como si se desea satisfacer un pedido concreto, las plantas se ven obligadas a sobreproducir. Para asegurar la fabricación de las cantidades de producto requeridas por el stock o un determinado cliente dentro de las especificaciones de tamaño requeridas, es necesario fabricar una mayor cantidad de producto. Como consecuencia de esta forma de operar, suelen generarse cantidades no despreciables de piezas que se quedan en los almacenes debido a que su calibre o tonalidad no es la deseada, ocupando espacio adicional y con altas probabilidades de no poder ser comercializadas.

En la vista aérea de la figura 1.33 se muestra una zona industrial del *cluster* cerámico de Castelló en la que se evidencia el gran espacio ocupado por el producto acabado debido, precisamente, a la gran cantidad de referencias puestas de manifiesto. En concreto, en el caso mostrado, se resaltan en sombreado azul tres plantas productivas existentes en la zona y en sombreado amarillo el espacio de almacenamiento ocupado por el producto fabricado por las tres plantas. Para minimizar esta problemática, algunas empresas optan por almacenar el producto acabado en almacenes verticales automáticos, en los cuales la gestión y manipulación de los palets se encuentra completamente automatizada. Este tipo de sistemas optimiza el espacio destinado al almacenamiento al aprovechar una mayor altura vertical, sin embargo, por la elevada inversión que suponen, su uso no está muy extendido entre las empresas cerámicas.



Figura 1.33. Vista aérea de una zona industrial del *cluster* cerámico de Castelló reflejando el espacio destinado a plantas productivas (sombreado azul) y a almacenamiento de producto terminado (sombreado amarillo). (Fuente: www.google.es/maps).

1.3 Cambios dimensionales durante el procesado

A pesar de que los fenómenos físicos que dan lugar a la aparición de los calibres en las clasificaciones finales de producto son conocidos, es evidente, como se desprende de los datos mostrados en el apartado 1.2.3.4, que el control de los mismos no es adecuado, dada la elevada incidencia que presentan de manera generalizada en las empresas cerámicas. Por ello, se considera interesante realizar un análisis pormenorizado de todos los cambios dimensionales que experimentan los soportes cerámicos a lo largo de su procesado. A partir del mismo será posible establecer las ecuaciones que describen sus cambios dimensionales y definir estrategias de control del tamaño final de las piezas cocidas, con el fin de minimizar la incidencia de los calibres.

En el presente apartado se describe la nomenclatura empleada en el trabajo para trazar los cambios dimensionales de la pieza a lo largo de su fabricación y se plantean las ecuaciones que describen dicha variación dimensional, en función de las variables de proceso. Hay que indicar que, en la introducción del documento, al exponer la importancia de los diagramas de compactación y gresificación, algunas de las variables indicadas a continuación han sido expuestas siguiendo la nomenclatura habitualmente utilizada en la bibliografía. Sin embargo, se ha considerado oportuno definir una nomenclatura específica para esta investigación que, de una manera más clara y homogénea, permita identificar inequívocamente las variables relacionadas con cada una de las etapas involucradas en el proceso de fabricación.

1.3.1 Nomenclatura

En la figura 1.34 se presenta el diagrama de flujo de los cambios dimensionales que experimenta un soporte cerámico destinado a la fabricación de gres, a lo largo de todas las etapas del proceso. En el mismo, se refleja el cambio dimensional experimentado por el soporte en cada etapa (definida por el subíndice i) de manera proporcional al espesor de la pieza (h_i), por lo que la longitud del lado (L_i o W_i , según se considere la longitud o la anchura), mucho mayor que el espesor, no ha sido representada en su totalidad. En el lateral derecho del esquema se muestran las variables independientes, las cuales quedan fijadas según las condiciones de operación del proceso, y en el lado izquierdo se anotan las variables dependientes de las anteriores, entre las que se encuentran las dimensiones de la pieza. En conjunto, las variables de proceso ilustradas son las siguientes:

- h_i : espesor de la pieza (mm)
- L_i : longitud característica de la pieza (longitud de lado, en pieza rectangular, o diámetro en probetas cilíndricas de laboratorio) (mm)
- X_i : humedad del polvo alimentado a los alveolos de la prensa ($i = 0$) o en el soporte conformado ($i = 1$) (kg agua/kg sólido seco o simplemente (%))
- D_i : densidad aparente de la pieza (kg/m^3)
- m_i : masa de la pieza (kg)
- P_1 : presión máxima aplicada sobre el polvo durante el ciclo de prensado (MPa)
- T_4 : temperatura máxima del ciclo de cocción ($^{\circ}\text{C}$)
- S_i : contracción ($S_i > 0$) o expansión ($S_i < 0$) lineal experimentada por la pieza en cada etapa del proceso (%)

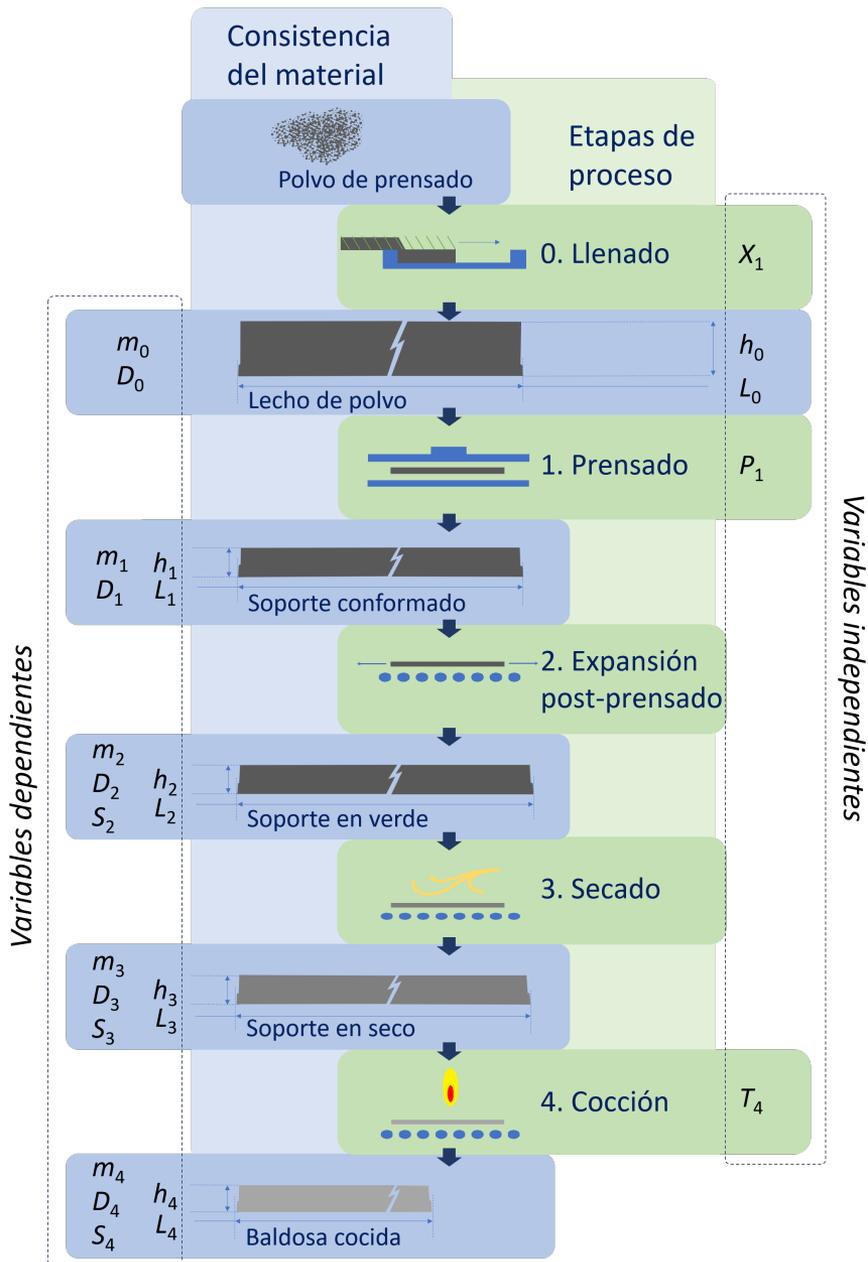


Figura 1.34. Diagrama de flujo mostrando la variación dimensional del producto a lo largo de su proceso de fabricación y las variables de las que depende.

Como puede observarse en el esquema, el cambio dimensional más importante tiene lugar durante la cocción del soporte, como consecuencia de la contracción lineal (S_4) que acompaña a la sinterización, la cual origina que el tamaño de la baldosa cocida, (L_4), sea mucho menor que el del soporte seco (L_3). Ahora bien, teniendo en cuenta

que las tolerancias dimensionales de calibre exigidas al producto son del orden de los milímetros, el resto de los cambios dimensionales que suceden durante el procesado en crudo del material, aunque son relativamente pequeños, no son despreciables, como se verá a lo largo del trabajo, desde el punto de vista de su incidencia sobre la generación de calibres.

Así, por una parte, los soportes experimentan un cambio dimensional importante tras el conformado, debido a la reacción elástica asociada a su expansión post-prensado (S_2). Dependiendo de la naturaleza de las materias primas presentes en la composición del soporte y de las condiciones de conformado, dicha expansión post-prensado puede variar de manera considerable, generalmente entre un 0,5 % y un 1,0 % del tamaño del alveolo (L_0).

Por otra parte, los soportes sufren una ligera contracción (S_3) durante su secado, que está relacionada con la reducción del volumen que implica la eliminación del agua contenida en su interior. Sin embargo, con respecto a los otros cambios dimensionales (S_2 y S_4), la magnitud de la contracción de secado suele ser muy poco significativa (<0,3 %). De todos modos, hay que indicar que, industrialmente, tras el secado los soportes se someten a un ligero desbarbado de sus bordes, cuyo cambio dimensional estaría incluido en este término de contracción, para eliminar posibles irregularidades y dejar la pieza lista para su esmaltado. Si esta operación no se realiza cuidadosamente, en ocasiones, el desbastado ejecutado sobre el soporte puede llegar a reducir su tamaño, incluso más que la propia contracción de secado.

A pesar de que en el esquema se muestran las variaciones de espesor de la pieza, las ecuaciones de comportamiento posteriormente introducidas solo harán referencia a los cambios dimensionales de la longitud de sus lados. Si bien los cambios dimensionales en la longitud de los lados tienen una magnitud cuantificable a nivel industrial con los sistemas habituales de control (equipos de clasificación), los cambios de espesor tras el prensado son muy pequeños, por lo que, tradicionalmente, sus variaciones han tenido poco interés desde el punto de vista del control industrial. Además, las prensas hidráulicas más modernas están equipadas con un sistema de control del espesor que da solución a las posibles variaciones experimentadas por este parámetro. El sistema de control se basa en la estimación del espesor de los soportes recién prensados (h_1) a través de la medida del desplazamiento máximo alcanzado por el travesaño móvil de la prensa en cada ciclo de prensado. En función de la variación de espesor detectada, el sistema de control modifica la cota de la primera caída del molde en cada ciclo de prensado (h_0), para cambiar la cantidad de polvo alimentado al alveolo (m_0) y corregir, de este modo, el espesor del soporte conformado.

Si se detecta un aumento del espesor de los soportes, respecto a un valor de consigna preestablecido, el sistema disminuye la cota de la primera caída del molde para introducir menos polvo en los alveolos y reducir el espesor de las piezas. Y al contrario, si se detecta una reducción del espesor, el sistema actúa aumentando la cota de la primera caída para aportar una mayor cantidad de polvo a las cavidades del molde y volver a incrementar el espesor de los soportes conformados. Este sistema de control funciona aceptablemente bien gracias a que el cambio de espesor que experimenta el soporte durante la cocción es de pequeña magnitud y se mantiene constante dentro

de las condiciones habituales de operación, de tal manera que un control del espesor del soporte conformado garantiza la estabilidad del espesor de la baldosa cocida (h_4).

Realizada esta consideración acerca de la variación del espesor del producto fabricado, resulta interesante constatar que cualquier variación lineal del tamaño de las piezas (S_i) puede ser estimada con la ecuación 1.19, la cual, aplicada a la contracción lineal durante la cocción, equivaldría a la ecuación 1.3.

$$S_i = \frac{L_{i-1} - L_i}{L_{i-1}} 100 \quad (1.19)$$

El tamaño de los compactos recién prensados (L_1) se mantiene constante en el tiempo, para un determinado tamaño nominal de pieza, al quedar fijado por una variable independiente de proceso como es el tamaño de la cavidad del molde ($L_0 = L_1$). Teniendo en cuenta esto, es posible estimar directamente el tamaño final de la pieza (L_4), mediante la ecuación 1.20, a partir del tamaño del soporte conformado (L_0), la expansión post-prensado (S_2) que experimenta y las respectivas contracciones lineales de secado (S_3) y de cocción (S_4). Dicha ecuación se ha obtenido aplicando recursivamente la ecuación 1.19 a las diferentes etapas de proceso y, en ella, S_2 adquiere valores negativos, al tratarse de una expansión del tamaño de la pieza, y S_3 y S_4 adoptan valores positivos, por implicar una reducción del tamaño.

$$L_4 = \frac{(100 - S_2)(100 - S_3)(100 - S_4)}{10^6} L_0 \quad (1.20)$$

Como se explicará en el siguiente apartado, en esta ecuación, las variables dependientes S_2 , S_3 y S_4 pueden escribirse en función de algunas de las variables independientes recogidas en el esquema de la figura 1.34, lo cual permite estimar el tamaño final de la pieza fabricada en función de sus condiciones de procesado.

1.3.2 Ecuaciones de comportamiento

Con el fin de poder establecer estrategias de control de proceso que permitan reducir la incidencia de la presencia de calibres en las clasificaciones finales, se hace imprescindible poder estimar con precisión, a través de la ecuación 1.20, el tamaño final de las piezas fabricadas. Ello implica, previamente, conocer con exactitud la relación existente entre los cambios dimensionales experimentados por los soportes a lo largo del proceso y los parámetros críticos de cada etapa del mismo.

Para una composición dada, los cambios dimensionales experimentados por los soportes pueden estimarse a partir, exclusivamente, de variables de operación o de ciertas propiedades del polvo atomizado, todas ellas variables independientes. En concreto, según la bibliografía consultada [20], la expansión post-prensado (S_2) y la contracción de secado (S_3) dependen básicamente de la humedad del polvo atomizado (X_1) y de la presión máxima aplicada durante el ciclo de prensado (P_1) (ecuación 1.21 y 1.22). Por su parte, la contracción de cocción (S_4), como ya se indicó previamente, depende de la temperatura máxima de cocción (T_4) y de la densidad aparente en seco de los soportes (D_3) (ecuación 1.24). Esta última variable no es directamente independiente, pero puede ser expresada, a través del diagrama de compactación de

la composición, en función de variables independientes como la humedad del polvo (X_1) y la presión específica máxima de prensado (P_1) (ecuación 1.23).

$$S_2 = f(X_1, P_1) \quad (1.21)$$

$$S_3 = f(X_1, P_1) \quad (1.22)$$

$$D_3 = f(X_1, P_1) \quad (1.23)$$

$$S_4 = f(D_3, T_4) \quad (1.24)$$

A continuación se plantean las relaciones empíricas que permitirán, en este trabajo, establecer dichas ecuaciones o leyes de comportamiento en cada etapa de proceso, inicialmente en condiciones de laboratorio y, posteriormente, a nivel industrial.

1.3.2.1 Llenado del molde y compactación

Según se ha expuesto con anterioridad, durante el conformado se define la microestructura de los soportes, quedando caracterizada su porosidad por una determinada densidad aparente en seco. Dicha densidad aparente en seco, además de afectar a otras muchas propiedades del producto, incide directamente sobre el proceso de sinterización de los productos gresificados, siendo determinante, junto con la temperatura máxima de cocción, en la contracción lineal experimentada por los soportes y, por ello, en el tamaño final de pieza obtenido.

La densidad aparente en seco depende, para una composición dada, exclusivamente de la humedad del polvo atomizado y de la presión máxima de prensado. La relación entre estas tres variables constituye el diagrama de compactación, el cual adopta la forma de la ecuación 1.25, equivalente a la ecuación 1.14 anteriormente planteada, en la que a (kg/m^3), b (kg/m^3), c (kg/m^3) y d (kg/m^3) son parámetros empíricos de ajuste propios de la composición.

$$D_3 = (aX_1 + b) \ln P_1 + (cX_1 + d) \quad (1.25)$$

En la práctica industrial seguida para efectuar el control de la operación de prensado, la variable independiente empleada es la humedad del polvo atomizado alimentado al molde (X_0). Sin embargo, en este trabajo, como se verá más adelante, la variable de control será específicamente la humedad de los soportes recién prensados (X_1), de ahí que en la ecuación 1.25 se emplee dicho valor.

Aunque la variable que guarda relación directa con la microestructura de los soportes es su densidad aparente en seco (D_3), es interesante conocer la relación existente entre esta y la densidad aparente en húmedo (D_2) de los soportes recién prensados, la cual viene definida por la ecuación 1.26.

$$D_3 = \frac{D_2}{\left(1 + \frac{X_1}{100}\right)} \quad (1.26)$$

Esta ecuación es aproximada, al no tener en cuenta el cambio de volumen experimentado por el soporte durante el secado, sino únicamente la pérdida de masa asociada a la evaporación del agua que contiene. A pesar de ello, como la contracción de secado suele ser de muy pequeña magnitud, puede ser empleada a nivel de laboratorio e industrial para estimar la densidad aparente en seco de los soportes a partir de la medida de la densidad aparente en húmedo y de la humedad de polvo con el que han sido conformados. Tal y como se verificará a lo largo del desarrollo de este trabajo, proceder de este modo, aunque puedan existir ciertas imprecisiones en la medida de la humedad dada la rápida fluctuación que suele presentar esta variable en el proceso, es mucho más adecuado que intentar mantener constante la densidad aparente en húmedo de los soportes a la salida de la prensa.

1.3.2.2 Expansión post-prensado

Al cesar la presión a la que está sometida la pieza durante la fase de compactación, la energía elástica que esta ha almacenado ejerce una fuerza normal sobre la pared lateral del molde que la contiene. Una vez extraída de la cavidad, la pieza aumenta su tamaño, fenómeno conocido como expansión post-prensado.

Según la bibliografía consultada [76], la fuerza normal que ejerce la pieza sobre las paredes del molde durante la fase de extracción y, por tanto, su expansión post-prensado, aumenta a medida que se incrementa la presión máxima de prensado y se reduce la humedad del polvo de prensado. En efecto, a una mayor presión, el material adquiere una deformación elástica superior, la cual es posteriormente liberada dando lugar a una mayor expansión del soporte. Del mismo modo, a una menor humedad, la plasticidad desarrollada por las arcillas contenidas en la composición se reduce, originando una mayor reacción elástica del material y, por consiguiente, un incremento de la expansión post-prensado.

Atendiendo al comportamiento del soporte tras su conformado, es posible correlacionar su expansión post-prensado con la humedad del polvo atomizado y la presión máxima de prensado mediante la ecuación 1.27 [70]. Dicha ecuación indica que, en los rangos habituales de trabajo, la expansión post-prensado varía linealmente con la humedad del polvo, dependiendo a su vez, la pendiente y la ordenada en el origen de dicha correlación de la presión máxima de prensado.

$$S_2 = (eP_1 + f) X_1 + (gP_1 + h) \quad (1.27)$$

Los parámetros e (MPa^{-1}), f , g (MPa^{-1}) y h son parámetros de ajuste experimental propios de cada composición. Para que la ecuación 1.27 sea válida y pueda ser empleada en el cálculo del tamaño final de la pieza mediante la ecuación 1.20, es imprescindible que la expansión post-prensado (S_2) se exprese con valores negativos, según la ecuación 1.19.

1.3.2.3 Contracción de secado

Durante el secado de los soportes tiene lugar una contracción del material asociada a la reducción del volumen de la pieza debido a la pérdida de la mayor parte del agua que contiene. Aunque esta contracción es relativamente pequeña, comparada

con, por ejemplo, la contracción de cocción, debe ser tenida en cuenta para asegurar una estimación precisa del tamaño final de las baldosas cocidas. Especial importancia presenta la contracción de secado en la fabricación de baldosas por vía seca, en la cual su magnitud puede ser hasta 10 veces superior a la del mismo producto fabricado por vía húmeda [77].

En la bibliografía consultada [70] se describe una forma sencilla de relacionar la contracción de secado (S_3) con las variables de conformado es haciendo uso de una correlación lineal, como la representada por la ecuación 1.28. En ella la contracción depende linealmente de la humedad de los soportes, siendo la ordenada en el origen y la pendiente una función de la presión de prensado. Según esto, al aumentar la humedad se incrementaría la contracción de secado de las piezas debido a la mayor cantidad de agua eliminada durante el secado y, al aumentar la presión de prensado, disminuiría la contracción de secado, al reducirse la porosidad del material y, por tanto, su capacidad para contraer durante el secado, lo cual está en concordancia con lo propuesto por otros autores [78].

$$S_3 = (iP_1 + j) X_1 + (kP_1 + l) \quad (1.28)$$

Los parámetros i (MPa^{-1}), j , k (MPa^{-1}) y l , serían de nuevo parámetros empíricos de ajuste característicos de la composición de trabajo. Tal y como se ha descrito en el apartado anterior, la expresión 1.28 debería permitir calcular, combinándola con la ecuación 1.19, el tamaño de la pieza seca previamente a la cocción, si se conoce el tamaño del soporte una vez completamente expandido. Para ello, a la hora de obtener los parámetros de ajuste es interesante contemplar la posible reducción de tamaño asociada al desbarbado lateral que sufren los soportes justo a la salida del secadero. Aunque este cambio dimensional no es debido a una transformación físico-química propiamente dicha, es necesario contemplarlo para tener buena precisión en la estimación del tamaño final del producto.

1.3.2.4 Contracción de cocción

Finalmente, el cambio dimensional experimentado por los soportes durante la cocción viene definido por el diagrama de gresificación, introducido en el apartado 1.2.3.2.1. Según lo indicado, la contracción lineal experimentada por el soporte durante la cocción se ajustaría bien a una ecuación cuadrática como la representada por la expresión 1.29, la cual es equivalente a la ecuación 1.4.

$$S_4 = (m D_3 + n) T_4^2 + (p D_3 + q) T_4 + (r D_3 + s) \quad (1.29)$$

Esta ecuación, en la que m ($\text{m}^3/(\text{kg K}^2)$), n (K^2), p ($\text{m}^3/(\text{kg K})$), q (K^{-1}), r (m^3/kg) y s son parámetros empíricos propios de la composición, permite estimar adecuadamente la contracción lineal del producto, siempre que esta tenga lugar de manera macroscópicamente homogénea. Si durante la cocción la pieza sufre excesivas deformaciones o presenta una contracción muy heterogénea, como consecuencia de la presencia de gradientes de densidad en su seno o de la existencia de gradientes térmicos en el horno, la estimación realizada perdería precisión.

1.3.2.5 Resumen de las ecuaciones de comportamiento

Para facilitar la comprensión de la exposición realizada en los siguientes apartados del trabajo, se considera interesante resumir en la tabla 1.5 las ecuaciones que describirían, al menos en condiciones de laboratorio, el comportamiento de los soportes durante su procesado. En concreto, en la misma se recoge, además de la propia ecuación, la variable que cada una de ellas permite estimar, su referencia dentro del documento, los parámetros obtenidos en base a la caracterización de laboratorio y las variables independientes de las que depende la variable calculada. Más adelante, una vez realizada la validación y el escalado del modelo planteado, la tabla se ampliará con parámetros adicionales que completen la descripción del modelo de comportamiento industrial.

Tabla 1.5. Resumen de ecuaciones propuestas para describir el comportamiento en condiciones de laboratorio de las piezas procesadas.

Variable calculada	Ecuación	Ref.	Parámetros	Variables independientes
D_3	$(aX_1 + b) \ln P_1 + (cX_1 + d)$	1.25	a, b, c, d	X_1, P_1
S_2	$(eP_1 + f) X_1 + (gP_1 + h)$	1.27	e, f, g, h	X_1, P_1
S_3	$(iP_1 + j) X_1 + (kP_1 + l)$	1.28	i, j, k, l	X_1, P_1
S_4	$(m D_3 + n) T_4^2 + (p D_3 + q) T_4 + (r D_3 + s)$	1.29	m, n, p, q, r, s	D_3, T_4

2

Motivación, objetivos y alcance

2.1 Motivación

El motivo principal, por el que se plantea este trabajo, es evitar, o al menos minimizar, la obtención de baldosas de diferente calibre al final de su proceso de fabricación por prensado, sobretodo, en productos de baja porosidad. Si bien para evitar la aparición de otros defectos de fabricación como las curvaturas o los descuadres se han llevado a cabo investigaciones y proyectos cuyos resultados han contribuido a su minimización, no ha sucedido lo mismo con los calibres. Esta situación ha sido debida, en gran parte, al hecho de que los calibres no suponen un defecto de fabricación propiamente dicho, pues no impiden que el producto pueda ser comercializado, cosa que si sucede, por ejemplo, con las curvaturas. En efecto, la presencia de calibres únicamente implica administrar el almacenamiento y la logística del producto de una manera particular, a la cual se han adaptado las empresas, dotándose de los instrumentos de gestión adecuados.

A pesar de la aparente normalidad con la que las empresas conviven con la presencia de calibres, el gran número de referencias que supone el trabajar con varios de ellos para un mismo producto, conlleva unos sobrecostes de gestión. Estos costes, muchas veces intangibles para las propias empresas, se estima que son lo suficientemente elevados como para motivar la búsqueda de soluciones a la variabilidad del tamaño final de las baldosas cerámicas.

Independientemente de que las empresas cerámicas hayan podido realizar estudios internos para evaluar el sobrecoste originado por la gestión de múltiples calibres, no existe apenas bibliografía en la que se trate en detalle este asunto. De las referencias consultadas, únicamente el trabajo [79] trata los costes asociados a la existencia de problemas de estabilidad dimensional en la producción de gres esmaltado. Según este estudio, dichos costes pueden desglosarse en otros cuatro:

- Costes de prevención de la variabilidad.
- Costes de inspección de la variabilidad.
- Costes de fallos internos.
- Costes de fallos externos.

En base al estudio de la estructura de costes de una empresa cerámica concreta, el trabajo postula que el sobrecoste de fabricación que puede asociarse a la presencia de problemas de estabilidad dimensional es de 7,2 c€/m² (datos del año 2010), lo cual supone, aproximadamente, un 2% del coste total de fabricación del producto. Este sobrecoste estaría básicamente originado por los fallos internos motivados por la falta de estabilidad dimensional, los cuales supondrían prácticamente un 51% del sobrecoste total. Dentro de estos fallos se enmarcarían la pérdida de valor del producto fabricado fuera de calibre, la venta a precios de saldo de los restos de algunos lotes productivos de calibre difícilmente comercializable y el sobrecoste asociado al mayor espacio de almacenamiento requerido.

Considerando estos valores de sobrecoste, puede estimarse un potencial ahorro, asociado a la eliminación de los calibres en las clasificaciones en una empresa española

media, del orden de 150.000 euros anuales. Extrapolado al conjunto del sector cerámico español el ahorro anual sería de 18 millones de euros.

A estos costes podrían añadirse otros costes intangibles, difíciles de valorar pero que, sin duda, repercuten de manera negativa en las cuentas de resultados de las empresas. Entre ellos, el más significativo es la insatisfacción de los clientes, como consecuencia de recibir producto de diferentes calibres, que puede conducir a la generación de reclamaciones por su parte y, evidentemente, a la pérdida de confianza en el proveedor.

Los ahorros estimados, además, han sido obtenidos considerando una valoración realizada para producto de gres esmaltado. Para el caso del gres porcelánico, un producto con, generalmente, un mayor valor añadido, es muy posible que el ahorro que pudiera alcanzarse, como consecuencia de la eliminación de los calibres, fuera superior. Este tipo de productos se fabrican a partir de materias primas más caras y, además, son cocidos a temperaturas sensiblemente más elevadas que el gres esmaltado, de ahí que sus costes de fabricación y, por ende, los sobrecostes debidos a la falta de estabilidad dimensional, sean superiores a los del gres esmaltado.

Del mismo modo, tampoco existen datos referidos al sobrecoste originado por la presencia de calibres en la fabricación de productos rectificadas, generalmente del tipo gres porcelánico. Este proceso complementario aumenta el coste de fabricación del producto al tener un consumo eléctrico elevado y requerir de una cantidad importante de material fungible. La falta de constancia en el tamaño de las piezas alimentadas a los equipos de rectificado reduce su productividad y provoca desviaciones del tamaño final de la pieza como consecuencia de la falta de acuerdo entre la regulación del ancho de corte y el tamaño de entrada de las piezas. Estos problemas, no valorados económicamente en ninguna publicación científica, se estima que pueden tener una incidencia importante en el coste final de un producto, que además, suele tener precios de venta más elevados que el de los productos no rectificadas.

Las connotaciones adicionales, que acaban de ser apuntadas, hacen prever que el ahorro en coste que supondría la completa eliminación de los calibres podría ser incluso superior al estimado. Estos datos ponen de manifiesto la importancia de abordar este trabajo de investigación para establecer estrategias de control que permitan, sobre todo, minimizar las variaciones de densidad aparente en seco de los soportes. Todo ello, con vistas a estabilizar la variabilidad dimensional de las baldosas y contribuir a la optimización de los costes productivos, gracias a la mejora en las operaciones de gestión y logística del producto acabado.

La motivación del trabajo requiere, por tanto, de un planteamiento que permita abordar y dar solución a un problema industrial. Así, se plantea, por un lado, desarrollar una modelo que permita describir con precisión el comportamiento del producto cerámico, a lo largo de su procesado en condiciones industriales, para poder predecir el tamaño final de las piezas fabricadas, basándose en las condiciones de operación. Y, por otro lado, validar, también a nivel industrial, una estrategia de control que garantice la estabilidad dimensional del producto acabado, para lo cual, será previamente necesario simular su funcionamiento y dotar al proceso de la instrumentación y automatismos requeridos para asegurar su implementación.

El planteamiento que adquiere mayor relevancia es el referido a la implementación y validación industrial de un sistema de control automático de la operación de prensado, que permita minimizar, e incluso eliminar, la variabilidad dimensional del producto terminado. Aunque las prensas industriales se encuentran automatizadas desde el punto de vista del control de sus variables de operación, tales como, presión máxima, velocidades de avance del sistema de alimentación, tiempo de ciclo, etc., en lo referido al control de variables propias del producto conformado, tan solo poseen, las más modernas, sistemas de control automático del espesor medio de las piezas. Por ello, es especialmente interesante el desarrollo de un sistema de control automático adicional que garantice la constancia de las propiedades que afectan directamente a la estabilidad dimensional del producto, tales como, la densidad aparente en seco.

2.2 Objetivos

El objetivo principal del trabajo es desarrollar y validar una solución industrial de control automático de proceso, basada en la medida en continuo de la humedad del polvo atomizado, que permita eliminar o minimizar la incidencia de los calibres en las clasificaciones finales de producto de las empresas cerámicas, gracias a la regulación automática de las condiciones de conformado de los soportes cerámicos. Además, de manera indirecta, la consecución de este objetivo también contribuirá a la mejora del proceso de fabricación en general, ya que la estabilización de los parámetros de fabricación, que están directamente relacionados con la variabilidad del tamaño final de las piezas, también afectará de manera positiva a otros parámetros de calidad del producto acabado, tales como la curvatura, la tonalidad o la presencia de defectos superficiales.

Para poder abarcar los planteamientos realizados se establecen los siguientes objetivos específicos:

- Modelizar matemáticamente el comportamiento dimensional de los soportes cerámicos a lo largo de todo el proceso para poder predecir el tamaño final de las baldosas en función de los parámetros de fabricación.
- Validar el modelo de comportamiento propuesto, en condiciones industriales de operación, determinando la precisión alcanzada en la estimación del tamaño final de pieza.
- Elaborar un programa de simulación, basado en el modelo matemático desarrollado, para evaluar la incidencia de las variables de operación sobre la variabilidad dimensional del producto terminado.
- Simular diferentes estrategias de control de la operación de conformado con vistas a determinar su incidencia sobre la variabilidad dimensional del producto terminado y establecer los requerimientos de automatización e instrumentación requeridos para su implementación industrial.
- Desarrollar e implementar un sistema de control automático de la operación de prensado, basado en la medida de la humedad del polvo, que permita la aplicación de las estrategias previamente simuladas en condiciones reales de operación.

- Realizar la validación y seguimiento del funcionamiento del sistema de control automático puesto a punto, con la finalidad de evaluar el grado de mejora alcanzado en la estabilidad dimensional del producto fabricado.
- Evaluar la escalabilidad del sistema para poder alcanzar un nivel de madurez, lo suficientemente elevado, como para permitir el despliegue de la tecnología desarrollada en múltiples empresas del sector cerámico y garantizar la transferencia de los resultados de la investigación.

2.3 Alcance

Seguidamente se describe el alcance real del trabajo desarrollado, el cual se ha visto condicionado por las limitaciones propias de cualquier investigación llevada a cabo en condiciones industriales:

- El trabajo se ha centrado en el estudio de composiciones de gres porcelánico por ser las que habitualmente se emplean para fabricar las piezas de tamaños más grandes y, por tanto, con más problemas relacionados con la falta de estabilidad. Los resultados podrían aplicarse del mismo modo a composiciones de gres esmaltado, teniendo en cuenta que pueda existir una mayor incidencia de las condiciones de cocción sobre la falta de estabilidad dimensional. Aunque los problemas de calibres son poco comunes en las composiciones de azulejo, los resultados alcanzados también presentarán interés para estabilizar las condiciones de fabricación de estos productos.
- Los modelos, simulaciones y sistemas de control desarrollados han sido validados industrialmente con composiciones exclusivamente preparadas por molienda vía húmeda y prensado, por ser este el proceso más habitual en el sector cerámico europeo (España e Italia). Sin embargo, es de esperar que los desarrollos efectuados, con ciertas adaptaciones, puedan contribuir también a la mejora de la estabilidad dimensional de productos cuya composición es preparada por vía seca.
- La investigación pretende establecer un control automático de la operación de prensado que robustezca el proceso de fabricación, desde el punto de vista de su variabilidad dimensional. Esto no eximirá de la necesidad de efectuar un control rutinario de las variables de proceso controladas de manera genérica en la etapa de conformado y otras etapas del proceso. Al contrario, dichos controles servirán para confirmar el correcto funcionamiento de los sistemas de control puestos a punto, cuya actuación continua y precisa, será garantizada gracias al uso de los datos aportados por los controles de la densidad aparente en seco y de la humedad del polvo de prensas, típicamente realizados.
- Gran parte de la experimentación se ha realizado en condiciones industriales, adaptándose a la forma de operar de las empresas en las que esta ha sido efectuada. A pesar de esto, se ha pretendido establecer una metodología de modelización y aplicación de sistemas de control que pueda ser extrapolada a otras empresas cerámicas, independientemente de su proceso de fabricación. En este sentido, los

desarrollos han sido implantados y validados en empresas con pulmón de almacenamiento intermedio entre las secciones de conformado-esmaltado y la cocción. Es de esperar que en plantas productivas en las que la cocción se efectúa directamente tras la decoración, sin parque o pulmón de almacenamiento intermedio, los resultados sean completamente aplicables e incluso mejorables, gracias a la rápida retroalimentación que podrían tener los sistemas de control implementados, con datos procedentes del final del proceso.

3

*Materiales, equipos y procedimiento
experimental*

En este capítulo se describen y caracterizan las materias primas empleadas en el desarrollo del trabajo, así como el equipamiento más importante utilizado para la ejecución de la experimentación, tanto a escala de laboratorio, como industrialmente. Al mismo tiempo se describen los procedimientos experimentales más relevantes y las técnicas de simulación utilizadas para estudiar y validar las estrategias propuestas para el control de la estabilidad dimensional del producto acabado.

3.1 Materiales

3.1.1 Selección de materiales

En el desarrollo del trabajo se han empleado composiciones industriales de polvo atomizado utilizadas en la fabricación de baldosas cerámicas de gres porcelánico (Grupo A1a). Aunque a lo largo de las diferentes pruebas industriales efectuadas han podido emplearse otras composiciones, para la ejecución del grueso de la experimentación se han utilizado fundamentalmente dos. Por un lado, una composición típica de gres porcelánico esmaltado, referenciada como STD, y por otro lado, una composición, también de gres porcelánico, con una expansión post-prensado significativamente más elevada que la de la anterior, referenciada como EPP+. Estas composiciones, en función de las necesidades productivas de la planta en la cual se llevaron a cabo los trabajos, podían ser sometidas, previamente a su conformado, a un proceso de coloración en seco con hasta un 0,5 % en peso de pigmentos de origen inorgánico. La finalidad de este tratamiento era dotar al soporte cocido de una determinada coloración con fines estéticos.

Esta selección de materias primas ha sido efectuada para tratar de abarcar las dos principales tipologías de empresa que sobrevivieron a la crisis experimentada por el sector cerámico español en los años 2007 y 2008. Por una parte, empresas dedicadas a la fabricación de un producto de elevado valor añadido, principalmente aportado por un diseño especialmente cuidado y unas excelentes propiedades físico-químicas, conseguidas gracias al uso de materias primas de elevada calidad y coste (composición STD). Y, por otra parte, empresas enfocadas a mercados de menor valor añadido que trabajan con composiciones constituidas por materias primas más económicas, pero que no son capaces, en la práctica, de desarrollar las mismas propiedades técnicas durante su procesado (composición EPP+).

En la tabla 3.1 se muestra la composición química de los dos polvos atomizados mayoritariamente utilizados en el trabajo. La principal diferencia entre ambas composiciones radica en la proporción de óxidos fundentes. La composición STD, fabricada a partir de arcillas blancas altamente caoliníticas y feldespato sódico, presenta una baja proporción de óxido de hierro. En cambio, la composición EPP+, preparada en base a arcillas de carácter ilitico-montmorillonítico muestra una mayor proporción de óxido de hierro y menor cantidad de óxido de potasio aportado por los feldespatos.

Por su parte, la figura 3.1 recoge las distribuciones del tamaño de los gránulos de los dos polvos atomizados considerados. En ellas puede observarse que el polvo STD muestra una distribución de tamaños ligeramente más estrecha, con una mayor proporción de gránulos en la fracción intermedia, entre 300 y 400 μm , mientras que la

Tabla 3.1. Composición química de las dos composiciones de gres porcelánico esmaltado utilizadas en el desarrollo de la investigación (% en peso).

Óxidos	STD	EPP+
SiO ₂	68,5	66,3
Al ₂ O ₃	19,1	20,0
Fe ₂ O ₃	0,63	1,95
CaO	0,67	0,27
MgO	0,75	1,24
Na ₂ O	4,07	2,64
K ₂ O	1,42	1,49
TiO ₂	0,71	0,77
MnO	<0,01	<0,01
P ₂ O ₅	0,10	0,10
ppc a 1000°C	3,93	5,30

distribución del polvo EPP+ tiene una mayor proporción de fracción fina. A pesar de esto, las pocas diferencias observadas entre las distribuciones del tamaño de los gránulos no pueden llegar a justificar las diferencias de comportamiento de ambos materiales durante su conformado. Por ello, las diferencias de comportamiento deban achacarse, fundamentalmente, a la diferente naturaleza de las materias primas empleadas en la preparación de cada material y/o a las posibles diferencias entre las distribuciones del tamaño de las partículas primarias que constituyan los gránulos de polvo.

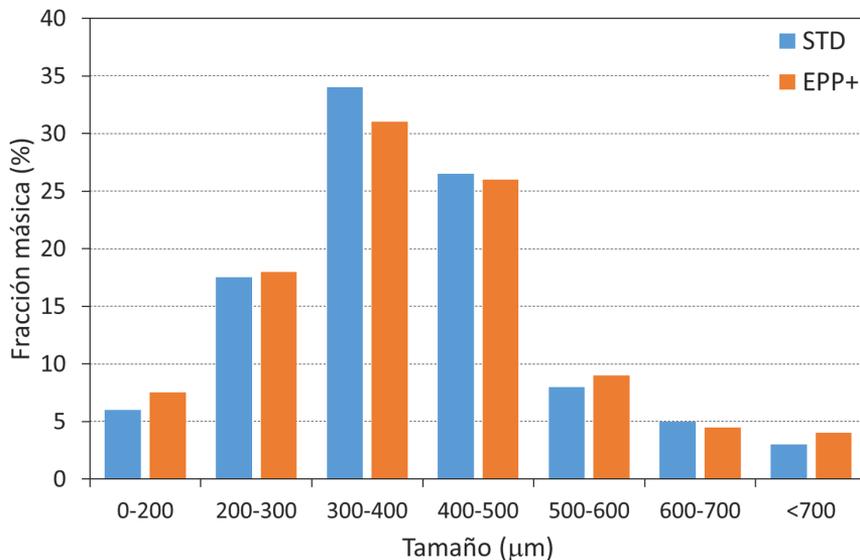


Figura 3.1. Distribuciones del tamaño de los gránulos de los dos polvos atomizados empleados mayoritariamente en el estudio.

3.1.2 *Técnicas de caracterización y equipamiento de laboratorio*

La experimentación efectuada en esta investigación se ha llevado a cabo a escala de laboratorio y a escala industrial. En el laboratorio se ha caracterizado el comportamiento de los materiales y se han preparado y acondicionado muestras para su posterior uso en procedimientos de calibración de la instrumentación empleada en planta. Por otra parte, en condiciones industriales, se han validado las leyes de comportamiento de los materiales y las estrategias de control propuestas, así como implementado los bucles de control automático objeto principal del trabajo.

El hecho de llevar a cabo una caracterización del comportamiento de los materiales en condiciones de laboratorio, para posteriormente utilizarla en la predicción del tamaño final de las piezas en condiciones industriales, ha obligado a realizar un escalado de los resultados obtenidos en laboratorio. Este escalado ha consistido en la verificación de la validez de las ecuaciones de comportamiento en condiciones industriales para adaptarlas en caso de resultar necesario. Como se expondrá más adelante, estas adaptaciones han sido necesarias, básicamente, en la estimación de la densidad aparente de los soportes recién prensados, a partir de sus condiciones industriales de conformado, haciendo uso de los diagramas de compactación.

En la caracterización del comportamiento durante el procesado de los diferentes polvos atomizados utilizados en la investigación se ha empleado el equipamiento típicamente existente en un laboratorio de composiciones cerámicas. Concretamente, siguiendo los procedimientos descritos en la bibliografía [80], se ha hecho uso del siguiente equipamiento:

- Dispositivo de pulverización de agua: utilizado para el acondicionamiento por humectación de muestras de polvo atomizado empleadas en el conformado de probetas y la preparación de muestras para la calibración del sensor de humedad empleado (ver apartado 3.2.3).
- Prensa hidráulica automática de laboratorio: con una capacidad máxima de 60 MPa (ver figura 3.2) utilizada en el conformado de probetas cilíndricas y paralelepípedicas empleadas en la obtención de las leyes de comportamiento recogidas en el apartado 1.3 y en la preparación de probetas cuadradas destinadas a realizar el calibrado del transductor de humedad.
- Dispositivo para la medida manual de la densidad aparente por inmersión en mercurio (ver figura 3.2): utilizado para la determinación de la densidad aparente de las probetas y muestras procedentes de piezas industriales en sus diferentes estados de procesado.
- Estufa de laboratorio: con aire caliente a 120°C empleada para el secado de probetas y muestras de piezas industriales y el acondicionamiento de la humedad de muestras de polvo.
- Horno eléctrico programable de laboratorio: utilizado en la cocción de las probetas según unos ciclos de cocción preestablecidos, de acuerdo con las condiciones de operación evaluadas.



Figura 3.2. Equipamiento de laboratorio empleado en la determinación del comportamiento de los materiales durante el conformado: prensa hidráulica (izquierda) y sistema de medida de densidad aparente (derecha).

Siendo el proceso de conformado de soportes cerámicos la etapa de fabricación eminentemente estudiada en este trabajo, se hace necesario describir brevemente el procedimiento llevado a cabo en condiciones de laboratorio para prensar las probetas que han sido empleadas en las diferentes caracterizaciones, calibraciones y verificaciones realizadas a lo largo del trabajo:

- Tanto si se prensaban probetas cilíndricas, como si estas eran de forma paralelipédica, la alimentación del polvo de prensado se realizaba manualmente. Haciendo uso de una cuchara metálica se colocaba justo delante del hueco del molde una cantidad de polvo suficiente para rellenarlo. Con la ayuda de una espátula metálica se desplazaba el polvo hacia la parte trasera de la prensa, posteriormente se enrasaba la superficie del polvo depositado en el interior del molde haciendo pasar sobre el mismo la espátula a modo de enrasador.
- Con el polvo perfectamente enrasado se ejecutaba el ciclo de compactación programado en la prensa, el cual se efectuaba automáticamente hasta la presión máxima definida, realizando una desaireación tras una primera prensada a baja presión. El ciclo de compactación de la prensa estaba regulado mediante un controlador PID que mantenía la presión máxima de prensado por un periodo de tiempo configurable, generalmente de 3 s.
- Finalizado el ciclo de compactado, se extraía la probeta conformada haciendo uso del sistema de extracción automática de la prensa y se eliminaban las rebabas y el

polvo que habían podido quedar adheridos a su superficie. Previamente al prensado de otras probetas, se tomaba la precaución de retirar y desechar el polvo excedente que hubiese quedado en la periferia del hueco del molde. De este modo se evitaba que las probetas sucesivas se conformaran empleando polvo que, aún siendo de la misma composición, hubiera podido secarse ligeramente o presentar segregaciones como consecuencia de su manipulación.

3.1.3 Leyes de comportamiento en laboratorio

Seguidamente se muestran las leyes de comportamiento que explican los cambios dimensionales experimentados por los soportes a lo largo del proceso productivo. Estas han sido obtenidas por ajuste de los datos experimentales resultantes de la caracterización realizada a nivel de laboratorio, según los procedimientos recogidos en la bibliografía [80]. En todos los casos, los datos experimentales se representan en forma de puntos, mientras que los trazos continuos corresponden a los ajustes realizados por el método de los mínimos cuadrados a las ecuaciones propuestas. Los datos hacen referencia a las composiciones de soporte no coloreadas, pues se comprobó que el bajo contenido en pigmento (<0,5 % en peso), aplicado por coloración en seco en algunos lotes productivos, no afectaba a las variables críticas del proceso. Además, por simplicidad, tanto los datos experimentales, como los parámetros de ajuste de todas las ecuaciones constitutivas, quedan tabulados en el apéndice de este documento.

En primer lugar, respecto al comportamiento de ambas composiciones durante el prensado, en la figura 3.3 se representan sus diagramas de compactación. Los datos experimentales han sido ajustados a la ley de comportamiento representada por la ecuación 1.25. Puede comprobarse que, en ambos casos, el ajuste a la ecuación es bueno, sin embargo, se aprecia una clara diferencia entre el comportamiento en prensado de la composición STD con respecto a la EPP+.

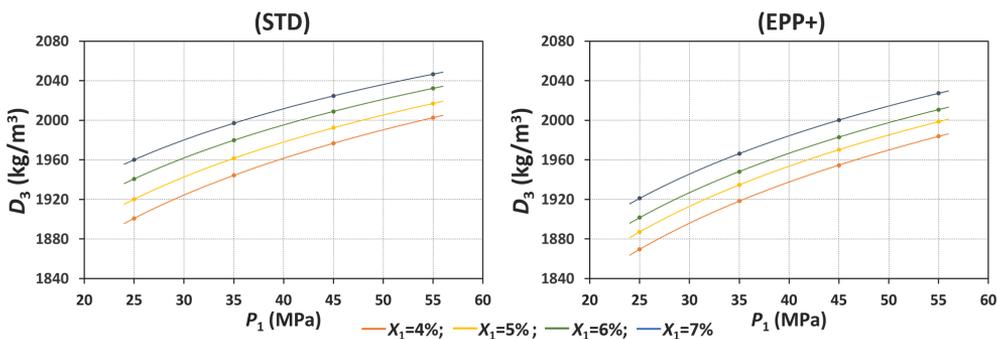


Figura 3.3. Diagramas de compactación de las dos composiciones de gres porcelánico esmaltado utilizadas en el desarrollo de la investigación.

Para la misma humedad y presión de prensado, las densidades aparentes en seco (D_3) alcanzadas por la composición STD son significativamente más elevadas. Este comportamiento guarda relación con el hecho de que esta misma composición presente una menor expansión postprensado, tal y como queda reflejado en la figura 3.4, en la

cual se muestra la variación experimentada por la expansión post-prensado de ambas composiciones, dentro de los límites habituales de variación de la presión máxima de prensado y de la humedad del polvo atomizado. En efecto, una menor expansión postprensado está directamente relacionada con una menor reacción elástica del material cuando cesa la aplicación de la presión sobre el lecho de polvo, lo cual, a su vez, implica una mayor capacidad de deformación plástica y, por consiguiente, un incremento de la densidad aparente en seco alcanzada por los soportes.

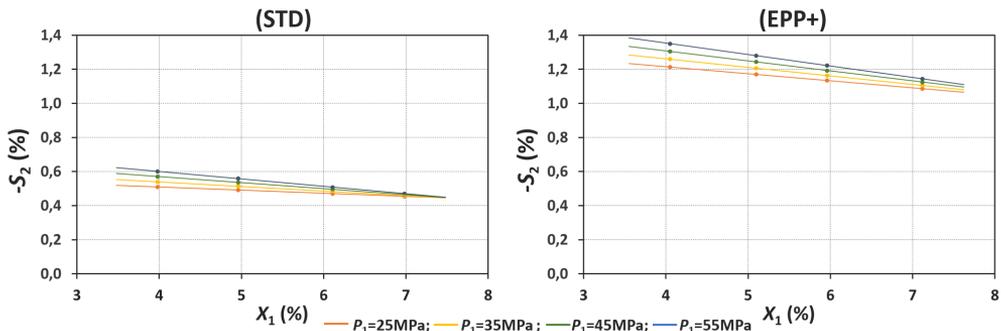


Figura 3.4. Variación de la expansión post-prensado con las condiciones de conformado para las dos composiciones de gres porcelánico esmaltado utilizadas en el desarrollo de la investigación.

Para ambas composiciones, los datos experimentales recogidos en los gráficos de la figura 3.4 se ajustan adecuadamente a una expresión del tipo reflejado en la ecuación 1.27. Como acaba de indicarse, la composición EPP+, para las mismas condiciones de conformado, proporciona expansiones post-prensado sensiblemente superiores a las de la composición STD. Así, para una humedad de trabajo de 6 % y una presión máxima de prensado de, por ejemplo, 30 MPa, la composición STD presentaría tras su conformado una expansión de 0,5 % mientras que la EPP+ experimentaría una expansión post-prensado, considerablemente superior, de 1,15 %, prácticamente el doble. Además, tanto la humedad, como la presión máxima de prensado, influyen en mayor medida sobre la expansión post-prensado en la composición EPP+ que en la STD, tal como se evidencia por las pendientes y las dispersiones de las rectas de ajuste reflejadas en la figura 3.4.

Para evidenciar la influencia que puede presentar una diferencia de expansión post-prensado de tal magnitud sobre la estabilidad dimensional del producto final, es interesante calcular el cambio de tamaño de un determinado soporte crudo que supondría la expansión en uno y otro caso. De este modo, para un tamaño final de pieza relativamente grande de, a modo de ejemplo, 750 mm x 750 mm, en la composición STD la expansión post-prensado implicaría un aumento del tamaño del soporte tras su conformado de 4 mm, sin embargo, para la composición EPP+, el cambio dimensional alcanzaría prácticamente los 10 mm. Además, en las mismas condiciones de conformado, para la composición STD, un cambio de la humedad del polvo del 0,5 % conllevaría un cambio de tamaño, asociado a la variación de la expansión, de únicamente 0,2 mm, mientras que, para la composición EPP+, la variación del tamaño final, debida a la misma fluctuación de la humedad de conformado, llegaría a los

2 mm. Estos valores ponen de manifiesto como la expansión post-prensado en ciertas composiciones puede ser crítica para el control de la estabilidad dimensional del producto terminado, debido a su elevada variación con los cambios de humedad.

A diferencia de lo observado en los diagramas de compactación y expansión post-prensado, para los cuales se ha podido realizar un ajuste de los datos experimentales obtenidos en el laboratorio a las leyes de comportamiento planteadas en 1.3.2, no sucede lo mismo con la contracción de secado. Dada la pequeña magnitud de esta variación (ver datos experimentales en las tablas A.7 y A.8 del apéndice) no pudo determinarse con precisión el cambio dimensional experimentado por las probetas de laboratorio durante su secado. Como consecuencia de esto los datos experimentales no se correlacionan adecuadamente con la humedad y la presión de prensado, como cabría esperar, lo cual no quiere decir que, en condiciones industriales, la contracción de secado de los soportes no pueda tener influencia sobre las estabilidad dimensional del producto fabricado. En cualquier caso, como se verá más adelante, en la fase experimental desarrollada en condiciones industriales, se evaluó la incidencia real de la contracción de secado en el proceso de fabricación y el modo de tenerla en consideración en el modelo de simulación puesto a punto.

Finalmente, el comportamiento de las composiciones durante su cocción queda reflejado en los diagramas de gresificación recogidos en el figura 3.5. Ambos polvos atomizados presentan el comportamiento típico de las composiciones de gres porcelánico descrito en el apartado 1.3.2.4. El ajuste de los datos experimentales a una expresión del tipo de la ecuación 1.24 es bueno, lo que denota, de nuevo, la validez de la ley de comportamiento propuesta para explicar la contracción experimentada macroscópicamente por las piezas durante su cocción.

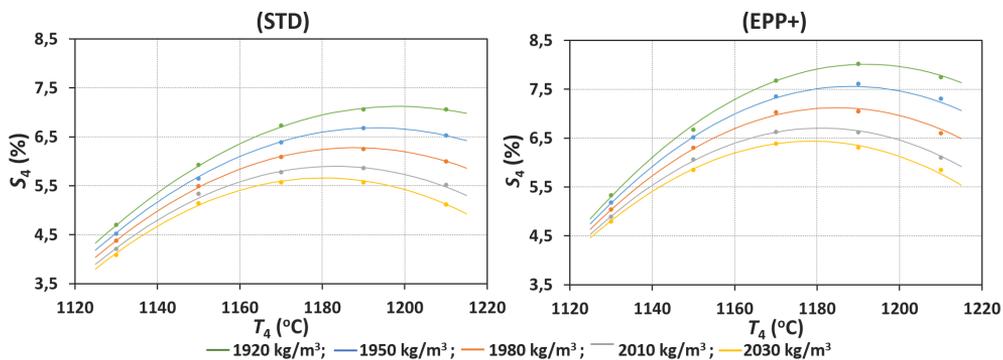


Figura 3.5. Diagramas de gresificación de las dos composiciones de gres porcelánico esmaltado utilizadas en el desarrollo de la investigación.

La principal diferencia entre ambos diagramas de gresificación reside en el hecho de que la composición STD presenta menores contracciones de cocción, para unos determinados valores de la densidad aparente en seco y de la temperatura máxima de cocción, que la EPP+. También se observa como en esta última, la contracción lineal se incrementa más rápidamente con el aumento de la temperatura de cocción, sobretodo para bajas densidades aparentes. Este comportamiento está asociado al

carácter ligeramente más refractario de la mezcla de materias primas empleada en la preparación de la composición STD.

Para comprender mejor las diferencias mostradas por ambas composiciones durante su cocción, la figura 3.6 muestra la variación que experimenta la absorción de agua de las piezas cocidas obtenidas con cada una de ellas. Por simplicidad, únicamente se han representado las curvas de absorción de agua para una densidad aparente en seco de 1980 kg/m^3 . Según este diagrama, para alcanzar una absorción de agua por debajo de 0,5 %, que permitiría considerar el producto como del grupo B1a, el polvo atomizado STD requeriría una temperatura máxima de cocción ligeramente superior a la de la composición EPP+. Aunque por encima de 1175°C ambas composiciones mostrarían absorciones de agua adecuadas, la EPP+ presentaría su óptimo de cocción en el intervalo $1180\text{-}1185^\circ\text{C}$, alcanzado una contracción lineal del 7 %, mientras que la STD lo tendría en $1185\text{-}1190^\circ\text{C}$, con una contracción de 6,25 %.

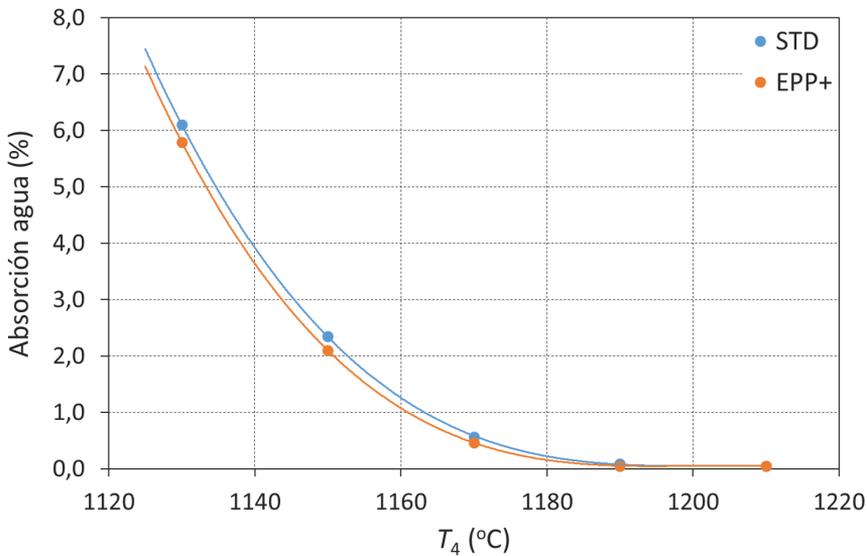


Figura 3.6. Absorción de agua en función de la temperatura máxima de cocción a una densidad aparente en seco de 1980 kg/m^3 para las dos composiciones de gres porcelánico utilizadas en el desarrollo de la investigación.

3.2 Equipamiento, instrumentación y procedimientos industriales

En esta apartado se describe el principal equipamiento e instrumentación empleado a nivel industrial en el desarrollo de la investigación, centrándose especialmente en el transductor de humedad por absorción de radiación infrarroja puesto a punto en este trabajo para medir en continuo la humedad de los soportes recién prensados. Al mismo tiempo, también se detallan los principales procedimientos de experimentación industrial que han permitido verificar los modelos de comportamiento de los materiales y evaluar la eficacia del sistema de control planteado.

3.2.1 Conformado, cocción y caracterización dimensional de soportes industriales

El grueso de la experimentación industrial ha sido llevado a cabo en una prensa hidráulica, mostrada en la figura 3.7, con una capacidad máxima de prensado de 5000 t (49 MN) y destinada al conformado de soportes para gres porcelánico esmaltado en 5 posibles tamaños nominales, en función de las características del molde utilizado (ver tabla 3.2). El circuito hidráulico de la prensa podía trabajar hasta una presión máxima de 350 bar (aproximadamente, 350 MPa), lo cual permitía aplicar presiones máximas sobre el polvo, dependiendo del tamaño de las piezas conformadas, de hasta 450-550 kgf/cm² (aproximadamente, 45 a 55 Mpa). La velocidad de trabajo de la prensa se situaba entre 5,5 y 7 ciclos/min según el tamaño de pieza fabricado y las necesidades productivas de la planta en la que se desarrolló la investigación.



Figura 3.7. Prensa hidráulica (izquierda) y horno monoestrato de rodillos (derecha) empleados en la experimentación industrial de la investigación.

Tabla 3.2. Características dimensionales de los moldes utilizados en la prensa industrial empleada en el estudio.

Tamaño nominal cocido, $L_4 \times W_4$ (mm x mm)	Número de alveolos	Tamaño del alveolo, $L_0 \times W_0$ (mm x mm)
1200 x 600	1	1282,6 x 641,3
675 x 450*	2	721,5 x 481,0
600 x 600	2	641,3 x 641,3
450 x 450	3	481,0 x 481,0
330 x 330	4	352,7 x 352,7

El ciclo de prensado constaba siempre de una primera prensada para desairear el lecho de polvo y una segunda prensada a presión máxima, cuyo valor dependía de

*En algunas de las pruebas industriales realizadas con la composición de soporte EPP+, este tamaño nominal era ligeramente distinto, concretamente de 700 mm x 475 mm, lo cual requería trabajar con dos alveolos de 754,2 mm x 511,7 mm.

las condiciones de operación o, en su caso, del control ejercido sobre la misma. La presión a lo largo de todo el ciclo de prensado y, especialmente, en el punto máximo de aplicación, era registrada por un transductor de presión piezorresistivo ubicado en el circuito hidráulico de la prensa. Este sensor no fue instalado expresamente para el desarrollo de la investigación, sino que era el mismo que utilizaba el sistema de control de la propia prensa.

Durante el transcurso de la experimentación, y contando con la colaboración del fabricante de la prensa, se efectuaron en su software de automatización y sistema operativo las adaptaciones necesarias para poder extraer de los mismos parámetros de funcionamiento imprescindibles para abordar el control automático del prensado. En concreto, se habilitó un puerto de comunicaciones en el ordenador de automatización de la prensa que permitía leer, en cada ciclo de prensado, a través del protocolo de comunicación Modbus TCP, las siguientes variables:

- Presión máxima alcanzada en el circuito hidráulico durante el último ciclo de prensado (bar)
- Presión máxima de consigna del circuito hidráulico a alcanzar durante el ciclo de prensado (bar)
- Desplazamiento máximo del travesaño móvil de la prensa durante el ciclo de prensado (centésimas de mm)
- Valor acumulado de ciclos de prensado

Además, mediante la misma pasarela de comunicaciones se obtenían los siguientes parámetros necesarios para efectuar los cálculos complementarios requeridos por los sistemas de control establecidos:

- Número de cavidades del molde instalado en la prensa (número de piezas conformadas por ciclo de prensado)
- Anchura de las piezas conformadas (mm)
- Longitud de las piezas conformadas (mm)
- Superficie del pistón del circuito hidráulico de la prensa (mm²)

De todas estas variables, la presión máxima de consigna tenía permisos de lectura/escritura con la finalidad de poder modificarla a través del sistema de control externo desarrollado en este trabajo. Para ello, el fabricante de la prensa estableció una ventana de tiempo, que se iniciaba en el momento en el que se producía el incremento en el valor del número acumulado de ciclos de prensado, en la cual era posible enviar a través del puerto de comunicaciones habilitado el nuevo valor de presión máxima de consigna del circuito hidráulico a establecer en el sistema operativo de la prensa. Una descripción más detallada del software de control puesto a punto será dada en la exposición de resultados presentada en el apartado 4.3.1.

El secado de los soportes conformados se realizaba en un secadero horizontal existente en la misma línea de fabricación en la que se encontraba la prensa, empleando ciclos de secado de aproximadamente 25-35 min a una temperatura máxima de 310°C, dependiendo del tamaño de las piezas procesadas. Además, en caso de que las pruebas realizadas requiriesen el empleo de soportes decorados, estos se esmaltaban y decoraban en las líneas de esmaltado existentes en la instalación y se secaban de nuevo, previamente a su tratamiento en el horno, para evitar roturas de piezas al inicio de la cocción.

La cocción de las piezas industriales se llevó a cabo en un horno monoestrato de rodillos de 90 metros de longitud, también mostrado en las imágenes de la figura 3.7, en el que el aporte de calor se realizaba mediante combustión de gas natural. Los ciclos térmicos aplicados alcanzaban temperaturas máximas que variaban entre 1180 y 1200°C, en función de la composición del soporte y del acabado superficial del producto fabricado en cada momento, con tiempos de ciclo de entre 50 y 65 min, dependiendo, fundamentalmente, del tamaño y espesor de las piezas procesadas. En la tabla 3.3 quedan recogidos los principales parámetros de los ciclos térmicos para los diferentes tamaños de pieza procesadas en el horno empleado para la realización de la investigación industrial.

Tabla 3.3. Parámetros principales de los ciclos térmicos de cocción empleados en el horno industrial utilizado en la experimentación.

Tamaño nominal cocido (mm x mm)	Número de piezas por fila	Duración ciclo cocción (min)	Tiempo permanencia a T_4 (min)
1200 x 600	2	65	7,2
675 x 450	3	60	6,7
600 x 600	4	62	7,0
450 x 450	5	53	5,8
330 x 330	7	50	5,5

Finalmente, para realizar la medida del tamaño de las piezas procesadas se utilizaron dos metodologías distintas. Por una parte, un máquina industrial de clasificación automática de producto en final de línea (figura 3.8), que utilizaba un sistema de telemetría láser para determinar las dimensiones de las piezas cocidas siguiendo el procedimiento descrito en el apartado 1.2.3.1. Y por otra parte, una mesa de medida dimensional dotada de una serie de palpadores de desplazamiento manual (figura 3.8), que permitía medir la anchura y la longitud en diferentes puntos del borde lateral de piezas individuales, tanto crudas, como cocidas. El primer sistema fue el empleado para realizar el seguimiento de lotes productivos completos, durante la puesta a punto del sistema de control desarrollado, mientras que el segundo, se utilizó durante los experimentos industriales destinados a la preparación y validación de los modelos de comportamiento de los materiales.

De manera general, los equipos automáticos de clasificación como el empleado proporcionan estadísticas de la clasificación dimensional realizada para un determinado lote de fabricación, indicando el número de piezas que se clasifican dentro de las di-



Figura 3.8. Mesa de caracterización dimensional y clasificadora industrial empleadas en la medida del tamaño de soportes y piezas terminadas durante la investigación.

ferentes clases de calibre establecidas. Aunque determinan las dimensiones de todas las piezas procesadas, estos datos no son fácilmente accesibles, teniendo la posibilidad de visualizar en cada momento, a lo sumo, las dimensiones de la última pieza clasificada. Por este motivo, con la finalidad de disponer de las dimensiones de todas las piezas procesadas en los distintos lotes estudiados en el desarrollo del trabajo, fue necesario solicitar al proveedor del equipo la habilitación de un puerto de comunicaciones a través del cual poder realizar el volcado de las dimensiones de todas las piezas que constituían un lote productivo.

3.2.2 Procedimientos industriales de experimentación

Dado el carácter eminentemente industrial de la investigación, gran parte de la experimentación fue desarrollada en la planta de fabricación de baldosas cerámicas donde se ubicaba el equipamiento descrito en el apartado 3.2.1. Esto obligó a planificar y consensuar, con los responsables de gestionar las operaciones de la instalación, el desarrollo de muchas de las experiencias llevadas a cabo. En especial, de todas aquellas referidas a la validación del comportamiento de los materiales, simulaciones y acciones de control, que muchas veces requerían de la realización de variaciones sobre las condiciones de fabricación (maniobras), para evaluar el impacto de estas en el comportamiento de los procesos y en las propiedades del producto final.

Varios han sido los procedimientos de experimentación en planta que fue necesario realizar a lo largo del trabajo, destacando:

- Muestras de polvo atomizado en la tolva del sistema de alimentación de polvo de la prensa.
- Medidas de la densidad aparente de los soportes recién prensados.
- Seguimiento de lotes completos de producción o conjuntos de piezas asociados a una maniobra determinada.
- Calibración del equipo de medida en continuo de humedad puesto a punto.

Ya que el procedimiento de calibración del medidor de humedad será descrito en detalle en el apartado 3.2.3, seguidamente se describen únicamente los tres primeros.

3.2.2.1 Muestreos de polvo atomizado en planta

Los muestreos del polvo atomizado alimentado a los alveolos de la prensa (ver figura 3.9) han supuesto una tarea habitual en el desarrollo del trabajo, sobretodo, para verificar el correcto funcionamiento del sensor de medida en continuo utilizado, pero también para llevar a cabo la validación industrial de los modelos de comportamiento. Las prensas industriales, a pesar de la gran importancia que tiene la humedad del polvo en el proceso de conformado, no disponen de un punto específicamente habilitado para llevar a cabo un adecuado muestreo del polvo atomizado con el que se está trabajando.

La forma habitual de conocer la humedad de prensado consiste en recoger con un pequeño envase, directamente sobre la superficie del polvo en la tolva del sistema de alimentación, unos 30 gr de muestra para determinar su humedad por secado en una termobalanza. Esta forma de proceder presenta mucha incertidumbre, si no se tienen en consideración una serie de precauciones a la hora de realizar la toma de muestras, por lo que en el trabajo se prefirió seguir el siguiente procedimiento:

- Habiendo habilitado un acceso seguro y estable a la zona trasera de la prensa, para tener al alcance la superficie del polvo depositado sobre la tolva del sistema de alimentación, se recogía, durante un periodo de tiempo no inferior a 30 s, polvo atomizado que era inmediatamente introducido en una bolsa de plástico hasta completar una muestra de aproximadamente 500 gr.
- El muestreo de polvo solo se iniciaba si la prensa había permanecido en régimen normal de operación, sin ningún tipo de parada, al menos durante 5 minutos seguidos. De este modo se evitaba recoger muestras de polvo, que podrían haberse secado al permanecer detenidas en la tolva durante un periodo prolongado de tiempo y que con ello podrían inducir a errores en las verificaciones realizadas.
- Si la muestra de polvo debía ser correlacionada con algún otro parámetro productivo, como, por ejemplo, la presión de prensado, la densidad aparente de los soportes o la humedad determinada en continuo por el medidor de humedad instalado a la salida de la prensa (ver apartado 3.2.3), al finalizar el muestreo, se esperaba un minuto para registrar la variable complementaria. De este modo, se garantizaba que la muestra de polvo fuera representativa de los soportes recién prensados cuyo comportamiento iba a ser estudiado. Como se verá en el apartado 3.2.3.3, esto era especialmente crítico al correlacionar la muestra de polvo con las medidas del sensor de humedad.
- Si durante la toma de la muestra se producía una parada imprevista de la prensa, la muestra era descartada por no ofrecer la posibilidad de correlacionarla correctamente con los parámetros de fabricación o con los soportes que deberían conformarse con ese polvo.
- La medida de humedad de la muestra recogida, con el método de referencia seleccionado, se realizaba a partir de la hora de haberla recogido, para asegurar su homogeneidad y siempre por triplicado para obtener un valor medio representativo.

En este trabajo, por su mayor precisión, se ha utilizado como método de referencia para la medida de la humedad, tanto de muestras de polvo atomizado, como de muestras de soporte, el secado en estufa a 120°C hasta pesada constante. Puntualmente, para realizar verificaciones en planta, se han utilizado termobalanzas, las cuales permiten determinar de una manera rápida el contenido en agua de muestras de polvo, pero con una menor precisión que el secado en estufa. En la medida de las posibilidades, los valores de humedad se han expresado porcentualmente en base seca, es decir, referidos a la masa de producto seco (kg agua/kg sólido seco, b.s.), aunque, por ser bastante habitual en la industria el referir las humedades del polvo atomizado a la masa de producto húmedo (kg agua/kg sólido húmedo, b.h.), en ocasiones, también se ha empleado una notación porcentual en base húmeda.



Figura 3.9. Muestreo de polvo atomizado en el sistema de alimentación de la prensa y preparación de muestras para la medida de la densidad aparente de los soportes.

3.2.2.2 Medida de la densidad aparente de los soportes industriales

A lo largo de la experimentación, la densidad aparente de los soportes recién prensados ha sido, junto con la humedad del polvo y la presión de prensado, otra de las variables de proceso ampliamente evaluada, tanto en la comprobación de los modelos de comportamiento, como en el seguimiento de las maniobras productivas efectuadas en la verificación de los resultados de las simulaciones y en la puesta a punto del sistema de control. La determinación de la densidad aparente ha sido realizada por el método de inmersión en mercurio, atendiendo a su sencillez y precisión, siguiendo el siguiente procedimiento:

- Toda medida de la densidad aparente ha estado acompañada de una medida de la humedad del polvo con el que se habían conformado los soportes y un registro de la presión específica de prensado, dada la relación intrínseca existente entre estas variables de proceso. Así, para determinar la densidad de las piezas industriales crudas, una vez recogida y embolsada una muestra de polvo, se anotaba la presión de prensado y se extraía manualmente de la línea de fabricación, justo antes de su entrada al secadero, el soporte o los soportes objeto de análisis. Lo habitual era recoger todas las piezas de un mismo ciclo de prensado,

para evaluar posibles diferencias de densidad entre piezas, fundamentalmente, al inicio de los lotes productivos, o únicamente una pieza de cada ciclo, si se estaba realizando un seguimiento de la evolución de la producción.

- Los soportes se trasladaban a una mesa de corte manual para obtener de los mismos muestras cuadradas de aproximadamente 50 mm x 50 mm cuya densidad aparente sería determinada por inmersión en mercurio (ver figura 3.9). El número de muestras obtenidas de cada soporte y su distribución en el mismo dependía del tamaño de las piezas fabricadas. El valor de la densidad aparente asignado a cada soporte caracterizado correspondía a la media de la densidad aparente de todas las muestras preparadas.
- Aunque lo más común fue considerar la densidad aparente en seco, en lugar de la densidad aparente en húmedo, por las connotaciones que se verán a lo largo del trabajo, si se deseaba medir la densidad aparente en húmedo de los soportes recién prensados, era fundamental trocear las piezas y realizar las medidas de densidad lo más rápidamente posible para no cometer grandes errores experimentales, como consecuencia de la pérdida de agua a la que estaban sometidos los soportes durante el desarrollo del procedimiento de medida. Si se quería determinar la densidad aparente en seco, las muestras resultantes de cada soporte se almacenaban en el interior de una bolsa de plástico para, posteriormente, secarlas en una estufa a 120°C, hasta pesada constante, y determinar su densidad aparente por inmersión en mercurio, tras haberse enfriado.

El método de determinación de la densidad aparente por inmersión en mercurio es un método destructivo. Por este motivo, una vez determinada la densidad aparente de un soporte dado, este no podía seguir siendo procesado, por lo que, en muchos casos, ante la necesidad de procesar soportes y, al mismo tiempo, conocer su densidad aparente, se recogía de la línea de fabricación dos soportes conformados de manera consecutiva. Uno se empleaba en la determinación de la densidad aparente y el otro podía seguir siendo procesado en función de las necesidades de la experimentación.

3.2.2.3 Seguimiento de los lotes productivos a lo largo del proceso de fabricación

El seguimiento, a lo largo de las diferentes etapas de todo su proceso de fabricación, de los soportes conformados en la prensa, ha sido una práctica habitual en el transcurso de las investigaciones. En efecto, por un lado, para confirmar la adecuación de las leyes de comportamiento de los materiales para la predicción de las propiedades del producto, fue necesario procesar múltiples muestras industriales, lo cual obligó a trazar su flujo para impedir que se extraviaran o que fueran procesadas en unas condiciones diferentes a las previstas. Y, por otro lado, para evaluar el impacto sobre las propiedades del producto terminado de las acciones de control efectuadas en el proceso de conformado, fue imprescindible seguir la evolución en el tiempo de las propiedades de lotes productivos completos.

La ejecución de estas tareas requirió de una supervisión exhaustiva del proceso, más si se tiene en cuenta que, durante el proceso de fabricación, se producen incidencias que, de no ser detectadas, dificultan en gran medida el correlacionar la influencia

de variables concretas de operación, con propiedades del producto terminado. Entre estas incidencias, las más habituales serían la rotura de piezas, la retirada de muestras para la realización de controles de calidad o la alteración de órdenes productivas ante necesidades operativas.

La planta en la que se realizó el trabajo disponía de un pulmón intermedio de vagonetas en el que los soportes esmaltados eran almacenados previamente a su cocción. Lo mismo sucedía con los lotes productivos tras la cocción, los cuales quedaban almacenados en el pulmón, antes de su clasificación final. Este punto era especialmente crítico a la hora de conocer el flujo de los materiales a lo largo del proceso, ya que, la gestión del material almacenado en dicho pulmón no se realizaba necesariamente en modo FIFO*.

Básicamente, dentro de los procedimientos de experimentación industrial efectuados, pueden diferenciarse los dos tipos de seguimiento productivo detallados a continuación:

- Para la evaluación del comportamiento en proceso de muestras concretas, se referenciaban soportes justo a la salida de la prensa, identificando sus condiciones particulares de conformado, fundamentalmente, humedad, presión, densidad aparente y tamaño en crudo, para, posteriormente, retirarlos de la línea de fabricación antes de su esmaltado. Se trasladaban manualmente los soportes secos hasta la entrada del horno, mediante los batidores móviles habitualmente empleados en planta para el transporte de piezas utilizadas en la realización de controles de calidad. Se cocían las piezas, anotando las condiciones específicas de cocción e intentando colocarlas siempre en la parte central del canal de cocción, y se recogían de nuevo justo a la salida del horno. Finalmente, se determinaba su tamaño, bien con la mesa de caracterización dimensional o, directamente, haciendo uso de la máquina de clasificación industrial.
- En el caso de requerirse el seguimiento de un lote productivo completo, se referenciaba el comienzo del mismo registrando, por una parte, el momento de inicio de su conformado, lo cual permitía disponer del trazado de las variables de prensado registradas en los sistemas de captura de datos puestos a punto, y por otra parte, la primera vagoneta en la que empezaban a cargarse las piezas esmaltadas. A lo largo del lote se iba completando el registro de las vagonetas de material crudo cargadas y se realizaba un control similar para la carga de las vagonetas con el material cocido a la salida del horno. Finalmente, en el proceso de clasificación final, el lote era de nuevo identificado en el inicio de la descarga de la primera vagoneta, para tener el tiempo de referencia a partir del cual los datos proporcionados por el equipo de clasificación correspondían al lote de interés.

*First In First Out.

3.2.3 Medida en continuo de la humedad de los soportes industriales recién prensados

Como se ha descrito en la introducción, el contenido en humedad del polvo atomizado en la etapa de prensado es una variable clave a la hora de definir la densidad aparente de los soportes recién prensados y, con ello, su comportamiento a lo largo de todo el proceso de fabricación. En este trabajo se ha considerado necesario utilizar una técnica instrumental que permitiera medir en continuo y sin contacto la humedad de los soportes industriales recién prensados.

Con anterioridad a este estudio, se ha medido con éxito la humedad del polvo granulado a la salida del atomizador en continuo y sin contacto. Sin embargo, en esta investigación, debido a la dificultad que presentaba la medida directa sobre el polvo de prensas, y al desfase entre dicho punto de medida y el momento del conformado, se consideró oportuno, como un reto más de este estudio, medir directamente la humedad de los soportes recién prensados, como se expondrá posteriormente.

Existen varias tecnologías que permiten medir el contenido en humedad de un sólido poroso sin interactuar con él de manera directa. Entre ellas destacan la medida por radiofrecuencia, la coherencia de microondas, la espectrometría de infrarrojos, la resonancia magnética nuclear y la espectrometría de reflexión en el infrarrojo cercano [81]. Para el desarrollo de esta investigación se seleccionó esta última técnica por existir referencias previas en el uso de la tecnología para llevar a cabo la medida del contenido de humedad del polvo atomizado a la salida de un secadero por atomización [82][83] y en el posterior trasiego de este en las cintas de transporte típicamente existentes en las baterías de silos empleadas para su almacenamiento.

A continuación, se describen las características generales de la técnica de medida de humedad por espectrometría de infrarrojo cercano, así como las particularidades de la aplicación industrial desarrollada en esta investigación, especialmente en lo referido a la instalación y calibrado de la instrumentación empleada.

3.2.3.1 Tecnología de medida de la humedad por espectrometría de reflexión en el infrarrojo cercano

La espectrometría de reflexión en el infrarrojo cercano, o espectrometría NIR*, es una técnica rápida y no destructiva que permite determinar simultáneamente múltiples componentes químicos dispersos en matrices de diferente naturaleza, gracias al análisis multiparamétrico del espectro de reflexión del producto objeto de análisis [84]. En los últimos 20 años la sensórica involucrada en la espectrometría NIR ha experimentado grandes mejoras que han permitido poner en el mercado instrumentos espectrométricos con altos valores de relación señal-ruido. Además, la irrupción de las tarjetas FPGA**, con sus elevadas velocidades de procesado, permiten ejecutar rápidamente las complejas operaciones de cálculo involucradas en los algoritmos de análisis multivariante utilizados por las técnicas quimiométricas de detección. Todo ello, ha convertido a la espectrometría NIR en la técnica de referencia para el análisis

*Near Infrared

**Field Programmable Gate-Array

sis de múltiples constituyentes en el seno de prácticamente cualquier tipo de matriz [85].

Actualmente, esta técnica presenta un gran número de aplicaciones industriales y ha sido empleada con éxito para la medida rápida de humedad, proteína y contenido en grasas de muchos productos farmacéuticos y agroalimentarios [86]. El avanzado estado del arte de la tecnología en el momento de iniciar la investigación mostraba visos de permitir realizar la medida del contenido en humedad de los soportes industriales recién prensados con la precisión suficiente como para detectar los cambios de humedad tan restrictivos apuntados en el apartado 1.2.3.2.3. A pesar de esto, como se expondrá más adelante, la precisión de la espectrometría NIR, en la aplicación de control puesta a punto en el trabajo, fue igualmente evaluada.

La medida del contenido en humedad en sólidos mediante la técnica de espectrometría de reflexión NIR se fundamenta en la detección de dos intensas bandas de absorción, asociadas a una excitación vibracional de los enlaces O-H, que presenta la molécula de agua alrededor de 1440 y 1930 nm (ver figura 3.10). Los equipos basados en esta técnica, emiten sobre el producto objeto de análisis luz infrarroja a dichas longitudes de onda para después capturar y medir en un fotodetector la luz reflejada por el material, lo cual permite cuantificar el contenido de humedad de la muestra en un rango de concentraciones bastante amplio. Los espectros de reflexión NIR suelen presentar las bandas de absorción de varios componentes solapadas entre sí, lo cual requiere de la aplicación de técnicas quimiométricas de análisis multivariante para su cuantificación. En particular, uno de los métodos más usados en quimiometría es el método de los mínimos cuadrados parciales, conocido por sus iniciales en inglés, PLS (“partial least squares”) [87].

Para esta investigación se utilizó un transductor de humedad por espectrometría de reflexión NIR de la firma NDC Infrared Engineering, concretamente el modelo CM710e. En el esquema simplificado de la figura 3.10 se muestran los principales componentes internos del dispositivo. Durante su funcionamiento, la luz generada por una lámpara de cuarzo halógena de altas prestaciones (1) se divide, al pasar a través de una rueda de filtros (2) que gira a velocidad constante accionada por un motor (3), en pulsos secuenciales de energía NIR en longitudes de onda que son absorbidas por el componente a medir, el agua en este caso. Antes de emitir la luz sobre el producto (4), el transductor desvía, mediante un espejo semitransparente (5), una parte del haz principal hacia el detector secundario (6), para generar una señal de referencia con la que se comparará la luz retrodispersada de retorno (7).

La luz que sale del equipo a través de una ventana de vidrio (8) interacciona con el producto y la energía no absorbida se refleja de nuevo en el instrumento, se captura en un espejo facetado de 24 segmentos (9) y es enfocada hacia el detector primario (10). Las dos señales recibidas por el detector se relacionan, haciendo uso de las técnicas y algoritmos de tratamiento de datos anteriormente comentados, para generar una salida proporcional y lineal a la cantidad de humedad. La óptica del sistema está diseñada para minimizar las influencias de la luz ambiental, la humedad relativa y la temperatura ambiente para proporcionar una medición muy estable independientemente de la distancia respecto a la muestra, dentro de unos márgenes de variación razonables. Además, el uso de un haz de referencia permite que el equipo compense

automáticamente las derivas en la medida que pueden ser originadas por el deterioro progresivo de la lámpara o el ensuciamiento de la ventana de medida.

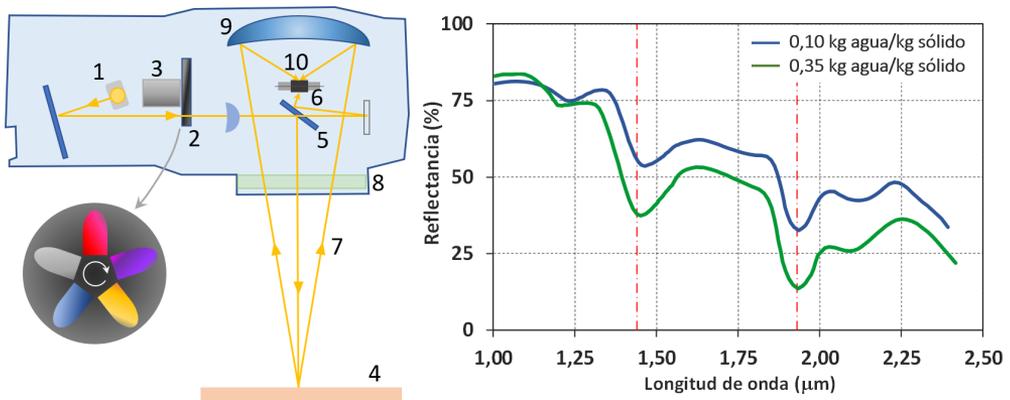


Figura 3.10. Componentes principales del transductor de humedad MM710 con detalle de la rueda de filtros (izquierda) y espectros de reflexión NIR de una muestra sólida con diferentes humedades (derecha, imágenes cortesía de NDC infrared).

Pese a todo ello, este tipo de instrumentos se suministran con una serie de patrones de referencia que son empleados para verificar su correcto funcionamiento a lo largo del tiempo. Los patrones están fabricados en un material cuya respuesta espectral emula la que tendría una muestra de sólido húmeda. En concreto, a lo largo de la experimentación se emplearon dos patrones, uno que proporcionaba una respuesta en el rango de humedades bajas y otro en el de altas.

Una de las principales limitaciones de la técnica de medida de la humedad por espectrometría NIR es la baja capacidad de penetración que tiene la radiación infrarroja en los materiales, lo cual implica que la interacción de la luz emitida con el material solo tenga lugar a nivel superficial. Esto puede originar, sobretodo para contenidos en humedad elevados, que se produzcan errores en la medida, como consecuencia de la existencia de diferencias de humedad significativas entre la superficie y el seno del material. Para los contenidos en humedad típicamente encontrados en el polvo atomizado empleado en la fabricación de soportes para baldosas, siempre por debajo del 8 %, este problema es poco significativo.

3.2.3.2 Instalación del dispositivo en planta

La variable de interés para el control de la operación de prensado de soportes para baldosas es la humedad del polvo atomizado en el momento de su conformado. Una posible forma de proceder para realizar la medida de esta variable era ubicar el equipo en la parte trasera de la prensa, concretamente sobre el tolván de dosificación de polvo a la rejilla del sistema de alimentación, de manera que pudiera registrarse la humedad del polvo previamente a su compactado. Sin embargo, las dificultades que presenta la medida de la humedad del polvo atomizado en la salida de los atomizadores [88] hicieron valorar la posibilidad de realizar una medida de la humedad directamente sobre la superficie de los soportes recién prensados. De hecho, el uso de la espectrometría NIR para controlar el proceso de atomización de polvos cerámicos

requiere la implementación de un sistema de muestreo, expresamente desarrollado [89], que garantiza la homogeneidad de la muestra sobre la que se realiza la medida de humedad. De no utilizarse este dispositivo e intentar medir la humedad directamente sobre el polvo atomizado transportado por las cintas, las grandes heterogeneidades de humedad presentes en el lecho de polvo impiden alcanzar la suficiente precisión y estabilidad en la medida, como para abordar un control automático de la instalación, incluso empleando tiempos de integración de la señal elevados.



Figura 3.11. Transductor de humedad por espectrometría NIR modelo CM710e de la firma NDC Infrared Engineering instalado a la salida de la prensa.

En un trabajo de investigación previo [90] se estudió la influencia de la operativa típica de las secciones de prensado sobre la evolución de la humedad del polvo en diferentes puntos de la instalación. Concretamente, se realizaron medidas de humedad en continuo en las cintas de transporte que alimentaban una prensa hidráulica y se exploró la medida de la humedad de los soportes a la salida de la misma prensa, con un equipo similar al empleado en esta investigación. Los resultados de este estudio, junto a la imposibilidad de instalar un adecuado sistema de muestreo de polvo que garantizara una medida precisa en el sistema de alimentación de la prensa, por el poco espacio disponible, hicieron finalmente decantarse por una medida directa sobre los soportes crudos recién prensados, no sin antes comprobar su adecuación a las necesidades de la investigación.

A la salida de las prensas, los soportes conformados son trasladados sobre un transportador de rodillos hasta el secadero. Los soportes discurren en filas compuestas por tantas piezas como alveolos tenga el molde en el que han sido conformadas. Por esta razón, para poder medir correctamente la humedad, sin considerar las medidas realizadas directamente sobre el plano de rodillos en ausencia de piezas, fue necesario incorporar en el equipo de medida dos fotocélulas, que permitían detectar la presencia en el campo de medida del sensor de una pieza de cada fila conformada, tal y como puede observarse en la imagen de la figura 3.11.

Para determinar la humedad de cada uno de los soportes analizados, desde un PC industrial y haciendo uso de la pasarela de comunicaciones Modbus TCP proporcionada por el equipo, se interrogaba y registraba en una variable vectorial, a la frecuencia máxima de muestreo permitida por el dispositivo (1,5 KHz), la señal de humedad generada durante el paso de cada pieza. Posteriormente, dependiendo del tamaño del soporte, se descartaba un porcentaje variable de valores al principio y el final del vector de datos recogido, para minimizar la incidencia de los posibles artefactos ópticos generados por los bordes de la pieza durante su entrada y salida en el campo de medida. El valor de la señal relacionada con el contenido en humedad finalmente asignado a cada soporte analizado correspondía a la media aritmética de todos los datos registrados por el equipo en la zona central de la pieza.

Aunque la tecnología debería ser precisa independientemente de los cambios de altura respecto a la muestra, se prefirió realizar la medida siempre sobre la cara vista del soporte, la cual, generalmente, presenta menores irregularidades superficiales que el anverso de la pieza, incluso cuando esta dispone de un relieve superficial con fines estéticos. Por ello, se decidió instalar el dispositivo tras el volteador de piezas existente habitualmente en la salida de las prensas. Este elemento se emplea al trabajar con moldes de tipo penetrante en los cuales la cara vista de las piezas es conformada por los punzones inferiores, lo cual obliga a darles la vuelta para seguir con su procesado [21]. En el caso de trabajar con una tipología de molde en la que la cara vista quede conformada por los punzones superiores, generalmente en los conocidos como moldes dobles, el volteador queda deshabilitado y las piezas circulan desde su salida de la prensa con la cara vista en la parte superior.

En un régimen de operación normal, los automatismos que gestionan la entrada de las filas de piezas al secadero las detienen puntualmente, según la lógica requerida para la formación de los paquetes de filas de piezas introducidas en cada plano del secadero. La ubicación del equipo sobre el sistema de transporte fue seleccionada para garantizar que la medida se realizase en una zona en la que los soportes no quedaran detenidos en el campo de medida y evitar, de este modo, lecturas anómalas como consecuencia del secado de las piezas durante las paradas prolongadas. Del mismo modo, se tomó la precaución de que el sensor pudiera registrar siempre el paso de las piezas, independientemente del tamaño de los soportes conformados, para lo cual se colocó en una posición, respecto a la anchura del sistema de transporte, que garantizaba la presencia de pieza en su campo de medida, al paso de cada fila. Además de todas estas precauciones que buscaban asegurar una medida robusta, como se explicará con mayor detalle más adelante, a la hora de abordar el control automático del prensado, se descartaron las medidas realizadas sobre piezas que permanecieran más de 5 segundos detenidas bajo el sensor y aquellas correspondientes a un determinado número de ciclos de prensado, previamente definido, tras las paradas de la línea de fabricación. Con ello, de nuevo, se evitaba considerar valores de humedad anormalmente bajos como consecuencia del secado de los soportes detenidos.

Finalmente, es importante destacar que durante el desarrollo de la experimentación el equipo estuvo dotado de un sistema de protección contra el ensuciamiento de la ventana de medida proporcionado por el fabricante del mismo. Este estaba constituido por un tubo de diámetro ligeramente superior al de la ventana, que servía además

de soporte para las fotocélulas de detección (ver figura 3.11), y en cuyo interior se situaba un filtro metálico cilíndrico del mismo diámetro que la ventana. Al presurizar con aire de instrumentación la camisa existente entre el filtro y el tubo externo, el aire se difundía a través del filtro, generando una sobrepresión delante de la ventana de medida que evitaba que el polvo ambiental se adhiriese a la ventana de vidrio.

Cabe decir que, aunque el desarrollo de la investigación se realizó en una línea de fabricación dotada de un secadero horizontal, en la posterior transferencia de resultados de la investigación llevada a cabo en el clúster cerámico, la metodología de medida se evidenció también válida para líneas equipadas con secaderos verticales, en las cuales puede optarse por el mismo tipo de configuración aquí descrito. Además, es interesante comentar que, en ciertas instalaciones con secadero horizontal, puede resultar oportuno instalar el transductor de humedad aprovechando el tramo de transporte habitualmente existente entre la prensa y el secadero, por el cual las piezas discurren individualmente. Procediendo de este modo, se dispone de una medida de humedad por cada pieza, en lugar una única medida por fila de piezas conformadas.

3.2.3.3 Calibración del equipo

Este tipo de equipos son preconfigurados en fábrica con diferentes algoritmos de tratamiento de señal adaptados a las longitudes de onda del espectro infrarrojo generadas por la rueda de filtros con la que se hayan equipado y a los constituyentes químicos que vayan a ser analizados. Utilizando el algoritmo indicando por el fabricante para la matriz y constituyente objeto de análisis, en este caso, agua en una matriz de arcillas de coloración blanca, la señal proporcionada por el sensor debería ser completamente proporcional a la humedad del material. Sin embargo, para que el transductor de humedad proporcione una señal que coincida con la humedad de los soportes recién prensados es imprescindible escalarla (ver figura 3.12), a través de un procedimiento de calibración, con respecto a la humedad proporcionada por un método de referencia.

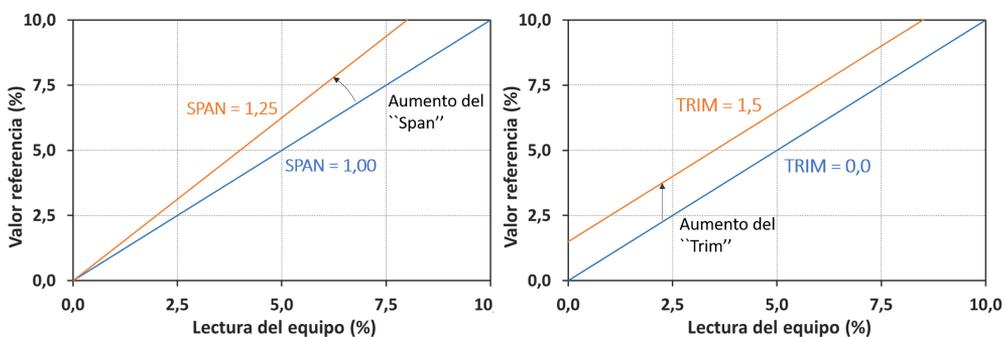


Figura 3.12. Parámetros de calibrado del transductor de humedad y efecto de su modificación sobre la medida.

El escalado de la lectura del equipo consiste, básicamente, en la aplicación de una ganancia o “span” a la señal de salida ofrecida por el medidor y una posterior corrección de cero o “trim”, que se aplica en todo el rango. Ambos parámetros de calibrado

se determinan, para un algoritmo de medida y una composición de material objeto de análisis dados, mediante una regresión lineal por mínimos cuadrados en la que los valores de humedad real de varias muestras, obtenidos con el método de referencia, se utilizan como variable dependiente, y los de salida proporcionados por el equipo al analizar las mismas muestras, como variable independiente.

El método de calibrado propuesto por el proveedor del equipo está especialmente concebido para la calibración de la medida sobre muestras de materiales pulverulentos, por este motivo, fue necesario poner a punto un método de calibración alternativo que permitiera realizar medidas de humedad precisas sobre los soportes compactados. La metodología finalmente retenida para realizar las calibraciones se resume a continuación:

- Se recogía de la tolva del sistema de alimentación de la prensa, u otro lugar accesible de la instalación, una muestra representativa de al menos 4 kg del polvo atomizado de la composición de soporte para la cual quería calibrarse el transductor de humedad. La muestra se dejaba reposar por un tiempo de 2 horas en una bolsa de plástico perfectamente cerrada para garantizar la homogeneidad de su contenido en humedad, previamente al inicio del procedimiento.
- Se determinaba con el método de referencia la humedad real de la muestra y se preparaban, por secado y/o humectación del polvo, un total de cuatro muestras de, aproximadamente, 1 kg de peso cada una, con humedades que abarcaran el rango máximo de variación que cabría esperar en el proceso de fabricación, por ejemplo, de 4,5 % (0,045 kg agua/kg sólido seco) a 7,5 % (0,075 kg agua/kg sólido seco). Las cuatro muestras resultantes se dejaban reposar, en este caso, por un periodo de tiempo no inferior a 8 horas.
- Con cada muestra se conformaban en la prensa hidráulica de laboratorio 2 probetas cuadradas de 10 cm x 10 cm a una presión de prensado que proporcionara en las piezas crudas una densidad aparente en seco próxima a la densidad aparente en seco de consigna esperada en el proceso industrial de conformado, para unas condiciones óptimas de operación. Idealmente, para poder compactar cada muestra a la misma densidad aparente en seco, previamente a la preparación de las muestras era conveniente conocer el diagrama de compactación de la composición. Justo después de su conformado las probetas se colocaban en el interior de bolsas de plástico que quedaban perfectamente cerradas para evitar su pérdida de humedad.
- Las muestras preparadas se trasladaban a planta y se desembolsaba una de ellas para colocarla, inmediatamente después, sobre el plano de rodillos de la salida de la prensa, de manera que quedara centrada en el campo de medida del equipo. Utilizando una funcionalidad de muestreo disponible en la consola del operador del dispositivo se integraban todas las medidas realizadas por el equipo, sin aplicarle ningún tipo de escalado (“span” = 1 y “trim” = 0), durante un periodo de tiempo de 5 segundos. Al finalizar el muestreo, el equipo ofrecía el valor medio calculado y la desviación estándar de la señal proporcionada. A continuación, se determinaba la masa de la probeta en una balanza previamente ubicada en las proximidades del sensor. Se realizaba este mismo procedimiento para todas las probetas disponibles.

- Una vez estaban analizadas todas las probetas, se procedía a su secado en la estufa hasta pesada constante y se determinaba su humedad real por diferencias de masa. Se representaban las humedades reales de cada probeta frente a las señales proporcionadas por el equipo y se obtenía, por regresión lineal de los datos, una recta cuya pendiente y ordenada en el origen serían los parámetros de “span” y el “trim” del calibrado, respectivamente.
- Finalmente, el calibrado obtenido por análisis estático de las probetas preparadas se verificaba en condiciones dinámicas de funcionamiento. Para ello, se comparaban las medidas de humedad proporcionadas por el medidor ya calibrado, con las humedades reales de los soportes recién prensados y se ajustaba el “trim” del calibrado, en caso de encontrarse diferencias significativas ($>0,001$ kg agua/kg sólido seco) durante al menos un turno completo de producción. A la hora de comparar las medidas del equipo con las realizadas por secado en estufa de muestras recogidas en la tolva, se consideraba el valor medio de la humedad de los soportes prensados durante un tiempo de 30 segundos (entre 3 y 4 soportes dependiendo del tamaño de pieza fabricado), tiempo similar al empleado en la recogida de las muestras de polvo atomizado, según el procedimiento descrito en el apartado 3.2.2.

En la figura 3.13 se muestran los calibrados correspondientes a las dos composiciones base de trabajo (no coloreadas) empleadas en la investigación.

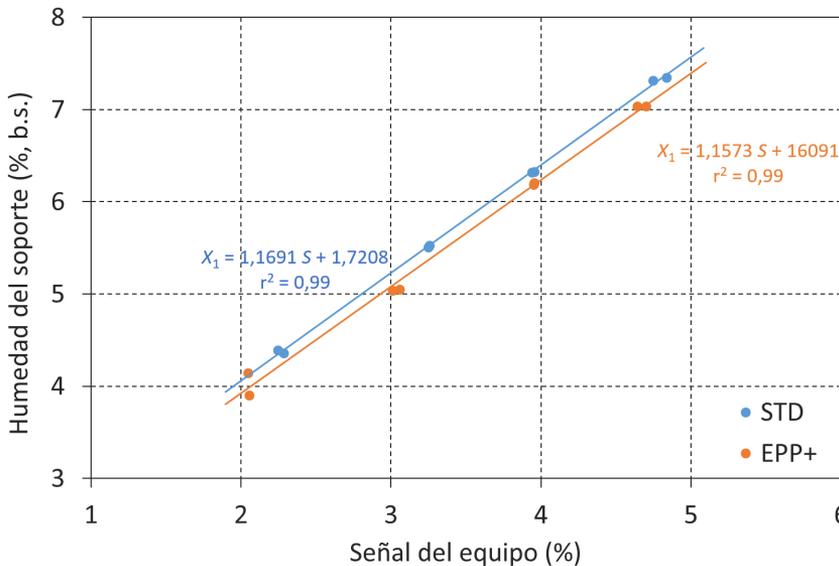


Figura 3.13. Calibrados del sensor de humedad para las composiciones de soporte STD y EPP+ utilizadas en la investigación.

Como puede observarse, la pendiente de las rectas de calibrado (“span”) es muy similar para ambas composiciones y próxima a la unidad, lo cual denota que el algoritmo de tratamiento de señal aconsejado por el fabricante para medir humedad en matrices de naturaleza arcillosa se adapta correctamente en los dos casos. Del mismo modo, el

coeficiente de correlación de ambos ajustes es muy bueno, poniendo de manifiesto la proporcionalidad existente entre las lecturas del equipo (S) y los valores de humedad de las muestras (X_1).

3.2.3.4 Evaluación del funcionamiento del equipo y precisión de la medida

Tomando como punto de partida los principales resultados mostrados en la bibliografía [90] se evaluó el funcionamiento del dispositivo una vez calibrado. Concretamente, se verificó, por una parte, la adecuada correlación entre las humedades de los soportes recién prensados y las del polvo atomizado con el que se conformaban. Y, por otra parte, el efecto sobre la precisión de la medida de variables, como el coloreado en seco efectuado en algunos lotes de producto, o la presencia de relieves decorativos generados durante el prensado en la cara vista de los soportes.

3.2.3.4.1 *Correlación entre las medidas de humedad realizadas sobre los soportes y la humedad del polvo atomizado*

Un aspecto clave, para dar validez al sistema de medida puesto a punto, era que la lectura realizada por el medidor directamente sobre un determinado soporte industrial fuera equivalente a la humedad que presentaba, al encontrarse contenido en la tolva del sistema de alimentación de la prensa, el polvo atomizado con el que se habría conformado ese mismo soporte. En caso de existir discrepancias significativas entre ambas medidas, el desarrollo de los bucles de control de la operación de prensado planteados en el trabajo, podría haberse visto comprometido. Para evidenciar la buena correlación entre ambas medidas, fue necesario realizar un seguimiento de las medidas proporcionadas por el equipo calibrado. Así, a través del procedimiento de muestreo manual de polvo descrito en el apartado 3.2.2, se determinaron por secado en estufa, las humedades de múltiples muestras de polvo atomizado STD, para compararlas con la indicada por el equipo al paso de los soportes conformados con el mismo polvo.

A priori, el grado de homogeneización con el que llegaba el polvo al sistema de alimentación de la prensa era bastante grande, gracias a la existencia de un sistema de dosificación (ver figura 1.14) que repartía el polvo en movimientos de vaivén sobre la superficie del atomizado contenido en la tolva. Pese a ello, se consideró igualmente interesante evaluar las diferencias de humedad que pudieran darse entre los dos laterales de la tolva. Como se ha expuesto anteriormente, el medidor se instaló de manera que garantizaba la lectura de una de las piezas laterales de cada fila de piezas conformada, concretamente, la pieza del lado derecho en el sentido de avance hacia el secadero. Realizando el seguimiento con muestras tomadas en cada lateral del sistema de alimentación, se aseguraría que la lectura efectuada sobre un único soporte de cada fila conformada, era representativa de la humedad del polvo que se estuviera prensando en cada momento.

En el gráfico de la figura 3.14 se han superpuesto, sobre la recta de calibrado del medidor (con un incremento de “trim” de 0,16 %, b.s. respecto al calibrado estático mostrado en la figura 3.13), los valores de humedad obtenidos con el método de referencia para los muestreos realizados a derecha e izquierda de la tolva. Como puede observarse, la estimación de la humedad del polvo atomizado realizada por

el equipo a partir de la recta de regresión es buena, independientemente del lado del alimentador considerado. El análisis de los datos revela una desviación típica de 0,07 % b.s., la cual proporcionaría un error en la medida de la humedad, para un intervalo de confianza del 90 %, de $\pm 0,12$ % b.s., el cual se considera adecuado para plantear un control preciso de esta variable.

Estos datos pusieron de manifiesto que el procedimiento de calibración en estático, basado en la preparación de probetas conformadas a diferentes humedades, que posteriormente era adaptado a unas condiciones de funcionamiento en dinámico, era válido para estimar con precisión el contenido en humedad del polvo atomizado. En efecto, en ausencia de paradas en la línea de fabricación, el tiempo que transcurría entre la llegada del polvo a la tolva del sistema de alimentación de la prensa y el paso por debajo del sensor de los soportes conformados con este polvo, era lo suficientemente corto, como para no implicar grandes cambios en el contenido en humedad del material.

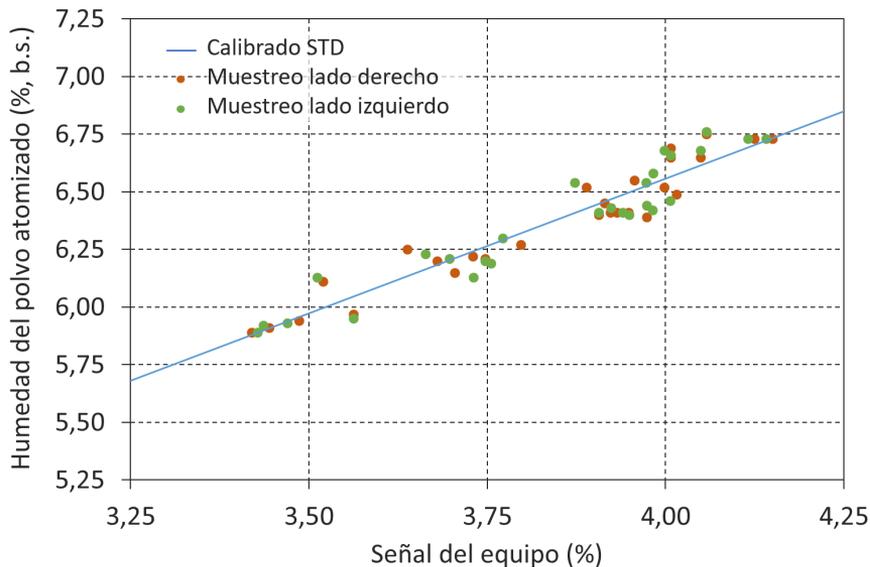


Figura 3.14. Valores de la humedad de muestras de polvo atomizado recogidas en el sistema de alimentación de la prensa superpuestas sobre la recta de calibrado de la composición STD.

Al mismo tiempo que se realizaron las pruebas experimentales para evidenciar si la medida realizada directamente sobre los soportes era representativa de la humedad del polvo atomizado, fue necesario comprobar la estabilidad de funcionamiento del equipo. De no haberse realizado esta verificación en paralelo, no habría sido posible diferenciar las posibles pérdidas de precisión relacionadas con una falta de estabilidad del equipo, por efecto de ciertas variables externas, tales como los cambios de temperatura o de la humedad ambiental, de aquellas derivas en la medida asociadas a, por ejemplo, la utilización de un calibrado inadecuado o cambios en la composición del producto.

La verificación de la estabilidad del equipo se realizó haciendo uso de los patrones de referencia proporcionados por el fabricante. Estos patrones se anclan mecánicamente a la ventana de medida del transductor. Al analizarlos, el equipo debe proporcionar una señal completamente estable, siempre que no existan problemas de medida intrínsecamente relacionados con su funcionamiento, como podrían ser, el desgaste de la lámpara, el ensuciamiento de la ventana o las derivas térmicas de los componentes electrónicos, entre otros.

En la gráfica de la figura 3.15 se ha representado la evolución en el tiempo de la señal proporcionada por el equipo al mostrarle los patrones de referencia. Se comprueba que, a lo largo de los prácticamente 3 meses de tiempo en los que se realizaron las pruebas de validación de la tecnología, el funcionamiento del equipo fue completamente estable en el rango de señales evaluado. No obstante este buen comportamiento, los patrones de referencia fueron utilizados regularmente a lo largo de todo el periodo de investigación, considerándose una herramienta de verificación imprescindible para garantizar el buen funcionamiento de los desarrollos resultantes de este trabajo.

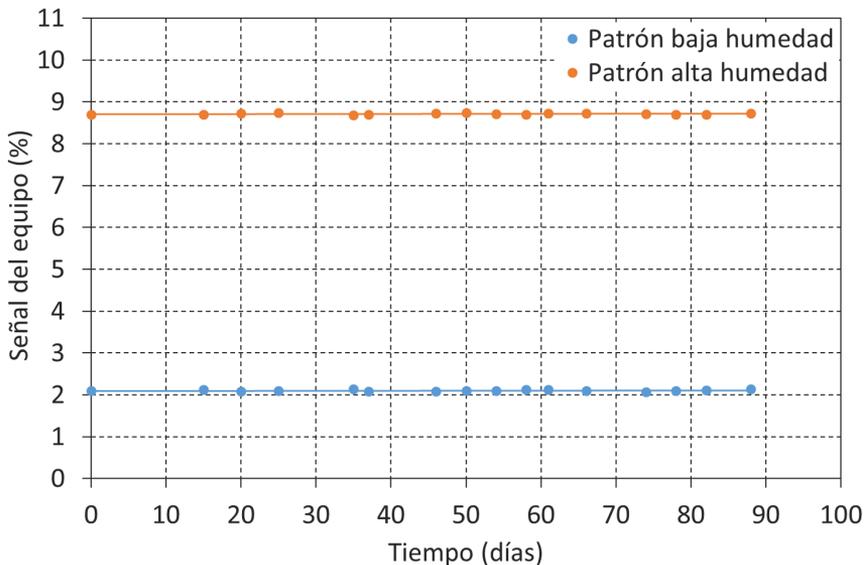


Figura 3.15. Evolución en el tiempo de la señal proporcionada por el medidor de humedad al analizar los patrones de referencia facilitados por el fabricante del equipo.

3.2.3.4.2 Evaluación de la incidencia de algunas variables externas sobre la medida

Según se describe en la bibliografía [90], las variables que pueden perturbar la medida de un espectrómetro NIR similar al empleado en este trabajo son: la temperatura del producto, la temperatura interna del equipo (relacionada con la temperatura ambiente), la humedad relativa del aire y la propia porosidad de los soportes recién prensados. A todas estas variables, en el caso de la aplicación industrial desarrollada en esta investigación, es importante incorporar, por un lado, el posible efecto sobre la medida de los pequeños cambios de composición química de la matriz cerámica,

asociados a la coloración en seco del polvo atomizado, y por otro lado, la influencia que puedan tener los cambios de altura originados por la presencia de relieves de prensado en la superficie de los soportes.

De estas variables, la influencia de las referentes a condiciones ambientales fue indirectamente evaluada al realizar el seguimiento de la estabilidad del medidor con los patrones de referencia proporcionados por el fabricante. A lo largo de todo el periodo de evaluación de la tecnología y en las fases posteriores de la investigación, las lecturas proporcionadas por el medidor, al analizar los patrones de referencia, fueron siempre las mismas en diferentes condiciones de temperatura y humedad ambiente. Por ello, seguidamente, se hará referencia exclusivamente a las verificaciones realizadas para comprobar el efecto sobre la medida de la porosidad de los soportes, de la coloración del polvo atomizado y de la presencia de relieve superficial.

■ Efecto de la porosidad de los soportes recién prensados

Para comprobar la incidencia de la porosidad del soporte sobre las medidas de humedad se compactaron, a una misma humedad de prensado (5,95 %, b.s.), piezas a diferentes presiones específicas máximas y se determinó su humedad con el medidor instalado en línea. En el gráfico de la figura 3.16 se muestra como se modificó la lectura proporcionada por el equipo con los cambios de presión específica. En el eje horizontal superior se recoge la densidad aparente en seco que tendrían los soportes a cada presión de prensado, según el diagrama de compactación de la composición STD.

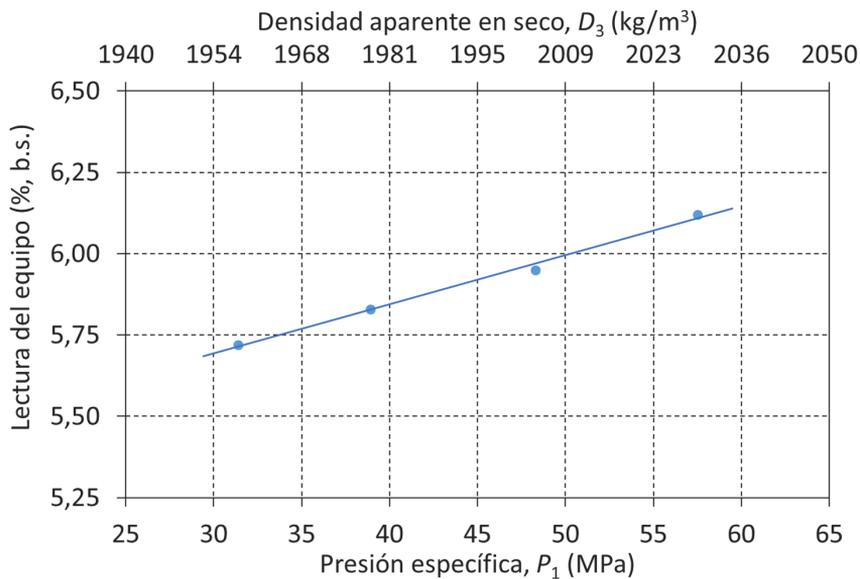


Figura 3.16. Lectura de humedad proporcionada por el medidor para diferentes densidades aparentes de los soportes conformados.

Las variaciones de la porosidad de los soportes recién prensados, originadas como consecuencia de las fluctuaciones que puedan producirse en la presión de prensado

o en la propia humedad del polvo, dan como resultado los cambios en la medida de la humedad observados en la figura 3.16, fundamentalmente, por dos motivos. En primer lugar, porque se produce una ligera alteración de la matriz con la cual interacciona la luz emitida por el equipo y eso origina un cambio en la cantidad de radiación infrarroja reflejada por el material. Y en segundo lugar, porque al modificarse la porosidad del soporte, se produce un cambio en el coeficiente de difusión del agua a través de su estructura porosa [91], que cambia ligeramente su velocidad de secado y, con ello, la cantidad de agua detectada superficialmente.

Si se incrementa la porosidad de la pieza, para un mismo contenido en humedad, la cantidad de material sólido con el que interacciona la luz infrarroja es menor, quedando absorbida una proporción inferior de la radiación infrarroja incidente. Además, al mismo tiempo la reducción de la tortuosidad de la estructura porosa provoca que el coeficiente de difusión aumente, facilitando el secado del producto y reduciendo su humedad superficial. Ambos fenómenos contribuyen, por tanto, a un incremento de la radiación retrodispersada detectada por el sensor, que se traduce en un ligero incremento de la humedad registrada. Lo contrario sucede, si se reduce la porosidad de los soportes, para un contenido en humedad dado. Por una parte, disminuye la fracción de radiación reflejada, al interaccionar la luz incidente con una mayor cantidad de sólido y, por otra parte, la humedad superficialmente detectada aumenta ligeramente al disminuir el coeficiente de difusión del soporte y verse dificultado su secado.

A pesar de la influencia de la porosidad detectada, esta únicamente supone un cambio en la lectura de humedad del equipo de 0,08 % b.s., por cada 15 kg/m³ de variación en la densidad aparente en seco. Teniendo en consideración que la densidad aparente en seco es un parámetro que en condiciones óptimas de operación no debería sufrir cambios superiores a los 10 kg/m³, al fabricar soportes de gres porcelánico, puede decirse que el efecto de esta variable tiene realmente muy poca importancia.

■ Efecto de la coloración en seco de la composición

La planta en la que se realizó la experimentación industrial coloreaba, por mezclado en seco con pigmentos cerámicos de naturaleza inorgánica, algunos de los lotes de polvo atomizado previamente a su conformado. Por ser esta una práctica habitual de muchas otras empresas dedicadas a la fabricación de baldosas de gres porcelánico esmaltado, se consideró imprescindible evaluar la incidencia, que tenía sobre la medida, la coloración del polvo atomizado STD con las siguientes tipologías y proporciones de pigmento:

- Atomizado STD + 0,5 % en peso de pigmento negro
- Atomizado STD + 0,25 % en peso de pigmento gris
- Atomizado STD + 0,25 % en peso de pigmento rojo

Para ello se realizó un seguimiento de las medidas del equipo, a lo largo de diferentes lotes fabricados con las coloraciones indicadas, haciendo uso del calibrado obtenido para la composición STD. Todo ello, con el objetivo de comparar las medidas proporcionadas por el medidor con las obtenidas por secado en estufa de muestras de polvo recogidas en la tolva de la prensa.

En la figura 3.17 se han representado las lecturas registradas por el equipo al medir la humedad de los soportes conformados con las diferentes composiciones, frente a la humedad del polvo atomizado determinada por secado en estufa. En el caso de la composición STD, junto a los datos referentes al seguimiento realizado para validar industrialmente la calibración del equipo (ver figura 3.14), se han incorporado datos adicionales obtenidos durante las pruebas destinadas a evaluar el efecto de la coloración. Como puede observarse, tanto los puntos correspondientes a la composición STD, como los referentes a la composición STD coloreada con un 0,5 % de pigmento negro y un 0,25 % de pigmento gris, se encuentran sobre la diagonal del gráfico. Esto indica la buena correlación entre las medidas experimentales y las lecturas del medidor, independientemente de que el atomizado de base hubiera sido coloreado con dichos pigmentos. De hecho, considerando estos datos adicionales la desviación estándar de las muestras solo aumenta ligeramente a 0,09 % b.s., lo que para un intervalo de confianza del 90 %, se traduce en un error en la medida de $\pm 0,15$ % b.s.

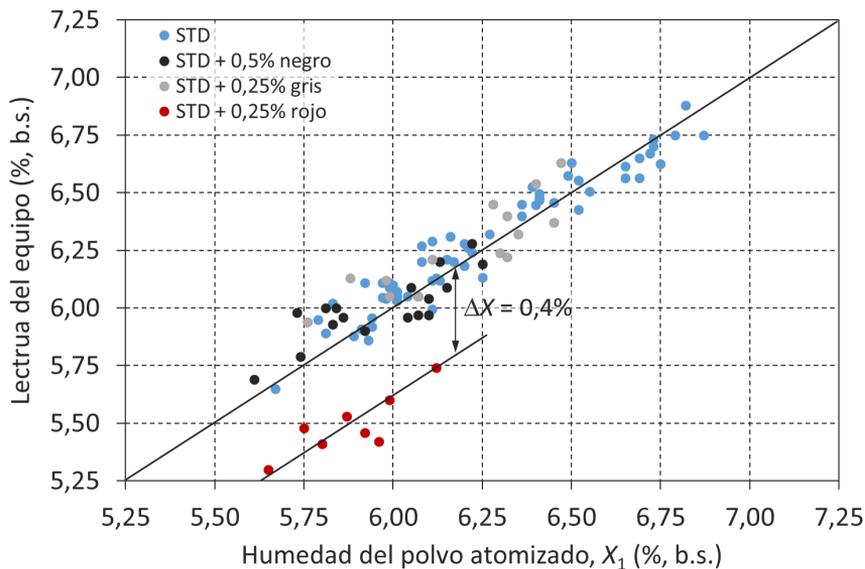


Figura 3.17. Lectura de la humedad proporcionada por el medidor para diferentes coloraciones de la composición de atomizado STD.

Por el contrario, no sucedía lo mismo cuando la coloración se realizaba con un 0,25 % de pigmento rojo. En ese caso, los datos recogidos no coinciden con la diagonal de la representación, pues el equipo proporcionaba medidas de humedad más bajas de lo esperado. Si bien la influencia de la composición y cantidad añadida de los pigmentos negro y gris no influían significativamente en la interacción entre la radiación infrarroja emitida por el medidor y el producto, el cambio causado por la introducción del pigmento rojo en la matriz de análisis era lo suficientemente importante, como para que el algoritmo de tratamiento de señal, internamente utilizado por el equipo, no resolviese del mismo modo la determinación del contenido en agua de los soportes.

El comportamiento observado puso de manifiesto la necesidad de realizar nuevos calibrados para trabajar con ciertas composiciones coloreadas, independientemente de que fueran obtenidas a partir del mismo polvo atomizado de base. En cualquier caso, y como queda ilustrado en la figura 3.17 para la composición coloreada con el pigmento rojo, en la mayoría de los casos, para tener una medida de humedad lo suficientemente precisa, bastaba con la adaptación de un calibrado ya existente mediante una corrección del parámetro de “trim”, en este caso un aumento de 0,4 % b.s. respecto al calibrado industrial realizado con la composición STD. Aplicando esta corrección al calibrado y pese al pequeño tamaño de la muestra disponible, la estimación de la medida de humedad sobre la composición coloreada de rojo presentaba una desviación estándar de 0,08 % b.s. y un error de $\pm 0,15$ % b.s. para un intervalo de confianza del 90 %.

■ Incidencia de la presencia de relieve en la superficie de los soportes

Para evaluar la influencia sobre la medida de humedad del posible relieve existente en la superficie de las piezas, se realizó un seguimiento de la producción de lotes fabricados a partir de la composición STD, sin colorear, diferenciando entre acabados de soporte liso y acabados con relieve decorativo.

En la gráfica de la figura 3.18 se muestran las lecturas de humedad proporcionadas por el medidor en función de la humedad del polvo para los dos acabados superficiales considerados. Como puede apreciarse, los datos siguen manteniéndose en la diagonal del gráfico, lo cual refleja la buena correlación entre las medidas. Concretamente, el análisis detallado de los datos revela un error en la medida de $\pm 0,15$ % b.s., para un intervalo de confianza del 90 %, muy similar al observado para los otros efectos estudiados.

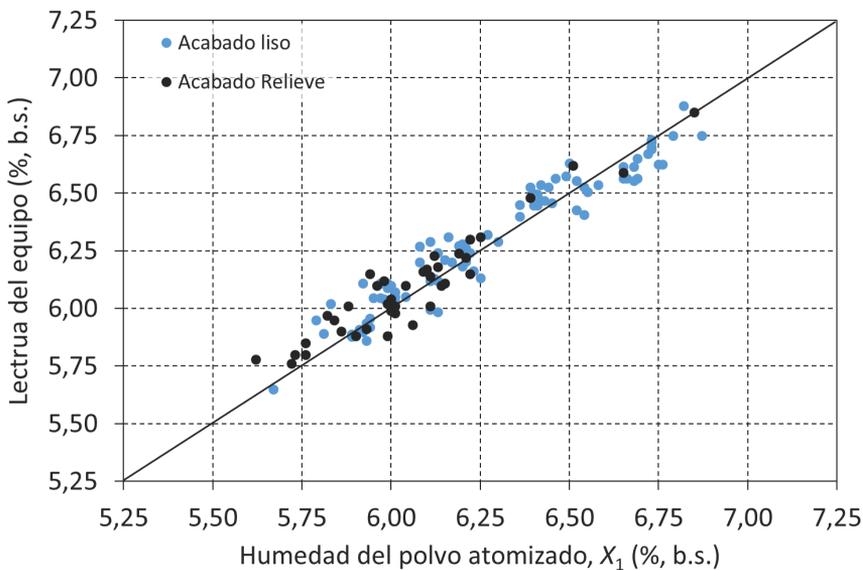


Figura 3.18. Lectura de la humedad proporcionada por el medidor para soportes de la composición de atomizado STD con acabado liso y con acabado en relieve.

3.3 Simulación del comportamiento del material en el proceso

Las técnicas de simulación permiten experimentar en un entorno modelizado el comportamiento de un sistema a medida que este evoluciona en el tiempo, con el fin de comprender mejor y mejorar dicho sistema [92]. Aunque la experimentación en planta ha constituido una parte esencial de este trabajo, ha sido necesario recurrir a un modelo de simulación, que contemplase las ecuaciones de comportamiento del material, por las siguientes razones [93]:

- La experimentación en planta puede resultar muy costosa, sobretodo, cuando supone la interrupción de las operaciones cotidianas de un proceso productivo o implica el empeoramiento de estas, al proporcionar resultados que pueden no ser todo lo positivos que se hubiese esperado. En cambio, en una simulación los cambios o pruebas pueden acometerse sin realizar ningún tipo de intervención sobre el proceso físico real, que pueda mermar la calidad de los productos fabricados, el rendimiento de los procesos o la satisfacción de los clientes.
- La experimentación industrial suele consumir mucho tiempo, requiriéndose en la mayoría de los casos semanas o meses para extraer conclusiones certeras de la influencia de una posible mejora sobre el proceso o los productos fabricados. Los modelos de simulación, por su parte, pueden proporcionar resultados en muy poco tiempo, dependiendo del tamaño del modelo y de la complejidad del problema a resolver.
- Al comparar diseños o soluciones de proceso alternativas es muy útil tener controladas las condiciones experimentales bajo las que se evalúan, con el fin de poder realizar comparativas directas, lo cual es bastante complicado en condiciones reales. Con un modelo de simulación, las condiciones experimentales deseadas pueden repetirse tantas veces como se requiera. Esto es especialmente importante en este trabajo en el que se compara el efecto de diferentes estrategias de control de la operación de prensado, previamente a su implementación y validación industrial.
- Finalmente, la última razón que puede justificar el desarrollo de un modelo de simulación es que el entorno que se quiera simular no exista. La experimentación directa en estos casos no es posible, quedando como única alternativa el desarrollo de un modelo. Esto mismo sucedió en este trabajo, en el que al inicio del mismo no se disponía de un sistema de regulación del prensado destinado al control de la estabilidad dimensional de los productos fabricados, por lo que previamente a su implantación industrial fue conveniente realizar su simulación.

En este apartado se describe brevemente la técnica de simulación por eventos discretos, que ha sido la empleada para la preparación del modelo de simulación, y se exponen las características de las simulaciones realizadas, especialmente en lo referente a las posibles estrategias de control de la operación de prensado planteadas.

3.3.1 Simulación dinámica mediante eventos discretos

El procesado de las baldosas cerámicas, desde su conformado hasta su embalado final, se enmarca perfectamente dentro de la tipología de proceso discreto [94]. En contraposición con los procesos continuos, en los que el estado del sistema cambia continuamente en el tiempo, los procesos discretos están constituidos por una serie de secuencias o eventos, que tienen lugar en un momento determinado del tiempo. Los procesos continuos implican habitualmente operaciones de transformación en las que se manipulan fluidos como, por ejemplo, las plantas químicas o las refinerías de petróleo, o incluso, dentro del propio proceso cerámico, las etapas de preparación de materia prima como pueden ser la molienda y la atomización. Por su parte, ejemplos de procesos discretos serían la mayor parte de los procesos de manufactura, los sistemas de transporte, los sistemas públicos, como los hospitales o las administraciones públicas, y todos aquellos procesos y sistemas que impliquen la gestión de colas [95].

Para la generación del modelo de simulación utilizado en la investigación, se ha empleado una técnica denominada Simulación Dinámica por Eventos Discretos (DES, acrónimo del inglés Discrete-Event Simulation). Esta metodología permite modelar un determinado sistema como una secuencia (discreta) de eventos en el tiempo. Durante la simulación, cada evento marca un cambio en el estado del sistema considerándose que, entre dos eventos consecutivos, no se produce ningún cambio en el mismo [96].

De manera general, la DES se emplea para modelizar sistemas que impliquen la gestión de colas. El sistema se representa como entidades que fluyen entre las diferentes actividades que constituyen el proceso, estando estas separadas por colas. Las colas se llenan de entidades a medida que van llegando a una determinada actividad con una velocidad mayor que la velocidad a la que pueden ser procesadas por la actividad. Aunque pueda parecer que muy pocos sistemas son modelizables de este modo, la aplicación de esta metodología es muy variada, existiendo gran cantidad de sistemas o procesos que responden a la teoría de los sistemas de colas, independientemente de que las entidades que fluyen a lo largo del sistema sean elementos físicos, personas o información.

En el modelo DES del proceso cerámico, las piezas cerámicas serían entidades físicas que fluirían a través de los sistemas de transporte, apiladores, sistemas de almacenamiento y equipos de procesado que constituyen las diferentes líneas de la planta cerámica. Las colas, por poner un ejemplo, serían el propio parque de vagonetas guiadas existente entre las secciones de esmaltado y cocción, los pulmones de almacenamiento vertical, que suelen encontrarse en diferentes partes de las líneas de fabricación, comúnmente denominados “compensers” o los formadores de filas de piezas existentes generalmente en las entradas de los secaderos y hornos.

La implementación de un modelo DES puede realizarse empleando librerías específicas desarrolladas para lenguajes de programación de alto nivel como C++ o Python[®]. Sin embargo, en este trabajo, se ha preferido utilizar una herramienta de código abierto denominada JaamSim[®] [97], cuyo uso no requiere de conocimientos avanzados de programación y permite obtener, con tiempos de desarrollo relativamente cortos, soluciones de gran utilidad. JaamSim[®] (Java Animation Modelling and Simulation) es

un software de simulación por eventos discretos cuyo desarrollo se inició en 2002. El paquete incluye un interfaz de usuario gráfico, un motor de animaciones 3D y un conjunto completo de objetos y utilidades para la construcción de modelos de simulación [98]. Se trata de una solución orientada a objetos, extremadamente rápida y escalable hasta aplicaciones de tamaño considerable (modelos con más de 300.000 entidades han sido probados con velocidades de procesamiento aceptables).

Junto con el hecho de presentar un corto periodo de aprendizaje, la otra razón por la que se ha seleccionado JaamSim[®] es que, al tratarse de un paquete de código abierto, el código de programación se distribuye libremente. Esto permitirá en un futuro modificar o crear objetos y métodos de modelización, directamente en el código fuente, que posibiliten, en caso de necesidad, adaptar el desarrollo genérico de Jaamsim[®] a las especificidades del proceso de fabricación de baldosas.

3.3.2 Implementación del modelo de simulación

El modelo de simulación desarrollado mediante DES, del cual se muestra una vista en 3D en la figura 3.19, está constituido por dos líneas de conformado y decoración, con las mismas capacidades productivas que la existente en las instalaciones industriales en las que se abordó la experimentación. Cada una de las líneas consta de una prensa hidráulica con una capacidad máxima de prensado de 50 MN, un secadero horizontal y una línea de esmaltado con varias aplicaciones decorativas. Aunque los trabajos en planta se realizaron en una única línea de procesamiento en crudo del material, en el modelo se ha preferido implementar dos líneas para poder realizar simultáneamente dos simulaciones en condiciones de operación diferentes y agilizar, de este modo, la obtención de resultados. El modelo se completa con un parque de almacenamiento en vagones de material crudo y un horno monoestrato de rodillos con las mismas características que el empleado en la experimentación industrial. Por simplicidad, y ya que las propiedades del producto cocido objeto de estudio quedan definidas a la salida del horno, se ha optado por no incluir la sección de clasificación y embalado del producto final, si bien hay que indicar que la herramienta JaamSim[®] permitiría su implementación en el modelo.

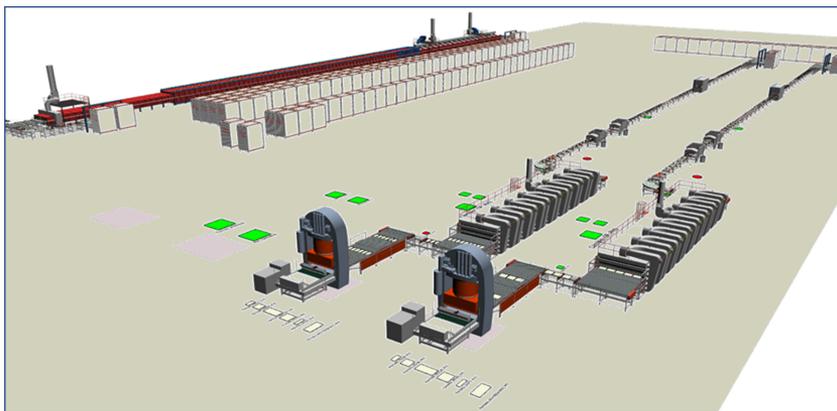


Figura 3.19. Vista 3D del modelo DES implementado.

El modelo ha sido planteado para poder simular la fabricación de lotes de baldosas cerámicas de gres porcelánico de los cinco tamaños nominales recogidos en la tabla 3.2. A pesar de que, desde un punto de vista tecnológico, la incidencia del régimen productivo de la instalación sobre la estabilidad dimensional del producto, como variable de interés resultante de las simulaciones, no presenta significación, en el modelo se ha implementado el mismo régimen productivo seguido en las instalaciones industriales reales. En concreto, una turnicidad de 3 turnos/día, 5 días a la semana, en las secciones de conformado y esmaltado y de 3 turnos/día, 7 días a la semana, en el horno.

Junto con todo el equipamiento empleado en la ejecución de las diferentes etapas de proceso consideradas, el modelo incluye todos los sistemas de transporte necesarios para realizar la manipulación del producto semielaborado entre ellas. Así, se simula el transporte de las piezas en las rodilleras de salida de las prensas, los formadores de filas de entrada y salida de secaderos y hornos, las cintas de correas de las líneas de esmaltado o el almacenamiento y transporte en vagonetas, entre otros. A modo de ejemplo, en las imágenes de la figura 3.20, se muestra, por un lado, un detalle de la vista en planta del modelo 3D, correspondiente a la sección de prensado y secado, y por otro lado, una vista esquemática de exactamente la misma zona del modelo, en la que quedan reflejados los diferentes diagramas de bloques y módulos en el entorno de programación JaamSim[®]. En concreto, en la simulación ejecutada en el momento de realizar las capturas mostradas, en la línea situada en la parte inferior se estaba simulando el procesado de piezas cuadradas de 600 mm x 600 mm de tamaño nominal cocido, mientras que en la otra línea se evaluaba la producción de piezas rectangulares de 1200 mm x 600 mm de tamaño.

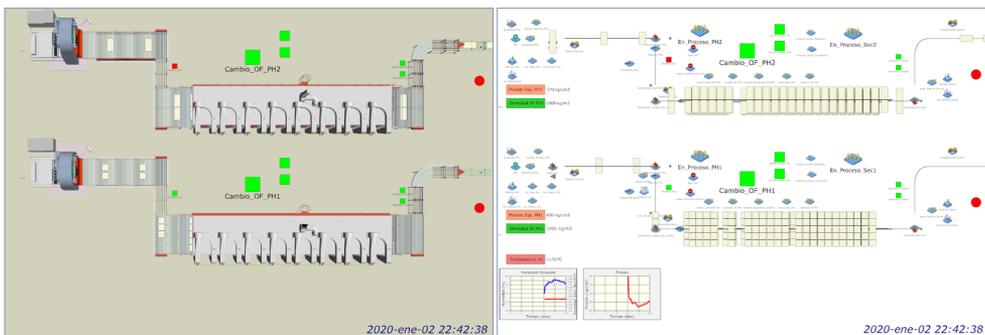


Figura 3.20. Vista en planta de detalle de la sección de prensado en el modelo DES implementado. Izquierda, modelo 3D; derecha, modelo con diagrama de bloques.

Una peculiaridad de JaamSim[®], compartida también por otros softwares de simulación DES, es que permite asignar a las entidades simuladas una serie de atributos que, además, pueden ir modificándose a medida que transcurre la simulación. Esta funcionalidad ha sido empleada en el modelo implementado para asignar a las piezas simuladas sus propiedades y, lo que es más importante, como estas iban cambiando, de acuerdo a las leyes de comportamiento del material simulado, a lo largo de las diferentes etapas de fabricación.

A modo de ejemplo, en la figura 3.21 se muestran los atributos de dos piezas, durante una simulación dada, justo a la salida de las prensas. Por un lado, se distinguen los atributos de la pieza referenciada como PH1_1199, de tamaño nominal cocido 600 mm x 600 mm, procesada en la línea PH1 del modelo, y por otro lado, los de la PH2_8085, de tamaño nominal 450 mm x 450 mm, conformada en la línea PH2. Como puede comprobarse, en todo momento de la simulación, se tiene acceso, tanto a variables relacionadas con el procesado de las piezas, como por ejemplo, la presión específica (P_1) y la humedad (X_1) de conformado, como a propiedades de las piezas, entre las que destacarían la longitud característica (L_i), la densidad aparente en seco (D_3) o los cambios dimensionales experimentados (S_i). Nótese que en el momento de realizar la captura, los valores de S_3 y S_4 , correspondientes a la contracción de secado y a la contracción de cocción, respectivamente, son nulos, debido a que, a la salida de la prensa, los soportes todavía no han experimentado dichos cambios dimensionales.

Junto con las variables imprescindibles para estudiar la variación de la estabilidad dimensional de productos porcelánicos, el modelo se completó con otras de interés para el proceso, como el espesor o la masa, en vistas a una utilización futura del modelo en otras investigaciones. También hay que recalcar que, por motivos inherentes a la sintaxis de programación de JaamSim[®], aunque pueden tratarse los valores numéricos incluyendo sus unidades, resulta más sencillo tratar muchas de las magnitudes como adimensionales, de ahí que en la figura 3.21 la mayoría de ellas aparezcan sin las unidades correspondientes.

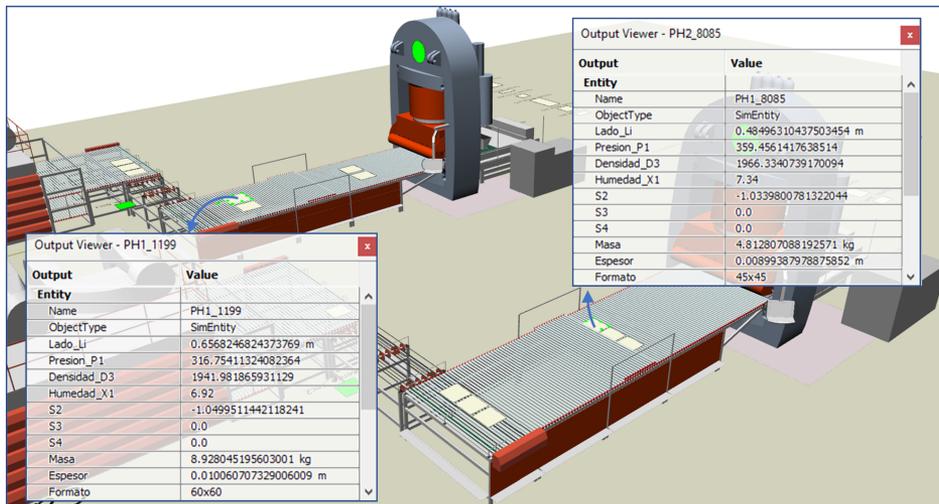


Figura 3.21. Vista del modelo mostrando en las tablas superpuestas los atributos de dos soportes recién prensados.

Para configurar los parámetros de los diferentes elementos, se han definido una serie de ficheros de encabezamiento, para cada uno de los tamaños de pieza a fabricar. Dichos ficheros incluyen, por ejemplo, las velocidades teóricas de los diferentes elementos de transporte, el número de piezas por fila procesadas en la prensa, el secadero o el horno, el número de piezas por fila y plano contenidas en las vagonetas de almacenamiento o la duración de los ciclos de secado y cocción. Además, para que el modelo

permita simular un determinado material y/o producto, se ha definido un fichero de inicialización en el que, por una parte, queda recogido el tamaño del lote productivo que se desea simular, así como el tamaño nominal de las piezas a procesar. Y por otra parte, los parámetros de ajuste de las leyes de comportamiento del material, según las ecuaciones 1.25, 1.27, 1.28 y 1.29.

En el esquema de la figura 3.22 se muestra el diagrama de flujo lógico que constituye el modelo conceptual simplificado [99] seguido para la implementación del modelo de simulación por ordenador. En él quedan recogidas las entradas y salidas del modelo, así como el contenido general de los cálculos que efectúa. La nomenclatura de las variables utilizada para su elaboración ha sido la misma que la empleada en la preparación del esquema de la figura 1.34.

El modelo recibe como variables de entrada, a través de ficheros externos, los datos y variables sombreados en verde en el diagrama de la figura 3.22, y proporciona, como salidas principales, los tamaños de las piezas a lo largo del proceso, L_i , los cuales quedan sombreados en rojo. Adicionalmente, mediante los objetos de captura de datos disponibles en el software, se registra la evolución en el tiempo de variables que afectan directamente a la estabilidad del producto, como la densidad aparente en seco, D_3 , y los cambios dimensionales, S_i . Aunque en el propio modelo se incorporan algunos elementos gráficos para realizar el seguimiento en tiempo real de los principales parámetros puestos en juego en las simulaciones, todos estos datos quedan almacenados en archivos de texto, que son posteriormente exportables a otras aplicaciones de cálculo para extraer estadísticas y realizar análisis comparativos.

La técnica DES permite introducir de manera sencilla en los modelos la variabilidad asociada a los procesos que vayan a ser simulados. Al estudiar un proceso industrial como la fabricación de baldosas, dicha variabilidad permite tener en consideración interrupciones y pérdidas de rendimiento productivo debidos a averías del equipamiento, acciones de mantenimiento preventivo, bajas productivas, interrupciones por incidencias en las líneas de transporte y paros para realizar cambios de referencia (modelo) y/o del tamaño del producto fabricado. En el estudio realizado, pese a tenerla en cuenta, este tipo de variabilidad no es crítica para obtener unos resultados que predigan correctamente el comportamiento del material en el proceso. En cambio, la variabilidad asociada a la dispersión de parámetros como la temperatura máxima de cocción, ΔT_4^* , o la presión máxima de prensado aplicada sobre el polvo, ΔP_1^* , tienen gran incidencia en los resultados obtenidos, tal y como ha quedado demostrado en los apartados 1.2.3.2.2 y 1.2.3.2.3. La primera es debida a los gradientes térmicos existentes en el horno, que causan que las piezas no sean procesadas todas exactamente a la misma temperatura máxima, y la segunda, a las diferencias de carga de polvo existente entre los alvéolos del molde o a la propia variabilidad del sistema de regulación de presión de la prensa.

La variabilidad introducida en el modelo se ha implementado mediante las funciones probabilísticas proporcionadas por JaamSim[®], las cuales han sido programadas utilizando algoritmos adaptados a partir de [92]. Estas funciones permiten generar de manera aleatoria datos que se ajustan a una determinada distribución probabilística, con el fin de simular el efecto de todas las variables indicadas. Concretamente, las dispersiones en la temperatura máxima de cocción y la presión máxima de prensado

han sido modelizadas mediante funciones de probabilidad normal respecto a un valor medio y para una desviación estándar dada.

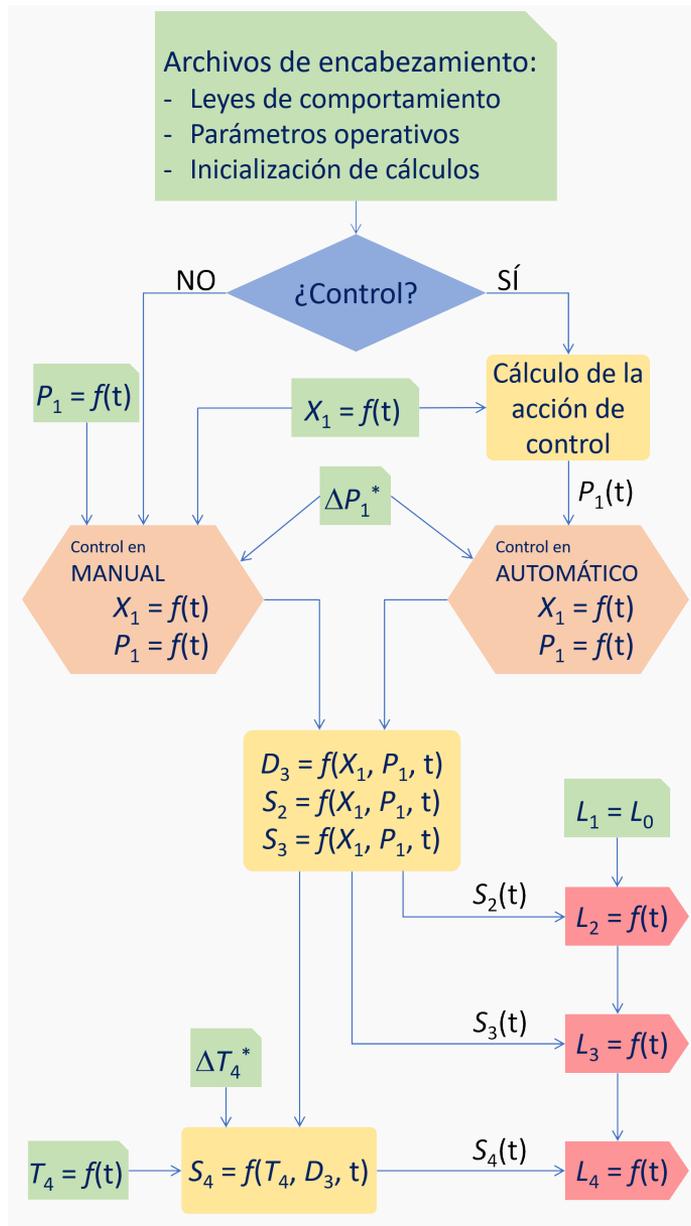


Figura 3.22. Diagrama de flujo mostrando la lógica del modelo conceptual planteado para la implementación del modelo de simulación DES.

Finalmente, hay que indicar que, a pesar de que el modelo permite disponer de una visualización en tiempo real del proceso de simulación, este puede también ejecutarse sin la necesidad de lanzar el motor gráfico, lo cual contribuye a disminuir sensible-

mente los tiempos de cálculo. La técnica resulta muy eficiente, permitiendo realizar simulaciones experimentales en cuestión de minutos. Así, por ejemplo, de manera general, una simulación correspondiente a 2 días de producción en el proceso físico real, se ha completado en una media de 1 minuto, empleando un ordenador convencional con un procesador Intel® Core i5 y una memoria RAM de 8 GB. En caso de necesidad, la herramienta podría ser empleada, acoplada con un algoritmo de optimización, para simular múltiples escenarios o alternativas en base a la modificación de los parámetros de entrada, con tal de proporcionar los resultados que mejor se adapten a unas necesidades concretas.

3.3.3 Simulación experimental del proceso

Como puede observarse en el modelo conceptual de la figura 3.22, el modelo de simulación fue preparado para simular el comportamiento del proceso en ausencia de cualquier tipo de control o bajo la acción de un sistema de control automático destinado a mejorar la estabilidad dimensional del producto terminado. Durante el transcurso de la investigación el modelo ha sido empleado para realizar simulaciones en ambas situaciones, las cuales, a su vez, responden a dos aspectos clave de la simulación experimental. Por un lado, el comprobar que los resultados proporcionados por el modelo describen con la suficiente precisión lo que sucede en la realidad y, por otro lado, la selección y comparación de diferentes escenarios alternativos que mejoren el comportamiento del proceso físico real. Este segundo aspecto, es de suma importancia pues proporciona una gran ayuda a la hora de seleccionar la alternativa más adecuada, ante varias posibilidades de implantación de mejoras en el proceso real.

En este sentido, los experimentos simulados tuvieron como objetivo, por una parte, validar el modelo constituyente que explica el comportamiento de los materiales en condiciones industriales, mediante la comparación de los resultados propuestos por el modelo, con los obtenidos en experimentos llevados a cabo en condiciones industriales. Y por otra parte, alcanzar un mejor entendimiento del proceso físico real y de las implicaciones que los sistemas de control planteados pudieran tener sobre el mismo. A continuación, se describen, brevemente, los dos tipos de simulaciones experimentales realizadas con el modelo planteado.

3.3.3.1 Simulación de maniobras en proceso y funcionamiento convencional

Para simular la evolución del proceso en condiciones convencionales de operación, o reproducir su comportamiento frente a determinadas maniobras efectuadas sobre los parámetros de fabricación, el modelo debía alimentarse con la evolución en el tiempo de las variables independientes del conformado ($X_1 = f(t)$ y $P_1 = f(t)$ en el diagrama de la figura 3.22). Los datos de humedad del polvo atomizado eran obtenidos a partir de las medidas realizadas con el transductor de humedad puesto a punto, mientras que las presiones se registraban a través de la comunicación establecida con el ordenador de automatización de la propia prensa, como queda descrito en el apartado 3.2.1.

Puesto que el transductor de humedad únicamente proporcionaba un dato de humedad por ciclo de prensado, si el tamaño de pieza simulado implicaba conformar

más de una pieza por ciclo, se incorporaba una variabilidad adicional sobre la medida de humedad registrada por el transductor. Para ello, del mismo modo que con ΔT_4^* y ΔP_1^* , se empleaba una distribución normal, con una desviación estándar igual a la obtenida en las pruebas de validación de la tecnología de espectrometría NIR empleada (ver apartado 3.2.3).

Respecto a la evolución de la temperatura máxima de cocción con el tiempo ($T_4 = f(t)$ en la figura 3.22), aunque el modelo está preparado para introducirla como una variable, al igual que las condiciones de conformado, en los casos resueltos se ha considerado constante a lo largo de toda la simulación experimental. Únicamente se ha aplicado sobre ella la variabilidad asociada a los gradientes térmicos del horno, haciendo uso de la distribución normal anteriormente comentada. Se ha preferido proceder de esta forma porque, para disponer de la evolución real de la temperatura de cocción, habría sido necesario implementar una pasarela de comunicaciones con el sistema de automatización del horno industrial en el que se ha llevado a cabo la experimentación, aspecto que no pudo abarcarse en el desarrollo del trabajo.

Así pues, a partir de estos datos y de la variabilidad intrínseca de proceso asociada a la temperatura máxima de cocción y la presión máxima de prensado, que se deseaba considerar (ΔT_4^* y ΔP_1^*), se lanzaba la simulación para unas propiedades de la composición de soporte y características del producto dadas. Como resultado de las simulaciones se obtenían, recogidos en una serie de ficheros de texto plano, los cambios dimensionales experimentados por cada soporte simulado (S_i) y el tamaño de los mismos (L_i), a lo largo de las diferentes etapas del proceso. Y además, los valores de las condiciones de procesado experimentadas por cada soporte, entre ellas, la densidad aparente en seco (D_3), la presión máxima de prensado (P_1), la humedad de los soportes conformados (X_1) y la temperatura máxima de cocción (T_4).

3.3.3.2 Simulación de estrategias de control

Las simulaciones experimentales realizadas para evaluar la incidencia de una determinada estrategia de control sobre la estabilidad dimensional del producto partían, en parte, de los mismos ficheros de encabezamiento que las descritas en el punto anterior. La única diferencia en cuanto a los datos de entrada residía en el hecho de que no era necesario proporcionarle al modelo la evolución en el tiempo de la presión específica de prensado para realizar los cálculos, pues esta variable era determinada por el propio modelo, a lo largo de la simulación, dependiendo del tipo de acción de control preestablecida. Del mismo modo, y condicionada por la estrategia de control, era necesario indicar el valor de la variable de consigna.

Así pues, una vez validado el modelo de comportamiento del material en condiciones industriales, se realizaron simulaciones que evaluaban la influencia, sobre la estabilidad dimensional de los productos fabricados, de las acciones de control involucradas en un total de tres estrategias de control diferentes. Todas ellas seguían un principio de control anticipativo al estar fundamentadas en la medida de la perturbación (la humedad de conformado), antes de que su efecto se propagara en el proceso.

El esquema de la figura 3.23 representa, haciendo uso de la notación formal de la teoría del control de procesos, el diagrama de bloques de los diferentes componentes que

constituyen un control anticipativo/retroalimentado [100] (Feedforward-Feedback, FF) de la operación de conformado, basado en la medida de la humedad de los soportes. Aunque la variable de proceso que se busca mantener constante al controlar la estabilidad dimensional del producto final es su tamaño, en el esquema se considera como variable controlada una variable genérica, Y_c , que a priori debería ser el tamaño final de pieza, pero que, para algunas de las estrategias planteadas es una variable relacionada con dicha estabilidad dimensional, como puede ser la densidad aparente en seco. Los sistemas de control anticipativos son realmente bucles de control abiertos que no requieren de una medida directa de la variable controlada para funcionar, sino únicamente de una medida anticipada de la perturbación, X_{1m} . De todas maneras, siempre es aconsejable complementar el control anticipativo con un bucle cerrado de control retroalimentado, o realimentado, dependiendo del autor consultado [101], que permita comprobar que la acción de control realizada modifica adecuadamente los parámetros de funcionamiento del sistema para llevar la variable controlada al valor de consigna prestablecido, Y_{SP} . Dicha retroalimentación puede realizarse a través de una medida directa de la variable controlada, Y_m , o de una estimación indirecta, Y_e , como era el caso de algunas de las estrategias planteadas.

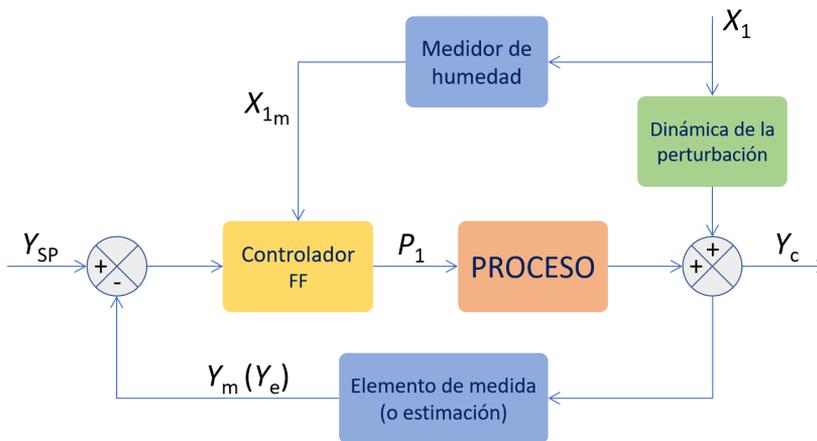


Figura 3.23. Diagrama de bloques del control anticipativo de la operación de conformado basado en la medida de la humedad de los soportes, aplicable a las tres estrategias de control evaluadas.

Seguidamente, se describen brevemente las características más importantes de las estrategias de control anticipativo simuladas, dándose más detalle sobre ellas al exponer y discutir, más adelante, los resultados de la investigación.

- *Control basado en mantener constante la densidad aparente en húmedo de los soportes recién prensados*

Por ser el control basado en la constancia de la densidad aparente en húmedo una práctica que, aunque inadecuada, es bastante habitual en la industria, esta fue una de las primeras estrategias simuladas. En estos casos se fijaba como consigna de trabajo una densidad aparente para los soportes a la salida de la

prensa (D_2) y se modificaba la presión específica máxima para compensar las oscilaciones en la humedad del polvo atomizado. Puesto que el diagrama de compactación de las composiciones de soporte, que es utilizado para calcular las acciones de control en este tipo de estrategia, está confeccionado con respecto a la densidad aparente en seco, fue necesario considerar la ecuación 1.26, anteriormente introducida, que relaciona esta variable con la densidad aparente en húmedo.

El esquema de la figura 3.24 muestra el diagrama de bloques del control anticipativo basado en el control de la densidad aparente en húmedo. La presión a imponer en la prensa se calcula mediante la resolución de la función $D_2 - f(X_1, P_1) = 0$, derivada a partir de la combinación de la ecuación del diagrama de compactación (1.25), con la ecuación 1.26.

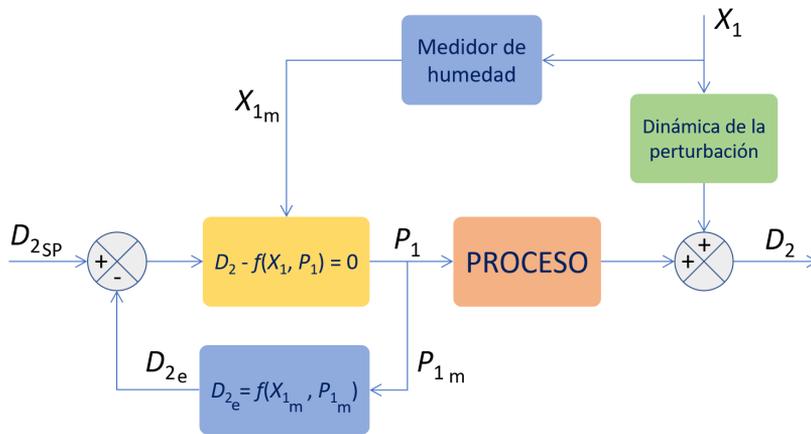


Figura 3.24. Diagrama de bloques del control anticipativo de la operación de conformado basado en la densidad aparente en húmedo.

- *Control basado en mantener constante la densidad aparente en seco de los soportes recién prensados*

La segunda estrategia evaluada perseguía mantener, dentro de un margen de variación máxima, la densidad aparente en seco de los soportes recién prensados, la cual, tal y como se ha expuesto en la introducción, es la variable macroscópica directamente relacionada con la porosidad de los soportes. Para ello, en estas simulaciones se fijaba como consigna de trabajo una densidad aparente de los soportes, en ausencia de humedad (D_3), y se modificaba la presión específica máxima para mantener la densidad aparente en seco constante.

El esquema de la figura 3.25 muestra el diagrama de bloques del control anticipativo basado en la densidad aparente en seco. En este caso, la acción de control determina la presión a imponer en la prensa mediante la resolución de la función $D_3 - f(X_1, P_1) = 0$, la cual corresponde directamente al diagrama de compactación de la composición (1.25). Es importante destacar que, tanto en este caso, como en el del control basado en la densidad aparente en húmedo,

al no poder hacer una determinación directa de la densidad con un sistema de medida en línea, la densidad resultante de la compensación de la perturbación de humedad debe, necesariamente, estimarse a partir del propio diagrama de compactación. Por ello, se hace imprescindible registrar la presión de prensado realmente aplicada por la prensa en cada ciclo de prensado para, junto con la humedad medida por el transductor de humedad, poder realizar dicha estimación.

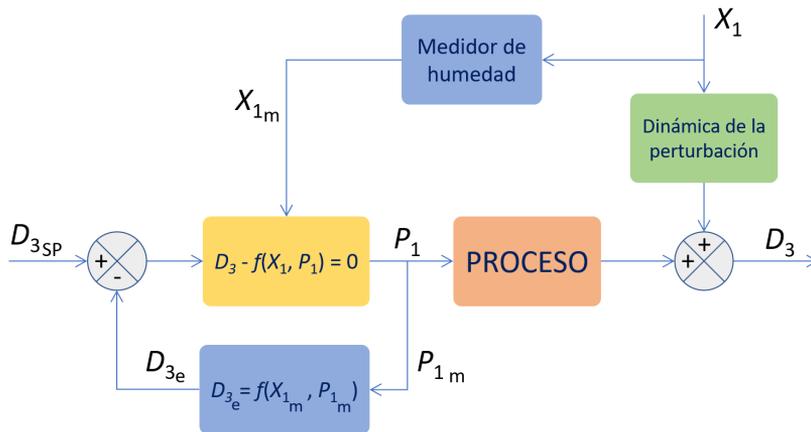


Figura 3.25. Diagrama de bloques del control anticipativo de la operación de conformado basado en la densidad aparente en seco.

El principal inconveniente de esta estrategia radica en el hecho de que, industrialmente, es necesario esperar todo un ciclo de secado para poder disponer de una medida de la densidad aparente en seco. Este hecho puede generar mucha incertidumbre a la hora de gestionar las operaciones en la planta, pues el retardo en disponer de información acerca de como se está comportando el proceso es considerable, aún más cuando se trabaja con secaderos verticales cuyos ciclos de secado suelen tener duraciones superiores a 1 hora. Sin embargo, un control automático basado en la constancia de esta variable, conseguida gracias a la compensación de las oscilaciones de humedad detectadas con una medida en continuo como la propuesta, se auguraba muy esperanzadora para mejorar la estabilidad dimensional del producto. En efecto, un único control puntual de la densidad aparente en seco, realizado de manera manual para cerciorarse de que el sistema de control automático estuviese trabajando correctamente, proporcionaría la confianza suficiente como para basar la estrategia de control en una estimación, que no una medida directa, de la densidad aparente en seco.

- *Control directo del tamaño final de pieza con las densidades aparentes en húmedo y en seco variables*

Finalmente, la última de las estrategias de control considerada se planteó a raíz de la evaluación del efecto que la expansión post-prensado de las piezas crudas puede tener a nivel industrial sobre la estabilidad final del producto. Tradicionalmente, como se ha planteado en la introducción de este trabajo, al exponer

como se ve afectada la estabilidad dimensional por las condiciones de conformado (apartado 1.2.3.2.3), se ha considerado que la variable que presenta más influencia sobre la estabilidad dimensional es la densidad aparente en seco de los soportes. Esto es cierto, sobretodo en productos de gres porcelánico, no obstante, durante el desarrollo de la experimentación industrial, especialmente, con las actuaciones efectuadas trabajando con la composición de soporte EPP+, se evidenció que la expansión de los soportes tras su prensado puede llegar a tener una influencia no despreciable sobre el tamaño de las piezas tras la cocción.

Ante esta situación, se planteó una tercera estrategia de supervisión del prensado en la que la acción de control sobre la presión de prensado permitía compensar los cambios dimensionales en el tamaño final, asociados a los cambios de expansión post-prensado, con cambios en la contracción de cocción. Todo ello, a costa de tener una ligera variación de la densidad aparente en seco de los soportes recién prensados y, evidentemente, de su tamaño antes de la cocción.

En la figura 3.26 se recoge el diagrama de bloques del sistema de control anticipativo del conformado basado en el control directo del tamaño final de la pieza. La aplicación de esta estrategia requería obtener la combinación de valores de humedad y presión específica aplicada en cada ciclo de prensado que proporcionaba, para una temperatura máxima de cocción dada, un tamaño de pieza final (L_4) constante e igual a un valor de consigna preestablecido L_{4SP} .

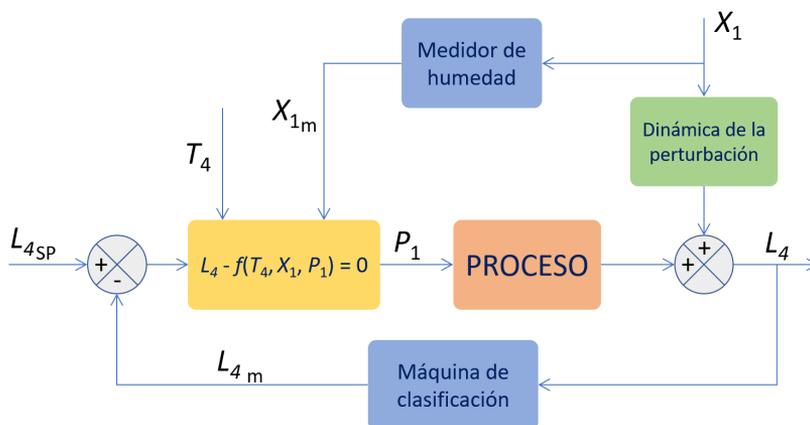


Figura 3.26. Diagrama de bloques del control anticipativo de la operación de conformado basado en el control directo del tamaño final de la pieza.

El cálculo de la presión de prensado a imponer en la prensa implica, en este caso, la resolución de la ecuación 1.20, que es no lineal respecto a la presión, cuando en ella se sustituyen los valores de S_2 , S_3 y S_4 , por las correspondientes leyes de comportamiento de los materiales. Al proceder de este modo se obtiene una expresión con la forma de 3.1, en la que el tamaño final solamente depende del tamaño del alveolo, de la humedad, de la presión máxima de prensado y de la temperatura máxima de cocción. Puesto que las tres primeras variables

son conocidas, para calcular la presión de prensado basta calcular mediante el método numérico de Newton-Raphson la raíz de la función real resultante, $L_4 - f(P_1) = 0$.

$$L_4 = f(L_0, X_1, P_1, T_4) \quad (3.1)$$

Esta estrategia de control, que puede considerarse como la más sofisticada de las tres propuestas, implica alcanzar durante la compactación una densidad aparente en seco que variará ligeramente con el tiempo. Gracias a esto, posteriormente durante la cocción, las variaciones de la contracción lineal producidas por dichos cambios de densidad podrán compensar los cambios dimensionales del producto en crudo, asociados a cambios en su expansión tras el prensado.

A diferencia de las dos estrategias anteriores, en este caso el valor de la variable controlada podría ser medida directamente en el propio proceso de fabricación en el momento de la clasificación final del producto. En una planta con proceso de cocción directo, con un almacenamiento intermedio prácticamente inexistente, el tiempo que transcurriría desde el prensado, hasta disponer de la retroalimentación del tamaño final de pieza, podría ser de apenas 2 o 3 horas, dependiendo de la duración de los ciclos de secado y cocción y la longitud de las líneas de decoración. En los procesos de fabricación con pulmón de almacenamiento intermedio, dicha medida no estaría disponible, en ocasiones, hasta varios días después de haber sido conformados los soportes, dado el tiempo de retardo que suele existir entre el prensado y la posterior cocción de los lotes, en este tipo de configuraciones de planta. En cualquier caso, siempre es posible anticipar la cocción de piezas de control, si los ciclos térmicos existentes en los hornos lo permiten, para evitar tiempos de espera muy prolongados y detectar prematuramente problemas graves de fabricación.

4

Resultados y discusión

En este cuarto capítulo se presentan y discuten los resultados obtenidos en la experimentación industrial y en las simulaciones llevadas a cabo para, en primer lugar, validar el modelo de comportamiento del material en condiciones industriales de operación y, en segundo lugar, determinar la influencia en el proceso de las diferentes estrategias de control planteadas para mejorar la estabilidad dimensional del producto final. La exposición de resultados incluye también la descripción del sistema de control automático finalmente desplegado en las instalaciones industriales en las que se ha desarrollado el trabajo, mostrando el impacto del mismo sobre las clasificaciones finales de producto. Finalmente, se hace referencia a la transferencia de resultados generada a raíz del desarrollo de este trabajo, la cual ha permitido que diferentes empresas fabricantes de baldosas cerámicas a nivel mundial se beneficien de los resultados de esta investigación.

4.1 Validación del modelo de comportamiento a escala industrial

La validación del modelo de comportamiento de los materiales a escala industrial ha implicado evaluar la precisión con la que las ecuaciones constitutivas, obtenidas mediante procedimientos de caracterización de laboratorio, permitían estimar los parámetros clave del proceso de fabricación que afectan a la estabilidad dimensional del producto terminado. Seguidamente se describen los resultados obtenidos en dichas validaciones, de las más sencillas, realizadas sobre un pequeño número de piezas de control, hasta las más complejas, llevadas a cabo con lotes completos de fabricación.

4.1.1 Evaluación de la estimación de los cambios dimensionales

La primera experiencia de validación de las ecuaciones constitutivas del modelo se llevó a cabo sobre piezas industriales no esmaltadas de tamaño nominal cocido 700 mm x 450 mm conformadas a partir de la composición de soporte EPP+. Los trabajos de validación se iniciaron con esta composición por presentar cambios dimensionales mayores que la STD, sobretodo en lo que se refiere a su expansión-post prensado. Se consideró que una demostración de la validez industrial del modelo en unas condiciones más desfavorables, como consecuencia de unos cambios dimensionales más acusados, permitiría evidenciar más fácilmente como realizar el escalado entre las condiciones de laboratorio y las industriales.

Las pruebas industriales realizadas consistieron en prensar soportes a tres presiones máximas de prensado diferentes y a una humedad en torno a 6,1 % b.s., la del polvo que en esos momentos se estaba suministrando a la prensa. El molde utilizado para conformar el producto al realizar las maniobras presentaba dos cavidades de dimensiones internas 754 mm x 503 mm (L_0 x W_0). Tras el conformado los soportes se secaron y se cocieron en el horno industrial de rodillos a una temperatura máxima de 1195°C. Para los diferentes soportes procesados se determinaron sus dimensiones, tanto tras el secado, como al finalizar su cocción. Las dimensiones de los soportes crudos inmediatamente después del prensado no pudieron determinarse, ya que la fragilidad y el gran tamaño que presentaban habría comprometido considerablemente su integridad al manipularlos manualmente. Así mismo, se determinó su densidad aparente en húmedo y en seco mediante los procedimientos descritos en 3.2.2.

Tabla 4.1. Datos de proceso empleados en la validación del modelo de comportamiento con piezas industriales de la composición EPP+.

Prensado		Postprensado	Secado			Cocción	
X1 (%)	P ₁ (MPa)	D ₂ (kg/m ³)	D ₃ (kg/m ³)	L ₃ (mm)	W ₃ (mm)	L ₄ (mm)	W ₄ (mm)
6,1	33,8	2065	1954	761,8	508,2	704,6	470,1
6,1	38,5	2082	1972	761,7	508,2	706,7	471,6
6,1	44,2	2102	1991	761,9	508,3	708,7	472,8

En la tabla 4.1 se recogen los valores promedio de las diferentes variables determinadas en la línea de fabricación, de acuerdo con la nomenclatura empleada en la figura 1.34. Por tratarse de piezas de geometría rectangular, los valores correspondientes al tamaño distinguen entre la longitud (L_i) y la anchura (W_i) de las mismas. Todas las medidas fueron realizadas sobre producto no esmaltado, para eliminar, en un primer momento, la influencia que pudiera presentar la presencia de esmalte sobre los resultados obtenidos. A partir de estos datos se evaluó el acuerdo que existía entre ellos y los cambios dimensionales propuestos por las ecuaciones del modelo de comportamiento (ver apartado 3.1.3 y apéndice A.1). Seguidamente se detallan los resultados encontrados en las estimaciones realizadas.

4.1.1.1 Estimación de la expansión post-prensado (S_2) y de la contracción de secado (S_3)

Por no disponer de medidas industriales del tamaño de los soportes previamente a su secado, L_2 , a priori, basándose en los datos de laboratorio, los cuales revelaron que la contracción de secado de la composición de trabajo era prácticamente despreciable, se supuso que los cambios dimensionales de los soportes durante el secado industrial también habrían sido muy pequeños. Según esta suposición, el tamaño de las piezas tras el secado debería coincidir con el tamaño de los soportes antes del mismo ($L_2 = L_3$) y el cálculo de la expansión post-prensado industrial podría realizarse haciendo uso de la ecuación 4.1. Partiendo de esta hipótesis, se determinó, para cada una de las tres presiones de compactación evaluadas, cual era la expansión post-prensado que habían experimentado los soportes. En la figura 4.1 se ha representado, por un lado, la variación con la presión de la expansión porcentual que debían haber experimentado los soportes, según la estimación realizada por el modelo de laboratorio (ecuación 1.27), y por otro lado, la variación de expansión que tuvo lugar a nivel industrial, según la ecuación 4.1.

$$S_2 = \frac{L_0 - L_3}{L_0} 100 \quad (4.1)$$

Como puede apreciarse, los valores de expansión industrial, aunque siguen la tendencia marcada por el modelo, se sitúan ligeramente por debajo de los valores estimados con este. Este hecho indica que la hipótesis realizada no es aplicable y que

en realidad, aunque no quede reflejado en los datos experimentales de laboratorio, el cambio dimensional asociado a la contracción de secado en condiciones industriales no puede considerarse despreciable. Según este razonamiento, la contracción de secado industrial sería prácticamente independiente de la presión e igual a 0,16 %, valor que corresponde a la media de las diferencias entre los valores de expansión post-prensado calculados mediante el modelo y los obtenidos a partir de la ecuación 4.1.

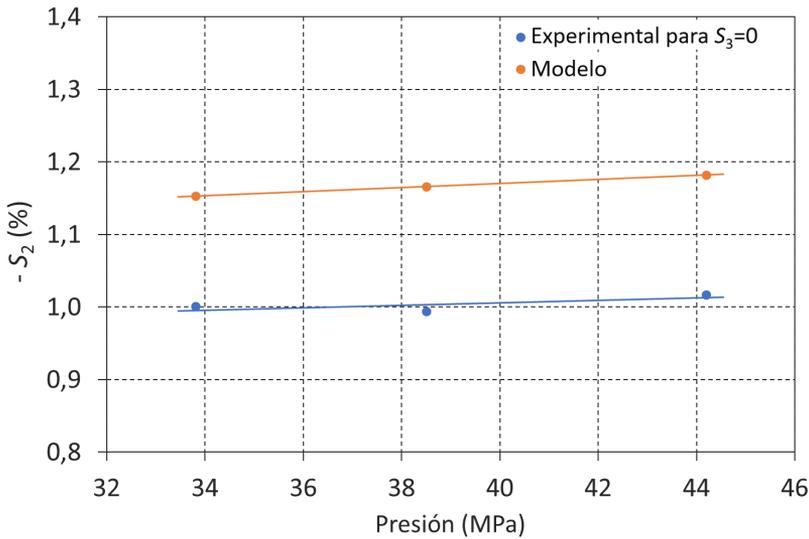


Figura 4.1. Variación con la presión de prensado de la expansión post-prensado predicha por el modelo y la obtenida industrialmente considerando una contracción de secado nula.

La importancia de la contracción de secado a nivel industrial, pese a su pequeña magnitud, también queda reflejada en los valores de densidad aparente en húmedo y en seco obtenidos industrialmente. En efecto, si se calculan las densidades aparentes en seco (D_3) a partir de los valores de densidad aparente en húmedo (D_2) (ver tabla 4.2), considerando únicamente la pérdida de masa asociada al secado (ecuación 1.26), se comprueba que existe una ligera discrepancia con respecto a los valores experimentalmente medidos.

Tabla 4.2. Estimación de la densidad aparente en seco de los soportes industriales a partir de la densidad aparente en húmedo haciendo uso de la ecuación 1.26.

P_1 (MPa)	D_3 experimental (kg/m ³)	D_3 modelo (kg/m ³)	ΔD_3 (kg/m ³)
33,8	1954	1946	8
38,5	1972	1962	10
44,2	1991	1981	10

De hecho, para cualquier valor de la presión de prensado, la densidad aparente en seco calculada a partir de la densidad aparente en húmedo es inferior a la determinada experimentalmente, lo cual denota que realmente, el soporte seco tiene un tamaño inferior al que presenta previamente al secado, al contrario de lo hipotetizado. Este hecho indica que, para realizar cálculos precisos de la densidad aparente en seco, no puede utilizarse directamente la ecuación 1.26, siendo necesario reemplazarla por la ecuación 4.2, en la cual se ha introducido un factor corrector para tener en cuenta, no solo el cambio de masa asociado a la evaporación del agua, sino también el cambio de volumen experimentado por las piezas durante su secado (V_2 , volumen del soporte húmedo y V_3 , volumen del soporte seco).

$$D_3 = \frac{D_2}{\left(1 + \frac{X_1}{100}\right)} \frac{V_2}{V_3} \quad (4.2)$$

Para poder resolver la ecuación 4.2, se hace necesario conocer la relación existente entre la contracción lineal de los soportes durante el secado, S_3 , y su contracción volumétrica, S_3^v , que viene definida por la ecuación 4.3.

$$S_3^v = \frac{V_2 - V_3}{V_2} 100 \quad (4.3)$$

Suponiendo que la contracción de secado tiene lugar de forma isotrópica, puede demostrarse que la relación entre estos dos cambios dimensionales puede estimarse a partir de la expresión 4.4.

$$S_3^v = 100 \left(1 - \left(1 - \frac{S_3}{100}\right)^3\right) \quad (4.4)$$

Esta ecuación se simplifica considerablemente aplicando el teorema del binomio al término $\left(1 - \frac{S_3}{100}\right)^3$, según el cual, una expresión matemática con la forma $(1 + x)^n$ puede descomponerse en el desarrollo a la n -ésima potencia mostrado en la ecuación 4.5.

$$(1 + x)^n = 1 + \frac{nx}{1!} + \frac{n(n-1)x^2}{2!} + \frac{n(n-1)(n-2)x^3}{3!} + \dots \quad (4.5)$$

De este modo, sustituyendo en dicho desarrollo $x = -\frac{S_3}{100}$ y $n = 3$ y despreciando, por ser $S_3 \ll 1$, los términos de mayor orden involucrando a S_3^2 y S_3^3 , la ecuación 4.4 se convierte en la 4.6, según la cual, para un comportamiento isotrópico del material, la contracción de secado volumétrica es aproximadamente tres veces la contracción lineal.

$$S_3^v \approx 3 S_3 \quad (4.6)$$

Finalmente, combinando las ecuaciones 4.2, 4.3 y 4.6 se obtiene la expresión 4.7 que permite calcular la contracción de secado de los soportes a partir de su densidad aparente en seco, su densidad aparente en húmedo y la humedad de conformado. Empleando esta expresión, se han calculado, para cada condición de conformado evaluada, las contracciones de secado experimentadas por los soportes. En la tabla 4.3 se comparan estas contracciones con las determinadas en base a la diferencia entre la expansión post-prensado predicha por el modelo y la obtenida industrialmente suponiendo que $L_2 = L_3$.

$$S_3 = \frac{100}{3} \left(1 - \frac{D_2}{D_3} \frac{100}{100 + X_1} \right) \quad (4.7)$$

Tabla 4.3. Comparativa entre las contracciones de secado calculadas con la ecuación 4.7 y las que justificarían los valores de expansión post-prensado determinados con la ecuación 4.1.

P_1 (MPa)	S_3 experimental (%)	S_3 modelo (%)
33,8	0,15	0,13
38,5	0,17	0,16
44,2	0,16	0,16
Promedio	0,16	0,15

Como puede apreciarse, existen muy pocas diferencias entre las contracciones de secado calculadas siguiendo los dos procedimientos. Este hecho permite confirmar, en primer lugar, que la contracción de secado industrial, aunque es de pequeña magnitud, no puede considerarse completamente despreciable. En segundo lugar, que si se supone una contracción isotrópica, esta puede ser determinada correctamente a partir de las medidas de densidad aparente en húmedo y en seco de los soportes. Y finalmente, que la expansión post-prensado estimada con el modelo reproduce correctamente el comportamiento de los soportes en condiciones industriales, suponiendo una contracción de secado independiente de la presión de prensado.

Dada la dificultad de disponer a voluntad de polvo atomizado con diferentes contenidos de humedad en la línea de fabricación industrial, no fue viable repetir los experimentos aquí descritos para otros valores de humedad. De haber podido efectuar esas experiencias, habría sido posible determinar la posible influencia del contenido en humedad sobre la variación de la contracción de secado de los soportes. En cualquier caso, en primera aproximación, se consideró que la contracción de secado tampoco tenía dependencia de la humedad de prensado, al menos en los rangos de trabajo habituales, confirmándose posteriormente esta suposición, al realizar seguimientos de la precisión del modelo en lotes completos de producción.

Hay que remarcar que, puesto que tras su secado los soportes industriales son sometidos a un proceso de desbarbado lateral para acondicionar su borde previamente al esmaltado, realmente, la contracción de secado industrial englobaría también el pequeño cambio dimensional originado por este proceso. Durante la realización de la

investigación se comprobó regularmente que el efecto de este proceso de rectificado lateral de los soportes no introducía una variabilidad adicional sobre la estabilidad dimensional del producto final. No obstante, para otros tamaños o tipologías de producto u otras instalaciones, este es un aspecto a tener en consideración a la hora de abordar estudios o acciones de mejora de la estabilidad dimensional de los soportes, ya que de ser descuidado, puede introducir una variación no despreciable en el tamaño de las piezas previamente a su cocción.

Finalmente, en la tabla 4.4 se muestran, para cada presión máxima de prensado ensayada, los valores de la expansión post-prensado calculados con el modelo (ecuación 1.27) y los obtenidos experimentalmente a nivel industrial teniendo en consideración la contracción de secado de 0,16 %. Como puede comprobarse, procediendo de este modo, el modelo predice correctamente las expansiones post-prensado encontradas experimentalmente.

Tabla 4.4. Comparativa entre la expansión post-prensado calculada con la ecuación 1.27 y la obtenida experimentalmente a nivel industrial.

P_1 (MPa)	S_2 experimental (%)	S_2 modelo (%)
33,8	-1,16	-1,15
38,5	-1,15	-1,17
44,2	-1,18	-1,18

4.1.1.2 Estimación de la densidad aparente en seco (D_3) mediante el diagrama de compactación

Con el fin de validar la ecuación del diagrama de compactación (1.25), en la figura 4.2 se ha representado la variación, en función de la presión máxima de prensado, de la densidad aparente en seco de los soportes industriales, comparándola con la predicha por la ecuación del modelo. Como puede observarse, para todas las presiones, la densidad aparente en seco de los soportes conformados en condiciones industriales es siempre ligeramente superior a la estimada mediante el diagrama de laboratorio. Este hecho podría ser debido a una falta de acuerdo entre los valores de presión proporcionados por los transductores de presión de las prensas empleadas en el trabajo y/o a diferencias en los ciclos de prensado utilizados, como por ejemplo, en el tiempo de aplicación de la presión máxima. En cualquier caso, es importante destacar que las diferencias observadas son muy poco significativas, pues tan sólo implican un error del 0,4 % (8 kg/m^3) sobre la estimación de la densidad aparente industrial.

Para contemplar las diferencias de densidad aparente en seco observadas, se supuso que, en el rango habitual de presiones de trabajo, dichas diferencias eran independientes de la humedad y se mantenían constantes en el tiempo, a menos que se produjera un cambio significativo en la composición del polvo atomizado. Esta suposición no se adoptó únicamente en base a estos resultados particulares, sino teniendo en cuenta los resultados obtenidos en seguimientos completos de lotes productivos. Como se verá más adelante, estos otros experimentos permitieron corroborar que una ecuación como la 4.8, obtenida con la introducción de un parámetro corrector en el

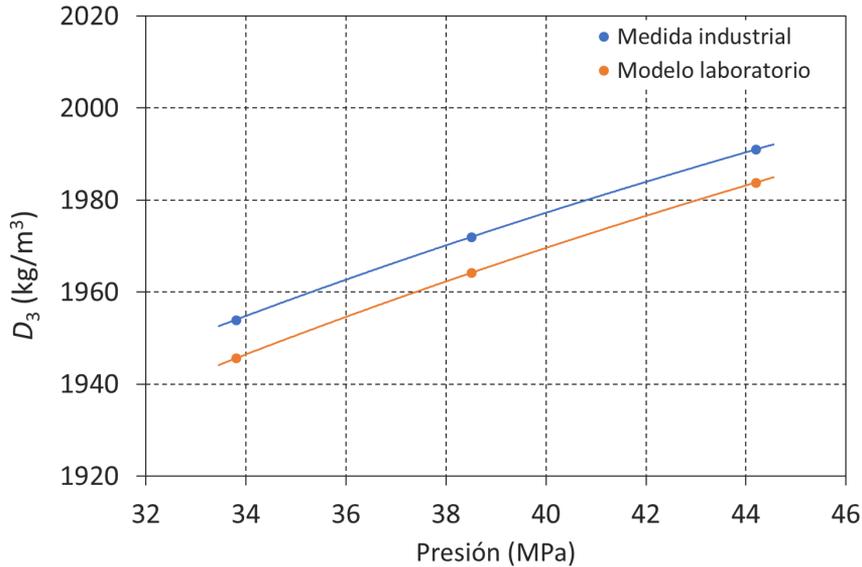


Figura 4.2. Variación de la densidad aparente en seco con la presión de prensado en condiciones industriales y según la predicción del modelo de laboratorio no escalado.

término de la presión del diagrama de laboratorio, permitía estimar con buena precisión la densidad de los soportes recién prensados a lo largo del tiempo, si no tenían lugar cambios en la compactabilidad del polvo. En el caso de la composición EPP+, según los resultados de estos experimentos, el parámetro corrector, representado por δ_{P_1} , adoptaba un valor de 2,15 MPa.

$$D_3 = (aX_1 + b) \ln (P_1 + \delta_{P_1}) + (cX_1 + d) \quad (4.8)$$

Gracias a la introducción de la corrección δ_{P_1} , tal y como queda reflejado en la tabla 4.5, el modelo fue capaz de estimar la densidad aparente de los soportes prensados con mucha precisión, dando un error en la estimación de $\pm 1 \text{ kg/m}^3$ para una desviación estándar de $0,4 \text{ kg/m}^3$ y un intervalo de confianza del 95%.

Tabla 4.5. Estimación de la densidad aparente en seco de los soportes industriales con el diagrama de compactación corregido con un parámetro $\delta_{P_1} = 2,15 \text{ MPa}$.

P_1 (MPa)	D_3 experimental (kg/m ³)	D_3 modelo (kg/m ³)	ΔD_3 (kg/m ³)
33,8	1954	1954	-
38,5	1972	1972	-
44,2	1991	1991	-

4.1.1.3 Estimación de la contracción de cocción (S_4) mediante el diagrama de gresificación

En la figura 4.3 se ha representado la variación de la contracción de cocción en función de la densidad aparente en seco en condiciones industriales y de laboratorio, para la temperatura máxima de cocción constante de 1195°C, empleada en las pruebas industriales. Como puede observarse, para cualquier densidad aparente, la contracción de los soportes industriales es siempre ligeramente superior a la estimada, siendo la diferencia muy baja pero ligeramente dependiente de la densidad aparente. Esta pequeña diferencia puede asociarse al salto de escala que implica el pasar de unas condiciones de laboratorio, en las que se utilizan pequeños hornos eléctricos, a unas condiciones industriales en las que la cocción se realiza de forma continua en hornos monoestrato de grandes dimensiones con gran número de quemadores de gas natural.

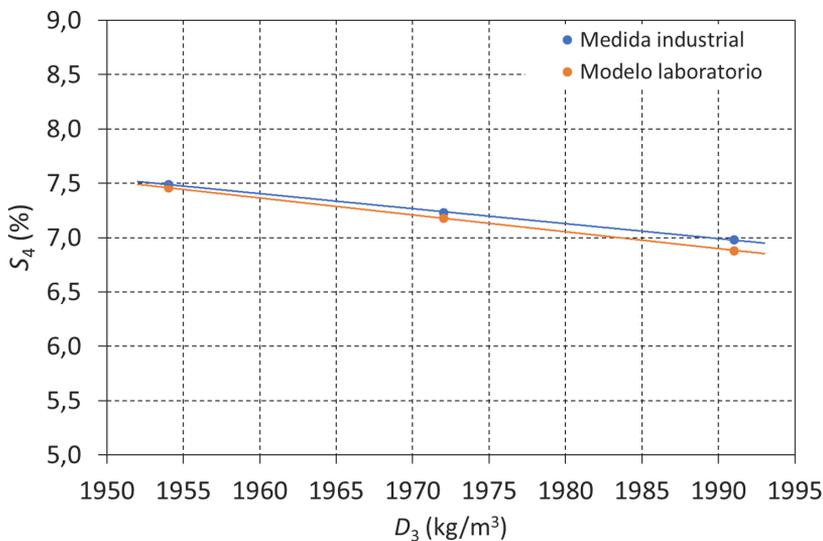


Figura 4.3. Variación de la contracción de cocción con la densidad aparente en condiciones industriales y según la predicción del modelo de laboratorio no escalado.

De forma similar a lo planteado para realizar el escalado industrial de la ecuación constitutiva del diagrama de compactación, se supuso que las diferencias observadas entre la estimación efectuada con el diagrama de gresificación de laboratorio y las contracciones determinadas en la experimentación industrial, podrían salvarse introduciendo un parámetro corrector en la temperatura máxima de cocción. Esta suposición, de nuevo, no se basó exclusivamente en estos resultados particulares, sino que se contrastó con otros experimentos industriales, mostrados más adelante, y realizados sobre lotes completos de producción. Así pues, el diagrama de gresificación de laboratorio se extrapolaría a condiciones industriales introduciendo un nuevo término, representado como δ_{T_4} , que permitía calcular la contracción de los soportes industriales mediante la expresión 4.9. Para el caso de la composición EPP+ el valor encontrado para δ_{T_4} resultó ser de -12,5 K. Con esta corrección, la estimación de la

contracción de cocción mejoró sensiblemente en todo el rango de densidades aparentes considerado, como puede observarse en los datos mostrados en la tabla 4.6, en la cual los valores experimentales de la contracción han sido calculados a partir de los tamaños de la pieza cruda y cocida reflejados en la tabla 4.1.

$$S_4 = (m D_3 + n) (T_4 + \delta_{T_4})^2 + (p D_3 + q) (T_4 + \delta_{T_4}) + (r D_3 + s) \quad (4.9)$$

Tabla 4.6. Estimación de la contracción de cocción de los soportes industriales con el diagrama de gresificación corregido con un parámetro $\delta_{T_4} = -12,5 K$.

P_1 (MPa)	S_4 experimental (%)	S_4 modelo (%)
33,8	7,5	7,5
38,5	7,2	7,2
44,2	7,0	7,0

El parámetro δ_{T_4} , cuyo uso no exime de la necesidad de confeccionar nuevos diagramas de gresificación si se producen cambios significativos en el comportamiento de las materias primas, es de gran ayuda para contemplar el carácter de retroalimentación en las estrategias de control planteadas en el trabajo. Además, permite, como se verá en el punto 4.1.3, adaptar ligeramente el diagrama de gresificación ante pequeños cambios en el comportamiento del material durante la cocción, sobre todo en presencia de esmaltes en la superficie de los soportes.

4.1.1.4 Resumen de las ecuaciones de comportamiento validadas industrialmente

Teniendo en consideración la información previamente reflejada en la tabla 1.5, en la cual se resumían las ecuaciones propuestas para explicar el comportamiento dimensional de las composiciones a nivel de laboratorio, en la tabla 4.7 se recogen las ecuaciones validadas y escaladas a nivel industrial. En concreto, en la misma se recoge, además de la propia ecuación, la variable que cada una de ellas permite estimar, su referencia dentro del documento, los parámetros obtenidos en base a la caracterización de laboratorio y los parámetros adicionales obtenidos con la verificación industrial, que han permitido el escalado de la ecuación.

Tabla 4.7. Resumen de ecuaciones propuestas para describir el comportamiento en condiciones industriales de las piezas procesadas.

Variable calculada	Ecuación	Ref.	Parámetros	Factor de escala
D_3	$(aX_1 + b) \ln (P_1 + \delta_{P_1}) + (cX_1 + d)$	4.8	a, b, c, d	δ_{P_1}
S_2	$(eP_1 + f) X_1 + (gP_1 + h)$	1.27	e, f, g, h	-
S_3	$\frac{100}{3} \left(1 - \frac{D_2}{D_3} \frac{100}{100+X_1} \right)$	4.7	-	-
S_4	$(m D_3 + n) (T_4 + \delta_{T_4})^2 + (p D_3 + q) (T_4 + \delta_{T_4}) + (r D_3 + s)$	4.9	m, n, p, q, r, s	δ_{T_4}

4.1.1.5 Estimación del tamaño final de los soportes (L_4 y W_4) mediante el modelo escalado

Una vez validadas las diferentes ecuaciones que constituirían el modelo de comportamiento del material en condiciones industriales, fue posible determinar el tamaño final de los soportes cocidos haciendo uso de la ecuación 1.20. Como se ha explicado, ante la dificultad de realizar pruebas industriales que permitieran obtener la relación entre la contracción de secado y las condiciones de conformado (P_1 y X_1), se consideró que esta presentaba un valor constante de 0,16%. El resto de cambios dimensionales, S_2 y S_4 , fueron calculados con las ecuaciones 1.27 y 4.9, respectivamente, obteniéndose los valores de L_4 y W_4 que quedan tabulados en la tabla 4.8. Además, los tamaños finales predichos por el modelo frente a los determinados en la experimentación industrial quedan reflejados en el gráfico de la figura 4.4.

Tabla 4.8. Tamaños de pieza estimados con el modelo escalado en las diferentes etapas y comparativa con medidas experimentales de tamaño final.

Modelo							Experimental		Diferencia	
P_1 (MPa)	L_2 (mm)	L_3 (mm)	L_4 (mm)	W_2 (mm)	W_3 (mm)	W_4 (mm)	L_4 exp. (mm)	W_4 exp. (mm)	ΔL_4 (mm)	ΔW_4 (mm)
33,8	762,9	761,7	704,7	509,0	508,2	470,2	704,6	470,1	0,1	0,1
38,5	763,0	761,8	706,7	509,1	508,3	471,5	706,7	471,6	0	-0,1
44,2	763,1	761,9	708,8	509,1	508,3	472,9	708,7	472,8	0,1	0,1
Promedio									0,1	0,1

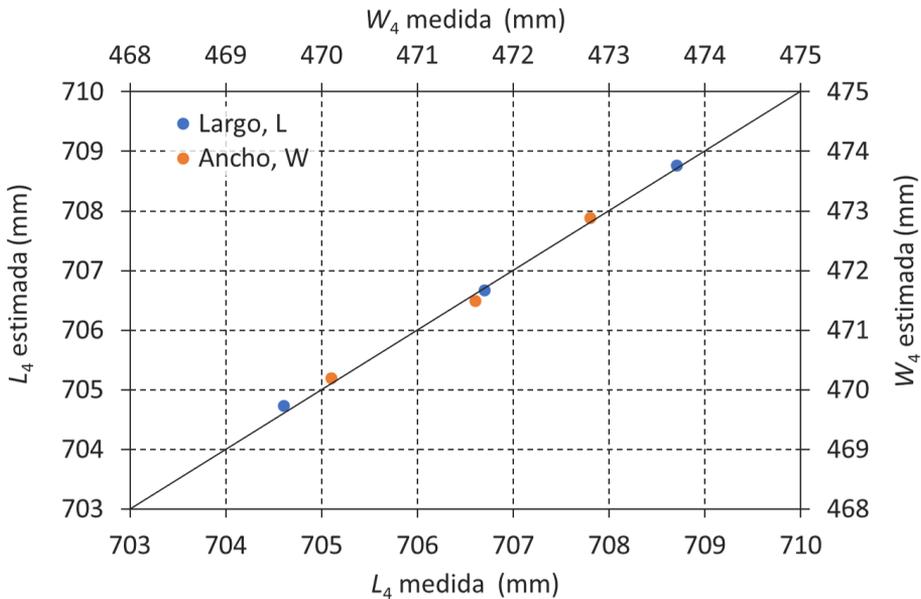


Figura 4.4. Tamaños finales de pieza estimados por el modelo de comportamiento industrial frente a tamaños determinados experimentalmente.

Como cabía esperar a raíz de las observaciones realizadas en los apartados previos, los tamaños estimados con el modelo validado son muy próximos a los valores experimentales obtenidos en condiciones industriales, a pesar de considerar como constante la contracción de secado. De hecho el error máximo en la estimación se sitúa en tan sólo $\pm 0,1$ mm, para un intervalo de confianza del 95 %. Destacable es el cambio dimensional asociado a la expansión post-prensado, el cual es de 9 mm en promedio respecto al tamaño del alveolo, en su lado largo, y de prácticamente 6 mm, en el corto. La magnitud de esta variación de tamaño, teniendo en consideración que las tolerancias de calibre suelen situarse en 1 mm para estos tamaños de pieza, justifica la necesidad de considerar la expansión post-prensado para muchas composiciones de soporte, si se quiere tener una estimación precisa del tamaño final de las piezas.

4.1.2 Influencia sobre la precisión del modelo de algunas variables industriales

Experimentos industriales adicionales realizados con la composición de trabajo STD permitieron constatar que el modelo constitutivo del comportamiento del material y su correspondiente escalado industrial, a través de los parámetros δ_{P_1} y δ_{T_1} , era válido para estimar las propiedades de esta composición de soporte. Sin embargo, en estos experimentos, efectuados también con soportes individuales pero por un periodo de tiempo más prolongado, se observó que existían algunas variables industriales que podían tener influencia sobre las estimaciones dimensionales realizadas, lo cual no pudo ser evaluado con las pruebas iniciales con la composición EPP+.

Concretamente, se estudió, por una parte, la influencia que la variabilidad en el tiempo del comportamiento en prensado de la composición del soporte originaba sobre las estimaciones de densidad aparente. Y por otra, la influencia que ciertos parámetros industriales, como el tamaño de pieza fabricado, la presencia de relieves superficiales o el tipo de esmalte aplicado sobre el soporte, tenían sobre la contracción lineal del producto, y con ello, sobre la estimación del tamaño final. En este último caso, hay que tener presente que, de por sí, dicha estimación del tamaño final se vería también afectada por la propia variabilidad en la estimación de la densidad, al depender la contracción, tanto de la temperatura de cocción, como de la porosidad de los soportes crudos. Seguidamente se muestran los resultados de estas experiencias.

4.1.2.1 Variabilidad en la estimación de la densidad aparente en seco

Un seguimiento de la producción, realizado durante aproximadamente nueve meses de funcionamiento de la prensa, conformando soportes en lotes de diferentes tamaños a partir de polvo de la composición STD, permitió evaluar como afectaban posibles cambios en la compactabilidad del polvo a las estimaciones de densidad aparente en seco proporcionadas por el modelo. Durante el tiempo que duró esta campaña, la prensa fue regulada de acuerdo a los controles de proceso llevados a cabo por los propios operarios de la sección de prensado en la que se realizaron los trabajos, por lo que puede decirse que los datos reflejan un funcionamiento habitual del proceso.

En el gráfico de la figura 4.5 se muestra como fueron variando los valores de la densidad aparente en seco y de la densidad aparente en húmedo de los soportes recogidos directamente de la línea de fabricación, durante los muestreos realizados a

lo largo de los meses de seguimiento. Junto con dichos valores se representa también el valor estimado para la contracción de secado experimentada por los soportes, según la ecuación 4.7.

Estos datos permitieron corroborar que la suposición realizada en los experimentos llevados a cabo con piezas individuales de la composición EPP+, para la que se consideró que la contracción de secado industrial era independiente de la presión y la humedad de conformado, dentro de un intervalo de variación típico, también se cumplía para la composición STD. En este caso, la contracción de secado estimada, 0,12 %, fue ligeramente inferior a la de la composición EPP+, y como puede observarse, prácticamente constante a lo largo del tiempo.

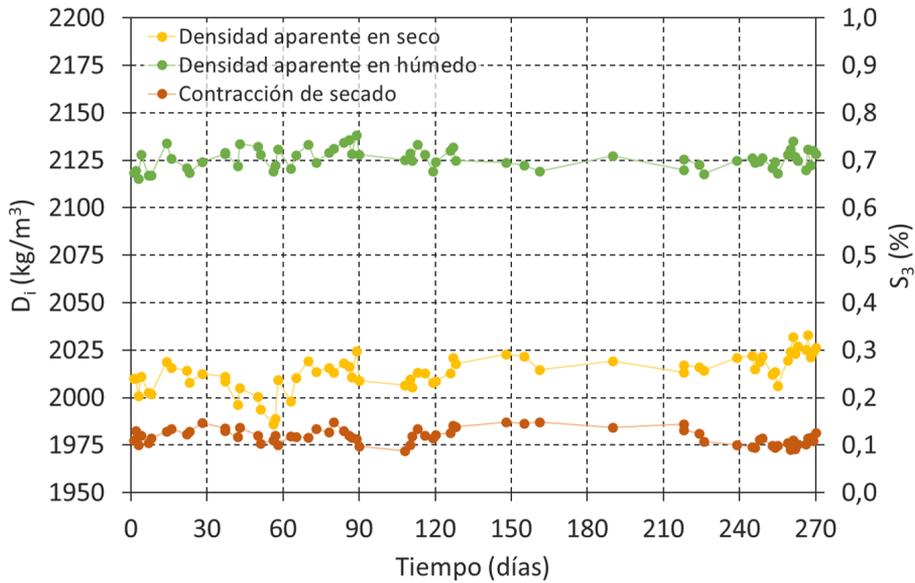


Figura 4.5. Variación de las densidades aparentes en seco y húmedo de soportes recién prensados con la composición STD durante nueve meses.

A pesar de que durante la producción del polvo atomizado se llevan a cabo procesos previos de homogeneización de las materias primas, dado su origen natural, suele ser habitual que posteriormente se produzcan cambios en el comportamiento del polvo durante la fabricación de las baldosas. Por este motivo, se consideró interesante incorporar un término independiente adicional en el diagrama de compactación industrial, δ_{D_3} , de manera que adoptara la forma de la ecuación 4.10.

$$D_3 = (aX_1 + b) \ln (P_1 + \delta_{P_1}) + (cX_1 + d) + \delta_{D_3} \quad (4.10)$$

Este parámetro, denominado “offset” de densidad, se introdujo para englobar las variaciones en la compresibilidad del polvo como consecuencia de sus cambios de comportamiento, dentro de unos márgenes de variación razonables y suponiendo que estas variaciones son independientes de la presión y la humedad de prensado. En cierta forma, δ_{D_3} es una medida de la diferencia existente entre la densidad aparente

en seco predicha por el modelo constitutivo del material, ya escalado a las condiciones industriales, y la densidad aparente en seco real de los soportes conformados por la prensa. Por ello, su seguimiento a lo largo del tiempo es una indicación de los cambios de compactabilidad que puede sufrir el polvo atomizado, respecto al polvo con el que inicialmente se prepara el diagrama de compactación. Dada la criticidad que puede tener la variabilidad de la compactabilidad del polvo atomizado en la correcta estimación de la densidad aparente, antes de abordar ningún tipo de control basado en el modelo constitutivo planteado, se consideró imprescindible comprobar la capacidad que se tendría para detectar dichas variaciones en base al parámetro δ_{D_3} .

Para determinar el valor de δ_{D_3} correspondiente a cada muestreo realizado, fue imprescindible registrar, siguiendo los procedimientos descritos en 3.2.2, la humedad y la presión de conformado de cada soporte recogido. A partir de estos datos, se calculaba la densidad aparente en seco predicha por la ecuación constitutiva del diagrama de compactación escalado mediante la introducción del parámetro δ_{P_1} , que resultó ser en este caso de 3,5 MPa. Y de esta manera, la diferencia entre la densidad aparente en seco medida y dicha predicción proporcionaba el valor de δ_{D_3} .

En la figura 4.6 se ha representado la evolución de δ_{D_3} para todo el periodo de tiempo estudiado. Como puede observarse, el parámetro fue muy estable durante periodos de tiempo prolongados, del orden de los meses. Inicialmente, presentaba un valor prácticamente nulo que se mantuvo constante hasta, aproximadamente, el inicio del tercer mes (día 63) de la campaña de medidas. Esto quiere decir que durante al menos tres meses el diagrama de compactación inicialmente escalado estuvo estimando aceptablemente bien la densidad aparente en seco de los soportes conformados, pues el comportamiento del polvo no había cambiado significativamente. A partir de ese momento, y como consecuencia de un cambio en la proporción de una de las materias primas dosificadas en la fórmula de la composición, el valor de δ_{D_3} aumentó ligeramente en, aproximadamente, 8 kg/m³. Es decir, a partir de ese momento, para la misma humedad de conformado y presión específica máxima aplicada sobre el polvo, los soportes densificaban ligeramente más.

Para confirmar estos resultados, paralelamente al seguimiento realizado en la línea de fabricación, las mismas muestras de polvo recogidas en los diferentes muestreos realizados se prensaron en una prensa de laboratorio a una presión de 39,2 MPa y una humedad acondicionada en un valor constante de 6 % b.s. Las densidades aparentes en seco de las probetas resultantes de estos controles se grafican en función del tiempo en la misma figura 4.6. Se comprueba como el cambio de compactabilidad detectado por el parámetro δ_{D_3} , a partir del tercer mes de seguimiento, también quedó reflejado en los controles de laboratorio. En efecto, los resultados de esto últimos mostraron en promedio un aumento de la compactabilidad del material de 7 kg/m³, mientras que δ_{D_3} se incremento, como ya se ha indicado, a partir del mismo momento, en un valor promedio de 8 kg/m³.

La similitud entre el cambio de compresibilidad detectado en el laboratorio y el reflejado por el “offset” de densidad pone de manifiesto la relevancia de este último para garantizar una estimación precisa de la densidad aparente en seco con el modelo de comportamiento propuesto. A lo largo de la investigación el término δ_{D_3} garantizó

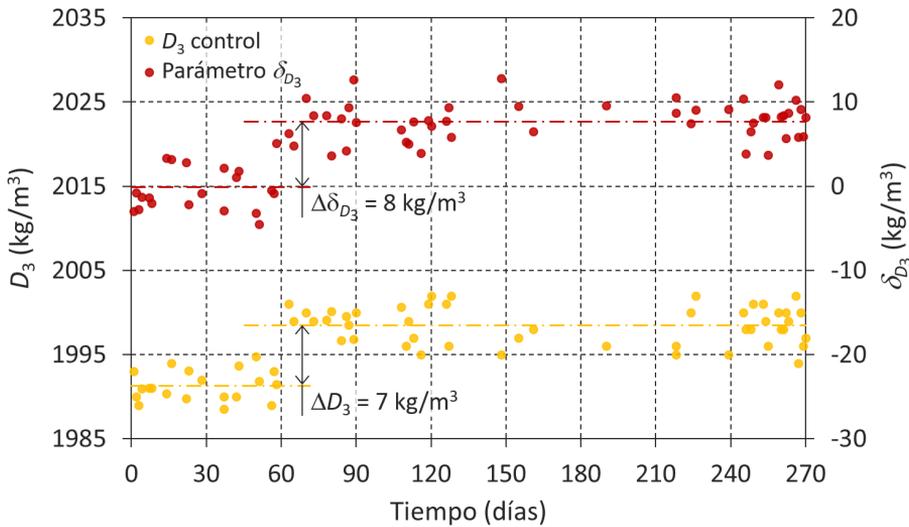


Figura 4.6. Evolución del parámetro δ_{D_3} y de la densidad aparente de probetas de control de la composición de soporte STD durante nueve meses.

la validez en el tiempo del diagrama de compactación al facilitar la introducción, de manera sencilla, de pequeñas modificaciones en el mismo sin necesidad de volver a obtener por completo el diagrama cuando aparecían cambios en el comportamiento de la composición de trabajo. De hecho, la supervisión rutinaria del parámetro δ_{D_3} fue una tarea habitual durante la implantación del sistema de control descrito en el apartado 4.3, constituyendo, en cierta forma, el complemento de retroalimentación del control anticipativo descrito en 3.3.3.2.

Hay que destacar que las compensaciones realizadas a través de δ_{D_3} tienen sus limitaciones, en la medida en que no pueden contemplar, por ejemplo, cambios significativos de la plasticidad de la composición, los cuales suelen reflejarse en modificaciones de las pendientes de las curvas del diagrama de compactación. Por este hecho, el uso del “offset” de densidad no exime de adaptar por completo, puntualmente, los diagramas de compactación, sobre todo si, en las etapas de preparación de la composición, las materias primas de origen natural no han sufrido un adecuado proceso de homogeneización.

Finalmente, en la gráfica de la figura 4.7 se han representado los valores de densidad aparente en seco de todos los soportes recogidos en la campaña de seguimiento, frente a la densidad aparente estimada por el modelo a partir de la presión de prensado aplicada por la prensa y la medida del sensor de humedad por espectrometría NIR. Los datos se encuentran en la diagonal del gráfico, lo cual indica la correcta estimación de la densidad aparente realizada con el modelo, en base al diagrama de compactación escalado a nivel industrial. Las estimaciones proporcionan un error absoluto de ± 5 kg/m^3 , para un intervalo de confianza del 95 %, con una desviación estándar de 2

kg/m^3 , valores que concuerdan aceptablemente bien con el error en la estimación de la densidad aparente que podría calcularse a partir de los errores en la medida de la humedad y la presión de prensado (ver datos en A.3).

Estos resultados, que completan a los presentados en el apartado 4.1.1.2, confirman la validez del modelo para estimar durante periodos de tiempo prolongados la densidad aparente en seco de los soportes, gracias al escalado industrial de la ecuación constitutiva del diagrama de compactación de laboratorio mediante la incorporación de los parámetros adicionales δ_{P_1} y δ_{D_3} . Es importante destacar que, durante la campaña de medida, además de procesarse diferentes tamaños de pieza, también tuvieron lugar cambios en el color del polvo atomizado conformado, debido al proceso previo de coloración en seco con pigmentos inorgánicos al que eran sometidos algunos lotes. Por consiguiente, puede considerarse que el diagrama de compactación preparado para el atomizado de base es válido para estimar la densidad aparente de los soportes, independientemente del proceso previo de coloración en seco realizado. En cualquier caso, este comportamiento debería ser validado para otras tipologías y proporciones de pigmento, aunque todo hace prever que, por las bajas proporciones habitualmente utilizadas en la industria para estos fines, no son de esperar grandes desviaciones respecto a lo observado en este trabajo.

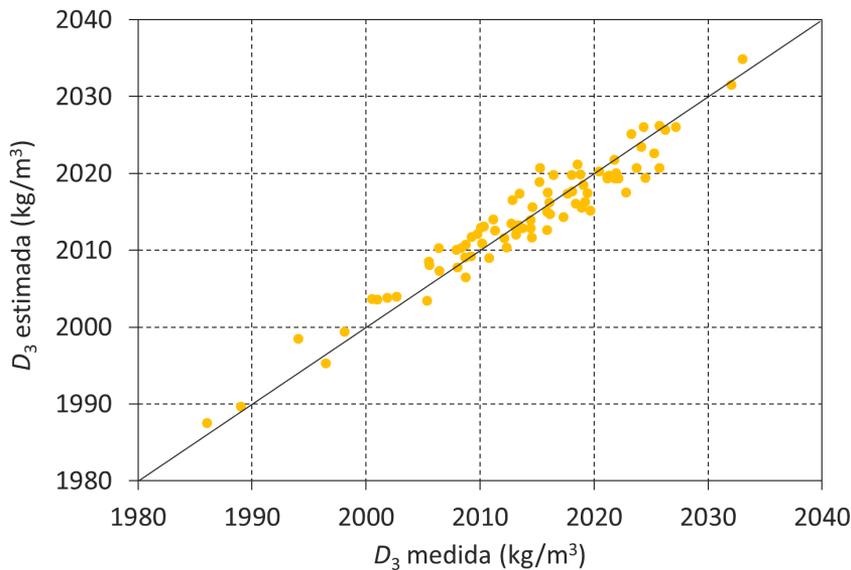


Figura 4.7. Comparación entre los valores estimados de la densidad aparente en seco de soportes industriales de la composición STD y la densidad aparente en seco medida.

4.1.2.2 Variabilidad en la estimación de la contracción de cocción

Tras confirmar la validez del modelo para estimar por periodos de tiempo prolongados la densidad aparente en seco de los soportes, fue necesario verificar que sucedía lo mismo con la estimación de su contracción de cocción. Para ello, aprovechando la misma campaña de medidas descrita en 4.1.2.1, se realizó un seguimiento de la estimación del tamaño final de pieza sobre muestras individuales procesadas en la

instalación industrial. La cocción de los soportes industriales se realizó siempre por la zona central del canal del horno, a una temperatura máxima de 1185°C , según los procedimientos descritos en 3.2.2.

En un primer momento, se evaluó el efecto que sobre la estimación de la contracción lineal podía tener el tamaño de la pieza procesada, la coloración del atomizado utilizado y el acabado superficial de los soportes. En el gráfico de la figura 4.8 se han representado, junto al diagrama de gresificación escalado a nivel industrial para la composición de soporte STD, los pares de valores $S_4 - D_3$ correspondientes a soportes de diferente tipología procesados a lo largo del periodo de tiempo evaluado. Por un lado, valores correspondientes a soportes lisos de tamaño nominal cocido 675 mm x 450 mm, conformados a partir del atomizado base y, por otro lado, soportes con relieve superficial de tamaño nominal cocido 450 mm x 450 mm y con un 0,5 % de pigmento negro en su composición. Se evidencia que, para el rango de densidades aparentes cubierto en el seguimiento, las contracciones de cocción alcanzadas por los soportes, independientemente de la tipología considerada, concuerdan muy bien con las predicciones realizadas por el modelo escalado.

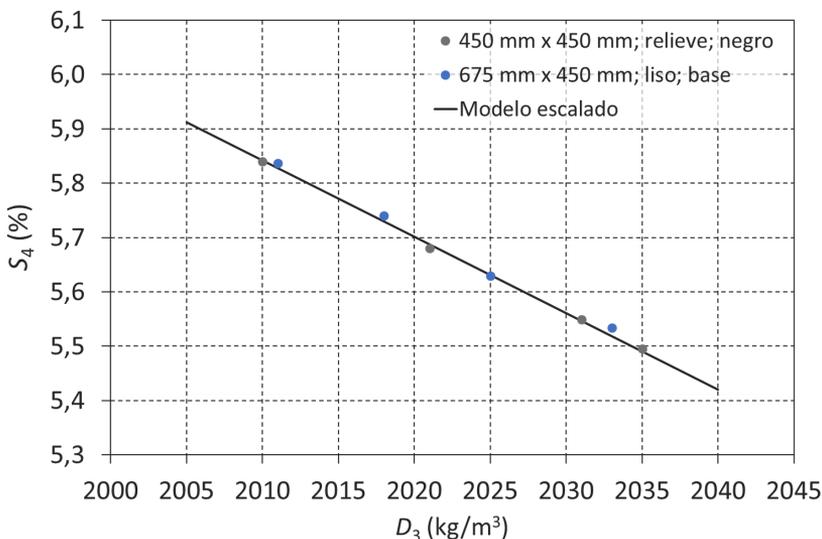


Figura 4.8. Influencia de diferentes parámetros industriales sobre la estimación de la contracción de cocción realizada mediante el modelo industrial escalado para la composición STD.

Tras evaluar la incidencia de las características de los soportes sobre la precisión del modelo, se estudió el efecto que sobre la estimación del tamaño final de las piezas podían tener los esmaltes aplicados sobre los mismos. Así, en el gráfico de la figura 4.9 se representa el diagrama de gresificación escalado a nivel industrial, el cual demostró su validez para estimar con precisión el tamaño final de soportes no esmaltados, junto a la variación de la contracción de cocción frente a la densidad aparente en seco, que presentaron soportes esmaltados con tres tipologías diferentes de esmalte.

Se observa como, en este caso, la precisión de la predicción realizada por el modelo se ve afectada por la tipología de esmalte utilizada en la fabricación del producto. La tipología de esmalte afecta principalmente a la ordenada en el origen de las rectas de gresificación mostradas en el gráfico, siendo la pendiente de estas similar a la correspondiente al modelo obtenido con producto no esmaltado. Esto indica que si bien para tener una estimación precisa del valor absoluto de la contracción de cocción y, por ende, del tamaño final de las piezas, se requiere de un correcto ajuste del parámetro δ_{S_4} introducido en la ecuación 4.9, el margen máximo de variación permitido para la densidad aparente, a la hora de realizar un control del prensado para mejorar la estabilidad dimensional del producto terminado, permanecerá prácticamente constante, independientemente del modelo fabricado.

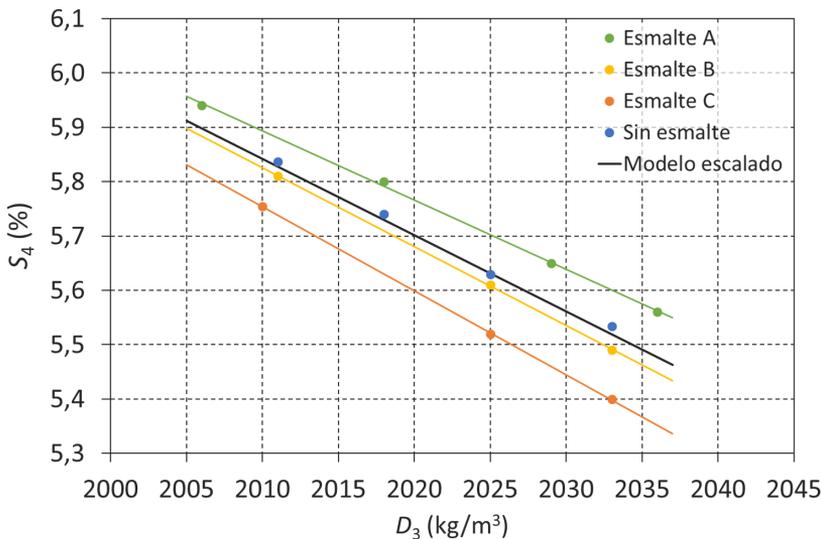


Figura 4.9. Influencia de la tipología de esmalte sobre la estimación de la contracción de cocción realizada mediante el modelo constitutivo.

Por las dificultades operativas que ello habría implicado, no se determinaron los tamaños finales correspondientes a todos los soportes considerados en la campaña de seguimiento productivo mostrada en 4.1.2.1. Por ello, la validez del procedimiento de escalado industrial del diagrama de gresificación basado en la incorporación del parámetro δ_{T_4} , fue directamente evaluada mediante el seguimiento de lotes completos de producción, cuyos resultados más ilustrativos se muestran en el siguiente apartado.

4.1.3 Estimación del tamaño final de pieza en lotes completos

Los experimentos industriales expuestos en los puntos 4.1.1 y 4.1.2 permitieron validar el modelo de comportamiento en base a medidas realizadas sobre piezas individuales a lo largo de varios meses de producción, para las dos composiciones de trabajo y considerando diferentes variables industriales como la propia composición del soporte, su acabado superficial, su color o el esmalte aplicado. Así pues, disponiendo de una metodología de escalado industrial del modelo validada, se realizó el seguimiento de todas las piezas procesadas en lotes de producción completos de la composición

STD, con el fin de reproducir posteriormente el comportamiento del proceso con el modelo de simulación DES. Utilizando el sistema de captura de datos puesto a punto para llevar a cabo la medida en continuo de la humedad de los soportes y comunicarse con el sistema de gestión de la prensa, se registró la evolución en el tiempo de las variables de conformado de todos los ciclos de prensado efectuados durante la fabricación de diferentes lotes productivos procesados en la prensa objeto de estudio. Además, los lotes fueron trazados de manera que fue posible obtener, directamente de la máquina de clasificación industrial al final del proceso, los tamaños de todas las piezas fabricadas. En los siguientes apartados se muestran los resultados más significativos de estos experimentos. En particular, los obtenidos en el seguimiento de un primer lote en el que se efectuaron voluntariamente maniobras sobre la presión de prensado para determinar como se comportaría el modelo constitutivo en distintas situaciones. Y los correspondientes a un segundo lote de fabricación durante el que los operarios realizaron varias correcciones de presión en la prensa, en base a los resultados de sus controles de proceso.

4.1.3.1 Evaluación del efecto de las modificaciones de la presión a lo largo de un lote de fabricación

En un primer experimento industrial, trabajando con un molde de tres cavidades y la composición de polvo STD, se realizaron modificaciones en la presión de prensado durante el conformado de un lote de piezas de tamaño nominal cocido 450 mm x 450 mm. La finalidad de estas maniobras era forzar cambios en el tamaño final de las piezas fabricadas y evaluar la precisión con la que el modelo podía predecirlos. Así pues, partiendo de una condición de base, con la prensa trabajando a una presión específica máxima de 37,8 MPa, se cambió la presión a 38,7 MPa, 41,2 MPa y 35,3 MPa, manteniendo la prensa funcionando en cada condición por un tiempo de 15 minutos, aproximadamente.

Tras su conformado los soporte se secaron y decoraron en la línea de fabricación y fueron cocidos en el horno industrial de rodillos a una temperatura máxima de 1185°C. A la salida del horno las piezas conformadas durante cada uno de los tres escalones de presión aplicados en las maniobras se acumularon en una misma vagoneta para, más tarde, determinar sus características dimensionales con el equipo industrial de clasificación.

En la figura 4.10 se muestra la evolución que tuvo la humedad de los soportes conformados mientras se estuvieron realizando la maniobras. Al emplearse el polvo atomizado directamente suministrado a planta para la fabricación habitual de sus productos, dicha humedad fue variando ligeramente durante los experimentos, desde valores de 6,0 %, hasta máximos de 6,4 %. En el mismo gráfico quedan reflejados los cambios de presión efectuados, considerándose como unidades de medida de presión los 'kg/cm²', por tratarse de las habitualmente empleadas en los entornos industriales. Puede observarse que en cada condición ensayada, con fondo sombreado en el gráfico, la presión de prensado se mantuvo relativamente estable, aunque un análisis detallado de la señal de presión revela que esta tenía una desviación estándar de 0,1 MPa, la cual proporcionaba una variabilidad en la presión de prensado, respecto a la consigna impuesta, de $\pm 0,19$ MPa (± 2 kg/cm²), para un intervalo de confianza del 95 %.

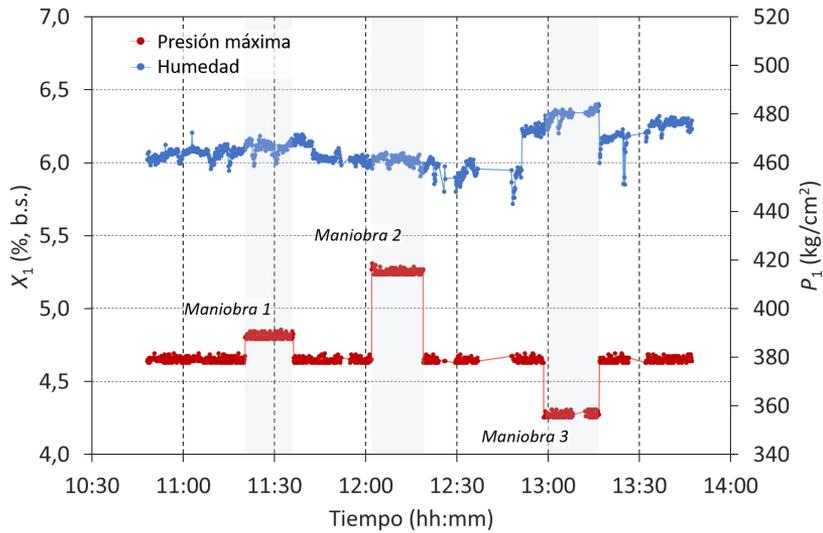


Figura 4.10. Evolución de la humedad y de la presión específica máxima en varias maniobras realizadas durante el conformado de baldosas de tamaño 450 mm x 450 mm.

A partir de los datos de presión y de humedad registrados pudo estimarse con el modelo de simulación DES la evolución experimentada por la densidad aparente en seco media de los tres soportes conformados en cada ciclo de prensado. Los resultados de estas estimaciones quedan recogidos en la figura 4.11.

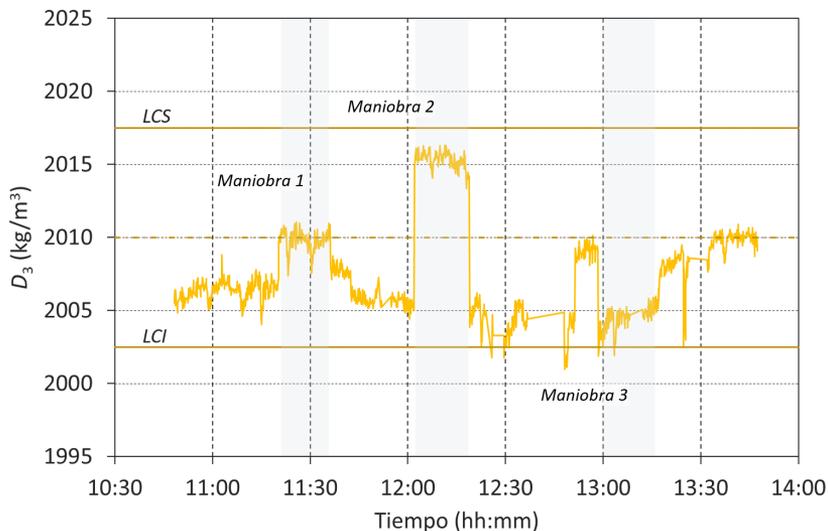


Figura 4.11. Evolución de la estimación de la densidad aparente en seco en varias maniobras realizadas durante el conformado de baldosas de tamaño 450 mm x 450 mm, con indicación de los límites de control para una tolerancia de calibre de 1mm.

Puede comprobarse como la densidad aparente estimada varía ligeramente con los cambios de humedad experimentados por el polvo, pero sobretodo, por el efecto de los cambios de presión realizados de manera voluntaria en cada maniobra. Junto a los datos estimados, en el gráfico se representan los límites máximos de variación de la densidad aparente en seco que podría tolerarse, según la ecuación simplificada 1.13, para que todas las piezas fabricadas estuvieran dentro de un mismo calibre centrado en un tamaño final de 454,5 mm y con una tolerancia de 1 mm entre su límite superior (455,0 mm) y su límite inferior (454,0 mm). El cálculo de este límite de variación, que resultó ser de $\pm 8 \text{ kg/m}^3$, se realizó para una densidad aparente en seco objetivo de 2010 kg/m^3 y un supuesto gradiente térmico en el horno de 5°C , $\Delta T_4^* = \pm 2,5^\circ\text{C}$.

En condiciones normales de operación, garantizar un flujo de materiales FIFO entre el prensado y la clasificación final es complicado debido a las incidencias que suelen aparecer cotidianamente durante la fabricación (rotura de piezas, paros de línea por avería, reprogramación de ordenes productivas, diferencias en el sentido de carga y descarga de los planos de las vagonetas, etc). Sin embargo, en este experimento, por tratarse la cantidad de piezas involucradas relativamente pequeña (apenas unas 300 piezas en cada maniobra) fue posible trazar adecuadamente su flujo a lo largo de todo el proceso de fabricación. Esto permitió asegurar que las primeras piezas conformadas fueran las primeras en ser cocidas y clasificadas, pudiendo relacionar inequívocamente los datos proporcionados por la máquina de clasificación en final de proceso, con las condiciones precisas en las que fueron conformados los soportes.

En el gráfico representado en la figura 4.12 se muestra la evolución del tamaño final de pieza estimado por el modelo de simulación basado en las ecuaciones constitutivas del material. En el mismo gráfico, en un trazo más fino se han superpuesto los tamaños de pieza registrados por el equipo de inspección dimensional a lo largo de la clasificación de las baldosas fabricadas durante cada una de las maniobras. El equipo proporcionaba, como se expuso en el punto 1.2.3.1, tres medidas por lado de cada baldosa, sin embargo, por simplicidad, se ha considerado únicamente la media de las tres medidas de uno de los lados de cada pieza. Además, aunque no sea un inconveniente para los fines de la investigación, la representación no se ha realizado en función del tiempo porque el sistema de adquisición de datos de la máquina de clasificación no permitía guardar las dimensiones de las piezas como una serie temporal, sino únicamente por unidad de pieza caracterizada. El acuerdo entre los datos experimentales proporcionados por la máquina de clasificación y las estimaciones realizadas por el modelo es bueno, para todo el periodo de experimentación. Ahora bien, se evidencia que los datos experimentales presentan una dispersión considerablemente superior a la de las estimaciones. De hecho, según el modelo, únicamente algunas piezas conformadas durante la tercera maniobra, ejecutada a la presión más baja, deberían presentar un tamaño final por debajo del límite inferior del calibre. En cambio, los datos proporcionados por el equipo de clasificación mostraban una mayor cantidad de piezas por debajo de dicho límite, concretamente, un 9,9% de todas las piezas conformadas en la tercera maniobra. Y no sólo eso, también un número significativo de piezas correspondiente a la segunda maniobra, un 12%, tenían un tamaño mayor al del límite superior del calibre, cosa que no reflejaba el modelo.

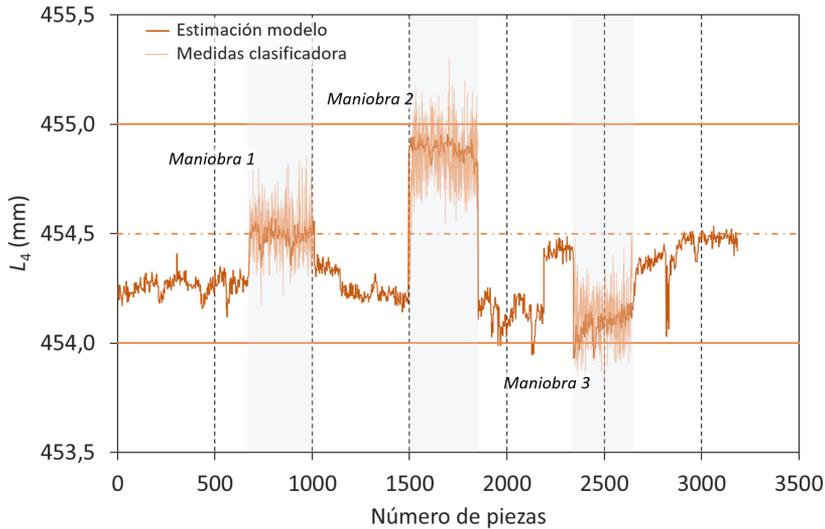


Figura 4.12. Evolución de la estimación y la medida experimental del tamaño final de pieza durante la fabricación de baldosas de tamaño 450 mm x 450 mm.

La razón de estas discrepancias reside en el hecho de que las estimaciones del tamaño final reflejadas en la figura 4.12 fueron obtenidas sin considerar, ni la variabilidad asociada a las diferencias de presión entre los alvéolos de la prensa, ni la de la temperatura de cocción del horno. Para solventarlo fue necesario realizar nuevas simulaciones añadiendo a la propia variabilidad de la prensa, que tal y como se ha indicado proporcionaba una desviación estándar de 0,1 MPa, la correspondiente al prensado simultáneo de tres soportes en cada ciclo de prensado, mucho más restrictiva. Dicha contribución adicional a la variabilidad de la presión de prensado fue determinada en base a los controles de compactación realizados en planta por los operarios de la sección de prensado. Estos revelaron que para el tamaño de pieza fabricado, la desviación estándar de la densidad aparente media entre los tres alveolos del molde era de 1 kg/m^3 , lo cual se traduce, según el diagrama de compactación de la composición STD para la humedad media del 6,15% registrada durante el experimento, en una desviación estándar de presión de 0,4 MPa (aproximadamente, 4 kg/cm^2 , correspondientes a $\Delta P_1^* \approx \pm 0,8 \text{ MPa}$). Junto a esta dispersión de la presión aplicada entre alveolos, también se tuvo en consideración una ligera dispersión de la humedad del polvo empleado en el conformado de cada soporte, que según los experimentos mostrados en 3.2.3 podía considerarse caracterizada por una desviación estándar de 0,03% b.s.

Considerando la variabilidad de prensado adicional que se acaba de indicar, se realizaron estimaciones de los tamaños finales de pieza para distintos valores de la dispersión térmica del horno hasta encontrar aquel que proporcionaba un porcentaje de piezas con un tamaño fuera de los límites del calibre igual al encontrado experimentalmente. En particular, para una desviación estándar de la temperatura máxima de cocción de $1,5^\circ\text{C}$ ($\Delta T_4^* \approx \pm 3^\circ\text{C}$) se obtuvo que un 10,6% de todas las piezas fabrica-

das en la segunda maniobra tendría un tamaño superior a 545 mm, mientras que un 11,4% de las prensadas en la tercera tendrían un tamaño inferior a 544 mm, valores muy próximos a los encontrados experimentalmente. La evolución de la estimación del tamaño de todas las piezas conformadas durante la experimentación, para dicha variabilidad, queda representada en la figura 4.13

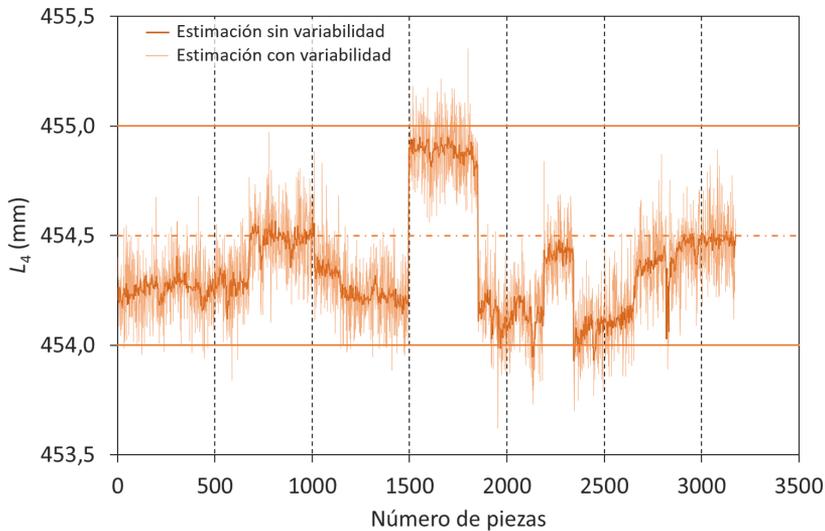


Figura 4.13. Estimación del tamaño final de pieza sin considerar variabilidad de presiones y temperaturas y tras ajustar la variabilidad a lo observado en el proceso para piezas de tamaño nominal 450 mm x 450 mm.

Para evidenciar mejor la buena correlación entre las medidas y las estimaciones del tamaño final, en la figura 4.14 se representa una variable frente a la otra. Los datos se encuentran en la diagonal del gráfico, lo cual denota la bondad del modelo en la predicción, teniendo un error en la estimación del tamaño final de $\pm 0,3$ mm, para un intervalo de confianza del 90% (líneas discontinuas en el gráfico). El error relativo en la estimación de la longitud es en todos los casos inferior a 0,1%. Este valor es algo superior al observado en los resultados de los experimentos mostrados en el punto 4.1.1, que revelaron un error en la estimación de $\pm 0,1$ mm. Esto es debido a que al no tenerse un trazado pieza a pieza de la producción, pese a acotar los grupos de soportes correspondientes a cada maniobra, es complicado asegurar que la pieza medida por el equipo de clasificación, fuese exactamente la pieza para la que se realizaba la predicción con el modelo, cosa que sí se conseguía en los experimentos iniciales con la composición EPP+. En cualquier caso, la estimación es aceptable, teniendo en cuenta que además incluye el propio error de medida del equipo de clasificación, el cual se estimó mediante ensayos de repetición sobre una placa patrón en $\pm 0,1$ mm.

Finalmente, a modo de resumen en la tabla 4.9 se recogen los valores promedio de las principales variables de proceso correspondientes a cada maniobra, así como los resultados de las estimaciones realizadas con el modelo industrial escalado.

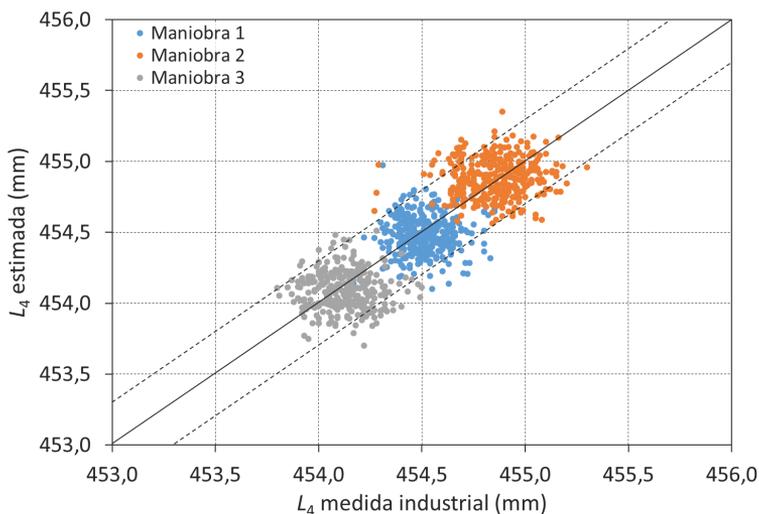


Figura 4.14. Tamaños finales de pieza estimados por el modelo de comportamiento industrial frente tamaños determinados experimentalmente para piezas de tamaño nominal 450 mm x 450 mm.

Tabla 4.9. Resumen de valores medios de los parámetros medidos y estimados para las maniobras realizadas durante la fabricación de un lote de baldosas de tamaño nominal 450 mm x 450 mm.

Maniobra	P_1 (kg/cm ²)	X_1 (%, b.s.)	D_3 , estimada (kg/m ³)	L_4 , estimada (mm)	L_4 , medida (mm)
1	389±2	6,1±0,1	2010±3	454,5±0,2	454,5±0,2
2	415±2	6,0±0,1	2015±3	454,9±0,3	454,9±0,3
3	357±2	6,3±0,1	2005±4	454,1±0,2	454,1±0,3

Los resultados de estos experimentos permiten extraer dos conclusiones importantes. Por un lado, el modelo escalado con la introducción de parámetros adicionales de corrección en los diagramas de compactación y de gresificación de laboratorio, tal y como apuntaban los resultados presentados en 4.1.1, permite estimar con precisión el comportamiento del proceso y el tamaño final de las piezas, a lo largo del tiempo. Y por otro lado, dada la variabilidad típica del proceso de fabricación, para obtener piezas que puedan considerarse del mismo calibre, es imprescindible tener una densidad aparente en seco de trabajo que proporcione tamaños de pieza centrados en la tolerancia del calibre deseado. De lo contrario, es probable que, aún teniendo una densidad de trabajo media que proporcione piezas de tamaño comprendido en el calibre, existan algunos soportes que tras su cocción tengan un tamaño fueran de las tolerancias deseadas.

En el caso de los experimentos presentados en este punto, las piezas procesadas durante la primera maniobra quedaron todas comprendidas dentro del mismo calibre,

tanto considerando las estimaciones de tamaño, como según las medidas industriales realizadas. Esto pone de manifiesto que, para este tamaño de pieza y tipología de producto, una tolerancia en el calibre de 1 mm es técnicamente alcanzable, aspecto que se remarcó en el apartado 1.2.3.2.3. En cambio, las piezas procesadas en la segunda y tercera maniobra, pese a mostrar una densidad aparente en seco media que proporcionaría piezas del mismo calibre que las de la primera, debido a la variabilidad del proceso, se sitúan en un porcentaje no despreciable fuera de los límites establecidos.

4.1.3.2 Estimación de la densidad aparente en seco y del tamaño final de las piezas de un lote completo en condiciones de fabricación

Tras poner a punto la metodología de escalado del modelo de comportamiento industrial, se procedió a realizar el seguimiento de lotes completos de producto en condiciones habituales de fabricación. En el gráfico de la figura 4.15 se representa la evolución de la humedad de los soportes recién prensados, registrada por el equipo de espectrometría NIR, a lo largo de la fabricación de un lote constituido por 1600 m² de piezas de tamaño nominal en cocido 675 mm x 450 mm, conformadas a partir de la composición de soporte STD, en un molde de dos cavidades. En la misma gráfica se incluye la evolución de la presión específica máxima aplicada por la prensa sobre el polvo durante ese mismo periodo de tiempo.

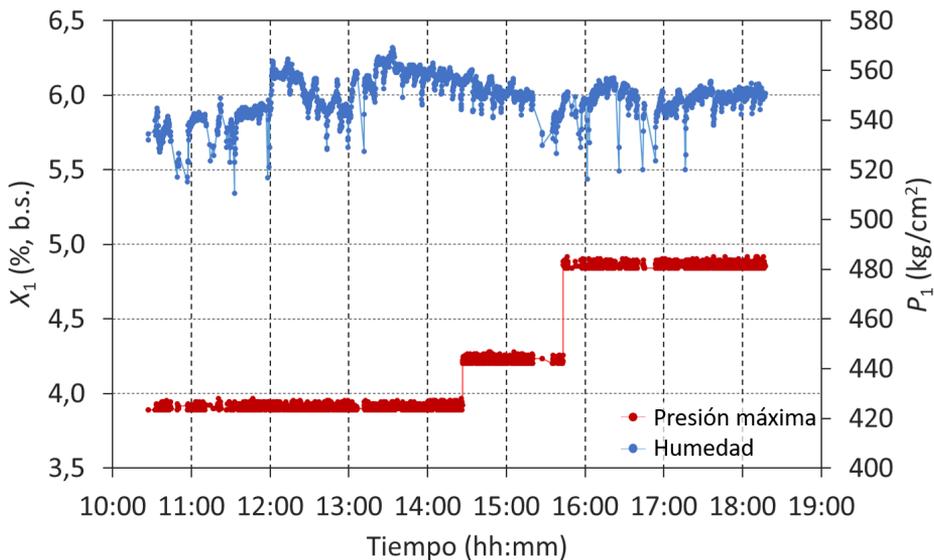


Figura 4.15. Evolución de la humedad y de la presión máxima de prensado a lo largo de la fabricación de un lote de baldosas de tamaño nominal 675 mm x 450 mm.

Un análisis detallado de la evolución de la humedad durante el lote completo revela que, en este caso, existen dos patrones de comportamiento de esta variable, cosa que no pudo observarse tan claramente en las maniobras anteriores, por ser menos acusadas las variaciones de humedad entonces producidas. Así, por una parte, se aprecia una oscilación relativamente frecuente que produce disminuciones puntuales

de la humedad de en torno a un 0,2%, y por otra parte, una oscilación de mucha menor frecuencia que provoca cambios de humedad progresivos con el paso de las horas. Este comportamiento se observa más fácilmente en el gráfico de detalle de la figura 4.16, el cual recoge únicamente la evolución de la humedad durante dos horas, periodo en el que, además, no tuvo lugar ninguna parada de la prensa.

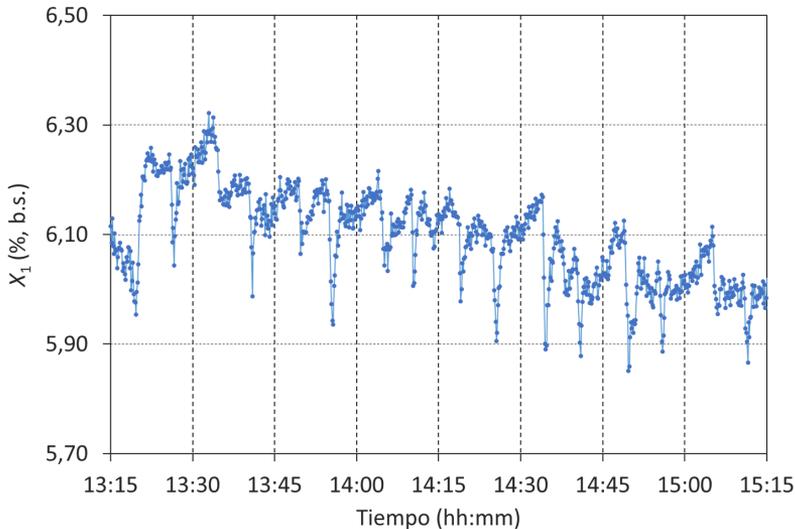


Figura 4.16. Detalle de la evolución de la humedad de los soportes recién prensados a lo largo de la fabricación de un lote completo de baldosas de tamaño 675 mm x 450 mm.

Las oscilaciones periódicas, que se repiten de cada 10 a 15 minutos, aproximadamente, son originadas por los ciclos de llenado-vaciado de la tolva superior de la prensa. En efecto, mientras la tolva va vaciándose a medida que se suministra polvo al sistema de alimentación, la superficie superior del polvo contenido en ella, la cual queda expuesta al ambiente a través de la boca de entrada, se seca ligeramente. Posteriormente, cuando dicho polvo es introducido en los alvéolos del molde, este secado se refleja en una disminución puntual de la humedad de los soportes conformados con el mismo. En el momento en el que un sensor de nivel mínimo indica que queda poca cantidad de polvo en el interior de la tolva, se inicia el llenado de la misma a través de una cinta de transporte, hasta que un sensor de nivel máximo indica que se dispone de suficiente polvo en el interior, volviéndose a producir el proceso de vaciado que se acaba de exponer. Este comportamiento tiene lugar de manera cíclica, durante el funcionamiento de la prensa, y con una frecuencia que dependerá de su velocidad de funcionamiento y de la cantidad de polvo alimentado al molde en cada ciclo de prensado.

En cuanto a las oscilaciones más lentas, como la que genera en el gráfico de la figura 4.16 una disminución progresiva de la humedad desde valores máximos de 6,3%, a las 13:30 h, hasta valores mínimos de 6,0%, a las 15:15 h, estas son debidas a la falta de homogeneidad del polvo contenido en los silos de almacenamiento. Desde un punto de vista del control habitual de la estabilidad dimensional del proceso,

son este tipo de oscilaciones de humedad las que se suelen contrarrestar actuando manualmente sobre la presión máxima de prensado. Siendo las oscilaciones debidas al ciclo de llenado-vaciado de la tolva muy complicadas de controlar e incluso una fuente de incertidumbre a la hora de realizar muestreos y medidas manuales de la humedad con termobalanzas o por secado en estufa. De hecho, la presencia de estas oscilaciones fue lo que obligó a definir un procedimiento de muestreo de polvo, como el descrito en 3.2.2.1, en el que, para amortiguar estas posibles disminuciones puntuales de humedad, las muestras recogidas aglutinaban polvo con el que se realizaban un mínimo de 3 ciclos de prensado.

Como resultado de la evolución de las variables de conformado mostrada en la figura 4.15, el modelo de comportamiento del material, escalado industrialmente con la incorporación de un término δ_{D_3} de 8 kg/m^3 , estimó la evolución de densidad aparente en seco media de los soportes en cada ciclo de prensado representada en el gráfico de la figura 4.17. En el mismo queda superpuesta la evolución de la densidad aparente en seco de todos los soportes predicha por el modelo considerando, en base a los resultados de los controles de compacidad en planta, una variabilidad de la presión específica máxima caracterizada por una desviación estándar de $0,25 \text{ MPa}$ (aproximadamente, $2,5 \text{ kg/cm}^2$ y correspondiente a $\Delta P_1^* \approx \pm 0,5 \text{ MPa}$), asociada al conformado de dos soportes por ciclo de prensado.

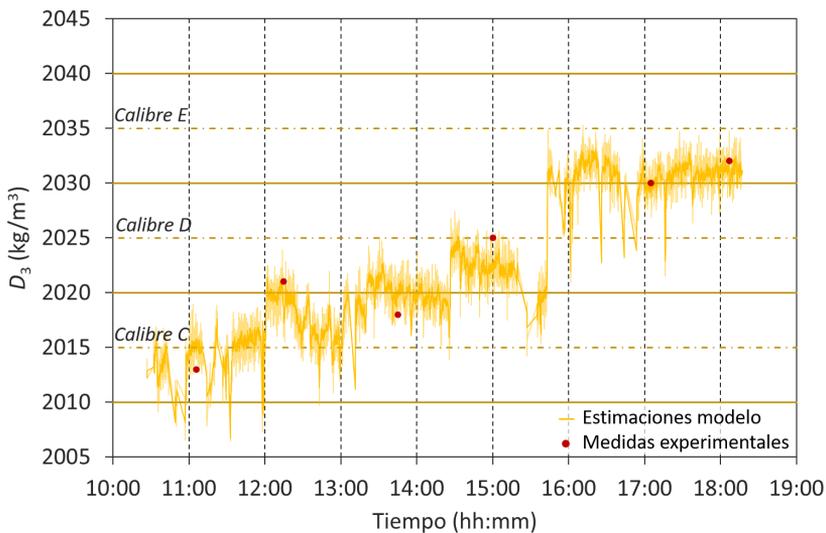


Figura 4.17. Evolución de la estimación de la densidad aparente en seco y comprobaciones con método de referencia a lo largo de la fabricación de un lote completo de baldosas de tamaño nominal $675 \text{ mm} \times 450 \text{ mm}$.

La representación incluye los límites de control de densidad aparente que definirían, según los cálculos realizados con la ecuación 1.13 para una densidad de 2015 kg/m^3 y un gradiente térmico de 5°C , los límites de tres calibres de tolerancia 1 mm , C, D y E, centrados en tamaños de pieza de $682,5 \text{ mm}$, $683,5 \text{ mm}$ y $684,5 \text{ mm}$, respectivamente. Si bien para la fabricación de piezas de $450 \text{ mm} \times 450 \text{ mm}$ con una tolerancia de 1 mm los límites de variación máxima de la densidad aparente se situaban en

$\pm 8 \text{ kg/m}^3$, para este lote el valor se reduce sensiblemente a $\pm 5 \text{ kg/m}^3$, por tratarse de piezas de mayor tamaño y, según lo expuesto en la introducción, más difíciles de mantener en un calibre de la misma tolerancia.

En este caso, para corroborar las estimaciones realizadas por el modelo de simulación, sobre el trazo correspondiente a las densidades predichas, se han incluido los valores obtenidos en base a seis controles de producción realizados con soportes recogidos de la línea productiva a medida que transcurría la fabricación del lote (puntos rojos). En concordancia con lo observado en las experiencias industriales previamente expuestas, la predicción de la densidad aparente de los soportes industriales realizada por el modelo fue satisfactoria. Todas las medidas experimentales se sitúan en la zona sombreada del gráfico, correspondiente a la variabilidad de la densidad aparente en las condiciones simuladas para un ΔP_1^* de $\pm 0,5 \text{ MPa}$ y un ΔT_4^* de $\pm 3^\circ\text{C}$, valor, este último, igual al observado en las maniobras anteriormente realizadas.

La predicción de la evolución de la densidad aparente de los soportes secos reflejó que, en principio, debían esperarse al finalizar el proceso de fabricación piezas situadas en, al menos, tres calibres distintos. Esta misma predicción fue realizada por el modelo de simulación, como puede observarse en la figura 4.18, en la que se recogen los valores estimados del tamaño del lado más largo de las piezas fabricadas, considerando una temperatura máxima de cocción de 1187°C . Los datos simulados revelan que debido a los importantes cambios de densidad aparente en seco generados durante el conformado de los soportes, el tamaño final de las piezas también muestra variaciones.

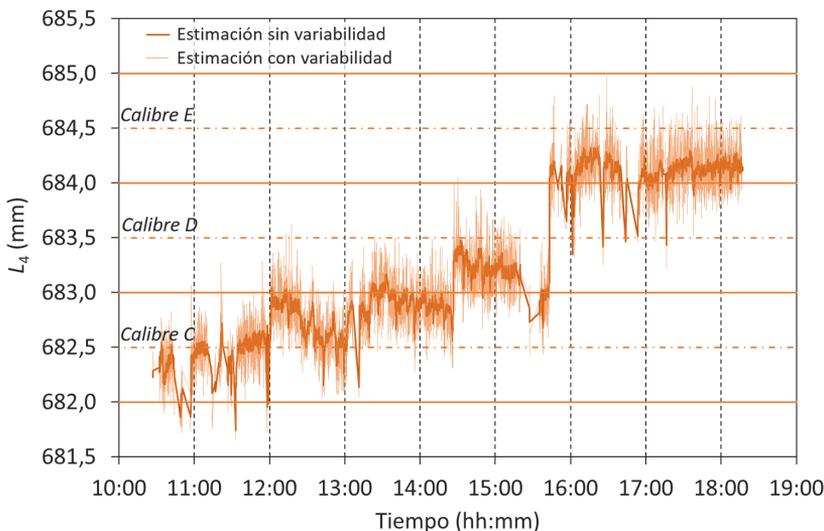


Figura 4.18. Evolución de la estimación del tamaño final de pieza a lo largo de la fabricación de un lote completo de baldosas de tamaño $675 \text{ mm} \times 450 \text{ mm}$.

Al mismo tiempo, se vuelve a verificar, como sucedía con las maniobras anteriormente presentadas, que es crítico fabricar piezas con una densidad aparente que centre el tamaño final en el calibre deseado, cosa que solamente sucede desde el inicio del lote

hasta las 12:00 h. Además, se comprueba que para un tamaño de pieza de 675 mm x 450 mm, mayor que el fabricado durante las maniobras del apartado 4.1.3.1, es muy complicado mantener todas las piezas fabricadas dentro de una tolerancia de calibre de 1 mm. Incluso en los periodos de tiempo para los cuales las condiciones de conformado proporcionaban una densidad aparente en seco relativamente constante, como por ejemplo, entre las 16:00 y las 18:00 h, la propia variabilidad del proceso dificultaba el situar todas las piezas dentro de la tolerancia, independientemente de que el tamaño no estuviese centrado en el calibre. Esto indica que, desde un punto de vista técnico, para este tamaño de pieza y superiores, si se desea obtener un único calibre es necesario aumentar la tolerancia de calibre a, por ejemplo, 1,2 o 1,4 mm, para permitir ampliar los límites máximos de variación de la densidad aparente y que fuera posible fabricar piezas de un determinado calibre. Desafortunadamente, las tolerancias de calibre, como ya se ha explicado, vienen definidas para la mayoría de las empresas por las exigencias del mercado y tan sólo para los tamaños de pieza más grandes, por encima de 1000 mm, suelen aceptarse tolerancias de calibre superiores a 1 mm.

Finalmente, para confirmar que las predicciones de tamaño hechas por el modelo de simulación eran representativas de lo realmente sucedido en el proceso de fabricación, se determinaron en el equipo de clasificación industrial los tamaños de todas las piezas que alcanzaron el final del proceso. Estos datos quedan reflejados en la figura 4.19.

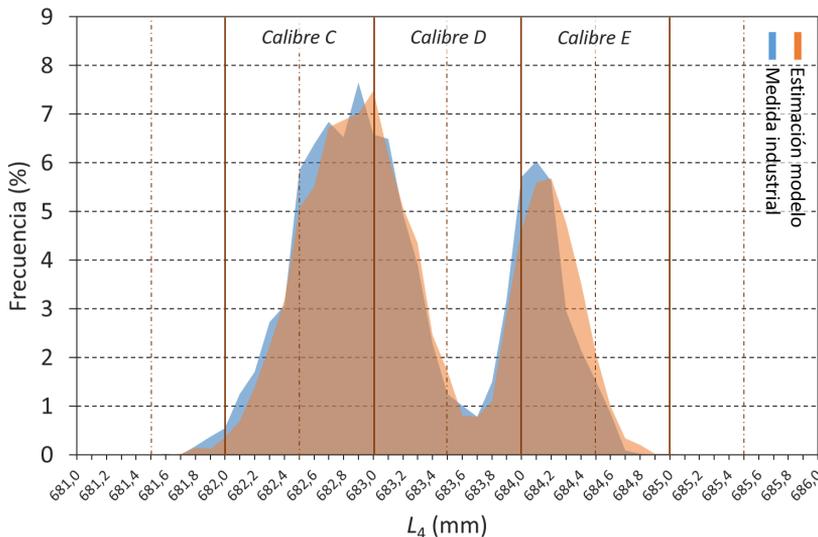


Figura 4.19. Distribución de tamaños finales de pieza predicha por el modelo y determinada mediante el equipo industrial de clasificación para un lote completo de baldosas de tamaño nominal 675 mm x 450 mm.

Al tratarse de un número considerable de piezas (más de 5000 unidades) en este caso no fue posible hacer un trazado pieza a pieza, que permitiera correlacionar los datos de la máquina de clasificación, con las estimaciones realizadas con el modelo. Por este motivo, los datos resultantes se han representado como una distribución de fre-

cuencias de tamaños para un rango de clases con amplitudes de una décima parte de la tolerancia del calibre (0,1 mm). Por un lado, se muestra la distribución de tamaños determinada experimentalmente con la máquina de clasificación (área azulada) y, por otro lado, la distribución de tamaños simulada con el modelo de comportamiento (área anaranjada). En los dos casos se obtiene una distribución de tamaños bimodal, debida fundamentalmente al brusco cambio de presión originado sobre las 15:45 h, el cual conduce a un desplazamiento de la producción a tamaños de pieza mayores a los fabricados las horas previas. Ambas distribuciones de tamaños son similares, estimándose con buena precisión los porcentajes de piezas fabricados dentro de cada uno de los calibres considerados, tal y como queda reflejado en el resumen de la tabla 4.10. En ella puede verse como la simulación predice adecuadamente el porcentaje de los calibres mayoritarios (C, D, E) y la existencia de una pequeña proporción de la producción que se situaría en un calibre minoritario, de tamaño inferior al C.

Tabla 4.10. Resumen de los porcentajes de calibre estimados y medidos con el equipo de clasificación para un lote completo de piezas de tamaño nominal 675 mm x 450 mm.

Calibre	Porcentaje estimado (%)	Porcentaje medido (%)	Diferencia (%)
C	46,2	48,6	2,4
D	29,9	31,0	1,1
E	23,2	19,3	-3,9
Resto	0,7	1,1	0,4

4.2 Simulación de estrategias de control industrial

Habiendo validado el modelo de comportamiento de los materiales a nivel industrial y comprobado que el modelo de simulación DES describe adecuadamente bien el proceso de fabricación, desde el punto de vista de su estabilidad dimensional, se procedió a utilizarlo para simular las diferentes estrategias de control planteadas.

- En una primera aproximación, se simuló cada estrategia sin tener en consideración la variabilidad de proceso observada previamente, evidenciando la dependencia existente entre el tamaño final de pieza y las variables de conformado.
- Posteriormente, se compararon las diferentes estrategias mediante la simulación de su comportamiento frente a un caso concreto de variación de la humedad del polvo atomizado, considerando la variabilidad intrínseca del proceso.
- Finalmente, en base a los resultados de las simulaciones, se seleccionó la estrategia considerada más adecuada para llevar a cabo una implantación industrial.

4.2.1 Simulación de una estrategia de control basada en la densidad aparente en húmedo

Como se ha comentado anteriormente, en muchas empresas el control de la operación de prensado se realiza, por facilidad operativa, en base a la medida de la densidad

aparente en húmedo y al establecimiento de esta variable como consigna de trabajo. Un lazo de control anticipativo/retroalimentado para controlar la densidad aparente en húmedo, según lo especificado en 3.3.3.2, se fundamentaría en el cálculo de la presión específica máxima a imponer en la prensa para alcanzar, ante una perturbación en la humedad del polvo, una determinada densidad aparente en húmedo de los soportes recién prensados. Dicha presión a establecer en la prensa puede determinarse combinando las ecuaciones del diagrama de compactación industrial y la ecuación 4.11, la cual se deriva fácilmente de la ecuación 4.7 y permite relacionar la densidad aparente en seco de los soportes con su densidad aparente en húmedo.

$$D_3 = D_2 \left(\frac{100 + 3 S_3}{100 + X_1} \right) \quad (4.11)$$

De esta manera, sustituyendo la ecuación 4.11 en la 4.10 y despejando P_1 se obtiene la expresión de control 4.12, en la que D_{2SP} es la densidad aparente en húmedo de consigna deseada.

$$P_1 = \exp \left(\frac{D_{2SP} (100 + 3 S_3) - ((cX_1 + d) + \delta_{D_3})}{(100 + X_1)(aX_1 + b)} \right) - \delta_{P_1} \quad (4.12)$$

Haciendo uso de esta expresión y de las ecuaciones del modelo de comportamiento puede determinarse cuál sería la variación del tamaño final de pieza, frente a las variaciones de la humedad del polvo, para una determinada densidad aparente en húmedo de consigna y un tamaño del alveolo dado. En el gráfico de la derecha de la figura 4.20 se ha representado, para la composición EPP+, cual sería dicha variación, para tres densidades aparentes de consigna distintas y un tamaño de alveolo en su lado más largo de 754 mm, el cual proporcionaría piezas de un tamaño nominal cocido 700 mm.

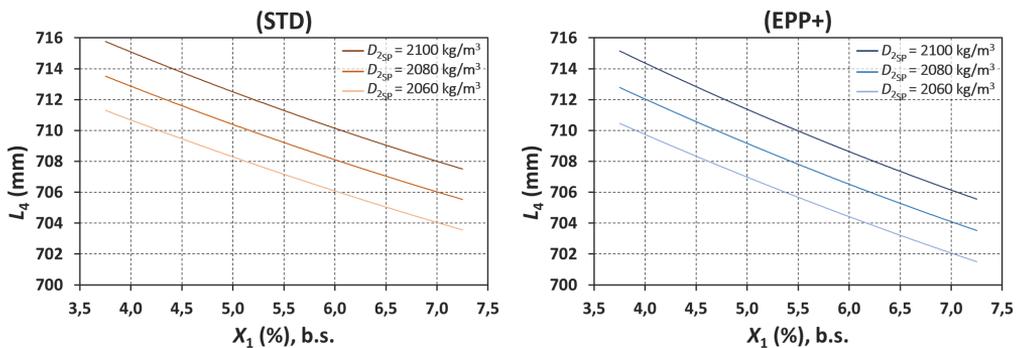


Figura 4.20. Simulación de la variación con la humedad de conformado del tamaño final de las piezas, para una estrategia de control basada en la densidad aparente en húmedo y un tamaño nominal de 700 mm x 450 mm.

Como puede comprobarse, para cualquiera de las densidades aparentes de consigna, a medida que aumenta la humedad, pese a mantenerse constante la densidad en

húmedo en el valor preconsignado, se produce una brusca disminución del tamaño final de las piezas. De manera general, la dependencia del tamaño final de las piezas con la humedad de conformado se sitúa en un valor promedio de 2,7 mm/(%, b.s.), variando muy poco con la densidad aparente en húmedo de consigna. Este hecho es debido a que, como se apuntó anteriormente, la contracción lineal de una pieza depende de su porosidad, macroscópicamente relacionada de forma directa con la densidad aparente en seco, pero no con su densidad aparente en húmedo. Por tanto, un control basado en compensar variaciones de la humedad manteniendo constante la densidad aparente en húmedo, genera cambios considerables en la densidad aparente en seco, que se traducen en cambios en la contracción del material.

En la parte izquierda de la figura 4.20 se representan los resultados de los mismos cálculos, pero aplicados a la composición STD. Para poder compararlos más fácilmente se ha considerado el mismo tamaño inicial del alveolo que para la composición EPP+. El comportamiento del sistema en este caso es similar, si bien es cierto que la variación del tamaño final de pieza es ligeramente inferior. Debido a la disminución de la presión con el aumento de la humedad originada por la acción de control, se produce una reducción de la expansión post-prensado y del tamaño en crudo, que son más acusados en la composición EPP+. Esto se traduce en que, mientras que la composición EPP+ experimentaba 2,7 mm de variación por cada punto porcentual de humedad modificada, en la STD esta variación se reduce a un valor promedio de 2,3 mm/(%, b.s.). En cualquiera de los casos, incluso en la composición STD con menor expansión post-prensado, desde el punto de vista de la estabilidad dimensional del producto, un control de la operación de prensado basado en utilizar como variable objetivo la densidad aparente en húmedo no es aconsejable.

De manera sencilla puede demostrarse que un control basado exclusivamente en mantener constante la presión máxima de prensado, P_1 , sería más ventajoso para la estabilidad dimensional del producto acabado, que realizar un control basado en la densidad aparente en húmedo. En los gráficos de la figura 4.21 se ha representado, para la composición EPP+ y la STD, como variaría el tamaño final de las piezas con la humedad de conformado, en caso de mantenerse la presión de prensado en valores constantes. En dicho caso, la variación del tamaño final de pieza con respecto a la humedad del polvo se reduce a un valor promedio de 1,7 mm/(%, b.s.), para la composición STD, y hasta 1,2 mm/(%, b.s.), para la EPP+.

El hecho de que trabajando a presión máxima de prensado constante la composición STD presente una variación del tamaño final ligeramente superior al de la EPP+ es debido a que, para poder obtener tamaños finales de pieza similares, las presiones de prensado consideradas en la STD han sido sensiblemente inferiores a las de la EPP+. Por consiguiente, los cálculos para la composición STD se han realizado en una zona del diagrama de compactación en la cual la variación de la densidad aparente en seco con la humedad es mayor que para la EPP+ y el cambio de contracción de cocción también.

Además, se da la coincidencia de que con la composición EPP+, por tener esta una mayor expansión post-prensado y una mayor dependencia de la misma con la humedad, al aumentar esta última variable sin reducirse la presión, se produce una compensación del cambio de contracción lineal originado por el aumento de la densi-

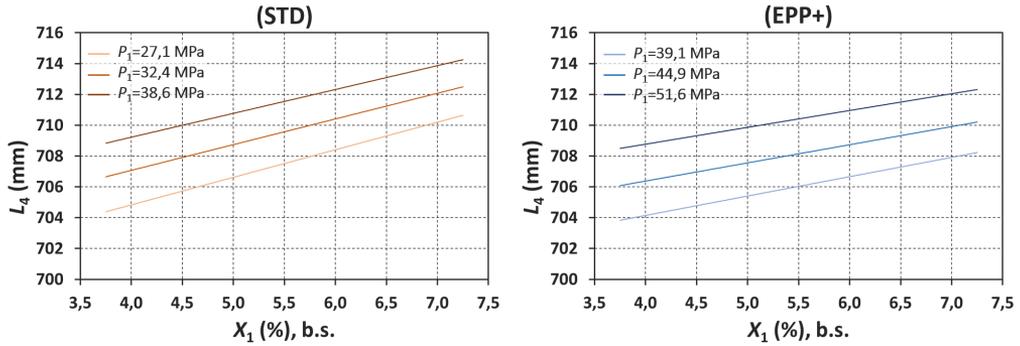


Figura 4.21. Simulación de la variación con la humedad de conformado del tamaño final de las piezas para una presión máxima de prensado constante y un tamaño nominal de 700 mm x 450 mm.

dad aparente en seco. En efecto, al incrementarse la humedad se reduce la expansión de los soportes de composición EPP+ de una manera más marcada que en los de STD, lo cual repercute en una disminución del tamaño en crudo de la pieza capaz de contrarrestar, en parte, el aumento del tamaño final causado por una reducción de la contracción de cocción, asociada al aumento de la densidad aparente en seco. Todo ello hace que la pendiente de las rectas representadas en la figura 4.21 sean mayores para la composición STD.

Para entender mejor estas diferencias de comportamiento es interesante calcular la variación del tamaño final de pieza (ΔL_4) en función de la variación de la humedad de conformado (ΔX_1). Para ello, es necesario derivar respecto a la humedad la ecuación 1.20, que permite calcular el tamaño final de pieza a partir de los diferentes cambios dimensionales que esta sufre a lo largo del proceso. Dicha derivada, según la expresión 4.13, puede calcularse a partir de las derivadas parciales del tamaño final respecto a los cambios dimensionales y las derivadas de dichos cambios respecto a la humedad:

$$\frac{dL_4}{dX_1} = \left. \frac{\partial L_4}{\partial S_2} \right|_{S_3, S_4} \frac{dS_2}{dX_1} + \left. \frac{\partial L_4}{\partial S_3} \right|_{S_2, S_4} \frac{dS_3}{dX_1} + \left. \frac{\partial L_4}{\partial S_4} \right|_{S_2, S_3} \frac{dS_4}{dX_1} \quad (4.13)$$

en la cual los términos en derivadas parciales, aplicando un cambio de variable de la forma $x = (100 - S_n)$ en la ecuación 1.20, podrían calcularse de manera genérica como:

$$\left. \frac{\partial L_4}{\partial S_n} \right|_{i \neq n} = \frac{-L_4}{(1 - S_n)} \quad (4.14)$$

De tal manera que:

$$\left. \frac{\partial L_4}{\partial S_2} \right|_{S_3, S_4} = \frac{-L_4}{(100 - S_2)} \quad (4.15)$$

$$\left. \frac{\partial L_4}{\partial S_3} \right|_{S_2, S_4} = \frac{-L_4}{(100 - S_3)} \quad (4.16)$$

$$\left. \frac{\partial L_4}{\partial S_4} \right|_{S_2, S_3} = \frac{-L_4}{(100 - S_4)} \quad (4.17)$$

Además, la derivada de cada cambio dimensional se determinaría derivando respecto a la humedad las ecuaciones constitutivas del modelo, concretamente, la ecuación 1.27 para la expansión post-prensado, la 4.10 para el diagrama de compactación y la 4.9 para el de gresificación. Así se tendría que:

$$\frac{dS_2}{dX_1} = (eP_1 + f) \quad (4.18)$$

$$\frac{dS_3}{dX_1} = 0 \quad (4.19)$$

$$\frac{dS_4}{dX_1} = \left. \frac{\partial S_4}{\partial D_3} \right|_{T_4} \frac{dD_3}{dX_1} = (m(T_4 + \delta_{T_4})^2 + p(T_4 + \delta_{T_4}) + r) (a \ln(P_1 + \delta_{P_1}) + c) \quad (4.20)$$

donde el término referente a la variación de la contracción de secado respecto a la humedad se anula, por considerarse a nivel industrial que es posible realizar un estimación dimensional adecuada suponiéndola constante.

De este modo, sustituyendo las ecuaciones 4.15, 4.16, 4.17, 4.18, 4.19 y 4.20 en la ecuación 4.13 y transformando los términos referidos a las derivadas en incrementos finitos, se obtiene la ecuación 4.21, que permite calcular la variabilidad del tamaño final de la pieza asociada a la variación de la humedad de conformado.

$$\frac{\Delta L_4}{\Delta X_1} = L_4 \left| \frac{(eP_1 + f)}{(100 - S_2)} + \frac{(m(T_4 + \delta_{T_4})^2 + p(T_4 + \delta_{T_4}) + r)(a \ln(P_1 + \delta_{P_1}) + c)}{(100 - S_4)} \right| \quad (4.21)$$

Haciendo uso de la ecuación 4.21, en la figura 4.22 se han representado, para ambas composiciones, como cambia la relación $\Delta L_4/\Delta X_1$ a medida que se incrementa la humedad de conformado, para valores constantes de la presión de prensado. Se obtienen líneas prácticamente horizontales, lo cual refleja que para todo el rango de humedad el efecto de la misma sobre el cambio dimensional se mantiene prácticamente constante. Tal y como cabía esperar, en base a los resultados mostrados en la figura 4.21, la composición STD muestra valores mayores de $\Delta L_4/\Delta X_1$, lo cual indica que el tamaño final de pieza es más sensible a los cambios de humedad, que en la composición EPP+. Además, esta variación se incrementa a medida que disminuye la presión de conformado.

En la figura 4.23 se representa para cada composición, por una parte, la contribución de la expansión post-prensado (eje vertical derecho) sobre el cambio del tamaño final

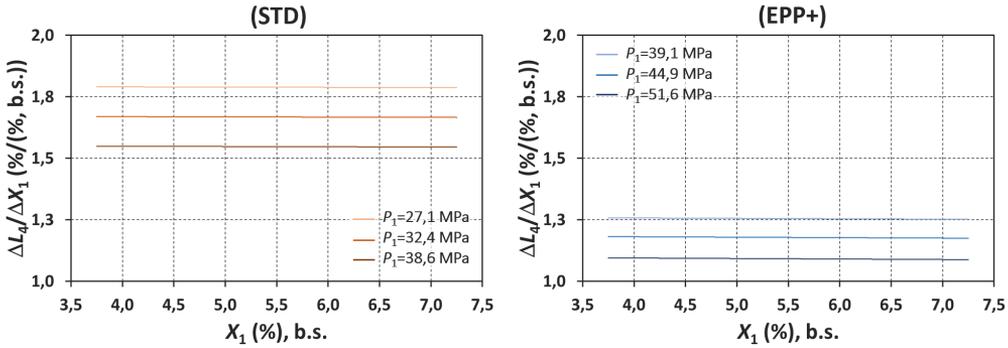


Figura 4.22. Simulación de la influencia de la humedad de conformado sobre el tamaño final de pieza para una presión máxima de prensado constante y para un tamaño nominal de 700 mm x 450 mm.

respecto a la densidad aparente y, por otra parte, la contribución de la contracción de cocción (eje vertical izquierdo). Dichas contribuciones corresponden a los términos de la expansión post-prensado y de la contracción lineal de cocción en la ecuación 4.13. Como puede comprobarse, la influencia de la contracción de cocción es significativamente mayor que la de la expansión post-prensado, independientemente de la composición considerada. Al mismo tiempo, los valores de dichas contribuciones disminuyen en todos los casos a medida que aumenta la densidad aparente en seco.

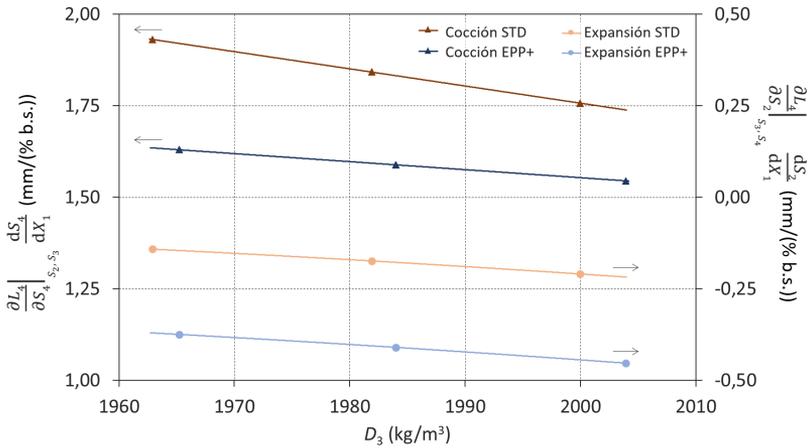


Figura 4.23. Contribuciones a la variación del tamaño final de la contracción de cocción (izquierda) y de la expansión post-prensado (derecha) en función de la densidad aparente en seco.

La composición EPP+, además de tener una menor influencia de la contracción de cocción, tiene mayor contribución de la expansión post-prensado, la cual, por ser de signo negativo, contrarresta el cambio de tamaño asociado a la cocción. Por contra, la composición STD presenta una mayor influencia de la contracción en cocción pero

tiene una menor contribución de la expansión tras el prensado, lo que da como resultado, en conjunto, una mayor variación del tamaño final con la humedad del polvo y una mayor dependencia de la misma con la humedad, que en la composición EPP+.

El fenómeno observado indica que, aunque mantener constante la presión máxima de prensado será siempre más ventajoso que efectuar una actuación sobre los parámetros de la prensa, basándose en el control de la densidad aparente en húmedo, dependiendo de las propiedades de la composición, la variabilidad del tamaño final puede presentar diferencias significativas. Así, en general, composiciones con mayor dependencia con la humedad de su expansión tras el prensado, para comportamientos en cocción similares, deberían proporcionar mayor estabilidad dimensional al final del proceso que las que muestren menor dependencia de la expansión con la humedad del polvo. De cualquier forma, no es recomendable trabajar con composiciones de soporte que presenten grandes expansiones post-prensado, ya que estas pueden ser fuente de problemas durante la extracción de las piezas de los alveolos del molde, tales como roturas o aparición de grietas.

Además de todo lo comentado, no hay que olvidar que estas simulaciones iniciales no tienen en consideración la variabilidad del proceso asociada a los posibles gradientes térmicos de cocción, ni a las variaciones de presión máxima entre alveolos. Como se ha comprobado en el apartado de validación del modelo, en muchos casos, dicha variabilidad ya supone un cambio dimensional en el producto final de entre el 30 y el 50 % del rango de tolerancia.

4.2.2 *Simulación de una estrategia de control basada en la densidad aparente en seco*

Una estrategia de control basada en la densidad aparente en seco de los soportes recién prensados supone implementar un lazo de control en el que, ante una perturbación de la humedad del polvo, se impondría en la prensa una presión específica máxima tal que la densidad aparente en seco de los soportes se mantuviera constante en un valor preestablecido. En este caso, la presión a establecer se determina fácilmente a partir del diagrama de compactación de la composición de trabajo, del cual se deriva la ecuación 4.22, en la que D_{3SP} es la densidad aparente en seco de consigna deseada. Con esta expresión, y las ecuaciones constitutivas del modelo, puede determinarse como varía el tamaño final de las piezas frente a los cambios de humedad para un determinado valor de la densidad de consigna y del tamaño del alveolo.

$$P_1 = \exp \left(\frac{D_{3SP} - ((cX_1 + d) + \delta_{D_3})}{(aX_1 + b)} \right) - \delta_{P_1} \quad (4.22)$$

En la figura 4.24 se ha representado como variaría el tamaño final de pieza, tanto para la composición STD, como para la EPP+, si se utilizara una estrategia de control con la que mantener la densidad aparente en seco constante, de nuevo para un tamaño nominal de 700 mm x 450 mm. Con fines comparativos, se ha mantenido la misma escala de tamaños que en los gráficos de la figura 4.20. Con este tipo de control el tamaño final de pieza presenta mucha menos dependencia con la humedad de conformado que en el caso de aplicar una estrategia de control basada en la densidad

aparente en húmedo. Especialmente, la composición STD mantiene el tamaño final en un rango de variación más estrecho que la EPP+, pero en los dos casos existe una disminución del tamaño final a medida que se incrementa la humedad del polvo. La composición STD muestra una reducción del tamaño final en promedio para la tres densidades consideradas de 0,2 mm/(%, b.s)), mientras que la EPP+ experimenta un cambio dimensional de hasta 0,5 mm/(% b.s.).

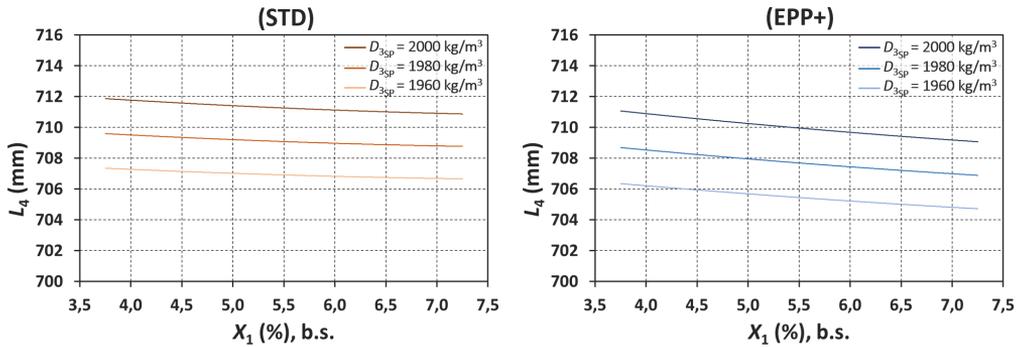


Figura 4.24. Simulación de la variación con la humedad del tamaño final, para una estrategia basada en la densidad aparente en seco y un tamaño nominal de 700 mm x 450 mm.

La explicación de este comportamiento reside en el hecho de que el tamaño de las piezas a la entrada del horno no se mantiene constante, y a pesar de que la contracción lineal si lo haga, al no variar la densidad aparente en seco, tiene lugar un cambio dimensional no controlado en el producto final, debido a la modificación de la expansión post-prensado. De forma similar a como sucede al adoptar una estrategia de control con la densidad aparente en húmedo, al disminuir la presión para compensar el aumento de la humedad, la expansión de los soportes tras el prensado se reduce, sobretodo en la composición EPP+. Como resultado de esto disminuye el tamaño de la pieza en crudo y dicha disminución de tamaño se traslada directamente al tamaño final del producto.

Los resultados de las simulaciones ponen de manifiesto la validez de un sistema de control basado en la densidad aparente en seco para mejorar la estabilidad dimensional del producto terminado en composiciones de gres porcelánico. Sin embargo, también reflejan la dificultad que puede suponer el trabajar con composiciones de soporte con expansiones post-prensado del orden del 1 % o superiores. En estos casos, una estrategia de control de este estilo podría también presentar limitaciones, puesto que parte de la variabilidad dimensional del producto seguiría siendo generada por los cambios de la expansión post-prensado de los soportes.

Para tamaños de pieza grandes y teniendo en consideración la propia variabilidad del proceso de fabricación, con las actuales tolerancias de calibre exigidas por el mercado, la mejora en cuanto a reducción del número de calibres podría no ser suficiente. En efecto, para el comportamiento de la composición EPP+ aquí simulada, un cambio de humedad del 1 % implicaría un cambio de tamaño de la mitad de la tolerancia de un

calibre de 1 mm. Si a esto se le une la propia variabilidad del proceso por gradientes térmicos y diferencias de densidad entre alveolos del molde fácilmente pueden presentarse tres calibres en la clasificación final, uno mayoritario y dos residuales, pese a tener bajo control la densidad aparente en seco del producto.

4.2.3 Simulación de una estrategia de control basada en el tamaño final de pieza

La última de las estrategias simuladas se basa en un control del tamaño final de pieza mediante la corrección de la presión de prensado frente a las perturbaciones de humedad. A diferencia de las dos estrategias anteriores, esta no pretende mantener constante la compacidad del producto a la salida de la prensa, sino que requiere establecer un tamaño final de consigna para, mediante las ecuaciones del modelo constitutivo, imponer en la prensa en cada momento la presión de prensado que lo proporcionará.

Así, el cálculo de la acción de control implica la determinación, a través del método numérico de Newton-Raphson, de la presión que satisfaga la ecuación 4.23, la cual se deriva de la ecuación 1.20, previa introducción de L_{4SP} como tamaño de consigna deseado.

$$f(P_1) = (100 - S_2)(100 - S_3)(100 - S_4) - \frac{L_{4SP}}{L_0} 10^6 = 0 \quad (4.23)$$

Para resolver la expresión 4.23 es interesante simplificar las ecuaciones del modelo constitutivo de manera que, como se aprecia a continuación, todas dependan directamente de la presión de prensado, a excepción de la contracción de secado que se considera constante.

$$S_2 = EP_1 + F \quad (4.24)$$

$$S_4 = MD_3 + N \quad (4.25)$$

$$D_3 = A \ln(P_1 + \delta_{P_1}) + B \quad (4.26)$$

Esto implica reorganizar los coeficientes de ajuste de las ecuaciones de comportamiento para que dependan exclusivamente de la humedad de conformado o de la temperatura de cocción y puedan ser calculados mediante las siguientes expresiones:

$$E = eX_1 + g \quad (4.27)$$

$$F = fX_1 + h \quad (4.28)$$

$$M = m(T_4 + \delta_{T_4})^2 + p(T_4 + \delta_{T_4}) + r \quad (4.29)$$

$$N = n(T_4 + \delta_{T_4})^2 + q(T_4 + \delta_{T_4}) + s \quad (4.30)$$

$$A = aX_1 + b \quad (4.31)$$

$$B = (cX_1 + d) + \delta_{D_3} \quad (4.32)$$

Con estas consideraciones la ecuación 4.23 pueden reescribirse de la siguiente forma:

$$(100 - (EP_1 + F))(100 - S_3)(100 - (M(A \ln(P_1 + \delta_{P_1}) + B) + N)) - \frac{L_{ASP}}{L_0} 10^6 = 0 \quad (4.33)$$

permitiendo calcular la presión específica de prensado, para una humedad del polvo y una temperatura de cocción, que proporcione un tamaño final de pieza igual al consignado. Por simplicidad, la descripción del procedimiento de resolución de la ecuación con el método numérico de Newton-Raphson queda recogido únicamente en el apéndice A.4 de este documento.

Aunque para las otras estrategias de control evaluadas se ha mostrado la variación del tamaño final de pieza con la humedad de conformado, en esta estrategia no tiene sentido realizar dichas representaciones gráficas, puesto que se obtendrían líneas horizontales para los diferentes tamaños de consigna preestablecidos. Por el contrario, es interesante evaluar cual es la variación con la humedad de la densidad aparente en seco experimentada por los soportes, como consecuencia de la acción de control aplicada. Principalmente, para comprobar el rango típico de variación que un control de este tipo podría tener sobre la porosidad de los soportes y evidenciar posibles efectos adversos sobre las propiedades de los materiales (absorción de agua, resistencia mecánica, etc.), más allá de la mejora de su estabilidad dimensional.

En los gráficos de la figura 4.25 se muestra la variación de la densidad aparente en seco que experimentarían los soportes frente a los cambios de humedad del polvo para tres tamaños de consigna distintos y un tamaño nominal de pieza cocida de 700 mm x 450 mm. Para ambas composiciones, cuanto mayor es el tamaño de pieza deseado, mayor debe ser la densidad aparente en seco. Además, como consecuencia de la acción de control, a medida que se incrementa la humedad del polvo se produce un aumento de la densidad aparente, siendo este incremento mayor para la composición EPP+. En efecto, para compensar la mayor expansión post-prensado de esta composición mediante una reducción de la contracción de cocción, se requiere un mayor aumento de la densidad aparente que en la composición STD. Así, se observa que mientras la composición STD requeriría un cambio de la densidad aparente de los soportes de 5 kg/(m³ (% , b.s.)) para mantener constante el tamaño final, la EPP+ necesitaría una variación de la densidad aparente de solamente 2 kg/(m³ (% , b.s.)).

Sobretodo para composiciones similares a la STD, con expansiones post-prensado contenidas, la variación de densidad aparente en seco que requeriría una estrategia como la simulada, no debería suponer problemas de fabricación relacionados con

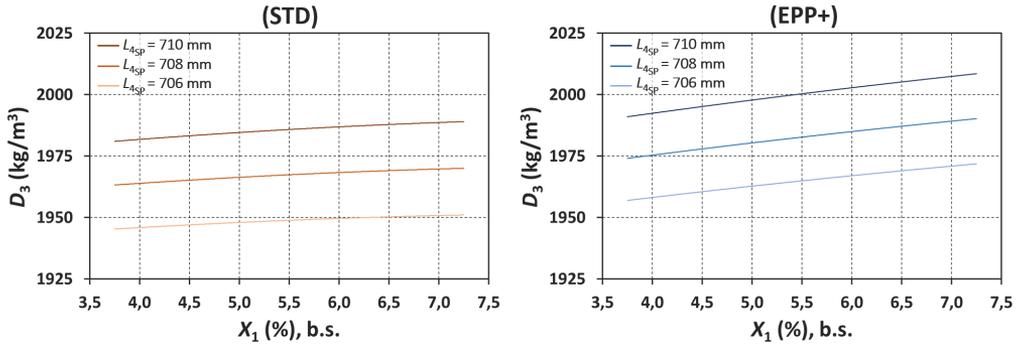


Figura 4.25. Simulación del cambio de densidad aparente en seco en una estrategia de control basada en el tamaño final de pieza y un tamaño nominal de 700 mm x 450 mm.

una falta de estabilidad de esta variable, tales como, la generación de defectos en la superficie de los esmaltes, pérdidas de resistencia mecánica o cambios en la curvatura del producto terminado. En el caso de composiciones de mayor expansión, el cambio de densidad aparente en seco es superior, pero tampoco parece que pueda inducir problemas de fabricación, al menos para unas condiciones de simulación en ausencia de variabilidad del proceso.

Para conseguir los cambios de densidad aparente en seco requeridos, la presión específica máxima se modificaría según lo representado en los gráficos de la figura 4.26. Con fines comparativos, en ambos gráficos se ha mantenido el mismo rango de variación de la presión específica máxima de prensado.

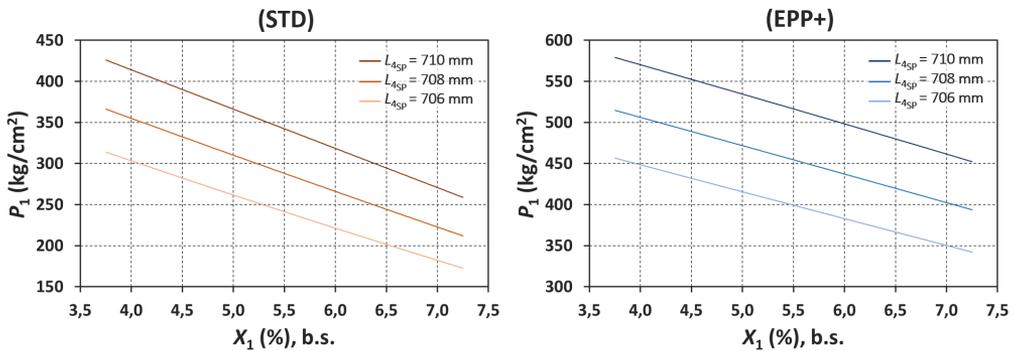


Figura 4.26. Simulación del cambio de presión requerido para compensar las variaciones de humedad para una estrategia de control basada en el tamaño final de pieza y un tamaño nominal de 700 mm x 450 mm.

Puede observarse como, además de que las presiones requeridas por cada composición son sensiblemente distintas, dadas las diferencias existentes entre los diagramas de compactación de ambas, el cambio de presión que se aplicaría durante el conformado de soportes de STD sería ligeramente superior al aplicado para piezas de EPP+, para una mismo cambio de humedad.

Las simulaciones realizadas muestran el interés de una estrategia basada en el tamaño final de pieza para mejorar la estabilidad dimensional del producto final. Si embargo, una estrategia de tales características no ha sido nunca antes evaluada a nivel industrial dada la relativamente compleja resolución de la ecuación que permite determinar la presión de prensado requerida. Como se verá más adelante, en este trabajo se comprobará, al menos mediante la simulación en unas condiciones reales de operación, el comportamiento de una estrategia de este tipo para la mejora de la estabilidad dimensional en productos de gres porcelánico.

4.2.4 Selección de la estrategia de control industrialmente implantada

Las simulaciones efectuadas en ausencia de variabilidad permitieron realizar una primera aproximación a las capacidades de las tres estrategias de control planteadas. Seguidamente, se llevará a cabo una comparativa detallada entre ellas y se simulará el comportamiento en condiciones reales de operación de las consideradas más apropiadas, todo ello con la finalidad de justificar la estrategia finalmente seleccionada para su implementación y evaluación en el entorno industrial.

4.2.4.1 Comparativa entre estrategias de control

Con fines comparativos, en el gráfico de la figura 4.27 se muestra la variación dimensional, que experimentarían unos soportes de tamaño nominal 700 mm x 450 mm de la composición EPP+, en función de la humedad de conformado para las tres estrategias de control planteadas. Además, se incluye la situación en la que la presión máxima de prensado se mantendría constante, sin realizar una modificación concreta de los parámetros de conformado en aras de una mejora de la estabilidad dimensional del producto. Los valores de la variable de consigna en cada estrategia han sido adaptados para tener, en todos los casos, un valor del tamaño final de pieza de 708 mm para una humedad de 5,5 % b.s.

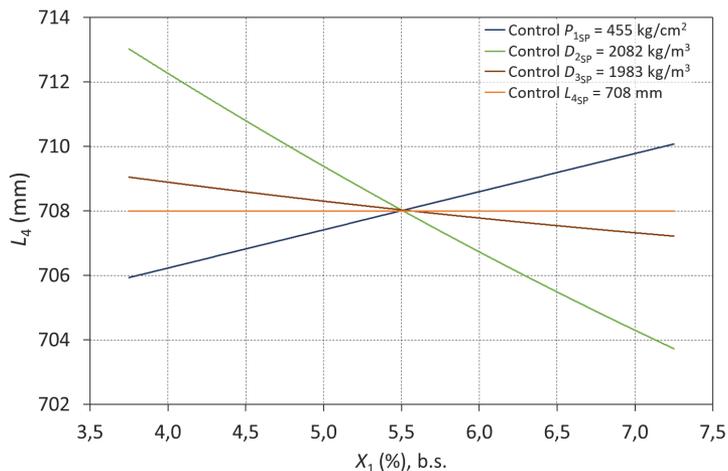


Figura 4.27. Comparativa de la variación dimensional con diferentes estrategias de control para soportes de composición EPP+ de un tamaño nominal de 700 mm x 450 mm.

En la tabla 4.11 se resumen las diferentes variables que intervienen en las estrategias planteadas y el supuesto número de calibres que se obtendría en un lote de producción que presentara una variación máxima de humedad del 1 % durante su conformado, para una tolerancia en el calibre de 1 mm. Se incluye también el valor absoluto del parámetro $\Delta L_4/\Delta X_1$, correspondiente a la pendiente promedio de las curvas representadas en la figura 4.27.

Tabla 4.11. Variables de operación y cambios dimensionales experimentados por los soportes en el proceso productivo para las estrategias de control estudiadas (composición EPP+).

Estrategia de control	P_1 (kg/cm ²)	D_2 (kg/m ³)	D_3 (kg/m ³)	$ \Delta L_4/\Delta X_1 $ (mm/(%, b.s.))	Número de calibres
Control a presión constante	455	Variable	Variable	1,2	2
Control densidad en húmedo	Variable	2082	Variable	2,7	3
Control densidad en seco	Variable	Variable	1983	0,5	1
Control tamaño final	Variable	Variable	Variable	0,0	1

Como se deduce de los resultados reflejados en la figura 4.27 y la tabla 4.11, la estrategia de control basada en mantener constante la densidad aparente en húmedo es la que origina una mayor variación del tamaño final de las piezas. Estos resultados descartan por completo el uso de esta estrategia para controlar la estabilidad dimensional en la fabricación de cualquier tipo de producto cerámico. Su efectividad, desde el punto de vista de la estabilidad dimensional del producto final, es incluso menor que la de mantener constante la presión máxima de prensado. Es decir, en condiciones industriales, es preferible trabajar a una presión constante, independientemente de las variaciones de humedad, que tratar de mantener constante la densidad aparente en húmedo de los soportes. En efecto, para la composición estudiada, ante una variación de la humedad del 1 %, un control basado en la densidad aparente en húmedo proporcionaría una variación de tamaño de 2,7 mm, mientras que, trabajar a una presión de prensado fija, sólo generaría una variación de tamaño de 1,2 mm, prácticamente la mitad.

En cualquiera de los casos, estas dos estrategias son mucho menos efectivas que un control basado en mantener constante la densidad aparente en seco de los soportes, pues trabajando de este modo, tan sólo se produce un cambio dimensional de 0,5 mm, para una variación del 1 % en la humedad. La situación ideal sería la que proporcionaría, teóricamente, un tamaño único al final del proceso, gracias a la compensación del cambio dimensional experimentado por los soportes crudos por efecto de las variaciones de expansión post-prensado. Además, los datos recogidos en la tabla 4.11 constatan que un lote producido con una variación del 1 % en la humedad del polvo atomizado y controlado en base a la medida de la densidad aparente en húmedo presentaría un mínimo de 3 calibres, mientras que el mismo lote producido trabajando a presión constante presentaría solamente 2 calibres. Si a su vez, el control se hubiera basado en la medida de la densidad aparente en seco o la regulación de la presión para la compensación de los cambios de expansión, el lote habría presentado un único calibre en su clasificación final.

En composiciones similares a la STD, de menor expansión post-prensado y fundencia que la EPP+, el comportamiento sería parecido, tal y como se ha comprobado en apartados anteriores. De acuerdo a los resultados obtenidos, las dos únicas estrategias que se consideró oportuno plantear para su posible implementación industrial fueron la basada en el control de la densidad aparente en seco y la consistente en fijar un tamaño final de pieza constante.

4.2.4.2 Simulación de estrategias de control incorporando la variabilidad de proceso

Con vistas a elegir la estrategia de control a implementar en la instalación industrial se decidió evaluar la incidencia de la variabilidad del proceso sobre las dos estrategias consideradas a raíz de los resultados de las simulaciones previas. Para ello, del histórico de datos recopilados durante una semana en la instalación industrial, se seleccionó un lote productivo de aproximadamente 2300 m² de piezas de tamaño nominal cedido 450 mm x 450 mm, el cual presentaba una variación de humedad especialmente acusada, concretamente de 2,1 %. A partir de los datos de humedad registrados a lo largo de las prácticamente 12 horas durante las cuales estuvo fabricándose el lote (ver figura 4.28), se simuló la evolución del tamaño final de pieza que se obtendría gracias a la aplicación de cada una de las estrategias de control. Estos resultados, además, se compararon con los que proporcionaría una evolución natural del tamaño final como consecuencia de los cambios de humedad, para una presión máxima de prensado constante.

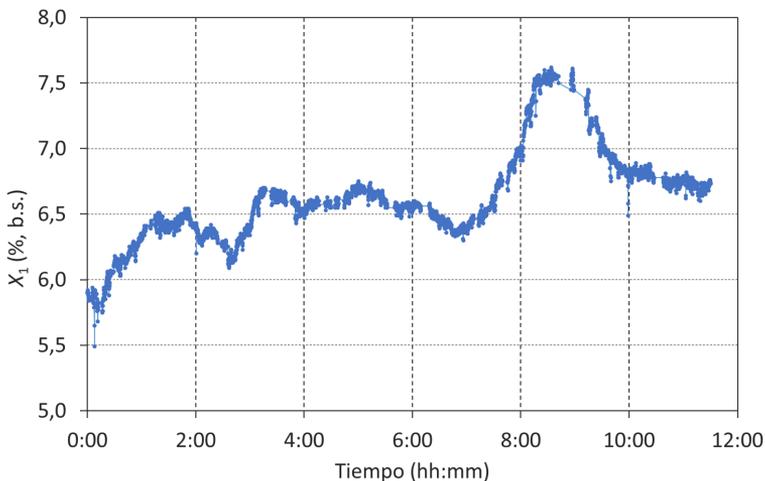


Figura 4.28. Evolución de la humedad de un lote de soportes de tamaño nominal 450 mm x 450 mm empleada en la simulación del proceso.

En las representaciones gráficas que se mostrarán a continuación, los límites de control establecidos en la densidad aparente en seco han sido determinados mediante la expresión 1.13 únicamente para la composición STD ($\pm 8 \text{ kg/m}^3$). En la EPP+, puesto que la expansión post-prensado es muy significativa, esta ecuación no es completamente válida y los límites de control ($\pm 10 \text{ kg/m}^3$) se han establecido en base a los resultados de las simulaciones.

4.2.4.2.1 Evolución de las variables operando a una presión máxima constante

En primera instancia se ha ejecutado el modelo de simulación para una presión máxima de prensado constante, obteniéndose la evolución de las densidades aparentes en seco mostrada en las figuras 4.29 y 4.30.

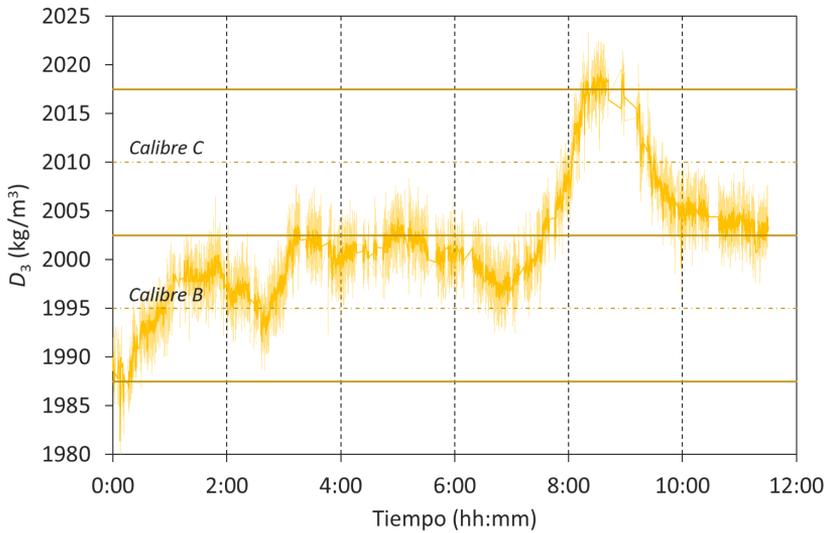


Figura 4.29. Evolución de la densidad aparente en seco simulada para un lote de piezas de tamaño nominal 450 mm x 450 mm de la composición STD prensadas a presión máxima constante.

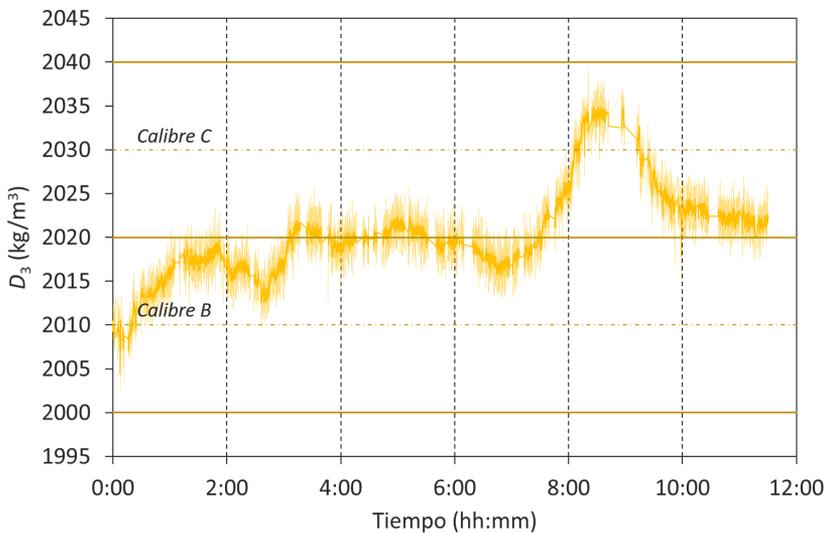


Figura 4.30. Evolución de la densidad aparente en seco simulada para un lote de piezas de tamaño nominal 450 mm x 450 mm de la composición EPP+ prensadas a presión máxima constante.

A su vez, las simulaciones proporcionaron las predicciones de evolución de los tamaños finales de pieza, con respecto al tiempo de conformado, recogidas en los gráficos de las figuras 4.31 y 4.32.

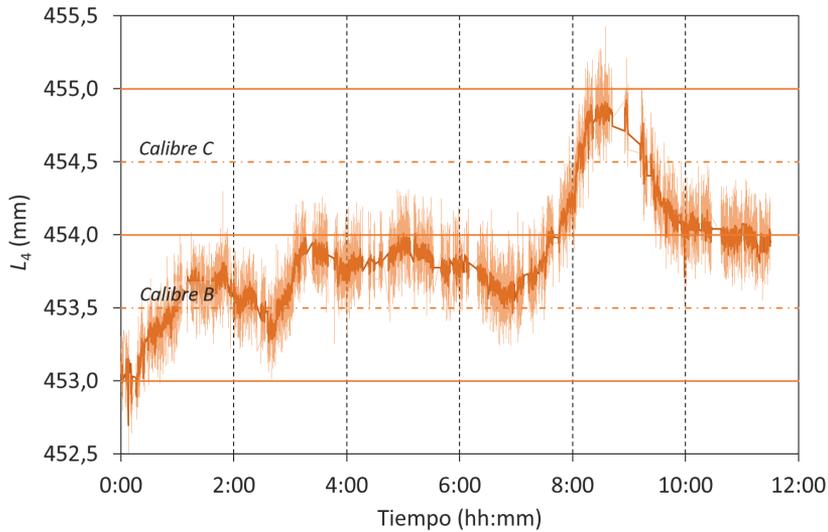


Figura 4.31. Evolución del tamaño final de pieza simulado para un lote de piezas de tamaño nominal 450 mm x 450 mm de la composición STD prensadas a presión máxima constante.

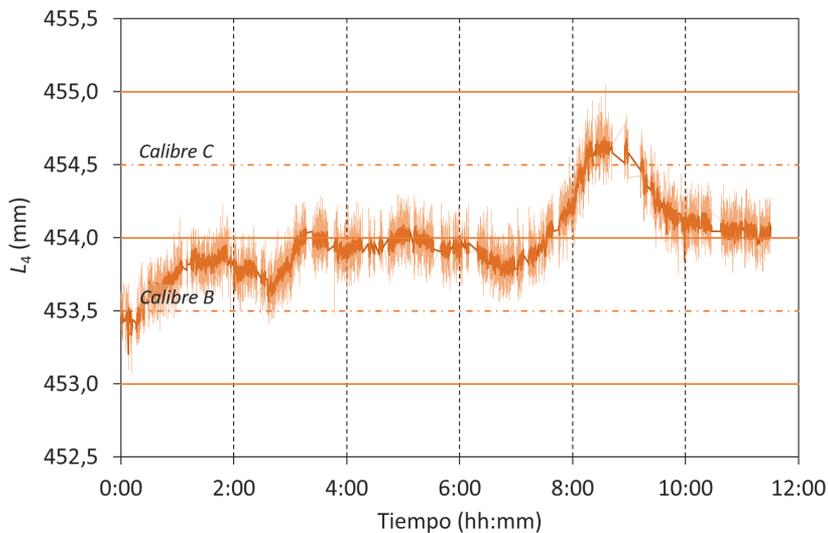


Figura 4.32. Evolución del tamaño final de pieza simulado para un lote de piezas de tamaño nominal 450 mm x 450 mm de la composición EPP+ prensadas a presión máxima constante.

Las presiones de conformado empleadas en las simulaciones han sido seleccionadas para obtener un tamaño medio de pieza final similar en ambas composiciones,

para las temperaturas de cocción industriales consideradas. Concretamente, de 330 kg/cm² (32,2 MPa), a una temperatura máxima de cocción de 1187°C, para la composición STD, y de 530 kg/cm² (52 MPa), con una temperatura de cocción de 1195°C, para la EPP+. Además, por tratarse de un molde con tres cavidades, la variabilidad asociada a las diferencias de carga entre alveolos ha sido de $\Delta P_1^* \approx \pm 0,8$ MPa, la misma que la empleada en el apartado 4.1.3.1, mientras que la variabilidad térmica del horno se ha fijado en $\pm 3^\circ\text{C}$, por ser la determinada en las pruebas de validación del modelo.

Si bien la composición STD muestra a lo largo del lote una variación máxima de densidad aparente en seco de 44 Kg/m³, esta se reduce a 37 Kg/m³ en la EPP+. Además, respecto de la variabilidad de la densidad aparente en seco, trabajando con la composición STD se obtiene una dispersión, caracterizada por una desviación estándar de 1,9 Kg/m³, que daría como resultado una variabilidad de densidad de ± 5 Kg/m³, para un intervalo de confianza del 99%. Con la composición EPP+ esta desviación disminuye ligeramente a 1,5 Kg/m³ y la variabilidad se estrecha a valores de ± 4 Kg/m³.

Las diferencias de comportamiento observadas guardan relación con las diferencias entre los diagramas de compactación de ambas composiciones. Por una parte, a bajas presiones el diagrama de la composición STD muestra un poco más de dependencia con la humedad del polvo, que el de la EPP+ a altas presiones, y por otra parte, la pendiente de las curvas de compactación es mayor en la composición STD. Todo ello contribuye a incrementar la variabilidad de la densidad aparente en seco de esta última composición.

Comparando los gráficos de evolución del tamaño final, así como las distribuciones de tamaños reflejadas en la figura 4.33, se evidencia que la composición EPP+ tiene una variabilidad dimensional más contenida que la STD, hasta el punto que proporcionaría piezas prácticamente en solo 2 calibres, a excepción de algunas piezas prensadas a las 8:30 h de haberse iniciado la producción del lote, las cuales se situarían en el calibre D. En el caso de la simulación para la composición STD el número de calibres aumenta claramente a 4, con una variabilidad dimensional máxima de 2,8 mm, frente al 1,9 mm de la EPP+. De hecho, como puede observarse en los gráficos de evolución de densidad aparente en seco, estas diferencias de comportamiento permiten tener unos límites de control en la densidad aparente más amplios, al simular la fabricación con EPP+, en la cual se sitúan en ± 10 kg/m³, con respecto a los ± 8 kg/m³ de la STD.

Para una situación como la simulada, en la que la presión de prensado se ha mantenido constante, la causa de la menor variabilidad dimensional de EPP+, como ya se apuntó anteriormente, es en parte la compensación que ejerce el cambio de la expansión del soporte tras el prensado sobre el cambio dimensional de cocción. Como queda reflejado en el gráfico de la figura 4.34, en el que se representan la evolución estimada del tamaño en crudo de las piezas y de la contracción que experimentarían durante la cocción, la variabilidad del tamaño en crudo de los soportes de EPP+ es mayor que la de los de STD. Mientras que los soportes de EPP+ tienen un cambio dimensional de 0,6 mm, a lo largo de todo el periodo simulado, los de STD sólo muestran una variación de 0,2 mm. Además, se aprecia como aquellos soportes que

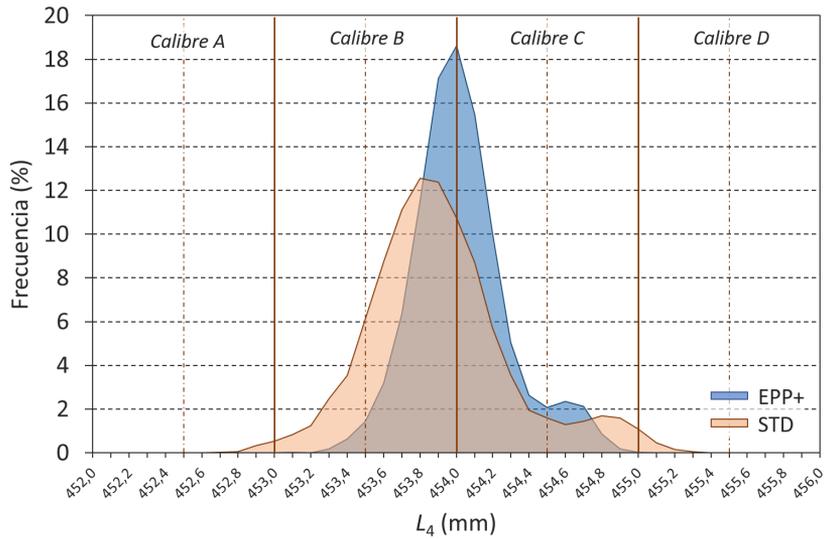


Figura 4.33. Distribución del tamaño final de la pieza predicho para ambas composiciones para un lote de piezas de tamaño nominal 450 mm x 450 mm prensado a una presión máxima constante.

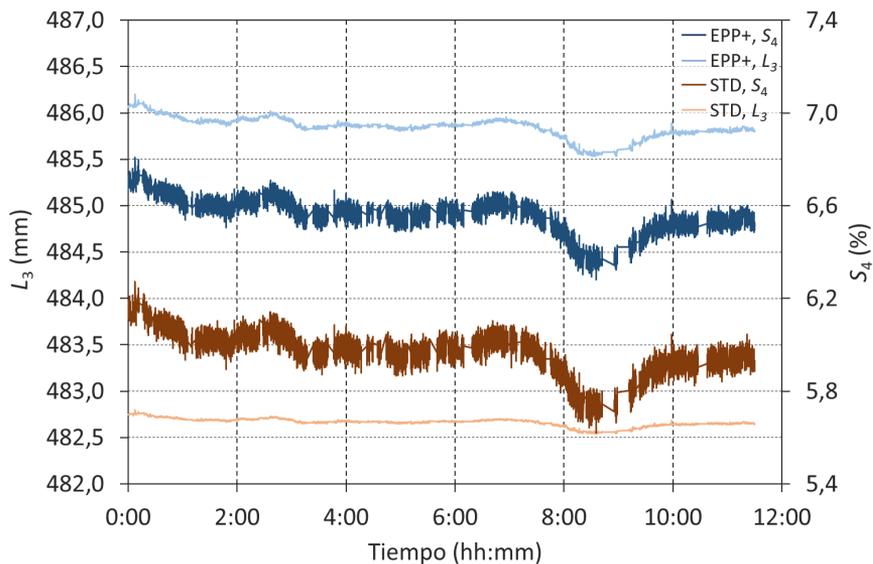


Figura 4.34. Evolución estimada del tamaño en crudo y de la posterior contracción de cocción de los soportes a lo largo de la fabricación de un lote de piezas de tamaño nominal 450 mm x 450 mm.

tienen un menor tamaño en crudo, asociado a una menor expansión tras el prensado, son también los que posteriormente menos contraen, lo cual se traduce en una disminución en el cambio dimensional global experimentado durante el proceso.

4.2.4.2.2 Evolución de las variables con un control de la densidad aparente en seco

En los gráficos de las figuras 4.35 y 4.36 se muestra la evolución de la densidad aparente en seco estimada al simular la fabricación del mismo lote de piezas pero empleando una estrategia de control basada en la densidad aparente en seco.

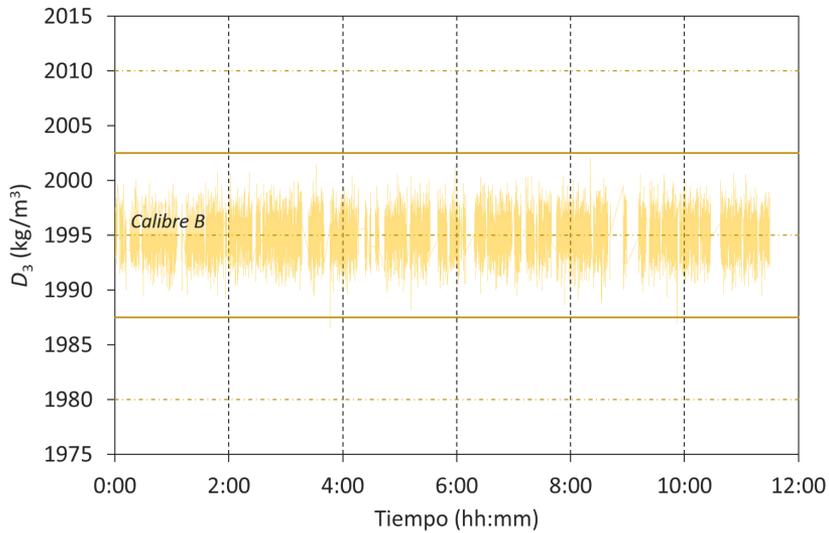


Figura 4.35. Evolución de la densidad aparente en seco simulada para un lote de piezas de tamaño nominal 450 mm x 450 mm de la composición STD controlado según una estrategia de control basada en la densidad aparente en seco.

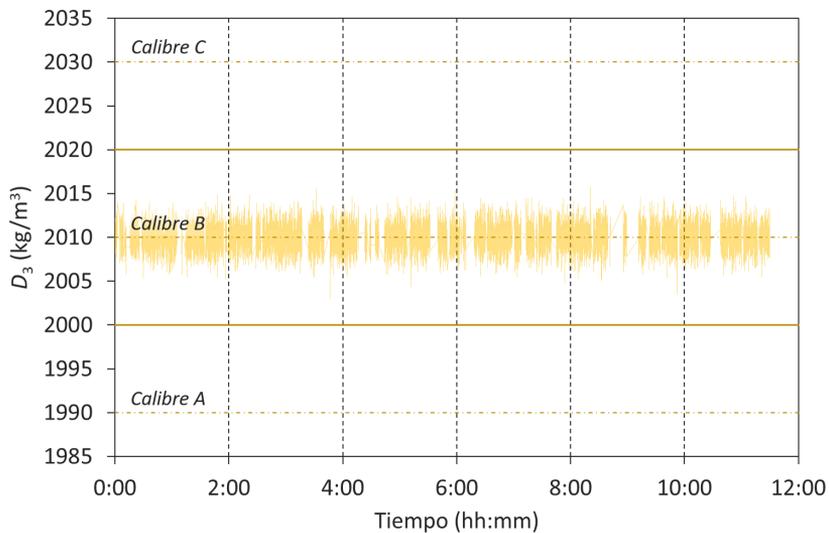


Figura 4.36. Evolución de la densidad aparente en seco simulada para un lote de piezas de tamaño nominal 450 mm x 450 mm de la composición EPP+ controlado según una estrategia de control basada en la densidad aparente en seco.

Por su parte en las figuras 4.37 y 4.38 se muestran las predicciones del tamaño final, en función del tiempo de conformado, para las dos simulaciones realizadas.

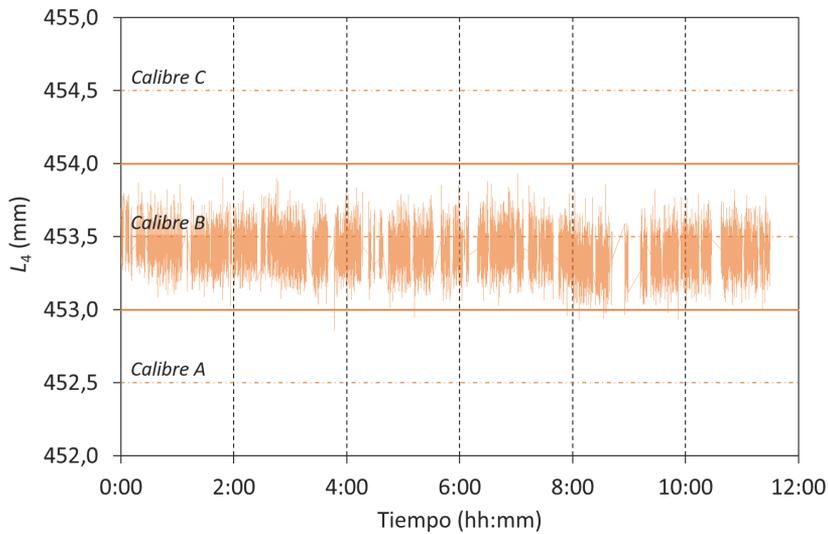


Figura 4.37. Evolución del tamaño final de pieza simulado para un lote de piezas de tamaño nominal 450 mm x 450 mm de la composición STD según una estrategia de control basada en la densidad aparente en seco.

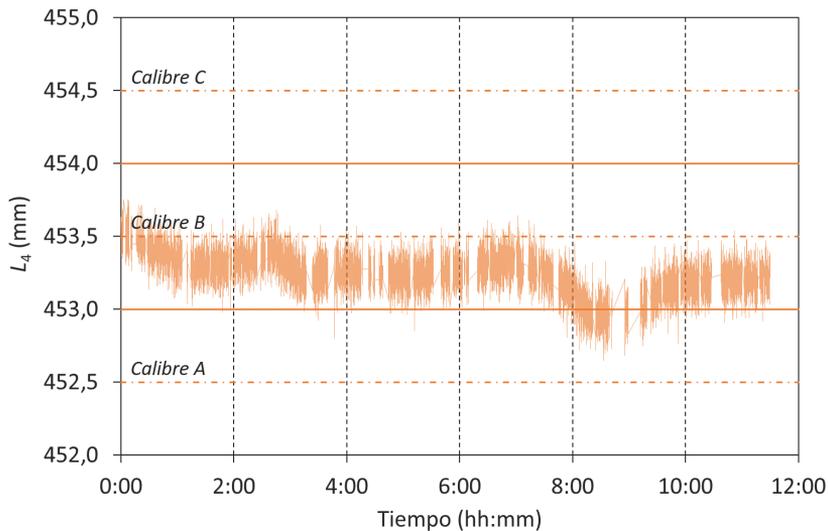


Figura 4.38. Evolución del tamaño final de pieza simulado para un lote de piezas de tamaño nominal 450 mm x 450 mm de la composición EPP+ según una estrategia de control basada en la densidad aparente en seco.

Las simulaciones se han realizado considerando unos valores de consigna de 1995 kg/m³, para la composición de soporte EPP+, y de 2010 kg/m³, para la EPP+. Estos

valores fueron fijados para intentar alcanzar un tamaño final de pieza centrado en un calibre B de dimensión central 453,5 mm. Además, con el fin de facilitar la visualización, en estos gráficos, no se ha representado en un color más intenso el valor promedio de la variable, tal y como se había hecho en anteriores gráficas.

Los resultados obtenidos son completamente diferentes a los de las simulaciones efectuadas a presión de prensado constante. Como puede observarse en los gráficos de evolución de la densidad aparente en seco, fruto de la acción de control, esta se mantiene en torno al valor de consigna preestablecido, con la dispersión propia de la variabilidad del proceso establecida.

En el caso de la composición STD el tamaño final de pieza predicho se mantiene dentro de los límites de variación del calibre B, prácticamente durante todo el tiempo. No ocurre lo mismo con la composición EPP+, para la cual se observa que, como consecuencia del aumento brusco de humedad producido al cabo de 8 h de iniciarse la fabricación, el tamaño de las piezas también disminuye de manera acusada, fabricándose momentáneamente piezas de calibre A. Lo que sucede es que, para compensar el incremento de humedad, el algoritmo de control propone una disminución de la presión máxima de prensado, dando como resultado una densidad aparente que se mantiene alrededor del valor consignado, pero también, una disminución de la expansión post-prensado, que reduce el tamaño final de pieza. Si se observa en detalle la figura 4.37 puede comprobarse como la composición STD también presenta una fluctuación del tamaño final para las piezas conformadas en ese mismo momento, sin embargo, esta es mucho menos acusada, hasta el punto de generar muy pocas piezas de calibre A.

Independientemente de que para los soportes de composición EPP+ la simulación prediga un mayor número de piezas en un segundo calibre minoritario (calibre A), es interesante remarcar que, en ambos casos, la variabilidad dimensional es muy similar. La composición STD, muestra una desviación estándar de 0,14 mm respecto a un tamaño medio de pieza de 453,4 mm, mientras que la EPP+, para una media de 453,2 mm, presenta una desviación estándar de 0,15 mm. Si se considera un intervalo de confianza del 99 % esto se traduciría en una variación del tamaño final de pieza de $\pm 0,4$ mm para ambas composiciones, valor que estaría dentro de la tolerancia de calibre establecida en 1 mm. En los dos casos acaba obteniéndose una misma variabilidad dimensional porque si bien la composición EPP+ muestra un mayor cambio de tamaño asociado a la variación de la expansión post-prensado, la composición STD tiene una dispersión más grande de la densidad respecto al valor medio. La simulación con soportes de EPP+ revela una dispersión de $\pm 4,0$ kg/m³ y la de los de STD de $\pm 4,8$ kg/m³, ambas para un intervalo de confianza del 99 %. Evidentemente, la situación ideal sería la de una composición de soporte que combinara, por un lado, una baja expansión post-prensado de poca dependencia con la humedad y, por otro lado, una baja dispersión de densidad entre alveolos.

Finalmente, en el gráfico de la figura 4.39 se representan las distribuciones del tamaño final de pieza para las dos simulaciones realizadas. Tal y como se ha comentado, la clasificación final de producto para la composición EPP+ proporciona una mayor cantidad de piezas en el calibre A, pero la variabilidad de ambas distribuciones es muy similar. Lo más destacable de estos resultados es la importancia que tiene el estable-

cimiento de una adecuada densidad aparente en seco de consigna para garantizar la fabricación de piezas con un tamaño medio centrado en el calibre deseado. De lo contrario, si la consigna no está bien establecida, debido a la dispersión propia del proceso, aunque la variación total de tamaño pudiese estar contenida en la tolerancia de calibre, con frecuencia podría darse el caso de obtener al menos dos calibres en la clasificación final, como sucede en la simulación de EPP+.

Este hecho pone de manifiesto la necesidad de establecer una adecuada retroalimentación en la estrategia de control, a través de la medida del tamaño final realmente alcanzado por el producto, para modificar, en caso necesario, la consigna de densidad aparente y mantener siempre el tamaño centrado en el valor deseado. Como se verá más adelante, esta retroalimentación podría realizarse, y de hecho es un procedimiento relativamente habitual hoy en día, en base a controles puntuales del tamaño final de pieza efectuados mediante la cocción, a lo largo de la fabricación de los lotes de baldosas, de algunos soportes recogidos a la salida de la prensa.

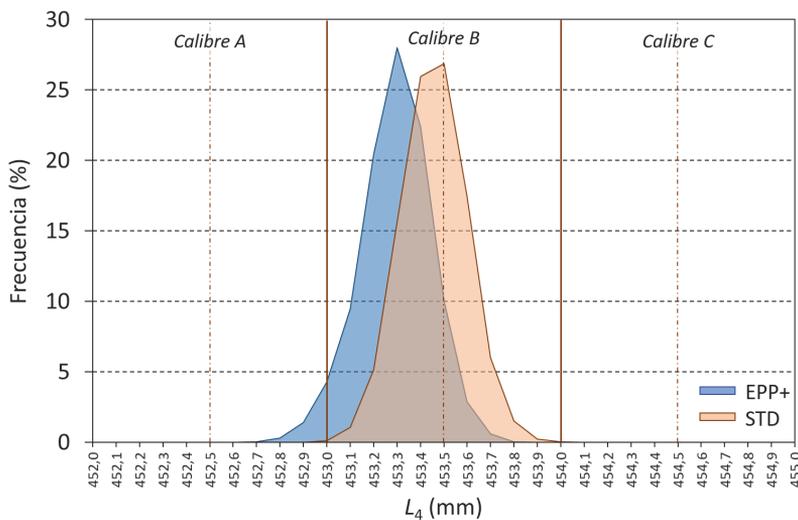


Figura 4.39. Distribución de los tamaños finales de pieza predichos para ambas composiciones en la fabricación de un lote de piezas de tamaño nominal 450 mm x 450 mm controlado en base a la densidad aparente en seco.

Es especialmente crítico disponer de una retroalimentación en el bucle de control al procesar composiciones de elevada expansión post-prensado como la EPP+, puesto que como se evidencia con los datos de la figura 4.36, los límites de variación máxima permitida de la densidad aparente en seco dejan de ser válidos para composiciones con esta peculiaridad. En el apartado 4.2.4.2.1 se ha podido comprobar que, prensando a presión máxima constante, los límites establecidos en la densidad aparente en seco pueden contemplar las variaciones de expansión post-prensado. No obstante, al introducir un control de la presión de prensado, dada la interacción existente entre esta variable y la expansión, por más que se estrechen los límites de control de la densidad aparente en seco, no puede garantizarse la estabilidad del tamaño final, sobretodo, en composiciones de soporte de elevada expansión.

4.2.4.2.3 Evolución de las variables con un control basado en el tamaño final de pieza

En los gráficos de las figuras 4.40 y 4.41 se representa como varía la densidad aparente en seco para ambas composiciones al simular la fabricación del lote objeto de estudio considerando una estrategia de control basada en la obtención de un tamaño final constante de 453,5 mm, centrado en el calibre B.

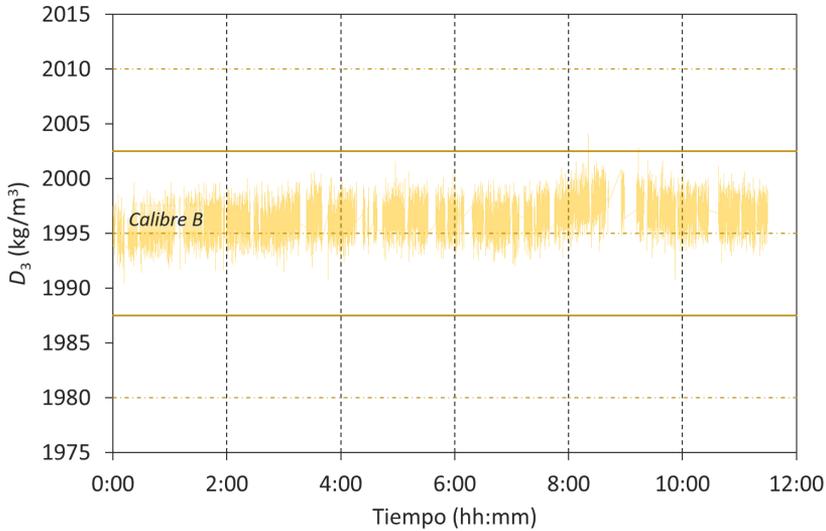


Figura 4.40. Evolución de la densidad aparente en seco simulada para un lote de piezas de tamaño nominal 450 mm x 450 mm fabricadas con la composición STD siguiendo una estrategia de control basada en el tamaño final de la pieza.

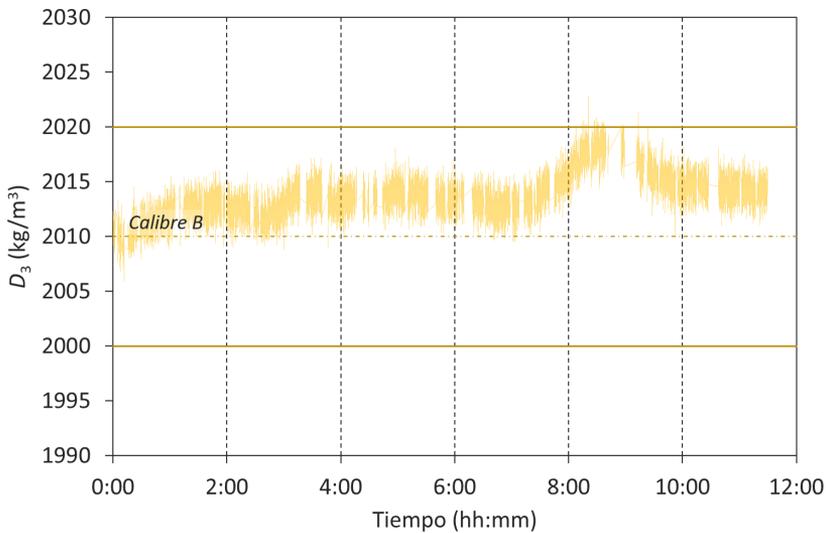


Figura 4.41. Evolución de la densidad aparente en seco simulada para un lote de piezas de tamaño nominal 450 mm x 450 mm fabricadas con la composición EPP+ siguiendo una estrategia de control basada en el tamaño final de la pieza.

En las figuras 4.42 y 4.43 se recoge la evolución estimada del tamaño final de pieza con respecto al tiempo de conformado para las dos composiciones consideradas.

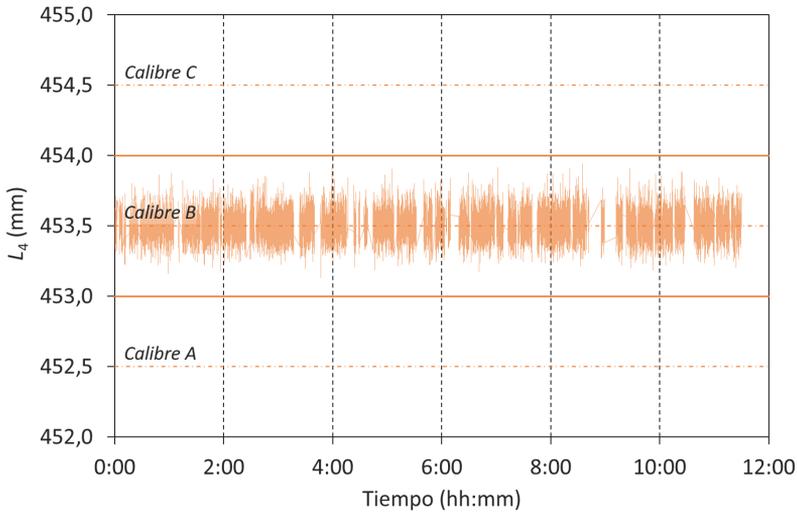


Figura 4.42. Evolución del tamaño final de pieza simulado para un lote de piezas de tamaño nominal 450 mm x 450 mm fabricadas con la composición STD siguiendo una estrategia de control basada en el tamaño final de pieza.

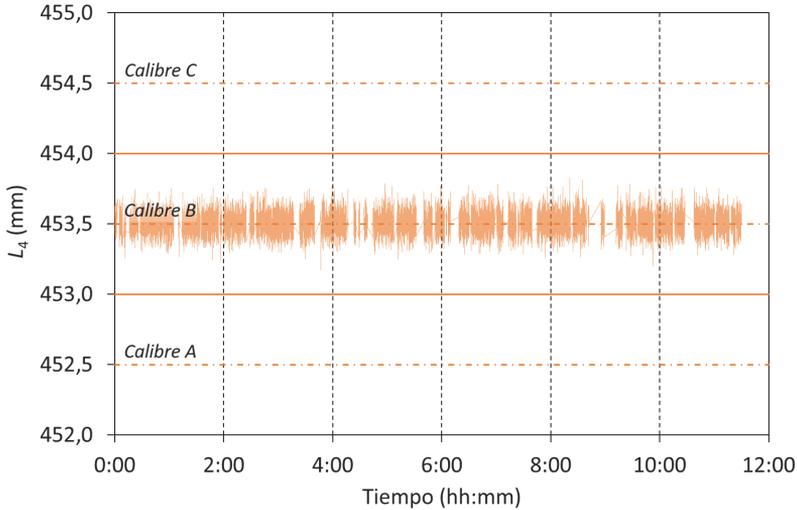


Figura 4.43. Evolución del tamaño final de pieza simulado para un lote de piezas de tamaño nominal 450 mm x 450 mm fabricadas con la composición EPP+ siguiendo una estrategia de control basada en el tamaño final de pieza.

En los dos casos el tamaño final se mantiene en torno al valor de consigna con una dispersión más baja que para todas las situaciones previamente simuladas. En particular, para la composición EPP+ la simulación arroja una desviación estándar respecto

al valor medio de 0,08 mm, que implica una variabilidad de $\pm 0,2$ mm con un intervalo de confianza del 99 %. Los resultados con la composición STD proporcionan una desviación estándar de 0,11 mm, la cual se traduce en una variación de tamaño de $\pm 0,3$ mm, para el mismo intervalo de confianza.

Como puede apreciarse en los gráficos de evolución de la densidad aparente en seco, al aplicar una estrategia de control fijando como objetivo el tamaño final de la pieza, esta no puede mantenerse en un valor constante. Tal y como se había anticipado, la densidad aparente en seco oscila entre unos márgenes de variación, los cuales superan incluso los límites de variación de densidad aparente que se fijarían en ausencia de expansión post-prensado. Por ello, en una estrategia de este tipo, los límites de control de la densidad aparente en seco dejan de tener utilidad, aunque, con fines comparativos con respecto al resto de estrategias evaluadas, se han mantenido en las representaciones realizadas. La fluctuación de la densidad aparente en seco es más marcada en la composición EPP+, en la cual, puesto que los cambios del tamaño en crudo de los soportes son más grandes que en la STD, se necesita un mayor cambio de la densidad aparente en seco para compensar el tamaño de la pieza.

Es interesante recalcar que al cabo de 8 horas de empezar la fabricación del lote se produce un ligero aumento de la densidad aparente en seco, más marcado al simular soportes de composición EPP+. En este momento, como se ha mostrado anteriormente, se producía un incremento de la humedad del polvo que hacía disminuir la expansión de los soportes y, con ello, el tamaño en crudo de las piezas. En consecuencia, para compensarlo, la acción de control incrementa la densidad aparente en seco lo suficiente como para que posteriormente, durante la cocción, el cambio dimensional asociado a la contracción del soporte sea ligeramente más bajo, dando como resultado un mismo tamaño final de pieza.

Otro aspecto destacable de los resultados de evolución simulada de la densidad aparente en seco es que, para las dos composiciones, la variabilidad de este parámetro respecto al valor medio se reduce ligeramente, comparado con la observada en una estrategia de control por densidad aparente en seco. Así, por ejemplo, en las simulaciones de la composición STD se pasa de tener una dispersión de ± 5 kg/m³, cuando el control se basa en mantener constante la densidad aparente en seco, a ± 4 kg/m³, al actuar según una estrategia de tamaño final, en todos los casos para un intervalo de confianza del 99 %. Estas diferencias son debidas a los cambios de presión máxima de prensado menos acusados, requeridos por esta segunda estrategia, lo cual ejerce un efecto ligeramente amortiguador sobre la dispersión de densidades, al reducir la propia variabilidad de presión de la prensa.

Concretamente, en el gráfico de la figura 4.44 se comparan, para los soportes de la composición EPP+, los cambios de presión específica experimentados en la simulación de las dos estrategias de control. Como puede verse, para conseguir el efecto deseado en el comportamiento del material, las modificaciones de la presión específica de prensado efectuadas por la acción de control han de ser más suaves que las que se efectúan cuando se aplica una acción de control basada en la densidad aparente en seco. Controlando en base a la densidad aparente en seco la presión fluctúa un

total de 100 kg/cm^2 ($9,8 \text{ MPa}$), mientras que considerando una estrategia basada en el tamaño final de pieza, dicha variación se reduce a 72 kg/cm^2 ($7,1 \text{ MPa}$).

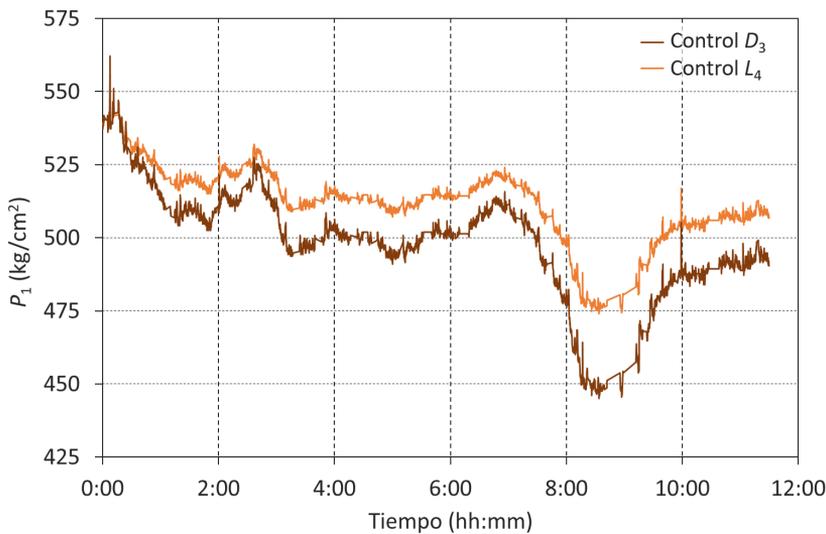


Figura 4.44. Evolución de la presión específica de prensado para un lote de piezas de tamaño nominal $450 \text{ mm} \times 450 \text{ mm}$ de la composición EPP+ considerando una estrategia de control basada en el tamaño final de la pieza y otra basada en la densidad aparente en seco.

Finalmente, en la figura 4.45 se representan las distribuciones de frecuencias de los tamaños finales de pieza resultantes de las simulaciones realizadas para ambas composiciones. Comparadas con las distribuciones de tamaño resultantes de las anteriores simulaciones, en este caso, ambas se encuentran centradas en el tamaño final de pieza deseado y muestran, como ya se ha expuesto, una menor variabilidad.

Los resultados de las simulaciones de una estrategia basada en el control del tamaño final de la pieza demuestran el interés de este procedimiento de control para mejorar la estabilidad dimensional del producto. A pesar de que la acción de control implica una variación de la densidad aparente en seco, esta no es lo suficientemente grande como para generar problemas en la fabricación relacionados con la misma. Al igual que se ha apuntado para la estrategia de control basada en la densidad aparente en seco, una estrategia basada en el tamaño en cocido también requeriría de una retroalimentación desde final de proceso para verificar la correcta actuación de un bucle de control anticipativo. Teniendo en cuenta que en la estrategia basada en la densidad aparente en seco las medidas de densidad aparente de los soportes recién prensados darían una idea del correcto funcionamiento del bucle de control, con esta última estrategia, únicamente la medida del tamaño final es la que podría confirmar la adecuación de la acción de control. Dada la variabilidad propia de la densidad aparente en seco de un control basado en el tamaño final, los controles de densidad aparente realizados en la sección de conformado solamente servirían para verificar el correcto acuerdo entre el valor de densidad aparente buscado en cada momento y el realmente conferido a los soportes.

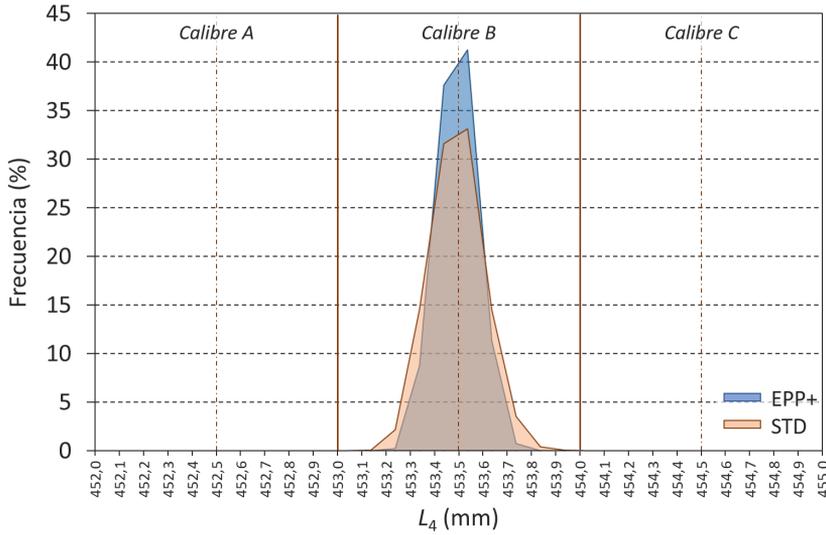


Figura 4.45. Distribución de los tamaños finales de las piezas predichos para ambas composiciones en la fabricación de un lote de piezas de tamaño nominal 450 mm x 450 mm controlado en base al tamaño final de pieza.

4.2.4.2.4 *Influencia del tamaño de la pieza y selección de la estrategia para automatizar el control*

Con la finalidad de decidir la estrategia que finalmente se implementaría industrialmente en la automatización del control del prensado, simulaciones similares a las presentadas en los anteriores apartados se plantearon para el resto de tamaños de pieza producidos en la instalación en la cual se desarrollaba la investigación. En la tabla 4.12 se resumen los resultados de dichas simulaciones para las dos composiciones consideradas.

Tabla 4.12. Resultados de las simulaciones realizadas con las dos composiciones para diferentes tamaños de la pieza y estrategias de control.

Tamaño nominal (mm x mm)	Variabilidad presión		$\Delta L_4 / \Delta X_1$ (mm/(% b.s.))					
	s_{P_1} (MPa)	ΔP_1^* (MPa)	STD			EPP+		
			Control P_1	Control D_3	Control L_4	Control P_1	Control D_3	Control L_4
1200 x 600	0,10	$\pm 0,2$	3,2	0,7	0,5	2,1	1,0	0,3
675 x 450	0,25	$\pm 0,5$	2,0	0,6	0,4	1,3	0,7	0,3
600 x 600	0,25	$\pm 0,5$	1,8	0,5	0,4	1,2	0,6	0,3
450 x 450	0,40	$\pm 0,8$	1,3	0,5	0,4	0,9	0,5	0,3
330 x 330	0,45	$\pm 0,9$	1,0	0,4	0,4	0,6	0,4	0,3

Todas ellas fueron efectuadas para una misma variabilidad térmica de cocción de $\pm 3^\circ\text{C}$. Dependiendo del número de cavidades del molde en el que se conformaban

los soportes (ver tabla 3.2), la variabilidad de la presión de prensado se modificó para tener en consideración las diferencias de carga de polvo entre alveolos. Los valores de la dispersión de la presión considerados fueron obtenidos en base a los controles de densidad aparente realizados en planta y quedan reflejados en la propia tabla 4.12 como una desviación típica (s_{p_1}) y el correspondiente intervalo de variación (ΔP_1^*). Con la finalidad de contrastar el comportamiento del proceso en las diferentes situaciones, para cada tamaño de pieza fabricada, se presentan los valores del cociente $\Delta L_4/\Delta X_1$ alcanzados al trabajar a presión constante (control P_1), con un control basado en la densidad aparente en seco (control D_3) y con un control en base al tamaño final (control L_4).

Las simulaciones del control basado en la constancia de la densidad aparente en seco fueron realizadas para una densidad de consigna de 1995 kg/m^3 , en el caso de la composición de soporte STD, y de 2010 kg/m^3 , para la EPP+. En cuanto a las simulaciones de la estrategia de control fundamentada en el tamaño final, los tamaños de consigna considerados fueron 1209 mm, 680 mm, 604,5 mm, 453,5 mm y 332,5 mm, según el orden de aparición del tamaño nominal en la tabla de resultados. En todos los casos los tamaños de consigna están referidos al lado más largo de las piezas. Hay que remarcar que estos resultados pueden variar ligeramente si se modifican las temperaturas máximas de cocción o las consignas de trabajo de cada estrategia, sin embargo, con fines comparativos y para evidenciar las capacidades de cada estrategia, tienen suficiente validez.

El análisis de los resultados permite comprobar que, para cualquier tamaño de pieza y composición, la incorporación de una estrategia de control reduce la variabilidad dimensional del producto respecto a una situación en la que se mantenga constante la presión máxima de prensado. Esta mejora es más importante en la composición STD, dado que fijando la presión de prensado, la variabilidad del tamaño final es mayor que en la composición EPP+, al no ser tan significativo el efecto de compensación sobre el tamaño final originado por la expansión de los soportes.

Prensado a presión máxima constante, con cualquiera de las composiciones, a medida que se conforman piezas de mayor tamaño, la variabilidad dimensional del proceso se incrementa pese a que las simulaciones se han realizado considerando una mejora de la homogeneidad en la distribución de presiones entre alveolos. Esto es debido a que, cuanto mayor es el tamaño de pieza, el cambio dimensional en valor absoluto asociado a las diferentes transformaciones existentes en el proceso es más significativo. Este comportamiento está completamente de acuerdo con las observaciones realizadas en la introducción en la que se mostraba como, a medida que se incrementa el tamaño de las piezas fabricadas, se hace más complicado mantener la estabilidad dimensional del producto. Esto obliga a estrechar los límites de variación máxima de las variables de control e incluso impide, para tamaños muy grandes, fabricar piezas dentro de un único calibre con las tolerancias exigidas por el mercado.

Al comparar los resultados de cada composición referidos a una operación a presión constante, los tamaños finales alcanzados por los soportes de la composición EPP+ presentan mayor homogeneidad que los de la STD, como consecuencia del fenómeno de compensación del tamaño final ejercido por la expansión post-prensado anteriormente expuesto. Además, a medida que se incrementa el tamaño de los soportes, la

estabilidad dimensional de las piezas de EPP+ es mejor. En efecto, para los soportes de 330 mm x 330 mm la mejora en la estabilidad dimensional que originaría trabajar con la composición EPP+, en lugar de la STD, sería de únicamente 0,4 mm/(% b.s.) (1,0 mm/(% b.s.) con la composición STD, frente a 0,6 mm/(% b.s.) con la EPP+), mientras que para los de 1200 mm x 600 mm la mejora llegaría a ser de 1,1 mm/(% b.s.) (3,2 mm/(% b.s.) con la composición STD, frente a 2,1 mm/(% b.s.) con la EPP+).

Para las dos composiciones, la estrategia que proporciona una mejora de la estabilidad dimensional del producto más significativa es la basada en el tamaño final de pieza. Esta estrategia demuestra ser especialmente interesante para los tamaños de pieza más grandes y en composiciones de soporte con expansiones elevadas. En efecto, para tamaños de pieza de 330 mm x 330 mm, trabajando con la composición STD no existen diferencias entre la variabilidad resultante de la aplicación de las dos estrategias de control consideradas y, con la EPP+, la diferencia es de únicamente 0,1 mm/(% b.s.). Para tamaños intermedios de 600 mm x 600 mm, la mejora en la estabilidad dimensional del producto proporcionada por la estrategia basada en el tamaño final, con respecto a un control de la densidad aparente en seco, sigue siendo baja, de 0,3 mm/(% b.s.), en el caso de la composición de mayor expansión, y de 0,1 mm/(% b.s.), para la STD. En cambio, para tamaños de pieza superiores y, especialmente, en las piezas de 1200 mm x 600 mm, la mejora es de 0,2 mm/(% b.s.), trabajando con la composición STD, y de hasta 0,7 mm/(% b.s.) con la EPP+.

Los resultados muestran que, en las condiciones simuladas, la efectividad de la estrategia basada en el tamaño final es relativamente superior al trabajar con la composición de soporte EPP+. Para todos los tamaños de pieza simulados esta estrategia conseguiría una variabilidad dimensional de 0,3 mm/(% b.s.), con la composición EPP+, mientras que la STD tendría una variabilidad de 0,4 mm/(% b.s.), la cual aumentaría a 0,5 mm/(% b.s.) al conformar piezas de 1200 mm x 600 mm. La causa de estas diferencias de comportamiento reside en la mayor variabilidad de la densidad aparente en seco existente al trabajar con la composición STD, la cual ya se ha puesto de manifiesto en apartados anteriores.

En los gráficos de las figuras 4.46 y 4.47 se compara, para ambas composiciones, la evolución del tamaño final predicho por las simulaciones de la estrategia de control basada en el tamaño final en piezas de tamaño nominal 330 mm x 330 mm (figura 4.46) y 1200 mm x 600 mm (figura 4.47). En ellos puede apreciarse que, en los tamaños más grandes, la variabilidad dimensional de los soportes STD proporcionada por esta estrategia no es debida a una fluctuación del tamaño a lo largo de la fabricación, como puede suceder en una estrategia basada en la densidad aparente en seco, sino a la propia dispersión de las medidas. De hecho, puede comprobarse que, tal y como se indica en los datos de la tabla 4.12, para el tamaño de 330 mm x 330 mm la dispersión mostrada por el tamaño final en ambas composiciones es muy similar (0,4 mm/(% b.s.) para la STD y 0,3 mm/(% b.s.) para la EPP+). Sin embargo, conformando piezas de 1200 mm x 600 mm la dispersión al trabajar con la composición STD (0,5 mm/(% b.s.)) es marcadamente superior a la de la composición EPP+ (0,3 mm/(% b.s.)), la cual es igual a la obtenida, con la misma composición, para el tamaño de 330 x 330 mm.

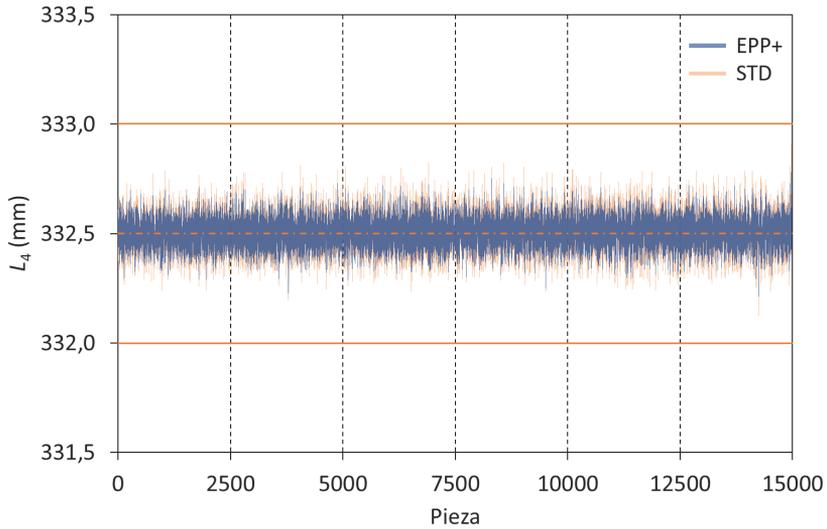


Figura 4.46. Evolución del tamaño final de pieza simulado para un lote de piezas de tamaño nominal 330 mm x 330 mm fabricadas con la composición STD siguiendo una estrategia de control basada en el tamaño final de pieza.

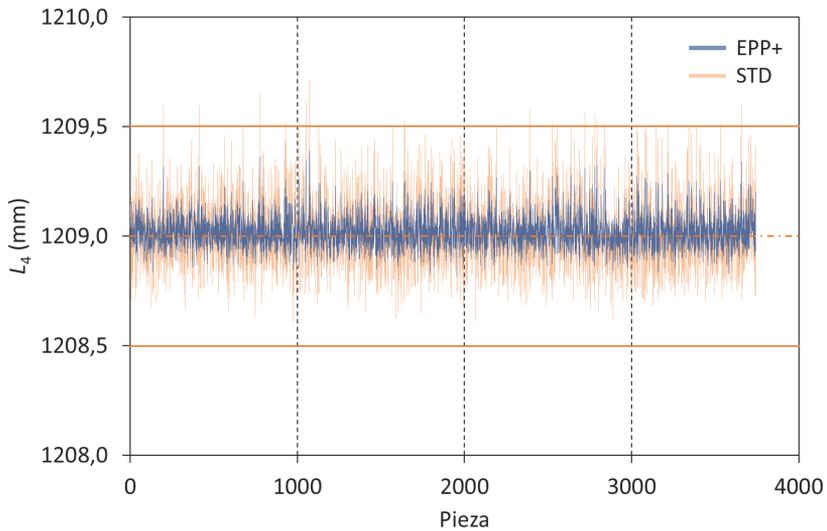


Figura 4.47. Evolución del tamaño final de pieza simulado para un lote de piezas de tamaño nominal 1200 mm x 600 mm fabricadas con la composición EPP+ siguiendo una estrategia de control basada en el tamaño final de pieza.

Aunque los resultados aquí expuestos demuestran que una estrategia de control basada en el tamaño final de pieza puede proporcionar mayor estabilidad dimensional en el producto final, para la implantación industrial se seleccionó la estrategia basada

en la constancia de la densidad aparente en seco por los motivos que a continuación se exponen:

- Un control automático basado en la constancia de la densidad aparente en seco se encontraba más próximo a la metodología de trabajo habitualmente empleada por los operarios que un control basado en el tamaño final de las piezas. En efecto, hasta la realización de este trabajo el control de la prensa industrial se realizaba de forma manual y estaba basado en la constancia de la densidad aparente en húmedo o, en el mejor de los casos, de la densidad aparente en seco de los soportes recién prensados.

De hecho, únicamente cambiando la forma de trabajo de los operarios, es decir pasar de controlar la densidad aparente en húmedo a controlar la densidad aparente en seco, aunque sea de forma manual, ya supone una mejora sustancial en los calibres del producto final.

- Dado que las dos estrategias requieren de realimentación de la variable a controlar (densidad aparente en seco o tamaño final de la pieza), esta puede realizarse de forma más inmediata en el caso del control basado en la constancia de la densidad aparente en seco. En efecto, una vez compactada la pieza es prácticamente inmediata la medida de su densidad aparente (minutos) mientras que, hasta que queda definido su tamaño, pueden transcurrir entre 1 y 2 h.
- Las mejoras más significativas del control del tamaño final de las piezas, con respecto al control de la densidad aparente en seco, se producen para tamaños de pieza grandes ($> 600 \text{ mm} \times 600 \text{ mm}$) y composiciones con elevada expansión postprensado (EPP+). Para tamaños más habituales ($< 600 \text{ mm} \times 600 \text{ mm}$), las mejoras que aporta el control del tamaño final de las piezas se reducen (ver tabla 4.12), sobre todo para la composición STD, utilizada más habitualmente para este tipo de productos.
- Hay que tener en cuenta que, en el momento de la realización de este trabajo, el control de la prensa industrial era completamente manual. Como se ha constatado en las simulaciones realizadas, tanto la estrategia de control automático basada en la constancia de la densidad aparente en seco como la basada en la constancia del tamaño final de las piezas, aportarán mejoras a la estabilidad dimensional de las piezas cocidas con respecto a la situación inicial (control manual).

4.3 Implementación y evaluación del funcionamiento de un bucle de control automático del prensado

Tras seleccionar, en base a las simulaciones realizadas con el modelo de comportamiento puesto a punto, la estrategia de control que se consideró más adecuada a las necesidades industriales, se procedió a su implementación industrial. En este apartado se muestran las características del software de control desarrollado para, por un lado, efectuar un control automático basado en la constancia de la densidad aparente

en seco de los soportes y, por otro lado, gestionar los diferentes aspectos (comunicación con equipos, recetas de trabajo, interfaz de usuario, etc.) relacionados con el mismo. Además se valida en condiciones reales de operación el funcionamiento del sistema y se evalúa el impacto del mismo sobre la estabilidad dimensional de la producción, en comparación con una situación en ausencia de control automático. Por último, se exponen una serie de acciones de transferencia de los resultados de la investigación que han permitido extender el uso de esta tecnología en varias empresas fabricantes de baldosas cerámicas.

4.3.1 Descripción de la aplicación de control desarrollada

Para llevar a cabo el control de la operación de prensado, se ha desarrollado una aplicación informática en lenguaje de programación C++ capaz de modificar automáticamente la presión máxima de prensado de la prensa, en función de las variaciones de humedad del polvo atomizado detectadas mediante la medida en continuo de la humedad de los soportes recién prensados. Esta aplicación ha sido generada con el compilador de C++ para el sistema operativo Windows Microsoft® e instalada en un PC industrial de control.

En la imagen de la figura 4.48 puede verse un detalle del sensor de humedad ubicado sobre la línea de transporte entre la prensa y el secadero y el PC de control encargado de ejecutar la aplicación y servir de interfaz gráfica para los usuarios. Valga decir que la aplicación de control, tal y como quedará descrita a continuación, es el resultado de un proceso de desarrollo iterativo, en el que fueron generándose versiones mejoradas de la aplicación a medida que se avanzaba en la investigación, hasta alcanzar la forma y funcionalidad definitiva.



Figura 4.48. Equipo de medida de la humedad y PC industrial en el que se ejecutaba la aplicación de control automático desarrollada.

4.3.1.1 Modo de funcionamiento del sistema

El bucle de control anticipativo implementado para automatizar la regulación de la operación de prensado se basa en el esquematizado en la figura 3.25. Haciendo uso del diagrama de compactación de la composición de trabajo, el software de control estima en tiempo real la densidad aparente en seco de los soportes recién prensados para compararla con una densidad aparente de consigna introducida por el usuario. En función de la diferencia entre estas densidades, la aplicación calcula, mediante la ecuación 4.22, una presión máxima de prensado, que es enviada al software que se encarga de gestionar los automatismos de la propia prensa, para mantener constante la densidad aparente de los soportes conformados. La comunicación con la prensa, tal y como se ha descrito en el apartado 3.2.1, se realiza mediante el protocolo estándar de comunicaciones Modbus TCP, a través de un puerto de comunicación, habilitado por su fabricante, en el denominado como ordenador de automatización de la prensa.

Si bien la presión empleada en todas las ecuaciones del modelo es la presión específica aplicada sobre el polvo (P_1), la presión de trabajo considerada por los automatismos de la prensa es la presión de su circuito hidráulico principal (P_c). Por este motivo, aunque los cálculos de la acción de control se realicen en base a la presión específica, el intercambio de información con la prensa debe realizarse siempre en base a la presión del circuito hidráulico. Esto obliga a utilizar la ecuación de conversión 4.34 y a conocer, tanto la superficie total de polvo compactada (A_p) para los N soportes conformados en cada ciclo de prensado, como la superficie (A_c) o el diámetro del cilindro (D_c) sobre el que ejerce la presión el aceite contenido en el circuito hidráulico de la prensa. Estos datos son obtenidos directamente del software de automatización de la prensa, en el cual debe tenerse la precaución de introducir las dimensiones reales de las cavidades del molde (L_0 y W_0) para que los cálculos de conversión entre presión específica y de circuito sean correctos. Aunque este detalle parezca tener poca relevancia, hay que saber que en muchas empresas, con relativa frecuencia, se introducen en el software de automatización de la prensa las dimensiones del tamaño nominal cocido de las piezas, pues los operarios están acostumbrados a trabajar exclusivamente en base a las presiones de circuito, sin verificar la presión específica.

$$P_1 A_p = P_c A_c \quad (4.34)$$

$$A_p = N (L_0 W_0) \quad (4.35)$$

$$A_c = \frac{\pi}{4} D_c^2 \quad (4.36)$$

El sistema tiene dos posibles modos de funcionamiento: el modo manual y el modo de control automático. Trabajando en modo manual, para cada ciclo de prensado procesado, el sistema proporciona la humedad registrada (base húmeda o base seca, dependiendo de la configuración seleccionada), la presión medida directamente de la prensa y la densidad aparente de los soportes (en base seca y, opcionalmente, en base húmeda) según la estimación realizada con el diagrama de compactación. Además de estos datos, la aplicación indica la presión calculada a la cual sería necesario prensar

para mantener la densidad aparente en seco de los soportes en el valor de consigna preestablecido, pero sin imponerla en el software de automatización de la prensa. En esta situación pueden realizarse modificaciones manuales de la presión de prensado a voluntad, sin que la aplicación interactúe con el proceso, mas que con fines de visualización y registro de datos.

Funcionando en modo de control automático, además de mostrar en tiempo real los valores de las tres variables de operación (humedad, presión y densidad aparente en seco), la aplicación envía al ordenador de automatización de la prensa los valores de presión de prensado a los que debe trabajar para mantener la densidad aparente en el valor de consigna prefijado. Con el modo de control automático activado, los operarios no pueden actuar directamente sobre la presión de prensado, debiendo pasar previamente al modo manual, si requieren la realización de actuaciones directas sobre la misma. En este modo de operación, los cambios en las condiciones de conformado solo pueden realizarse mediante modificaciones de la densidad aparente en seco de consigna, adaptándose la presión de la prensa de manera automática para alcanzar el nuevo valor de densidad aparente en seco establecido.

El funcionamiento del programa de control en modo automático y su interacción con el ordenador de automatización de la prensa queda reflejado en el esquema de la figura 4.49. En el puede verse la secuencia seguida por la aplicación desde el momento en que se detecta el paso de una pieza por debajo del sensor de humedad, hasta que se actualiza la presión de prensado en la prensa.

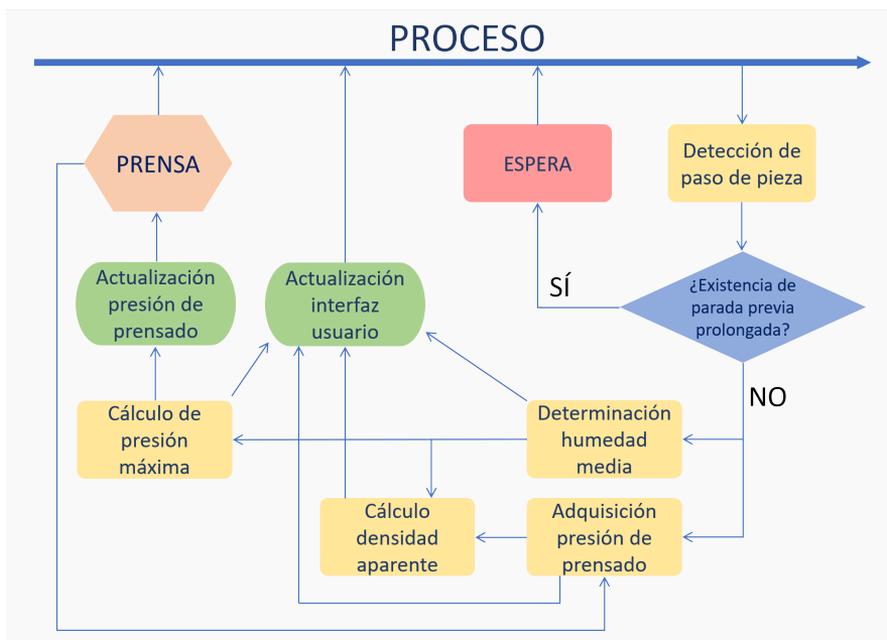


Figura 4.49. Diagrama de flujo mostrando el funcionamiento en modo automático de la aplicación de control desarrollada.

Conocida la humedad de los soportes y el valor de la densidad aparente en seco de consigna, el programa obtiene y envía al ordenador de automatización de la prensa la presión máxima de prensado a la que es necesario trabajar para mantener la densidad aparente en seco de los soportes en el valor consignado. De este modo, en el siguiente ciclo de prensado, la prensa aplica una presión igual a la calculada por la aplicación en el ciclo anterior. Tras realizar todos los cálculos y acciones comentadas, el sistema actualiza en pantalla todos los valores de las variables de control y se mantiene a la espera del paso de una nueva pieza por debajo del sensor de humedad para reiniciar el ciclo de cálculo. Además, guarda en un fichero de texto diario, el cual va actualizándose tras cada ciclo de prensado, los principales datos de operación.

4.3.1.2 Interfaz de usuario

En la imagen de la figura 4.50 se muestra la pantalla principal del interfaz gráfico de usuario de la aplicación desarrollada. En la parte superior de la misma existen una serie de pestañas que dan acceso a las diferentes capas de información de la aplicación. Por defecto, la aplicación se encuentra en la pestaña de “Medida y Control” que es desde la que los usuarios pueden realizar la mayoría de acciones durante su uso habitual.

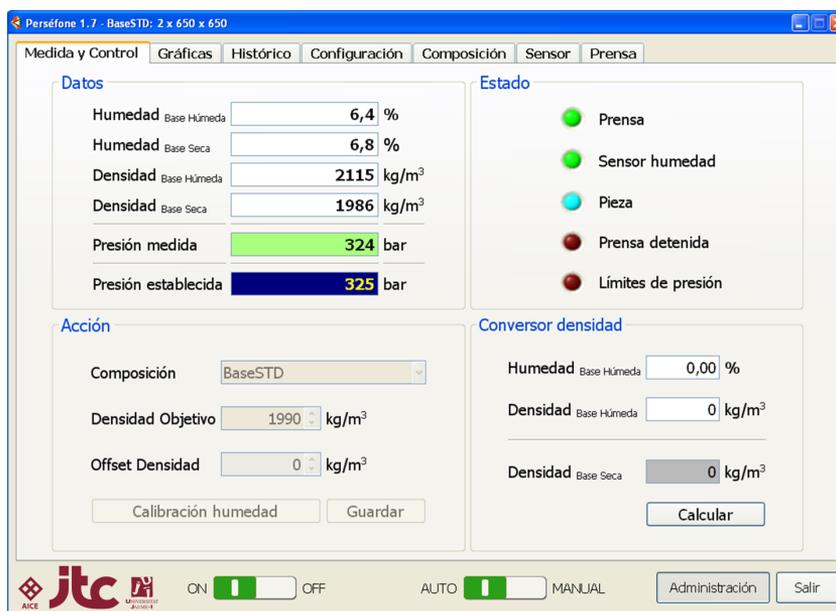


Figura 4.50. Pantalla principal del interfaz de usuario de la aplicación desarrollada para el control de la operación de prensado basado en la constancia de la densidad aparente en seco.

Desde esta pantalla principal el usuario puede supervisar el funcionamiento de la prensa y de los principales parámetros relacionados con el control automático. En la parte inferior de la misma existen tres botones principales de acción:

- ON/OFF: Al pulsarlo el sistema se pone en funcionamiento en modo manual e inicia la adquisición de datos. Inmediatamente después de confirmar el arranque, el botón ON/OFF queda iluminado en color verde y permanece así hasta que el usuario detiene el sistema.
- AUTO/MANUAL: Al pulsarlo queda iluminado en color verde y el sistema pasa a trabajar en modo de control automático. Al volverlo a pulsar se pasa de nuevo al modo de funcionamiento manual, quedando iluminado en color rojo.
- Administración: Este botón habilita/deshabilita, dependiendo de los permisos del usuario, el acceso a algunas de las pestañas superiores. Por defecto, al abrir el programa, el usuario tiene acceso exclusivamente a las pestañas “Medida y Control” y “Gráficas”. El acceso a las pestañas “Histórico”, “Configuración” y “Composición” se encuentra restringido para que solo puedan acceder los usuarios con capacidad para realizar modificaciones en la configuración del sistema y efectuar cambios en las recetas de trabajo. Las pestañas referentes a “Sensor” y “Prensa” contienen información relacionada con las comunicaciones entre los equipos y elementos que constituyen el sistema, por lo que no se requiere acceder a ellas durante el uso cotidiano de la aplicación.

La pestaña “Gráficas” permite visualizar la evolución en tiempo real de la humedad, tanto en base húmeda, como en base seca, la presión del circuito hidráulico leída directamente de la prensa y la densidad aparente en seco de las piezas recién prensadas, tal y como muestra la figura 4.51.



Figura 4.51. Pestaña de visualización gráfica del interfaz de usuario de la aplicación desarrollada para el control de la operación de prensado.

4.3.2 Evaluación del funcionamiento del sistema de control implementado

Haciendo uso de la aplicación de control desarrollada, se procedió a la validación industrial de la estrategia de control implantada en la prensa objeto de estudio, fabricando lotes de baldosas únicamente de la composición STD y en los diferentes tamaños de pieza recogidos en la tabla 3.2. Para ello, inicialmente, se llevaron a cabo acciones de control supervisadas, que permitieron evaluar el correcto funcionamiento del bucle de control anticipativo implementado. Posteriormente, se realizó el seguimiento de lotes de producción fabricados en su totalidad bajo la acción del sistema de control. Y finalmente, se estableció un protocolo de seguimiento y verificación que permitía evaluar diariamente, de forma sencilla, el correcto funcionamiento del sistema y retroalimentar el bucle, para adaptar los valores de la consigna de trabajo a las necesidades productivas. Seguidamente, se exponen los resultados más importantes de estas acciones.

4.3.2.1 Modificación controlada de la densidad aparente en seco de los soportes conformados

En una de las primeras intervenciones del sistema de control sobre el funcionamiento de la prensa, se evaluó la capacidad del mismo para modificar, de manera controlada, la densidad aparente en seco de los soportes conformados. Con la prensa produciendo piezas de un tamaño nominal en cocido de 675 mm x 450 mm y con el sistema en modo de funcionamiento automático, se realizó un cambio de la densidad aparente de consigna evaluando, posteriormente, el impacto del mismo sobre la clasificación del producto. En la figura 4.52 se muestra la evolución que tuvo la humedad registrada por el sensor durante la realización de la maniobra y el cambio de la presión máxima en el circuito hidráulico de la prensa, expresada en bares, producido de manera automática a raíz del cambio en la consigna de trabajo, aplicado entre las 15:48 h y las 16:39 h, desde un valor inicial de 2015 kg/m³ a 1995 kg/m³.

Como resultado del cambio de consigna en el sistema de control, la densidad aparente en seco de los soportes estimada por la aplicación experimentó la evolución plasmada en la figura 4.53. Junto a los datos de la densidad aparente media estimada por el programa, se incluye, en un trazo más fino, la predicción de la densidad realizada con el modelo de simulación, teniendo en consideración la variabilidad propia del proceso determinada en base a las experiencias previas. Como puede apreciarse, aunque durante la realización de las maniobras la humedad del polvo atomizado experimentó ciertas variaciones, pasando de valores máximos de 6,1 % a mínimos de 5,6 %, la densidad aparente en seco de los soportes se mantuvo constante en los valores de consigna preestablecidos, por efecto de las modificaciones de presión efectuadas por el sistema de control automático.

Haciendo uso del modelo de simulación se estimó, a partir de las variables de conformado registradas, el tamaño que deberían presentar tras su cocción las piezas procesadas en el periodo de tiempo analizado, obteniéndose la evolución de tamaños, respecto al tiempo de conformado, mostrada en la figura 4.54. Según estas estimaciones, fruto del cambio de la consigna de densidad aparente en seco realizado, la clasificación final debería presentar una variación de tamaños de aproximadamente

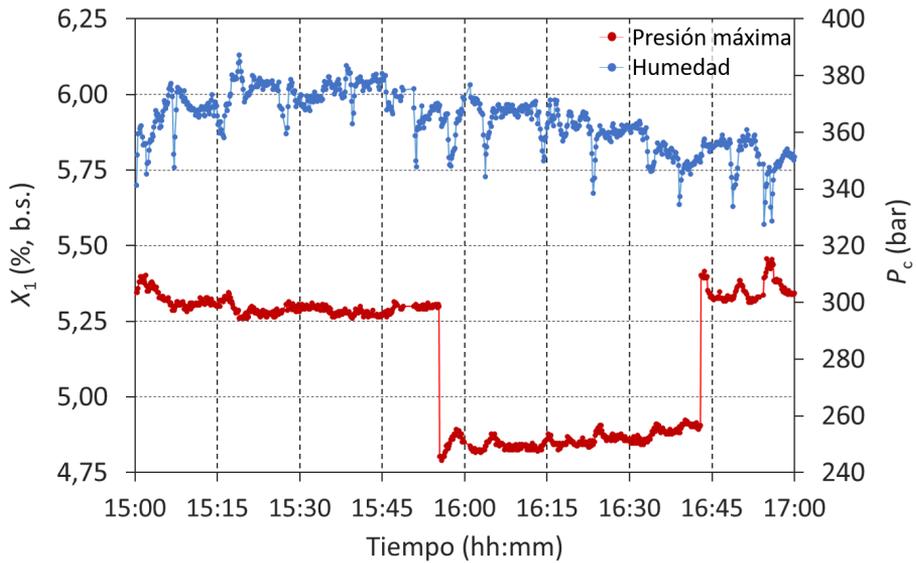


Figura 4.52. Evolución de la humedad del polvo y de la presión máxima del circuito hidráulico de la prensa a dos consignas de densidad aparente en seco de trabajo diferentes con el sistema de control funcionando en modo automático.

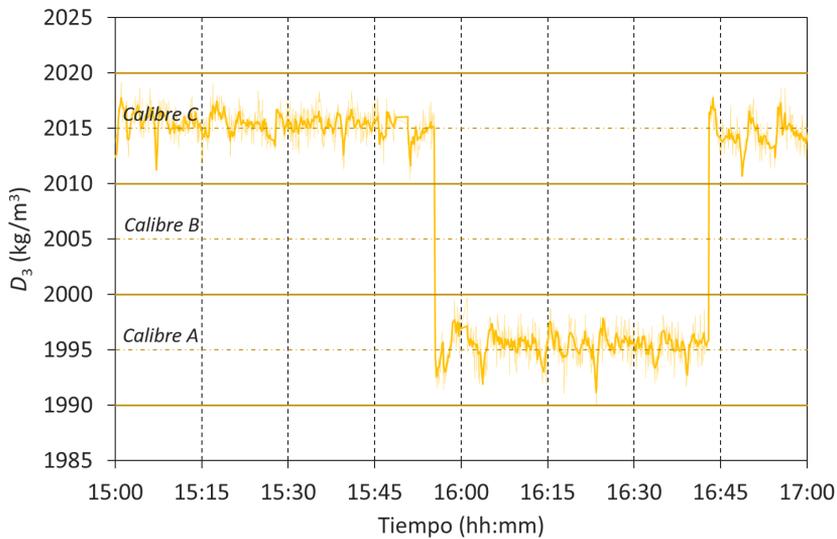


Figura 4.53. Evolución de la densidad aparente en seco estimada a dos consignas de trabajo diferentes con el sistema de control funcionando en modo automático.

2 mm, pasando de un tamaño medio de 682,5 μm centrado en el calibre C, para la consigna de trabajo de 2015 kg/m^3 , a un tamaño de 680,5 μm centrado en el calibre A, al imponer la consigna de 1995 kg/m^3 .

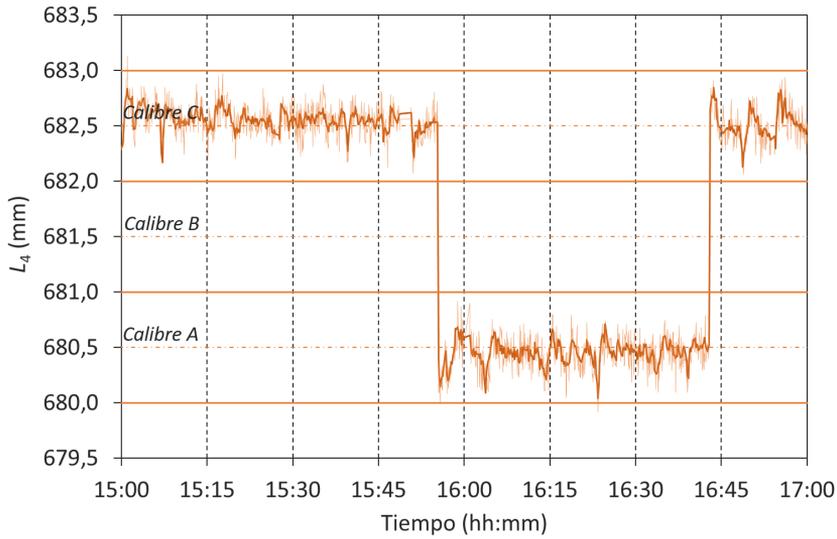


Figura 4.54. Evolución del tamaño final de las piezas predicho a dos consignas de trabajo diferentes con el sistema de control funcionando en modo automático.

Todas las piezas procesadas a cada una de las consignas evaluadas fueron cocidas y posteriormente caracterizadas dimensionalmente con el equipo industrial de clasificación, dando como resultado las distribuciones de tamaños finales de pieza de la figura 4.55.

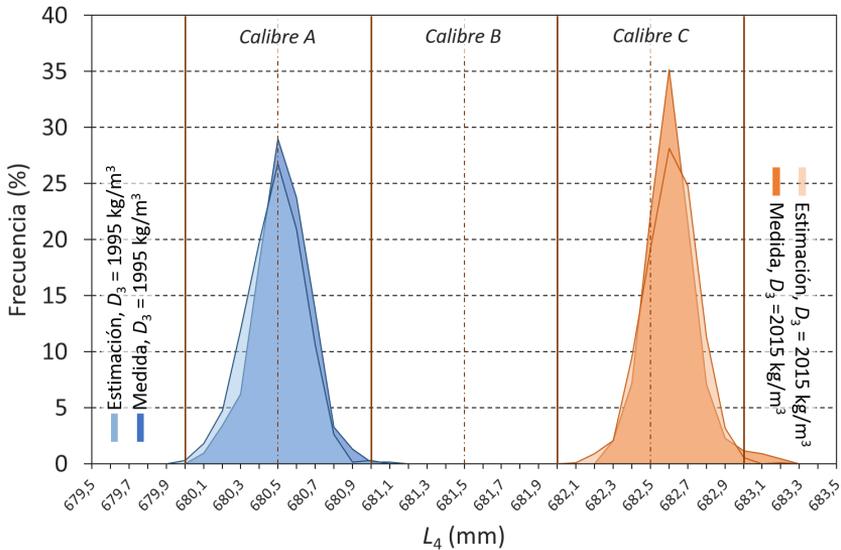


Figura 4.55. Distribuciones del tamaño de las piezas determinadas experimentalmente y simuladas con el modelo para las dos consignas de trabajo evaluadas en modo de funcionamiento automático.

De su análisis puede concluirse que las medidas de las piezas procesadas coinciden adecuadamente con las predicciones hechas por el modelo y, además, se encuentran en los valores esperados, atendiendo a los cambios de consigna de densidad aparente en seco realizados. En efecto, los soportes inicialmente conformados a una consigna de 2015 kg/m^3 dieron como resultado piezas cocidas centradas en el calibre C, mientras que los conformados a una consigna inferior de 1995 kg/m^3 dieron como resultado piezas cocidas dentro del calibre A, distanciado del anterior en 2 mm.

Los resultados de este experimento, junto a otros de características similares, que por no redundar no se exponen en este documento, permitieron comprobar el correcto funcionamiento del sistema de control automático puesto a punto. Al mismo tiempo, evidenciaron la posibilidad de gobernar el funcionamiento de la prensa manipulando directamente una variable relacionada con las propiedades físicas del producto conformado como es su densidad aparente en seco. Esta forma de proceder era completamente novedosa en la medida en que, de forma habitual, la variable manipulada cuando se trabaja de manera convencional es la presión del circuito hidráulico, necesitando muchas veces inferir que cambio de presión es necesario aplicar para conseguir un determinado cambio en la compacidad del producto.

4.3.2.2 Control automático de un lote completo de baldosas

Validado el funcionamiento del bucle anticipativo basado en la densidad aparente en seco, empezaron a controlarse de manera automática lotes completos de baldosas fabricados en la prensa automatizada, todos ellos a partir de la composición STD, con diferentes coloraciones, según las necesidades productivas de la planta. A modo de ejemplo, se muestran en este apartado los resultados referentes al control de la fabricación de un lote de 2000 m^2 de baldosas de tamaño nominal cocido $600 \text{ mm} \times 600 \text{ mm}$ conformadas en un molde con dos cavidades.

En este caso, la consigna de densidad aparente en seco de trabajo se mantuvo constante en un valor de 2005 kg/m^3 durante las prácticamente 13 horas, incluyendo paradas productivas, en las que el lote estuvo fabricándose en la prensa. La evolución de la humedad experimentada por el polvo atomizado durante todo este tiempo queda recogida en la figura 4.56 (trazo azul), en la que se aprecia una importante variación de esta variable de aproximadamente un 1 % b.s. Para compensar dichos cambios de humedad y mantener la densidad aparente en seco de los soportes constante, la presión del circuito hidráulico de la prensa debió regularse en un rango de 35 bar (figura 4.56 (trazo rojo)), el cual, traducido a presión específica aplicada sobre el polvo (ecuación 4.34), equivale a un total de 60 kg/cm^2 (5,9 MPa).

En la figura 4.57 se muestra la densidad aparente en seco de los soportes predicha por el modelo de simulación, de acuerdo a las condiciones de procesado. Los valores de la densidad aparente en seco se encuentran en torno al valor de consigna de 2005 kg/m^3 , que proporcionaría piezas centradas alrededor de un tamaño de 605,5 mm, en el calibre B. La obtención de una densidad aparente en seco perfectamente centrada en el valor de consigna no garantiza, como se ha demostrado en este trabajo, el obtener un tamaño final constante, debido al posible efecto de las variaciones de la expansión post-prensado sobre el tamaño final. Por ello, la efectividad del control

automático debe evaluarse en base a la evolución del tamaño final de las piezas tras la cocción.

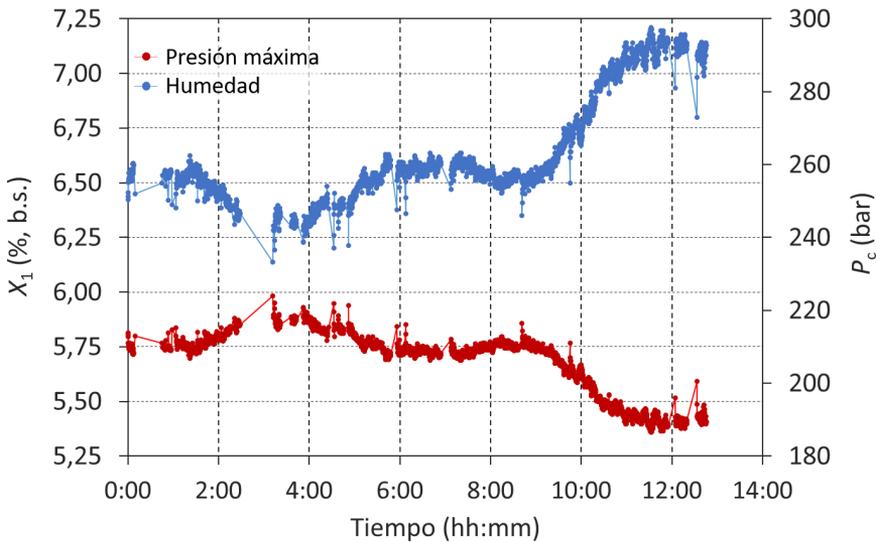


Figura 4.56. Evolución de la humedad del polvo y de la presión del circuito hidráulico de la prensa durante la fabricación de un lote de baldosas de tamaño nominal 600 mm x 600 mm controlado automáticamente.

En la figura 4.58 se representan los valores del tamaño de las piezas predichos por el modelo, con respecto al momento del conformado, junto a valores experimentales del tamaño de las baldosas cocidas caracterizadas, manual y puntualmente, con la mesa de medidas dimensionales. Para la realización de estos controles se recogieron, de forma periódica durante la fabricación del lote, soportes conformados en cada uno de los alveolos del molde, los cuales, tras su secado y decoración, eran cocidos directamente en el horno industrial, sin almacenarlos en el pulmón intermedio, aprovechando que se estaba cociendo producto sometido al mismo ciclo térmico que el producto objeto de estudio. Se aprecia como los tamaños predichos se encuentran alrededor del valor central del calibre B y, además, los tamaños de las piezas caracterizadas a la salida del horno concuerdan aceptablemente bien con los predichos, teniendo en cuenta la variabilidad propia del proceso para este tamaño de pieza.

Por último, en la figura 4.59 se refleja la distribución de los tamaños de las piezas registradas para el lote completo por el equipo de clasificación de producto en planta (área azulada). Los datos industriales se comparan con los tamaños propuestos por el modelo de simulación (área anaranjada), observándose un buen acuerdo, tanto en el valor promedio, como en la dispersión de los datos. El valor central de la distribución de tamaños no se encuentra completamente centrado en el calibre B, pero la mayoría de las piezas producidas (98,7%) pertenecían a dicho calibre.

Seguimientos similares al que se acaba de mostrar permitieron confirmar la efectividad del sistema de control para mejorar la estabilidad dimensional del producto

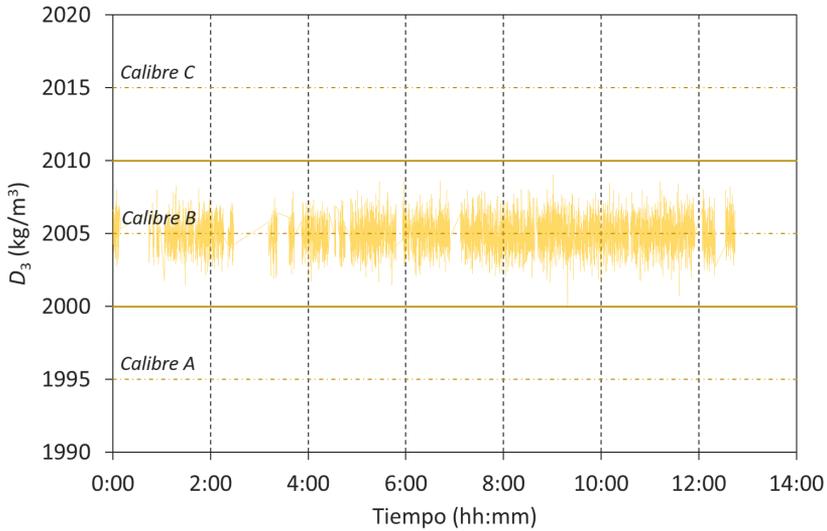


Figura 4.57. Evolución de la densidad aparente en seco simulada durante la fabricación de un lote de baldosas de tamaño nominal 600 mm x 600 mm controlado automáticamente.

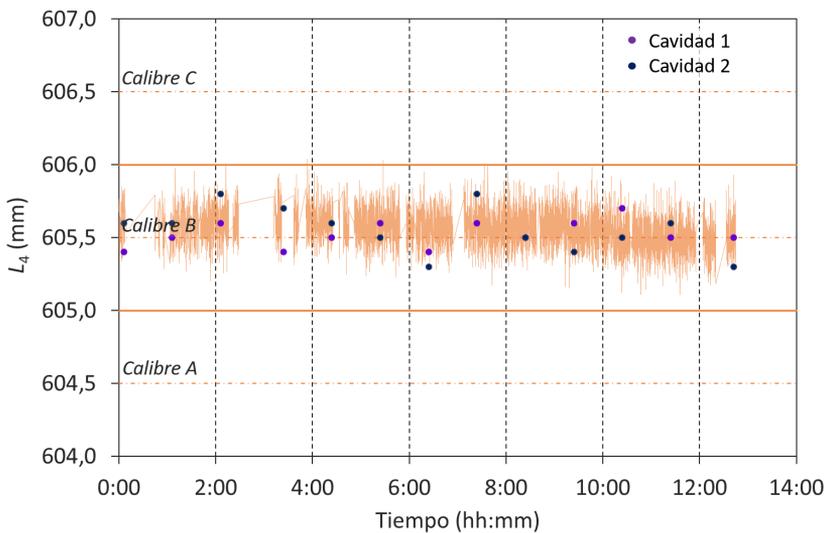


Figura 4.58. Evolución del tamaño final de las piezas predicho por el modelo de simulación durante la fabricación de un lote de baldosas de tamaño nominal 600 mm x 600 mm controlado automáticamente y valores experimentales del tamaño de las piezas muestreadas durante la producción.

terminado en los diferentes tamaños de pieza fabricados en la prensa estudiada. El conjunto de estos resultados, que refleja el impacto sobre las clasificaciones finales de producto, será puesto en el apartado 4.3.4.

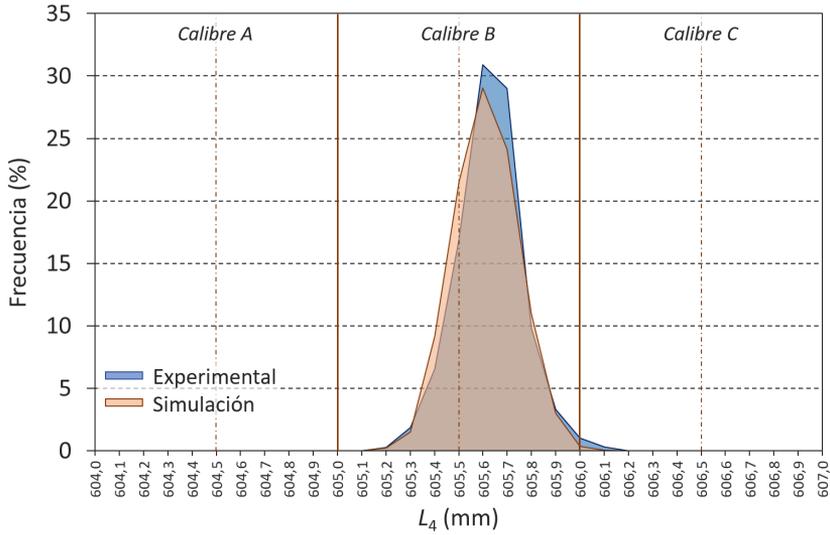


Figura 4.59. Distribuciones del tamaño de las piezas determinadas experimentalmente y simuladas con el modelo para un lote de baldosas de tamaño 600 mm x 600 mm controlado automáticamente.

4.3.3 Procedimiento de verificación del funcionamiento del sistema de control

La estrategia de control desplegada está constituida por un bucle de control anticipativo en el que, en base a las estimaciones de un modelo de comportamiento del material, se determina el cambio de presión máxima a efectuar en la prensa para mantener la densidad aparente en seco de los soportes constante y evitar que el efecto de las perturbaciones de la humedad se propague en el proceso. Además, la estrategia presenta la peculiaridad de que la variable que de manera indirecta se desea controlar es el tamaño final de pieza, que guarda relación no solo con la densidad aparente en seco, sino con el tamaño en crudo de los soportes y las condiciones de cocción.

Como en cualquier estrategia anticipativa de control industrial, para su correcto funcionamiento se hace imprescindible dotarla de una retroalimentación [101]. De no existir retroalimentación, la eficacia del control puede verse comprometida si el modelo realiza estimaciones erróneas, cosa que es difícil de evitar, debido a las perturbaciones externas adicionales que afectan al proceso y no pueden ser tenidas en cuenta o detectadas a tiempo. En el caso del sistema objeto de estudio, algunas de estas perturbaciones podrían ser, por ejemplo, los cambios en el comportamiento del material, debido a la variabilidad asociada al uso de materias primas de origen natural, o los cambios en las condiciones de cocción.

En una situación convencional, la retroalimentación de un bucle anticipativo se consigue con una medida directa de la variable controlada, la cual proporciona una señal con la cual adaptar automáticamente el funcionamiento del bucle. Generalmente, estas adaptaciones consisten en la realización de cambios de consigna o el ajuste de

los parámetros del modelo, para asegurar la estabilidad del proceso. Sin embargo, en el sistema aquí planteado no fue posible proceder de este modo por dos razones, fundamentalmente. En primer lugar, no se disponía, y tampoco existe a día de hoy, de tecnología para realizar una medida en continuo de la densidad aparente en seco de los soportes fabricados. Únicamente existen equipos at-line [58] que pueden proporcionar medidas discontinuas de la misma. Y en segundo lugar, aunque la medida del tamaño final de pieza se realizaba de forma automática con los equipos de clasificación, por tratarse de una planta con pulmón intermedio de almacenamiento, esta tenía lugar mucho tiempo después de haberse producido el conformado, lo cual retrasaba en exceso la retroalimentación del control. A esto había que añadir que, como sucede en la mayoría de las plantas cerámicas, al no disponer de un adecuado sistema de trazabilidad del producto en proceso, no era posible correlacionar de manera fehaciente las medidas de tamaño de una pieza concreta con las condiciones de conformados y/o cocción a las que fue sometida.

Por todo lo que se acaba de exponer, para asegurar el adecuado funcionamiento de la estrategia de control implantada, durante la campaña de seguimiento realizada, se hizo necesario abordar los siguientes aspectos relacionadas con la estrategia de retroalimentación:

- Establecer un procedimiento que permitiera fijar los valores de densidad aparente en seco de consigna que proporcionasen baldosas cocidas con un tamaño centrado en el calibre deseado.
- Definir una metodología de verificación que permitiera, al menos de una forma discontinua, retroalimentar el bucle de control con datos de la densidad aparente en seco de los soportes recién prensados y del tamaño final de las piezas procesadas para adecuar los parámetros de ajuste del modelo y evitar una deriva progresiva del sistema que condujera a situaciones fuera de los límites de control establecidos.

En la figura 4.60 se esquematiza el procedimiento seguido para retroalimentar y garantizar el buen funcionamiento del bucle de control implementado en la prensa. Este procedimiento de verificación fue necesario efectuarlo al menos una vez al día, aunque lo aconsejable era realizarlo todos los turnos productivos (cada 8 horas), siempre que las incidencias operativas típicas (cambios de molde, ajustes de líneas de fabricación, realización de pruebas, etc) no lo impidieran. La metodología constaba de tres puntos clave, cada uno de los cuales evaluaba un aspecto crítico del control. En primer lugar, la verificación de la correcta medida de la humedad por parte del espectrómetro IR empleado (flechas naranjas). En segundo lugar, la comprobación de la estimación, con el diagrama de compactación industrial, de la densidad aparente en seco de los soportes recién prensados (flechas verdes). Y por último, la evaluación del tamaño final realmente alcanzado por las piezas cocidas, con vistas a realizar, de ser necesario, ajustes en la densidad aparente de consigna (flechas rojas).

Aunque inicialmente estos procedimientos de supervisión no fueron realizados por los operarios, para poder tener un seguimiento fidedigno de la producción las 24 horas de día, fue imprescindible contar con su colaboración. Al proceder de esta forma,

además, los resultados obtenidos en la evaluación del impacto de la estrategia de control sobre la mejora de la estabilidad dimensional fueron más próximos a los que se obtendrían en unas condiciones reales de operación, al contar con la intervención de los usuarios finales de un sistema de control como el desarrollado.

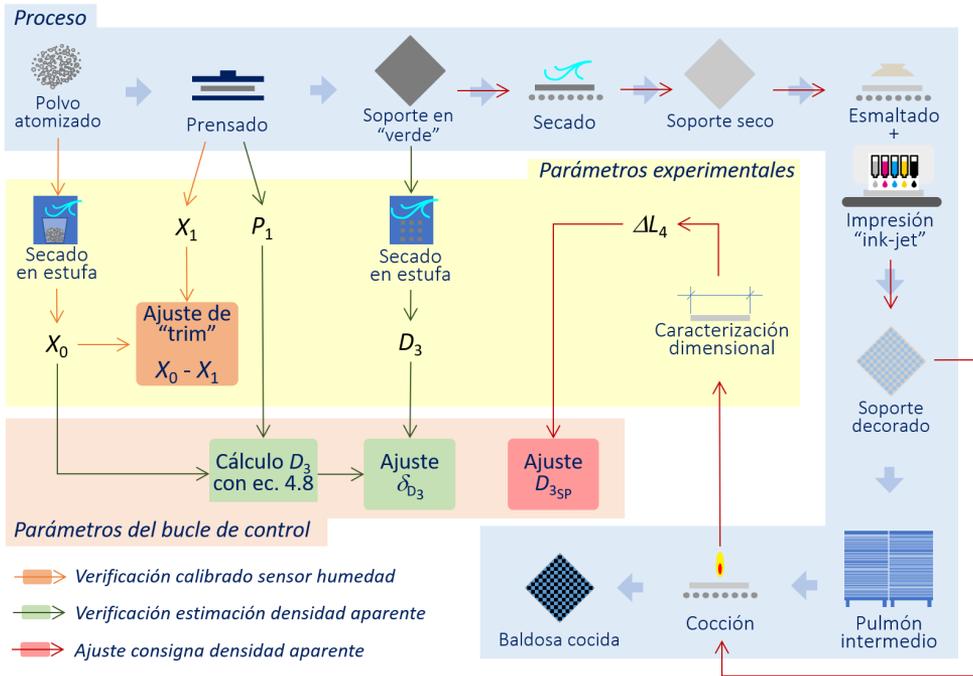


Figura 4.60. Diagrama de flujo mostrando las verificaciones necesarias para la supervisión y retroalimentación del bucle de control establecido.

En los procedimientos de verificación establecidos, se recogían piezas cocidas a la salida del horno y se determinaba, generalmente con la mesa de caracterización dimensional (ver apartado 3.2.1), el tamaño promedio de todas las piezas, para compararla con el tamaño central del calibre deseado. Si la diferencia respecto al calibre central deseado era superior a $\pm 0,2$ mm durante 3 verificaciones consecutivas se ajustaba el valor de la densidad aparente en seco de consigna para situar el tamaño final de pieza en el centro del calibre.

Para determinar el cambio a efectuar en la densidad aparente en seco de consigna en función del cambio de tamaño deseado, se derivó respecto a la densidad aparente en seco la ecuación 1.20, asumiendo la simplificación de que la expansión post-prensado era prácticamente independiente de la densidad aparente en seco. Procediendo de este modo se obtuvo la ecuación 4.37, en la que el parámetro M viene dado por la ecuación 4.29.

$$\frac{dL_4}{dD_3} = -\frac{L_0}{10^2} M \tag{4.37}$$

Utilizando esta expresión se determinaron los valores de $\frac{\Delta D_3}{\Delta L_4}$ recogidos en la tabla 4.13, para cada uno de los tamaños de pieza procesados por la prensa. Dichos valores permitían determinar cuanto había que modificar la densidad aparente en seco de consigna cuando se detectaba una desviación significativa respecto al tamaño central del calibre. Como puede observarse, los cambios de consigna para generar un mismo cambio de tamaño debían ser mayores cuanto menor era el tamaño de las piezas procesadas. Así, por ejemplo, para aumentar el tamaño final de las piezas en 0,5 mm, fabricando piezas de 1200 mm x 600 mm era necesario aumentar la densidad de consigna en 3 kg/m³, aproximadamente, mientras que si las piezas eran de 330 mm x 330 mm, el aumento debía ser de 10 kg/m³.

Tabla 4.13. Relación entre la variación de densidad aparente en seco y la variación de tamaño final de pieza empleada en la retroalimentación de la densidad aparente en seco de consigna del bucle anticipativo.

Tamaño nominal (mm x mm)	L_0 (mm)	$\Delta D_3/\Delta L_4$ (kg/(m ³ mm))
1200 x 600	1282,6	6
675 x 450	721,5	10
600 x 600	641,3	11
450 x 450	481,0	15
330 x 330	352,7	20

Teniendo en consideración lo que se acaba de exponer, desde un punto de vista formal, el diagrama de bloques, que finalmente representaría la estrategia de control implementada, es el mostrado en la figura 4.61. En dicho diagrama se recoge, por un lado, el bucle anticipativo constituido por la aplicación de control desarrollada, la cual se encargaba de compensar, en base al modelo constituido por el diagrama de compactación industrial, las fluctuaciones que la humedad, como principal perturbación del sistema, originaba sobre la densidad aparente en seco de los soportes. Por otro lado, puede observarse la retroalimentación de la diferencia entre la medida de densidad aparente en seco y la estimación de densidad realizada, la cual permitía ajustar el modelo de predicción a través del parámetro δ_{D_3} , para asegurar una correcta determinación de la acción de control. Y por último, se visualiza la realimentación de las medidas del tamaño final de las piezas, la cual facilitaba el establecimiento de la densidad aparente de consigna, para obtener piezas centradas en el calibre deseado, contrarrestándose, de este modo, la incidencia de perturbaciones adicionales en el proceso. Como se ha indicado, en ausencia de sistemas de medida que proporcionasen una medida rápida y en continuo de las variables controladas, tanto en el bucle anticipativo, como a nivel global, la realimentación del sistema se realizaba de manera discontinua por parte de los usuarios.

Es interesante destacar que, aunque este procedimiento de verificación y retroalimentación del modelo se validó para una estrategia de control basada en la densidad aparente en seco, el mismo podría también ser válido, con ciertas adaptaciones, para la aplicación de una estrategia basada en el tamaño final. En efecto, trabajando con esta otra estrategia, en lugar de verificar únicamente el tamaño final alcanzado por

miento del impacto sobre las clasificaciones del sistema de control mucho más representativa, al poder disponer de una mayor número de lotes de fabricación controlados de manera automática.

Tabla 4.14. Tolerancias de calibre para los diferentes tamaños de pieza fabricados en la planta donde se llevó a cabo la investigación y cantidades de piezas empleadas en la evaluación del impacto del control.

Tamaño nominal (mm x mm)	Tolerancia (mm)	Número de lotes	Cantidad (m²)
1200 x 600	1,6	15	46.000
675 x 450	1,0	37	105.000
600 x 600	1,0	20	52.000
450 x 450	1,0	27	78.000
330 x 330	0,8	22	65.000
TOTAL		121	346.000

Durante cinco meses, se realizó el seguimiento de todos los lotes producidos en ambas prensas, con la finalidad de disponer, tanto de los datos referentes a las clasificaciones finales de producto, como de los datos correspondientes a las variables de conformado. La composición de trabajo empleada durante todo ese periodo de tiempo fue la STD, la cual, puntualmente, se coloreaba mediante la adición de pequeños porcentajes de pigmentos inorgánicos, según lo explicado anteriormente. Los datos obtenidos se contrastaron con datos de clasificaciones previas obtenidas en la misma instalación, por un periodo de tiempo similar, para la misma tipología de producto y tamaños de pieza, pero controlando el proceso de manera convencional.

Las tolerancias de calibre consideradas en el análisis de los datos, las cuales quedan recogidas en la tabla 4.14, fueron las mismas que las utilizadas habitualmente en las instalaciones de la empresa para clasificar sus productos. Dichas tolerancias se refieren siempre al lado más largo de la baldosa para formas de pieza rectangulares. El aumento de las mismas a medida que se incrementa el tamaño de pieza fabricado responde a la dificultad, apuntada a lo largo del trabajo, de mantener dentro de un mismo intervalo máximo de variación el tamaño final de pieza, conforme los soportes tienen mayor tamaño.

El grado de mejora de la estabilidad dimensional del producto ha sido evaluado de dos formas diferentes:

- Considerando la reducción del número de calibres en el conjunto de los lotes producidos
- Determinando el incremento de calidad de las clasificaciones obtenidas, es decir, la proporción de la clasificación que se encontraba centrada en un único calibre, distinguiendo, para ello, entre:
 - Lotes con calidad baja: lotes con 3 o más calibres en su clasificación final

- Lotes con calidad media: lotes con más del 85 % de las piezas de su clasificación final en un mismo calibre
- Lotes con calidad alta: lotes con más del 95 % de las piezas de su clasificación final en un mismo calibre
- Lotes con calidad excelente: lotes con todas las piezas de su clasificación final en un mismo calibre

En primer lugar, se ha realizado un análisis del efecto del control automático sobre la estabilidad dimensional de los lotes de baldosas de tamaño nominal cocido 675 mm x 450 mm. En segundo lugar, se han analizado los lotes de piezas de tamaño nominal 450 mm x 450 mm, el cual era junto al anterior, el producido de manera más habitual en las instalaciones. Finalmente se ha efectuado un análisis global considerando el conjunto de tamaños de pieza fabricados en la planta.

4.3.4.1.1 Análisis de los lotes de tamaño nominal de las piezas 675 mm x 450 mm

Para un total de cuatro clases de calibre con una tolerancia de 1 mm, en el gráfico de la figura 4.62 se compara la clasificación de tamaños global de los 37 lotes controlados automáticamente, constituyendo aproximadamente un total de 105.000 m², con la obtenida para otros 35 lotes, también de tamaño nominal 675 mm x 450 mm. Estos últimos fueron producidos con anterioridad a la puesta en marcha del sistema de control y controlados, por tanto, mediante los procedimientos manuales convencionales.

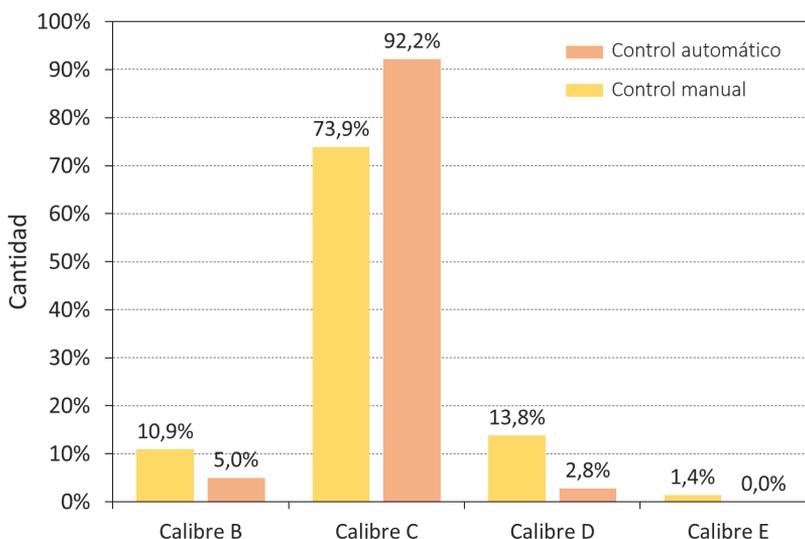


Figura 4.62. Distribuciones del tamaño de las piezas antes y después de la implantación del sistema de control automático de la operación de prensado para lotes de piezas de gres porcelánico de tamaño nominal 675 mm x 450 mm.

Como puede observarse, la incorporación del control automático implicó una mejora significativa de la estabilidad dimensional de los productos fabricados con respecto

a la situación previa. Por una parte, el control permitió eliminar por completo del conjunto de clasificaciones de producto el calibre D, que en ausencia de control automático suponía un 1,4% del total. Por otra parte, gracias al control tuvo lugar un aumento significativo del porcentaje de producto con un tamaño final situado dentro del calibre central C, el cual pasó de tener el 73,9% de la producción (valor sensiblemente bajo para ser el calibre mayoritario), a albergar más del 92%, al considerar los lotes controlados automáticamente. Por último, los dos calibres minoritarios B y D, que en una situación de control convencional suponían en conjunto el 24,7% del total de la producción, tras la implementación de los bucles de control pasaron a suponer únicamente un 7,8%.

Si el análisis del efecto de la automatización sobre las clasificaciones finales de los lotes de tamaño 675 mm x 450 mm se hace desde el punto de vista de su calidad, se obtienen los resultados recogidos en el gráfico de la figura 4.63.

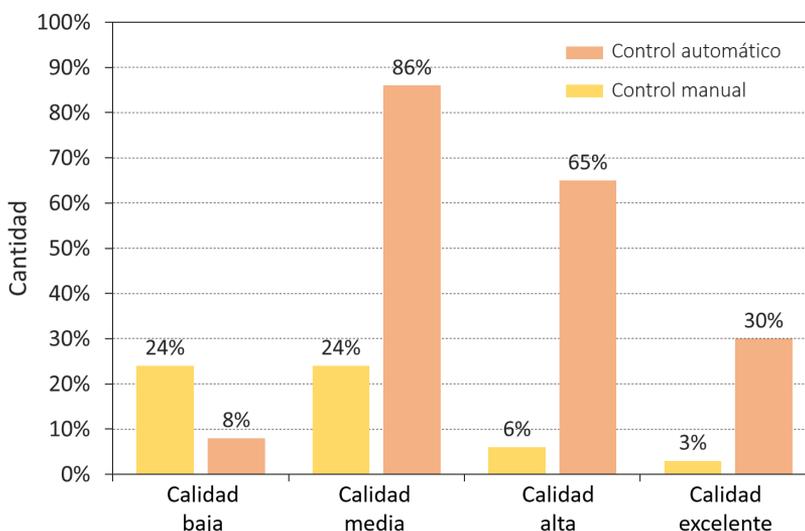


Figura 4.63. Impacto del sistema de control automático del prensado sobre la calidad de las distribuciones del tamaño de las piezas en lotes de gres porcelánico de tamaño nominal 675 mm x 450 mm.

En el mismo puede comprobarse como la incorporación del sistema de control contribuyó positivamente a mejorar, en lo referido a su homogeneidad dimensional, la calidad de los lotes fabricados en la planta. El uso del control automático implicó la reducción de la cantidad de lotes productivos considerados de calidad baja, los cuales pasaron de ser un 24% del total, a únicamente el 8% (3 lotes). Al mismo tiempo, el control automático originó un aumento significativo de los lotes de calidad excelente, es decir, de los lotes con un único calibre, los cuales con un control manual convencional solamente alcanzaban el 3%, mientras que al automatizar el control de la prensa se situaron en un 30% del total. Además de esto, el impacto del sistema de control también se refleja en la mejora del porcentaje de lotes de calidad media, los cuales aumentaron del 24% inicial a un 86%, pero sobretodo en el incremento de lotes que podían ser considerados de calidad alta, por estar constituidos en más de un 95%

de su producción por un único calibre. Estos últimos experimentaron un incremento muy marcado, pasando de producirse solamente un 6 % de lotes de calidad alta, a fabricarse el 65 % de los lotes dentro de esa categoría de calidad.

4.3.4.1.2 Análisis de los lotes de tamaño nominal de las piezas 450 mm x 450 mm

Como puede verse en las figuras 4.64 y 4.65, resultados similares a los obtenidos con los lotes de baldosas de tamaño 675 mm x 450 mm fueron alcanzados al trabajar con piezas de tamaño nominal 450 mm x 450 mm.

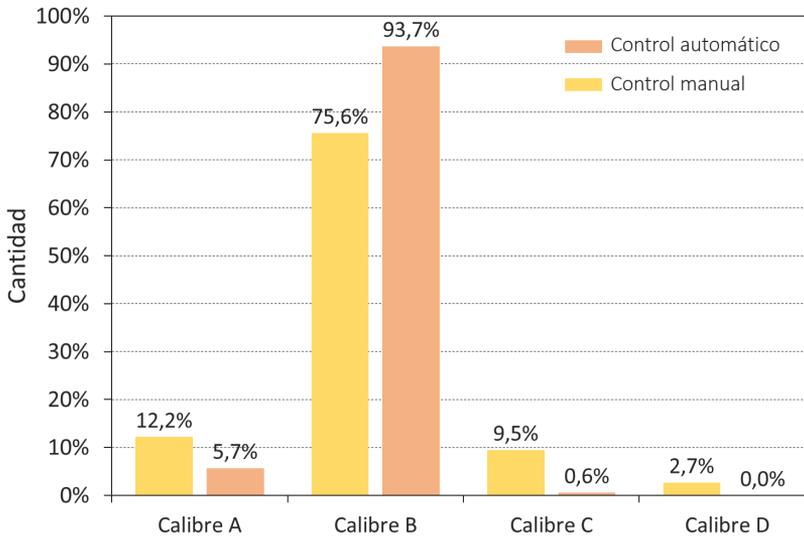


Figura 4.64. Distribuciones del tamaño de las piezas antes y después de la implantación del sistema de control automático de la operación de prensado para lotes de piezas de gres porcelánico de tamaño nominal 450 mm x 450 mm.

En este caso, para un total de 27 lotes de producto (aproximadamente, 78.000 m²), tanto el número de calibres en las clasificaciones finales de tamaño, como la calidad de estas, se vieron significativamente mejorados. No obstante, al trabajar con la misma tolerancia de calibre que en el producto de 675 mm x 450 mm, los resultados para este otro tamaño de pieza fueron ligeramente mejores. En efecto, aunque el molde en el que se prensaban los soportes tenía una cavidad adicional, con respecto a las dos que existían en el molde del tamaño 675 mm x 450 mm, lo cual generaba necesariamente mayor variabilidad en la densidad aparente en seco de los soportes fabricados, realmente era más sencillo fabricar piezas de un tamaño inferior, dentro de una misma tolerancia de calibre.

Así pues, para el tamaño de 450 mm x 450 mm puede considerarse que el control automático permitió reducir a prácticamente dos el número de calibres en el conjunto de la clasificación final, tal y como se aprecia en la figura 4.64, en la cual el 0,6 % de piezas que se clasificaron como calibre minoritario C, solo supondrían 450m² sobre el total de 75.000m² controlados. Además, el análisis de la calidad de las clasificaciones revela como con la introducción del control se produjo un aumento significativo de

las clasificaciones con un único calibre, que pasaron de ser solo un 5 %, en ausencia de control automático, a un 37 %, tras su implementación. Adicionalmente, se redujo la proporción de lotes con tres o más calibres en su clasificación a solamente un 4 % del total (1 lote), cuando con un control convencional se tenía hasta el 28 %.

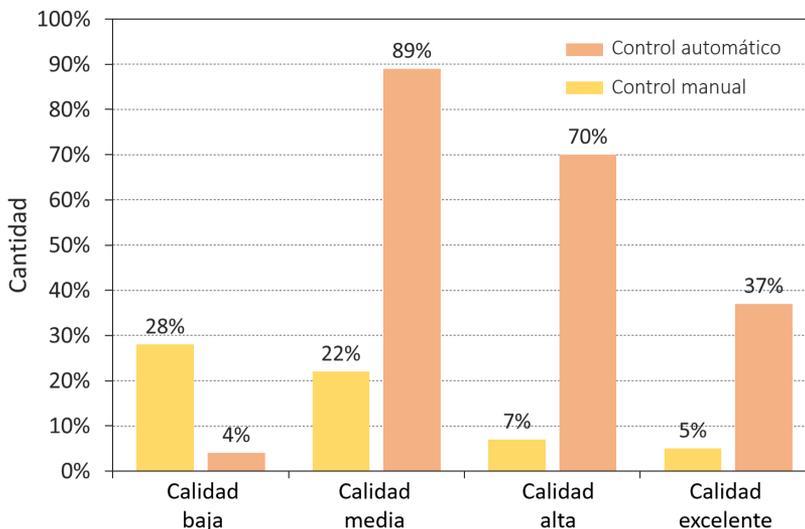


Figura 4.65. Impacto del sistema de control automático del prensado sobre la calidad de las distribuciones del tamaño de las piezas en lotes de gres porcelánico de tamaño nominal 450 mm x 450 mm.

4.3.4.1.3 Análisis global de los lotes fabricados

Estos resultados referidos al análisis global de las clasificaciones de los lotes con tamaños de pieza de 675 mm x 450 mm y 450 mm x 450 mm ponen de manifiesto el efecto positivo que ejerce el sistema de control sobre la estabilidad dimensional del producto. Ahora bien, aunque un control automático del prensado basado en la constancia de la densidad aparente en seco contribuye a reducir la dispersión del tamaño final de pieza, no consigue eliminar por completo los calibres residuales que impiden la obtención de un calibre único en el conjunto de los lotes fabricados. Este hecho es debido, principalmente, tal y como se ha venido exponiendo en anteriores apartados, en primer lugar, a la contribución de la expansión post-prensado a la variabilidad dimensional del producto terminado. En segundo lugar, a la influencia de perturbaciones adicionales a la humedad, tales como, los cambios en el comportamiento del material y la variabilidad de la temperatura de cocción. Y en tercer lugar, a la dificultad para establecer un valor de consigna de la densidad aparente en seco que proporcione siempre un tamaño final de pieza centrado en el calibre buscado. Aunque el sistema desplegado dispone de los procedimientos para llevar a cabo una realimentación del bucle de control, el hecho de que no fuera posible automatizarla por completo, sino que depende en parte de la intervención de los usuario del sistema, no garantiza el trabajar siempre en unas condiciones óptimas desde el punto de vista de la estabilidad dimensional del producto final.

Es importante remarcar que, tanto en el caso del análisis de los lotes de tamaño 675 mm x 450 mm, como en el de los de 450 mm x 450 mm, un ligero ajuste a la baja de las consignas de densidad aparente en seco de trabajo podría haber desplazado el conjunto de las clasificaciones al límite entre los calibres B y C, en el caso de los primeros, y al límite entre el A y el B, en el de los segundos. En dicha situación, en ambos casos se habría conseguido una clasificación final con únicamente dos tamaños mayoritarios con aproximadamente el 50 % de la producción cada uno. Eso si, en caso de haber procedido de este modo, el análisis de las calidades, desde el punto de vista dimensional, se habría visto penalizado al reducirse significativamente el número de lotes con únicamente un calibre en su clasificación final. De todos modos, es una estrategia a valorar por parte de las empresas, conjuntamente con la adecuación de las tolerancias dimensionales, que será presentada en el siguiente apartado 4.3.4.2, no para mejorar la estabilidad dimensional de sus productos, la cual solo puede controlarse con estrategias como la aquí planteada, sino para reducir el número de calibres gestionados.

Dependiendo de las estrategias comerciales adoptadas por cada empresa puede resultar más interesante trabajar, bien reduciendo el número de calibres fabricados, bien maximizando el porcentaje de piezas fabricadas en un determinado calibre central. En este sentido, si la empresa utiliza procedimientos operativos de fabricación bajo pedido, el maximizar la proporción de piezas de un calibre central puede ser lo más interesante. En efecto, esto permite reducir los tiempos de fabricación de los pedidos, al disminuir la cantidad adicional de piezas a fabricar dentro de un lote para asegurar una determinada cantidad de baldosas en el calibre deseado, incrementando la disponibilidad de la prensa para fabricar otros lotes y mejorando la competitividad de la empresa.

Un último análisis, referente a la evaluación del impacto del sistema de control sobre la estabilidad dimensional de los productos conformados en las dos prensas automatizadas, hace referencia a la proporción de piezas clasificadas dentro del calibre central, para cada uno de los cinco tamaños de pieza fabricados. Dicho análisis queda recogido en la figura 4.66 y en él puede apreciarse como, al incorporar el control automático, para los tamaños de pieza superiores a 330 mm x 330 mm, el porcentaje de producción centrada en un calibre es superior al 90 %. El hecho de que las baldosas de tamaños 330 mm x 330 mm presentaran una menor proporción de piezas en el calibre central es debido a que la tolerancia en el calibre, tal y como se recoge en la tabla 4.14, era de 0,8 mm, inferior a la del resto de tamaños. Además, al ser el producto que se fabricaba en un molde con mayor número de cavidades, concretamente cuatro, la variabilidad propia de la densidad aparente en este tamaño de pieza es sensiblemente superior. Por ello, aunque a priori debiera ser más sencillo obtener una distribución de tamaños de pieza más homogénea que en el resto de tamaños, se obtuvo una clasificación por calibres algo más penalizada.

Del resto de tamaños de pieza, el de 450 mm x 450 mm es el que presentaba una mejor clasificación por calibres, precisamente por tener una tolerancia de calibre de 1 mm, igual a la de los productos de 600 mm x 600 mm y 675 mm x 450 mm, siendo a su vez, por su menor tamaño, menos sensible a la variabilidad del proceso. Finalmente, los lotes de 1200 mm x 600 mm, son los que deberían mostrar una peor estabilidad

dimensional, dado su mayor tamaño, aunque su clasificación por calibres no reflejaba este hecho de manera acusada, siendo su porcentaje de producción centrado en un calibre central sólo un 1 % inferior al de los lotes de 675 mm x 450 mm. Este hecho es debido exclusivamente a que la tolerancia de calibre considerada para este tamaño era bastante mayor que en el resto de productos, concretamente, de 1,6 mm, un 50 % mayor que la del tamaño 330 mm x 330 mm y prácticamente un 60 % mayor que la de los otros 3 tamaños fabricados.

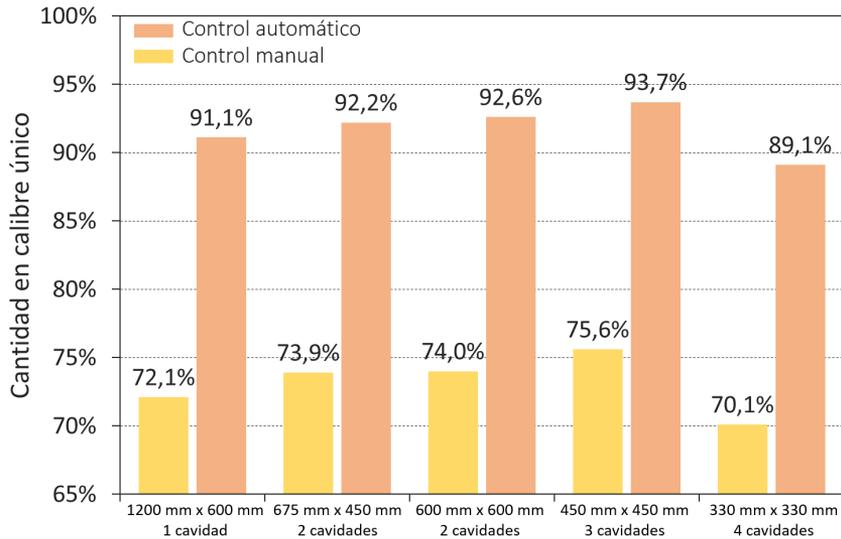


Figura 4.66. Proporción de piezas con calibre único para los diferentes tamaños de pieza considerados (control manual/automático).

Los resultados generales del seguimiento realizado al funcionamiento de los bucles de control desplegados ponen de manifiesto que, una estrategia de control automático, basada en la constancia de la densidad aparente en seco de los soportes recién prensados, contribuye de manera clara a la mejora de la estabilidad dimensional durante la fabricación de baldosas de gres porcelánico. Concretamente, los datos mostrados en la figura 4.66 revelan que, en promedio, las clasificaciones de los tamaños de las piezas incrementaron un 18,6 % la cantidad de piezas centradas en un único calibre, pasando de un 73,1 % (promedio de las barras amarillas), al controlar la producción de manera convencional, a un 91,7 % (promedio de las barras naranjas), cuando se controló automáticamente.

El uso de un sistema de control como el desarrollado es completamente recomendable en la medida en que minimiza la intervención de los operarios sobre el proceso y garantiza una homogeneidad en la distribución del tamaño final de las piezas no alcanzable con ningún otro procedimiento operativo de los típicamente empleados en la industria. Además permite ejercer un regulación de la prensa actuando directamente sobre la densidad aparente en seco de los soportes, que es la variable directamente relacionada con las principales propiedades físico-químicas del producto. Por ello,

aunque el efecto del sistema de control se evidencie fundamentalmente en la mejora dimensional del producto terminado, sus beneficios deben ser extensibles a la mejora de muchas propiedades del producto final (curvatura, porosidad, resistencia mecánica, etc.) [23].

4.3.4.2 Adecuación de las tolerancias dimensionales de las baldosas a las condiciones de procesado

Los resultados presentados en este trabajo de investigación, ponen de relevancia la dificultad para alcanzar las tolerancias dimensionales exigidas a los productos de gres porcelánico, dadas las propias limitaciones tecnológicas del proceso. A pesar de la importancia de las tolerancias dimensionales dentro del conjunto de propiedades que determinan la calidad del producto final, se ha constatado que, de manera generalizada, estas no son adecuadas, ni al tipo de producto, ni a las condiciones reales de fabricación. De hecho, por un lado, las tolerancias definidas por la normativa de referencia [1] [2] con respecto a los estándares de calidad actualmente establecidos, son muy poco exigentes y, por otro lado, las exigencias del mercado llegan a ser tan altas, especialmente en los productos de grandes dimensiones, que no pueden alcanzarse con el actual estado del arte de los medios de producción y control del proceso.

Por estas razones, es interesante mostrar los cambios que implicaría el acogerse a unas tolerancias dimensionales que estuvieran realmente adecuadas a las condiciones de procesado. Para lo cual, a partir de las ecuaciones del modelo constitutivo planteado y validado en condiciones industriales, puede determinarse cuales serían las tolerancias de trabajo técnicamente asumibles, en función del tamaño de las piezas fabricadas. Así, considerando la nomenclatura empleada en el modelo de comportamiento y la ecuación 1.10 expuesta en la introducción, la tolerancia de calibre (t) puede determinarse con la ecuación ecuación 4.38 en la que L_4^* y L_{4*} son, respectivamente, los límites máximo y mínimo de una determinada clase de calibre.

$$t = L_4^* - L_{4*} \quad (4.38)$$

Existe una tolerancia mínima, representada como t_* , por debajo de la cual es técnicamente inviable fabricar piezas dentro de una misma clase de calibre. Esta tolerancia mínima es aquella para la cual la variación máxima de la densidad aparente en seco (ΔD_3^*) es igual a dos veces el error absoluto del método de medida de la densidad aparente en seco de los soportes. La tolerancia más restrictiva que técnicamente se le puede exigir al proceso de fabricación es la tolerancia mínima t_* ya que, tolerancias de calibre más pequeñas requerirían de métodos de medida de la densidad aparente más precisos. Y no sólo eso, puesto que industrialmente existe una variabilidad significativa en la temperatura máxima de cocción y, aunque de manera menos acusada, en la presión máxima de prensado aplicada sobre el polvo, dicha tolerancia mínima también depende de esas variables. Por lo tanto, si la tolerancia empleada industrialmente es inferior a la tolerancia mínima, es técnicamente imposible producir piezas de una única clase de calibre, necesitándose que esta sea mayor o igual a la tolerancia mínima si se desea tener una clasificación final de producto centrada en un único calibre.

Para obtener una ecuación que permita calcular la tolerancia mínima exigible a un proceso de fabricación de baldosas, hay que partir de la expresión 4.39, resultante de aplicar, como se ha realizado anteriormente en este trabajo, la teoría del cálculo diferencial a la ecuación 1.20, la cual permite calcular el tamaño final de pieza en función de los cambios dimensionales experimentados por los soportes durante su procesado.

$$dL_4 = \left. \frac{\partial L_4}{\partial S_2} \right|_{S_3, S_4} dS_2 + \left. \frac{\partial L_4}{\partial S_3} \right|_{S_2, S_4} dS_3 + \left. \frac{\partial L_4}{\partial S_4} \right|_{S_2, S_3} dS_4 \quad (4.39)$$

Por otra parte, teniendo en consideración que la expansión post-prensado y la densidad aparente en seco dependen de la humedad y de la presión de prensado, y que la contracción lineal lo hace de la densidad aparente y la temperatura máxima de cocción, puede escribirse que:

$$dS_2 = \left. \frac{\partial S_2}{\partial P_1} \right|_{X_1} dP_1 + \left. \frac{\partial S_2}{\partial X_1} \right|_{P_1} dX_1 \quad (4.40)$$

$$dD_3 = \left. \frac{\partial D_3}{\partial P_1} \right|_{X_1} dP_1 + \left. \frac{\partial D_3}{\partial X_1} \right|_{P_1} dX_1 \quad (4.41)$$

$$dS_4 = \left. \frac{\partial S_4}{\partial D_3} \right|_{T_4} dD_3 + \left. \frac{\partial S_4}{\partial T_4} \right|_{D_3} dT_4 \quad (4.42)$$

Si en primera aproximación se considera nula la variabilidad de la presión de prensado, las expresiones 4.40 y 4.41 se transforman en:

$$dS_2 = \left. \frac{\partial S_2}{\partial X_1} \right|_{P_1} dX_1 \quad (4.43)$$

$$dD_3 = \left. \frac{\partial D_3}{\partial X_1} \right|_{P_1} dX_1 \quad (4.44)$$

de tal forma que, combinando estas dos ecuaciones, puede verificarse que se cumple:

$$dS_2 = \left. \frac{\partial S_2}{\partial X_1} \right|_{P_1} \left. \frac{\partial X_1}{\partial D_3} \right|_{P_1} dD_3 \quad (4.45)$$

De esta manera, sustituyendo las ecuaciones 4.42 y 4.45 en la 4.39, suponiendo, como ya se ha demostrado, que la contracción de secado puede asumirse constante para los rangos habituales de presión y humedad de trabajo, lo cual hace que $dS_3 = 0$, y transformando los términos diferenciales en incrementos finitos, se obtiene la ecuación 4.46. Esta permite calcular la variación máxima de la densidad aparente en seco, que podría tolerarse en la fabricación de las baldosas, sin que el tamaño de las piezas cocidas rebasase unos determinados límites de variación (ΔL_4^*), para

una variabilidad térmica dada (ΔT_4^*) y considerando la dependencia de la expansión post-prensado con la presión y humedad de trabajo.

$$\Delta D_3^* = \frac{\Delta L_4^* - \left. \frac{\partial L_4}{\partial S_4} \right|_{S_2, S_3} \left. \frac{\partial S_4}{\partial T_4} \right|_{D_3} \Delta T_4^*}{\left. \frac{\partial L_4}{\partial S_2} \right|_{S_3, S_4} \left. \frac{\partial S_2}{\partial X_1} \right|_{P_1} \left. \frac{\partial X_1}{\partial D_3} \right|_{P_1} + \left. \frac{\partial L_4}{\partial S_4} \right|_{S_2, S_3} \left. \frac{\partial S_4}{\partial D_3} \right|_{T_4}} \quad (4.46)$$

Para poder resolver la ecuación 4.46 se necesita reemplazar las derivadas parciales del tamaño final con respecto a los cambios dimensionales por la ecuación genérica 4.14, previamente deducida en el apartado 4.2.1, e incorporar las ecuaciones 4.47, 4.48, 4.49 y 4.50 obtenidas derivando las distintas ecuaciones constitutivas del modelo.

$$\left. \frac{\partial S_4}{\partial T_4} \right|_{D_3} = ((2(mD_3 + n)(T_4 + \delta_{T_4})) + (pD_3 + q)) \quad (4.47)$$

$$\left. \frac{\partial S_4}{\partial D_3} \right|_{T_4} = (m(T_4 + \delta_{T_4})^2 + p(T_4 + \delta_{T_4}) + r) \quad (4.48)$$

$$\left. \frac{\partial S_2}{\partial X_1} \right|_{P_1} = (eP_1 + f) \quad (4.49)$$

$$\left. \frac{\partial X_1}{\partial D_3} \right|_{P_1} = \frac{1}{(a \ln(P_1 + \delta_{P_1}) + c)} \quad (4.50)$$

Definiendo α como la precisión del método de medida de la densidad aparente por inmersión en mercurio, y combinando las ecuaciones anteriores, se llega a la expresión 4.51, mediante la cual es posible determinar la tolerancia mínima exigible al proceso, en función del tamaño de pieza fabricado, para una determinada variabilidad de la temperatura máxima de cocción.

$$t_* = L_4 \left| \frac{(eP_1 + f)}{(100 - S_2)(a \ln(P_1 + \delta_{P_1}) + c)} + \frac{(m(T_4 + \delta_{T_4})^2 + p(T_4 + \delta_{T_4}) + r)}{(100 - S_4)} \right| \alpha + L_4 \left| \frac{(2(mD_3 + n)(T_4 + \delta_{T_4})) + (pD_3 + q)}{(100 - S_4)} \right| \Delta T_4^* \quad (4.51)$$

Esta ecuación indica que la tolerancia mínima exigible al proceso es una función lineal del tamaño final de la pieza, que pasa por el origen de coordenadas. Su pendiente es siempre positiva, lo cual indica que cuanto mayor es el tamaño de pieza más restrictiva es la tolerancia mínima. Utilizando la ecuación 4.51 se ha determinado, para las dos composiciones de soporte empleadas en el trabajo, la tolerancia mínima que podría exigirse al proceso de fabricación de baldosas cerámicas con tamaños comprendidos entre 150 mm y 1350 mm. Para ello, por un lado, se ha supuesto una variabilidad térmica en el horno de $\pm 5^\circ\text{C}$, algo más restrictiva que la empleada a lo largo del estudio, y un valor de α de 8 kg/m^3 . Y por otro lado, unas condiciones de

conformado que proporcionaran, en ambos casos, soportes con una densidad aparente en seco de 1980 kg/m^3 y unas condiciones de cocción adecuadas para alcanzar la absorción de agua exigida al producto ($<0,1\%$). Los resultados de estos cálculos quedan reflejados en la figura 4.67, donde se observa como las tolerancias mínimas exigibles a la composición de soporte STD (trazo anaranjado) son ligeramente mayores que para la EPP+ (trazo azulado). De nuevo, este hecho guarda relación con la mayor expansión post-prensado de EPP+ y su efecto de compensación frente al cambio dimensional de cocción.

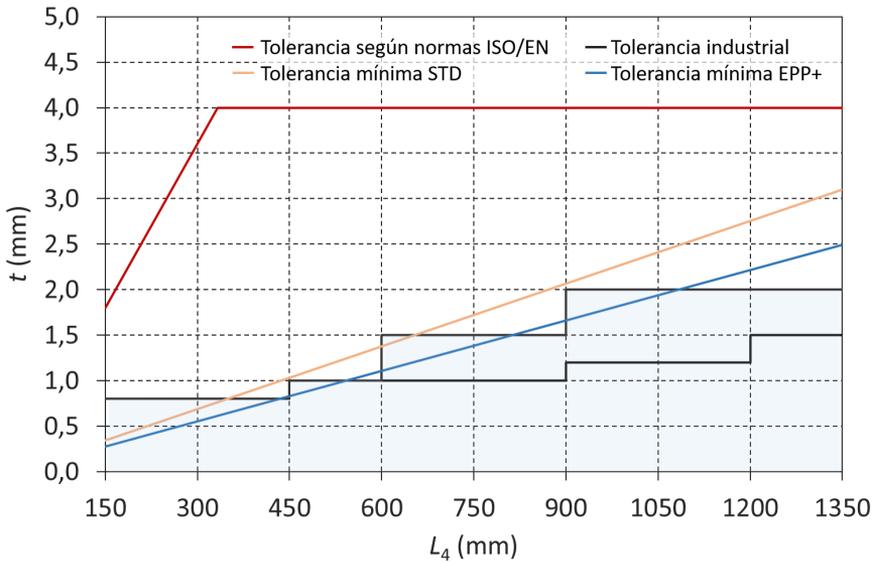


Figura 4.67. Tolerancias mínimas exigibles al proceso para la fabricación de baldosas de tamaños entre 150 y 1350 mm para las dos composiciones de trabajo y comparación con la práctica industrial habitual y las exigencias de la normativa.

En la misma figura se ha representado con un trazo rojo, la tolerancia exigida por la normativa en vigor (ISO 13006:2012 y EN 14411:2013), según la cual para piezas de dimensiones nominales mayores de 150 mm, la máxima tolerancia aceptable debe ser la más restrictiva entre $\pm 0,6\%$ de su tamaño nominal o $\pm 2,0$ mm. Se aprecia que, para todos los tamaños de pieza, las tolerancias mínimas calculadas, son mucho menores que las requeridas por la norma, la cual es realmente muy poco exigente.

Adicionalmente, se ha representado con líneas negras escalonadas las tolerancias utilizadas habitualmente en la práctica industrial. Para establecer estos valores se han tenido en cuenta los criterios utilizados normalmente por las empresas del sector cerámico español, la mayor parte de las cuales establecen tolerancias de 0,8 mm para piezas de tamaño final inferior a 450 mm. Para tamaños superiores, entre 450 y 900 mm, generalmente se incrementa la tolerancia hasta 1 mm, siendo este un estándar muy extendido, aunque un número no despreciable de firmas, para tamaños superiores a 600 mm aumentan las tolerancias hasta 1,5 mm, de ahí el doble trazo mostrado en el gráfico. Por encima de 900 mm se reducen ligeramente las exigencias incremen-

tando la tolerancia de calibre a 1,2 mm, con empresas que, de manera excepcional, fijan tolerancias en hasta 2,0 mm. Finalmente, al fabricar piezas de dimensiones iguales o superiores a 1200 mm, el acuerdo es generalizado y las tolerancias industriales se vuelven menos restrictivas situándose siempre en valores superiores a 1,5 mm, como es el caso de la empresa en la que se realizó el trabajo, que fabricaba piezas de 1200 mm con una tolerancia de 1,6 mm.

Comparar las líneas correspondientes a las tolerancias mínimas calculadas, con las referentes a la práctica industrial, es de gran interés para comprender las dificultades que encuentran las empresas para reducir sus referencias de producto por clases de calibre. De hecho, si la tolerancia mínima es inferior a la tolerancia exigida en la fabricación industrial, es técnicamente posible obtener piezas del mismo calibre, de lo contrario, no es viable conseguir piezas dentro de un único calibre.

Los tamaños de pieza para los cuales la tolerancia mínima calculada queda dentro de la zona sombreada de la figura 4.67, serían aquellos que técnicamente podrían ser fabricados manteniendo una clase única de calibre, con las tolerancias industriales menos exigentes. Así, se evidencia que, por debajo de un tamaño de pieza de 600 mm, las tolerancias industriales son acordes a los límites técnicos del proceso, ya que la tolerancia industrial se sitúa siempre por encima de la mínima, sobre todo en la composición EPP+, o sólo ligeramente por debajo, como sucede para la composición STD, en tamaños de pieza entre 450 y 600 mm. No obstante, para tamaños superiores a 600 mm, en cualquiera de las composiciones consideradas, si se sigue manteniendo una tolerancia industrial de 1 mm, al quedar esta por debajo de la mínima, es técnicamente imposible fabricar lotes de piezas con tamaños comprendidos dentro de una clase única de calibre. Este es el motivo por el cual, muchas empresas, a partir de valores cercanos a 600 mm se ven obligadas a reducir las exigencias de sus tolerancias, evitando de este modo la proliferación de calibres. Observaciones similares pueden realizarse para los tamaños superiores, en los cuales, aunque la tolerancia industrial se incrementa sensiblemente, esta se encuentra por debajo de la tolerancia mínima calculada, si se consideran los valores más exigentes fijados por la industria.

Por todo lo que se acaba de exponer es interesante replantear las tolerancias consideradas a nivel industrial para permitir la obtención de lotes de producto que, de manera generalizada, puedan clasificarse en su totalidad dentro de una clase de calibre única. Para ello se necesita fijar un valor de ΔD_3^* superior al error del método de medida ($\pm 4 \text{ kg/m}^3$), que sea alcanzable técnicamente y que genere tolerancias cercanas a las empleadas actualmente. Así pues, para proponer nuevas tolerancias de calibre a escala industrial, cumpliendo los requisitos anteriormente expuestos, se ha considerado un valor de ΔD_3^* superior en un 25% al valor de p , es decir de 10 kg/m^3 . Con estos supuestos y para una composición de soporte con un comportamiento intermedio entre el de la composición STD y la EPP+ se obtiene la variación de tolerancia con el tamaño de la pieza mostrada en la figura 4.68.

Desde el punto de vista industrial resulta más práctico trabajar con valores constantes de la tolerancia para diferentes intervalos de tamaño, antes que calcular, para cada tamaño, el valor de la tolerancia de acuerdo con el gráfico 4.68 o la ecuación 4.51. En

la tabla 4.15 se proponen esas tolerancias teniendo en cuenta el criterio anteriormente expuesto, comparando las tolerancias propuestas con las actuales.

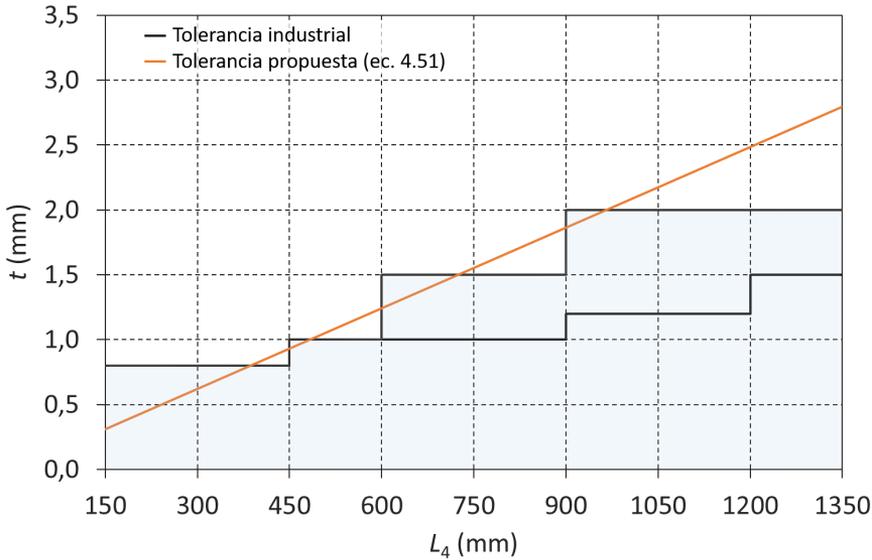


Figura 4.68. Propuesta de tolerancias industriales de calibre técnicamente asequibles.

A nivel industrial, debido a limitaciones técnicas existentes en la descarga automatizada, por periodos de tiempo prolongados, de datos de los equipos de clasificación, durante la realización del seguimiento productivo, no fue posible recopilar los datos de tamaño de todas las piezas que constituían los lotes evaluados. Únicamente se dispone de los datos referentes a los porcentajes de cada clase de calibre obtenidos al completarse la clasificación del lote. Por este motivo, al no poder determinar exactamente en qué clase de calibre se clasificaría cada una de las piezas, no es posible recalculer el efecto que tendría el control automático sobre la calidad de las clasificaciones finales de producto con las nuevas tolerancias propuestas en la tabla 4.15.

Tabla 4.15. Tolerancias de calibre propuestas para diferentes intervalos de tamaños de pieza.

L_4 (mm)	Tolerancia industrial (mm)	Tolerancia propuesta (mm)
< 450	0,8	1,0
450 - 750	1,0	1,5
750 - 900	1,0 - 1,5	2,0
900 - 1200	1,2 - 2,0	2,5

No obstante, un análisis pormenorizado de los lotes evaluados permitiría realizar una estimación aproximada del efecto de la adecuación de las tolerancias, considerando que la distribución de tamaños de cada lote responde a una distribución de tipo normal. Dicha distribución presentaría un valor medio igual al resultante de la distribución ponderada de calibres y una desviación estándar que proporcionaría porcentajes

de piezas dentro de cada calibre iguales a los obtenidos en las clasificaciones. Bajo este supuesto, en los gráficos de las figuras 4.69 y 4.70 se comparan, para los lotes de los tamaños mayoritarios, es decir, 675 mm x 450 y 450 mm x 450 mm, las calidades de las clasificaciones obtenidas industrialmente al fijar la tolerancia en 1 mm, con las calidades que se estima podrían obtenerse al ampliar la tolerancia a 1,5 mm.

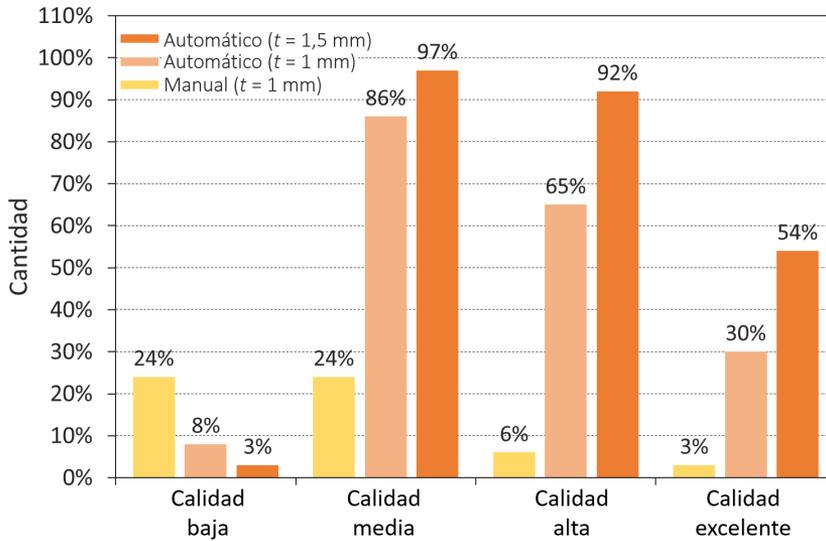


Figura 4.69. Estimación del impacto del sistema de control automático en la calidad de los lotes de 675 mm x 450 mm al adecuar la tolerancia de calibre.

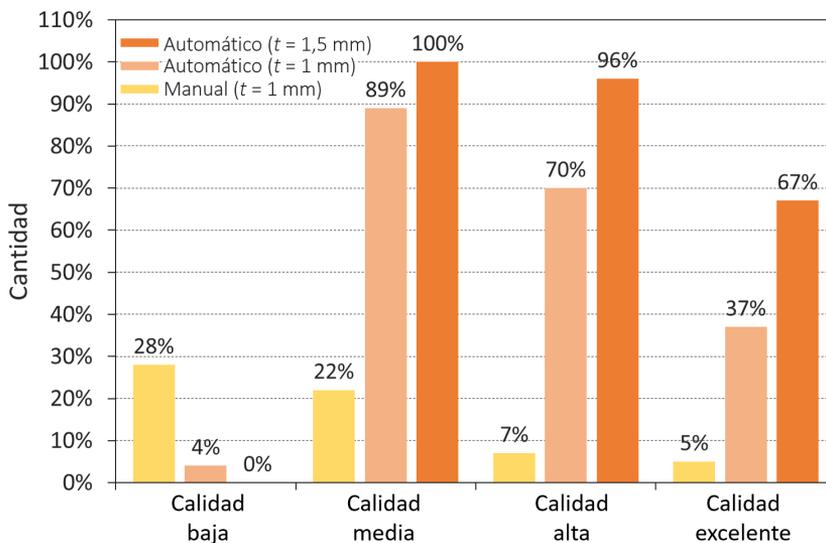


Figura 4.70. Estimación del impacto del sistema de control automático en la calidad de los lotes de 450 mm x 450 mm al adecuar la tolerancia de calibre.

Como puede apreciarse, un ligero cambio en las tolerancias consideradas, podría suponer una drástica mejora de las clasificaciones obtenidas. En particular, para el tamaño 675 mm x 450 mm, al ampliar la tolerancia de 1 mm a 1,5 mm, las estimaciones realizadas muestran posible un incremento del porcentaje de lotes de calidad excelente (calibre único), que llegaría a situarse en el 54 %, y una importante reducción de los lotes considerados de calidad baja (3 o más calibres) que pasaría a ser del 3 % (1 lote). En el caso de los lotes de 450 mm x 450 mm, con una misma adaptación de las tolerancias, esta mejora podría ser incluso superior, eliminándose completamente los lotes de calidad baja y aumentando los de calidad excelente hasta el 67 %. Para los dos tamaños, además, más del 90 % de los lotes fabricados tendría al menos un 95 % de sus piezas en un mismo calibre, pudiendo considerarse como de calidad alta.

Estos resultados ponen de manifiesto la importancia de la adecuación de las tolerancias dimensionales del producto a los límites tecnológicos del proceso de fabricación, independientemente de la estrategia de control adoptada. Y, en concreto, para el sistema de control implementado, evidencian su capacidad para establecer una gran proporción de los lotes de producto fabricados dentro de una misma clase de calibre.

4.3.5 Transferencia de los resultados de la investigación a empresas fabricantes de baldosas cerámicas

El sistema de control automático desarrollado, implementado y validado en esta investigación se ha basado en una patente de invención previa, referenciada como ES2249993-B1 y recogida en el apéndice A.5, la cual fue concedida a la Asociación de Investigación de las Industrias Cerámicas (AICE) en el año 2006. Dicha patente presentaba un nivel de desarrollo muy preliminar, sirviendo sólo como base para la tecnología y la metodología finalmente desplegada a nivel industrial. Mediante el desarrollo de la investigación aquí presentada se han realizado una serie de aportaciones, con respecto a la prueba de concepto inicialmente establecida con la patente, las cuales se detallan a continuación:

- El trabajo ha permitido implementar industrialmente la medida de la humedad de los soportes industriales recién prensados como base para diferentes estrategias de control automático destinadas a la mejora de la estabilidad dimensional de productos gresificados. Ello ha implicado la validación de la misma en condiciones reales de operación y el desarrollo de procedimientos específicos de uso y calibrado para garantizar una medida robusta en el tiempo de la humedad.
- La investigación planteada ha evaluado todas las posibles estrategias de control de la operación de conformado que podrían establecerse en base a una medida de la humedad del polvo de prensado.
- El estudio ha abordado la modelización de los cambios dimensionales experimentados por los soportes cerámicos durante su fabricación, evidenciando la particularidades de las distintas estrategias de control que podían asumirse y el efecto de las propiedades de la composición procesada sobre el comportamiento dimensional del material.

- Ha llevado a la práctica industrial una estrategia de control basada en la densidad aparente en seco y los procedimientos de seguimiento y realimentación que garantizan el correcto funcionamiento de la misma. Además, ha establecido las bases para la implementación de una estrategia global de control dimensional basada en la regulación de la operación de prensado fijando como variable objetivo un tamaño final de las piezas fabricadas.

Con todo ello, los buenos resultados proporcionados por la tecnología han permitido desplegar el sistema, hasta el año 2021, además de en la empresa en la que se desarrolla la investigación, en otras 11 empresas, tanto en España, como en otros países del mundo, algunas con más de un sistema instalado (ver A.6). En ellas se trabaja con composiciones de soporte de diferente naturaleza, todas destinadas a la fabricación de gres porcelánico en varios tamaños de pieza. El dispositivo empleado para la medida en continuo de la humedad de los soportes ha sido en todos los casos el mismo que el utilizado en este trabajo. Sin embargo, en lo referido a las comunicaciones con los ordenadores de automatización de las prensas, ha sido necesario adaptar las librerías de comunicación de la aplicación desarrollada a los protocolos y a las direcciones de memoria indicadas por el fabricante de cada prensa. Actualmente, la aplicación puede comunicarse con éxito con un total de 9 modelos diferentes de prensa hidráulica, fabricados por los dos proveedores mayoritarios de maquinaria del mercado, a través de los protocolos de comunicación Modbus TCP, Modbus RTU y Hostlink. A nivel de bus de comunicaciones, el sistema es compatible con RS-232, RS-485 (posteriormente encapsulado para hacerlo compatible con redes TCP) y con la mayoría de los estándares Ethernet/IP.

La aplicación de los resultados de este trabajo ha supuesto la transferencia de los resultados de una investigación desarrollada inicialmente en un centro tecnológico a un sector industrial que se está beneficiando de los mismos para mejorar su competitividad, a través del incremento de la calidad de sus productos y de la reducción de los costes de fabricación asociada a la disminución del número de calibres generados. El despliegue de los diferentes sistemas efectuado hasta la fecha ha estado además acompañado de un periodo de formación y asesoramiento tecnológico a las empresas receptoras. Ello ha permitido, no únicamente dotarlas de una nueva herramienta de control para la mejora de sus procesos, sino también de una serie de conocimientos asociados al uso de la misma y al comportamiento de los materiales durante su procesado.

Gracias a la recopilación de datos referentes al impacto en las clasificaciones de algunas de las empresas que utilizan el sistema de control en sus secciones de prensado, se dispone de más información sobre la eficacia del sistema. Concretamente, en la tabla 4.16 se recogen, junto a los datos ya expuestos en la tabla 1.4 sobre la incidencia típica de los calibres en un total de 1,5 millones de metros cuadrados de piezas de diferentes tamaños nominales fabricados por 3 empresas cerámicas, los datos referentes a las clasificaciones de los productos de gres porcelánico fabricados por seis empresas, que utilizan el control automático en sus prensas. Para que la comparativa tenga validez, en este último caso se ha considerado también una producción de 1,5 millones de metros cuadrados y los mismos tamaños de pieza.

Tabla 4.16. Impacto del sistema de control sobre el conjunto de las clasificaciones por tamaño de producto de varias empresas cerámicas.

Empresa	SIN control automático			CON control automático		
	Calibres	Calibres mayoritarios	ΔL_4^* (mm)	Calibres	Calibres mayoritarios	ΔL_4^* (mm)
A	5	2	5,0	1 - 2	1	1,3
B	6	3	6,0	1 - 2	1	2,4
C	5	2	5,5	1 - 3	2	2,4
D	-	-	-	1 - 2	1	2,0
E	-	-	-	1 - 2	1	1,6
F	-	-	-	1 - 3	2	1,2
Promedio	5 - 6	2 - 3	5,5	1 - 3	1 - 2	1,8

Estos resultados muestran la efectividad general del sistema para mejorar la estabilidad dimensional en la fabricación de productos de gres porcelánico. Para el conjunto de las empresas estudiadas, de una situación controlada con los procedimientos de supervisión convencionales, en la que lo habitual era conseguir entre 5 y 6 calibres de media, se ha pasado a una situación con control automático en la que, generalmente, los productos se clasificaban en uno o, a lo sumo, tres calibres. Además, al trabajar sin control, las tres empresas de las cuales se consiguieron datos tenían entre dos y tres calibres mayoritarios, mientras que tras implementar el sistema de control han pasado a tener, al igual que las otras tres empresas consultadas, entre uno y dos calibres mayoritarios. Y finalmente, el dato más revelador acerca de las bondades del sistema de control automático es el que indica que, en ausencia de control, las empresas tenían en promedio una dispersión del tamaño final de sus productos de hasta 5,5 mm. En cambio, el análisis del global de la producción controlada automáticamente muestra una variación máxima del tamaño de únicamente 1,8 mm. Es decir, el control automático del prensado ha contribuido a reducir en más de un 65 % la variabilidad dimensional de los productos fabricados.

Junto al incremento de la estabilidad dimensional proporcionado por el sistema de control, su implementación ha aportado de manera paralela otras mejoras al sector de fabricantes de baldosas cerámicas:

- En primer lugar, aunque la técnica de medida de la densidad aparente por inmersión en mercurio está en evidente regresión a nivel industrial, gracias a la aparición de métodos alternativos como el de la absorción de rayos X, la implementación del sistema desarrollado ha contribuido también, en cierto modo, a minimizar el uso de dicha técnica. En efecto, el disponer de una tecnología de control automático, que garantiza la estabilidad dimensional del producto terminado dentro de un determinado rango de variación, reduce considerablemente el número de controles de densidad aparente a realizar durante la fabri-

cación. Así, los controles de densidad at-line quedan relegados a la verificación del funcionamiento del sistema o de la homogeneidad en la distribución de las densidades aparentes, generalmente en húmedo, entre los soportes conformados en las diferentes cavidades del molde.

- En segundo lugar, siguiendo las últimas tendencias tecnológicas propias de la Industria 4.0 [102], el sistema de control automático puesto a punto ha permitido la digitalización de una etapa clave del proceso de fabricación como es el prensado. El incremento de la competitividad en los mercados hace que la mejora de los mecanismos de toma de decisiones conseguida con la digitalización de los procesos de fabricación suponga una gran oportunidad para optimizar la productividad y eficiencia de las empresas. El potencial económico de la conocida como Industria 4.0 reside en su habilidad para acelerar la toma de decisiones y adaptar los procesos internos de las organizaciones a los cambios del entorno, gracias al análisis continuo de grandes volúmenes de datos y a la interconexión entre los sistemas ciber-físicos y las personas [103] [104]. En este sentido, la aplicación desarrollada constituye en si misma un sistema ciber-físico del prensado al conectar en un mismo entorno el equipamiento de fábrica, con variables críticas para el procesado del producto, y permitir la interacción de los operarios de planta con el sistema para actuar en función de la información proporcionada por este.

Además, los modelos de comportamiento del material a lo largo de su procesado, que sientan las bases de las estrategias de control planteadas, incluyendo la finalmente implementada a nivel industrial, son el germen para la consecución de un “gemelo digital” del proceso de fabricación cerámica, tal y como ha quedado recogido recientemente en [94]. El “gemelo digital” es una representación virtual y dinámica del sistema productivo, que se mantiene perfectamente sincronizada con el sistema físico gracias a la combinación de modelos matemáticos y una elaboración en tiempo real de los datos facilitados por la instrumentación de proceso. El modelo de simulación mediante la técnica DES empleado en este trabajo, ampliado a otros aspectos de la fabricación como la gestión energética y de costes de fabricación, podría emplearse con tal finalidad. Disponer del “gemelo digital” de un proceso de manufactura ofrece la posibilidad de simular y optimizar el sistema productivo, contribuyendo a una mejora significativa de la competitividad, la productividad y la eficiencia. Además de estos aspectos propios de la gestión productiva, si el “gemelo digital” incorpora modelos de comportamiento del producto a lo largo del proceso de fabricación, como los validados en esta investigación, sus propiedades fisicoquímicas pueden ser evaluadas durante todo el proceso e interrelacionarlas con las variables productivas.

5

Conclusiones

Del estudio realizado se extraen las conclusiones que se exponen a continuación:

1. Se ha puesto a punto una técnica de medida sin contacto de la humedad de los soportes recién prensados basada en la espectrometría en el infrarrojo cercano. Se ha comprobado que una medida de la humedad realizada directamente sobre los soportes es completamente representativa de la humedad del polvo de prensado. La técnica ha sido validada en condiciones industriales de operación, demostrando ser lo suficientemente robusta y precisa como para utilizarla en el control de la operación de conformado. A su vez, se ha planteado y validado un procedimiento rápido de calibración del transductor de medida que asegura la precisión de las medidas a lo largo del tiempo.
2. Se ha propuesto y validado a nivel industrial un modelo del comportamiento del material cerámico durante la fabricación de baldosas de gres porcelánico, que permite reproducir los cambios dimensionales experimentados por los soportes en las diferentes etapas del proceso y estimar con precisión el tamaño final de las piezas, para diferentes condiciones de operación y características del polvo atomizado de partida.
3. Las ecuaciones constitutivas del material cerámico han sido implementadas en un modelo de simulación basado en la técnica de Simulación por Eventos Discretos (DES). La técnica ha demostrado ser válida para reproducir el comportamiento del proceso cerámico y evaluar diferentes estrategias de control destinadas a mejorar la estabilidad dimensional en productos de gres porcelánico.
4. La experimentación industrial ha permitido comprobar que la contracción de secado de los soportes, aunque es de pequeña magnitud, tiene influencia a la hora de estimar la densidad aparente en seco a partir de la densidad aparente en húmedo de los soportes recién prensados y de su humedad de conformado. En el modelo de comportamiento es posible asumir la contracción de secado como constante, para los rangos habituales de variación de la humedad y presión máxima de prensado.
5. La estimación de la expansión post-prensado de los soportes haciendo uso de las ecuaciones de comportamiento del modelo propuesto se realiza correctamente. La magnitud de este cambio dimensional no puede despreciarse si se desea realizar una estimación precisa del tamaño de las baldosas fabricadas.
6. La ecuación constitutiva del diagrama de compactación requiere de una adaptación a las condiciones industriales de operación para poder estimar con precisión la densidad aparente en seco de los soportes a partir de las variables de conformado. La introducción en la ecuación constitutiva de un término corrector (δ_{P_1}) de la presión de prensado, que tiene en consideración las discrepancias existentes entre los ciclos de prensado industriales y los empleados por la prensa de laboratorio utilizada en la preparación de los diagramas, permite estimar con una precisión de $\pm 1 \text{ kg/m}^3$ la densidad aparente en seco de los soportes.
7. Se ha constatado la necesidad de considerar la variabilidad en la compactabilidad del polvo atomizado, como consecuencia del carácter natural de las materias primas incluidas en su composición, para conseguir una estimación precisa

de la densidad aparente de los soportes a lo largo del tiempo. Para ello se ha incorporado un término independiente adicional (δ_{D_3}) en el diagrama de compactación industrial y se ha establecido un procedimiento de verificación rápido que permite seguir y compensar las fluctuaciones propias de la compresibilidad del polvo a través de dicho parámetro.

8. El escalado del diagrama de gresificación para su uso en condiciones industriales requiere de la introducción de un término corrector (δ_{T_4}) de la temperatura de cocción en la ecuación obtenida a nivel de laboratorio. La incorporación de este parámetro de adaptación permite que la ecuación constitutiva del diagrama de gresificación estime con precisión la contracción de cocción experimentada por los soportes industriales y, al mismo tiempo, posibilita la realización de pequeños ajustes sobre la misma que garantizan la precisión de las estimaciones a lo largo del tiempo.
9. El modelo de simulación implementado permite predecir con precisión la evolución del tamaño final de las piezas producidas en lotes de fabricación completos a partir de la evolución de la humedad del polvo atomizado y de la presión de prensado aplicada por la prensa sobre el mismo. Incluyendo la variabilidad propia del proceso, el modelo predice distribuciones de tamaño final de pieza acordes, tanto en valor medio, como en dispersión, a las registradas por los equipos de clasificación industrial.
10. Se han planteado varias estrategias de control anticipativo basadas en la medida de la humedad de los soportes recién prensados y la regulación de la presión específica máxima de prensado. La simulación de las mismas ha revelado que un control basado en la densidad aparente en húmedo es contraproducente respecto a la estabilidad dimensional del producto terminado, pues no solo no contribuye a su mejora, sino que la empeora, en la medida en que genera una mayor variación del tamaño final de las piezas que la propia ausencia de control.
11. La simulación de la evolución del tamaño final de las piezas procesadas en situaciones en las que no se realiza un control activo de la presión de prensado ha permitido comprobar que las composiciones con expansiones post-prensado elevadas proporcionan una mejor estabilidad dimensional, debido al efecto de compensación ejercido por el cambio del tamaño de las piezas en crudo sobre el cambio de contracción de cocción asociado a los cambios de densidad aparente en seco.
12. La simulación de una estrategia de control basada en la constancia de la densidad aparente en seco ha demostrado que esta es válida para mejorar sensiblemente la estabilidad dimensional durante la fabricación de baldosas de gres porcelánico. No obstante, las simulaciones muestran también que la técnica puede presentar limitaciones para composiciones con expansiones post-prensado elevadas y fabricando piezas de gran tamaño (>900 mm) por el efecto que tienen sobre el tamaño final las variaciones de la expansión post-prensado con las condiciones de conformado.
13. Una estrategia de control fundamentada en conseguir un tamaño final de pieza constante es la que proporcionaría, según los resultados propuestos por el mo-

delo de simulación, una mejora de la estabilidad dimensional en la fabricación de baldosas de gres porcelánico generalizada para diferentes tipos de composición e incluso grandes tamaños de pieza. Sin embargo, esta estrategia tiene la peculiaridad de generar una ligera fluctuación de la densidad aparente en seco, destinada a compensar, con cambios en la contracción de cocción, los cambios de expansión post-prensado experimentados por los soportes recién prensados.

14. Se ha implementado en una prensa hidráulica industrial un bucle anticipativo de control automático de la densidad aparente en seco, a través del desarrollo de una aplicación informática específica. Esta es capaz de comunicar con el propio ordenador de automatización de la prensa para comandar la presión específica de prensado de acuerdo a las medidas de humedad realizadas sobre los soportes y la determinación de la acción de control basada en el uso del diagrama de compactación industrial de la composición de trabajo.
15. Se ha establecido y verificado industrialmente un procedimiento de realimentación del bucle de control anticipativo para adaptar su funcionamiento a los cambios originados por perturbaciones secundarias, tales como los cambios en las condiciones de cocción y de la compresibilidad del polvo atomizado.
16. El bucle de control de la densidad aparente en seco mejora considerablemente las estabilidad dimensional de las piezas producidas y la calidad de las clasificaciones de los lotes de producto fabricados. Por un lado, reduce drásticamente el número de calibres, que pasa de una media de 5-6 antes de utilizar el control, a únicamente 1-2, tras su implementación. Y por otro lado, disminuye la dispersión en el tamaño final de las piezas fabricadas, situada en 5,5 mm, anteriormente a la instalación de la tecnología, y en 1,8 mm al automatizar el control de la densidad aparente en seco. En global, la aplicación del bucle de control propuesto en este trabajo mejora en prácticamente un 70 % la estabilidad dimensional del producto final.
17. Se ha demostrado que existe una tolerancia de calibre mínima por debajo de la cual es técnicamente imposible obtener baldosas cerámicas de una misma clase de calibre. Para evitar esto la tolerancia empleada industrialmente debe ser superior a la tolerancia mínima, la cual es una función lineal del tamaño de pieza fabricado, que depende, de las condiciones de operación, de la variabilidad del proceso y del comportamiento del polvo de prensas durante su procesado. Una correcta adecuación de las tolerancias dimensionales mejora el efecto, no solo de la estrategia de control validada, sino de cualquier otra que pueda establecerse.

6

Líneas futuras de investigación

Los resultados del trabajo han puesto de manifiesto la posibilidad de optimizar el desarrollo realizado mediante la puesta en marcha de las dos líneas de investigación que se plantean a continuación:

- **Implementación y validación de una estrategia de control basada en el tamaño final**

Se considera muy interesante validar a nivel industrial el funcionamiento de una estrategia de control automático basada directamente en la constancia del tamaño final de las piezas fabricadas, asumiendo ligeras variaciones en la densidad aparente en seco de los soportes. Ello implicará, por una parte, realizar las modificaciones oportunas en la aplicación de control para poder establecer consignas de trabajo en forma de tamaño final de pieza y, por otra parte, incorporar en la misma, junto a los diagramas de compactación de las recetas de trabajo, los diagramas de gresificación y el de expansión post-prensado del material, necesarios para poder realizar las estimaciones del tamaño de la pieza en función de las variables de procesado.

Al mismo tiempo, será imprescindible establecer, desde un inicio, un procedimiento de realimentación del bucle anticipativo para asegurar la precisión del control, al compensar las fluctuaciones originadas en el proceso por las perturbaciones secundarias que puedan darse, más allá de las perturbaciones de la propia humedad de conformado.

- **Establecer una realimentación automática de los bucles de control anticipativos**

Se ha demostrado que una de las limitaciones del bucle anticipativo de control basado en la densidad aparente en seco radicaba en la necesidad de efectuar una realimentación del mismo en base a medidas puntuales de variables de proceso, tales como, la propia densidad aparente en seco o el tamaño final de la pieza. Estos mismos inconvenientes se tendrían con una estrategia de control basada en el tamaño final de pieza, independientemente de que esta pudiera proporcionar una mejora de la estabilidad dimensional mayor que la originada por la estrategia validada en esta investigación.

Aunque se dispone de equipos al final del proceso, que podrían proporcionar medidas en continuo de las dimensiones de todas las piezas fabricadas, por la propia operativa del proceso, a no ser que se recurra a elaborados y costosos procedimientos manuales de análisis de datos, se hace muy complicado el correlacionar las propiedades finales de una baldosa con sus condiciones concretas de operación. En efecto, debido a la existencia en las plantas de los pulmones de almacenamiento intermedio y a la inversión de los flujo de carga y descarga de las vagonetas de transporte y almacenamiento de piezas, el proceso de fabricación de baldosas no se comporta como un proceso completamente FIFO. En consecuencia, no puede garantizarse que, por ejemplo, dos piezas que hayan sido conformadas en el mismo ciclo de prensado, vayan a llegar al equipo de clasificación final en el mismo momento, sino que entre ellas es probable que

exista un intervalo de tiempo que puede llegar a ser del orden de minutos e incluso horas.

Por todo ello se considera oportuno, y de hecho ya se han iniciado algunos trabajos en este sentido, el establecer un procedimiento de trazado del producto a lo largo del proceso que permita identificar inequívocamente el paso de las piezas por cada una de las etapas del proceso de fabricación. Este sistema consta, por un lado, como se observa en las imágenes de la figura 6.1, de un dispositivo de marcado, localizado cerca de la salida de la prensa, que es capaz de imprimir, en un bajo relieve situado en el anverso de las piezas, un código identificador único de tipo DM (Data Matrix). Y por otro lado, de una serie de cámaras de visión, colocadas estratégicamente a lo largo de la línea de fabricación, que permiten identificar, mediante la lectura del código, el paso de cada pieza. De este modo, se establece un registro temporal en el que el momento de la impresión define el tiempo de conformado de la pieza y la identificación del código por parte de las cámaras, los tiempos de entrada y/o salida de la misma en cada fase del proceso. Si paralelamente, se mantiene otro registro temporal con el estado de las variables de operación a lo largo de todo el proceso de fabricación es posible cruzar ambos registros para saber exactamente en que condiciones se ha procesado cada pieza concreta.



Figura 6.1. Sistema de trazabilidad en fase de desarrollo. De izquierda a derecha, cabezal de impresión, código DM y cámara registrando el paso de soportes codificados.

Para ejemplificar la potencialidad del sistema planteado, en la figura 6.2 se muestra la evolución de las variables de conformado (presión y humedad) durante el control automático del prensado de un lote de piezas de gres porcelánico de formato nominal cocido 600 mm x 600 mm compactadas en un molde de tres cavidades. En este gráfico, el eje de abscisas, en lugar de tener una escala temporal, recoge los códigos identificadores de cada soporte conformado. En la figura 6.3 se representa, también en función del código de pieza, la evolución del tamaño de las mismas registrado justo a la salida del horno de cocción mediante un equipo de caracterización dimensional en línea. Como puede observarse al comparar ambas gráficas, el tamaño final de pieza, aunque es bastante estable para el conjunto del lote, tiene una ligera variación que es acorde al cambio de tamaño en crudo que originaría la expansión post-prensado como consecuencia de los cambios de humedad y presión aplicados.

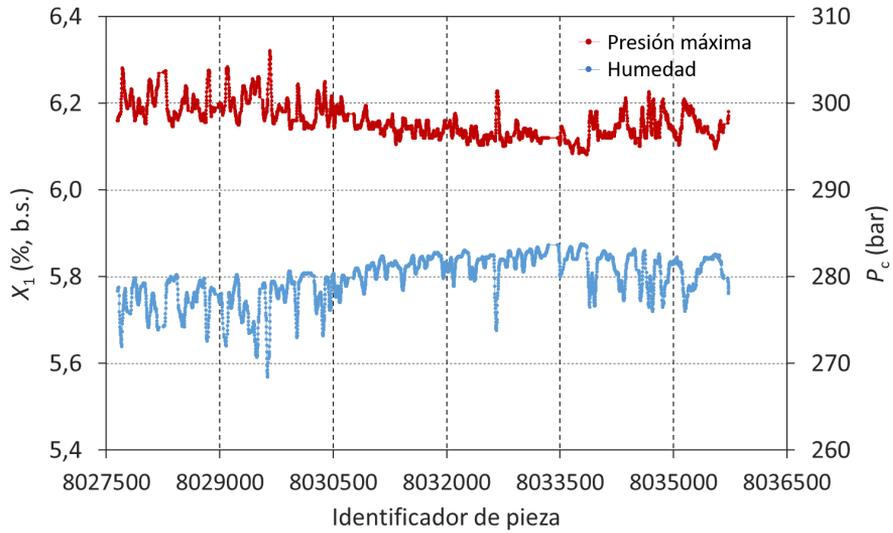


Figura 6.2. Evolución de la presión y de la humedad de prensado en función del número de identificación del soporte durante la fabricación de un lote de baldosas.

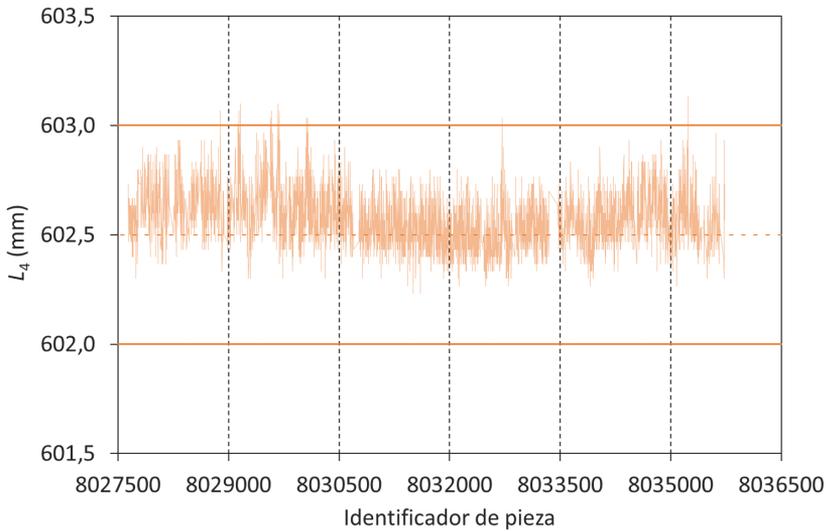


Figura 6.3. Evolución del tamaño de pieza registrado en continuo a la salida del horno en función del número de identificación del soporte durante la fabricación de un lote de baldosas.

En efecto, a medida que aumenta la humedad del polvo (trazo azul en la figura 6.2), el sistema de control disminuye la presión máxima de prensado (trazo rojo en la figura 6.2), reduciéndose al mismo tiempo la expansión post-prensado de

los soportes y con ello su tamaño en crudo. Puesto que la densidad aparente en seco se mantiene constante, por efecto del control, la contracción de cocción es también constante y el cambio de tamaño en crudo se refleja directamente en el tamaño final.

Este sencillo análisis que se acaba de realizar, habría sido muy complicado de hacer sin disponer de un identificador en cada pieza a través del cual correlacionar una propiedad de las piezas, como es su tamaño, con las condiciones en las que se conformaron. Es de esperar que un sistema de estas características abrirá las puertas a la realimentación del control automático del proceso, no solo desde el punto de vista del control de la estabilidad dimensional del producto, sino de cualquier otra propiedad final del mismo que se vea afectada por las variables de operación. Esta acción será prácticamente directa en plantas sin pulmón de almacenamiento intermedio en las que los parámetros del bucle de control podrán ser adaptados en base a las medidas de tamaño arrojadas en continuo por los equipos de clasificación. No obstante, en plantas con almacenamiento intermedio, con un adecuado tratamiento de los datos, este tipo de realimentación también sería viable y supondría una mejora considerable en la aplicación industrial de las estrategias de control planteadas y validadas en este trabajo.

Junto al inicio de estas dos líneas de investigación, se considera también interesante evaluar la influencia de ciertas propiedades de los materiales fabricados sobre la estabilidad dimensional de los productos fabricados, que no han podido ser estudiadas en profundidad en este trabajo:

- **Estudio de la influencia del esmalte sobre la estabilidad dimensional del producto**

En el trabajo se ha puesto de manifiesto que la tipología de esmalte aplicado sobre los soportes tiene cierta influencia sobre el tamaño final de las piezas, sobre todo si para el correcto desarrollo de la capa decorativa se necesita además modificar la temperatura máxima de cocción. A pesar de que industrialmente este hecho se ha solventado utilizando diferentes densidades aparentes en seco objetivo, en función de las características del producto terminado, sería oportuno profundizar en las causas que originan este comportamiento. De este modo, puede plantearse un estudio en el que se analice, a nivel industrial, el efecto sobre el tamaño final de diferentes tipologías y capas de esmalte aplicadas, así como de las condiciones de procesado.

- **Estudio del efecto sobre la absorción de agua de las acciones de mejora de la estabilidad dimensional de productos gresificados**

Durante la realización del trabajo, se ha comprobado puntualmente que la absorción de agua de las piezas cocidas se mantenía por debajo del límite normativo de 0,5 %, al aplicar una estrategia de control basada en la densidad aparente en seco. Sin embargo, se considera interesante efectuar un estudio más detallado para verificar, sobre todo en el caso de aplicar una estrategia de control basada en el tamaño final de las piezas, si en los márgenes de variación de la

densidad aparente en seco empleados, la absorción de agua de las piezas es correcta. Un estudio de tales características sería especialmente importante si la tecnología desarrollada se aplicara en el control de la estabilidad dimensional de composiciones de gres esmaltado, en las cuales la dependencia de la absorción de agua con la densidad aparente en seco es mucho más acusadas que en las composiciones de gres porcelánico como las empleadas en la investigación.

A

Apéndice

A.1 Datos experimentales y parámetros de ajuste de las ecuaciones constitutivas

A continuación se recogen los datos experimentales obtenidos en la caracterización realizada a nivel de laboratorio de las dos composiciones de soporte mayoritariamente empleadas en el desarrollo de la investigación. Se incluyen también los parámetros de ajuste de las ecuaciones constitutivas del comportamiento de ambas composiciones empleados en el desarrollo de la simulación del proceso de fabricación y el control de la operación de conformado.

A.1.1 Diagramas de compactación

Tabla A.1. Datos experimentales de la densidad aparente en seco (D_3 (kg/m³)) empleados en la elaboración del diagrama de compactación de la composición de soporte STD.

Presión, P_1 (MPa)	Humedad, X_1 (%)			
	4,0	5,0	6,1	7,0
25	1901	1920	1941	1960
35	1944	1962	1980	1997
45	1977	1992	2009	2025
55	2003	2017	2032	2047

Tabla A.2. Datos experimentales de la densidad aparente en seco (D_3 (kg/m³)) empleados en la elaboración del diagrama de compactación de la composición de soporte EPP+.

Presión, P_1 (MPa)	Humedad, X_1 (%)			
	4,1	5,1	6,0	7,1
25	1870	1887	1902	1921
35	1918	1935	1948	1966
45	1955	1970	1983	2000
55	1984	1999	2011	2027

Tabla A.3. Parámetros de ajuste de las ecuaciones constitutivas (ecuación 1.25) de los diagramas de compactación de las dos composiciones de trabajo.

Composición	'a' (kg/m ³)	'b' (kg/m ³)	'c' (kg/m ³)	'd' (kg/m ³)
STD	-5,33	148,27	36,65	1346,51
EPP+	-3,02	160,81	26,71	1281,48

A.1.2 Expansión postprensado

Tabla A.4. Datos experimentales de la expansión postprensado ($-S_2$ (%)) de la composición de soporte STD.

Presión, P_1 (MPa)	Humedad, X_1 (%)			
	4,0	5,0	6,1	7,0
25	0,51	0,49	0,47	0,45
35	0,54	0,51	0,48	0,46
45	0,57	0,54	0,50	0,46
55	0,60	0,56	0,51	0,47

Tabla A.5. Datos experimentales de la expansión postprensado ($-S_2$ (%)) de la composición de soporte EPP+.

Presión, P_1 (MPa)	Humedad, X_1 (%)			
	4,1	5,1	6,0	7,1
25	1,21	1,17	1,13	1,09
35	1,26	1,21	1,16	1,10
45	1,30	1,24	1,19	1,12
55	1,35	1,28	1,22	1,14

Tabla A.6. Parámetros de ajuste de las ecuaciones constitutivas (ecuación 1.27) para la determinación de la expansión postprensado de las dos composiciones de trabajo.

Composición	$'e' 10^4$ (MPa $^{-1}$)	$'f' 10^3$	$'g' 10^3$ (MPa $^{-1}$)	$'h' 10^1$
STD	-8,452	2,641	6,414	4,224
EPP+	-8,537	-20,190	8,001	11,810

Nótese que estos parámetros de ajuste proporcionan valores de la expansión mayores que cero. En las ecuaciones del modelo constitutivo, de la forma en que han quedado definidas, es necesario que los valores de la expansión post-prensado adopten valores negativos. Por ello, estos parámetros deben emplearse cambiados de signo en las estimaciones de tamaño y los cálculos de las acciones de control.

A.1.3 Contracción de secado

El cambio dimensional experimentado por las probetas de laboratorio, como consecuencia de su contracción de secado, es excesivamente pequeño como para establecer con precisión una ecuación constitutiva que se ajuste adecuadamente a la ecuación 1.22 propuesta. De ahí que los siguientes datos experimentales solo sirvan para evidenciar la baja contracción de secado experimentada por las dos composiciones de trabajo. Los valores negativos de contracción no tienen sentido físico y denotan la dificultad para determinar un valor preciso de este parámetro en condiciones de laboratorio.

Tabla A.7. Datos experimentales de la contracción de secado (S_3 (%)) de la composición de soporte STD.

Presión, P_1 (MPa)	Humedad, X_1 (%)			
	4,0	5,0	6,1	7,0
25	0,058	0,025	0,041	0,033
35	0,041	0,008	0,012	-0,001
45	0,033	0,012	0,016	0,008
55	0,002	0,008	-0,008	0,016

Tabla A.8. Datos experimentales de la contracción de secado (S_3 (%)) de la composición de soporte EPP+.

Presión, P_1 (MPa)	Humedad, X_1 (%)			
	4,1	5,1	6,0	7,1
25	0,040	0,033	0,043	0,028
35	0,021	0,028	0,024	0,012
45	0,022	0,010	0,024	-0,007
55	-0,002	0,009	0,001	-0,002

A.1.4 Diagramas de gresificación

Tabla A.9. Datos experimentales de la contracción de cocción (S_4 (%)) de la composición de soporte STD.

Densidad, D_3 (kg/m ³)	Temperatura, T_4 (°C)				
	1130	1150	1170	1190	1210
1920	4,70	5,93	6,73	7,06	7,06
1950	4,52	5,65	6,39	6,68	6,53
1980	4,38	5,49	6,09	6,25	6,00
2010	4,21	5,34	5,78	5,86	5,52
2030	4,09	5,14	5,57	5,57	5,12

Tabla A.10. Datos experimentales de la contracción de cocción (S_4 (%)) de la composición de soporte EPP+.

Densidad, D_3 (kg/m ³)	Temperatura, T_4 (°C)				
	1130	1150	1170	1190	1210
1920	5,33	6,67	7,68	8,02	7,75
1950	5,18	6,52	7,35	7,61	7,31
1980	5,04	6,30	7,03	7,05	6,60
2010	4,89	6,06	6,63	6,62	6,10
2030	4,80	5,85	6,39	6,31	5,85

Tabla A.11. Parámetros de ajuste de las ecuaciones constitutivas (ecuación 1.29) de los diagramas de gresificación de las dos composiciones de trabajo.

Composición	$'m' 10^7$ (m ³ /(kg K ²))	$'n' 10^3$ (K ⁻²)	$'p' 10^3$ (m ³ /(kg K))	$'q'$ (K ⁻¹)	$'r' 10^1$ (m ³ /kg)	$'s' 10^{-3}$
STD	-8,172	1,051	1,758	-2,134	-9,485	1,084
EPP+	1,875	-1,066	-0,611	2,857	4,470	-1,853

A.2 Datos experimentales de validación de la tecnología de medida de la humedad por espectrometría NIR

Tabla A.12. Datos experimentales de validación del funcionamiento de la tecnología de medida de la humedad por espectrometría NIR para la composición de trabajo STD no coloreada.

Lado derecho tolva alimentación			Lado izquierdo tolva alimentación		
Lectura equipo (%)	Humedad polvo (%)	Diferencia (%)	Lectura equipo (%)	Humedad polvo (%)	Diferencia (%)
6,13	6,25	-0,12	6,16	6,23	-0,07
6,18	6,20	-0,02	6,20	6,21	-0,01
6,21	6,15	0,06	6,24	6,13	0,11
6,00	6,11	-0,11	5,99	6,13	-0,14
6,05	5,97	0,08	6,05	5,95	0,10
5,88	5,89	-0,01	5,89	5,89	0,00
5,91	5,91	0,00	5,90	5,92	-0,02
5,96	5,94	0,02	5,94	5,93	0,01
6,24	6,22	0,02	6,26	6,20	0,06
6,32	6,27	0,05	6,29	6,30	-0,01
6,26	6,21	0,05	6,27	6,19	0,08
6,47	6,41	0,06	6,50	6,40	0,10
6,46	6,45	0,01	6,47	6,43	0,04
6,48	6,41	0,07	6,49	6,41	0,08
6,45	6,40	0,05	6,45	6,41	0,04
6,53	6,39	0,14	6,54	6,42	0,12
6,50	6,41	0,09	6,53	6,44	0,09
6,62	6,75	-0,13	6,62	6,76	-0,14
6,61	6,65	-0,04	6,61	6,68	-0,07
6,43	6,52	-0,09	6,41	6,54	-0,13
6,57	6,69	-0,12	6,56	6,68	-0,12
6,57	6,65	-0,08	6,57	6,66	-0,09
6,51	6,55	-0,04	6,54	6,58	-0,04
6,56	6,52	0,04	6,53	6,54	-0,01
6,73	6,73	0,00	6,72	6,73	-0,01
6,70	6,73	-0,03	6,69	6,73	-0,04
6,57	6,49	0,08	6,56	6,46	0,10

Tabla A.13. Datos experimentales de la evaluación de la influencia de la incorporación de un pigmento en la composición STD sobre la medida de la humedad por espectrometría NIR.

STD		STD + 0,5 % pigmento negro		STD + 0,25 % pigmento gris		STD + 0,25 % pigmento rojo	
Lectura (%)	Humedad (%)	Lectura (%)	Humedad (%)	Lectura (%)	Humedad (%)	Lectura (%)	Humedad (%)
6,88	6,82	5,90	5,92	6,05	6,07	5,99	5,99
6,12	6,11	5,97	6,07	6,22	6,32	5,92	5,87
6,13	6,12	6,09	6,05	6,24	6,30	5,81	5,96
6,63	6,50	5,96	6,04	6,63	6,47	5,85	5,92
6,75	6,79	6,28	6,22	6,45	6,28	5,87	5,75
6,67	6,72	6,20	6,13	6,40	6,32	5,69	5,65
6,75	6,87	6,05	6,07	6,05	5,99	6,13	6,12
6,65	6,69	6,00	5,84	6,12	5,98	5,80	5,80
6,40	6,36	6,00	5,81	6,21	6,11		
6,12	6,13	5,93	5,83	6,37	6,45		
6,10	6,00	5,96	5,86	6,32	6,35		
6,11	5,92	5,79	5,74	6,54	6,40		
6,05	6,01	6,04	6,10	5,94	5,76		
6,03	6,01	5,97	6,10				
6,20	6,17	6,09	6,15				
6,09	5,99	6,19	6,25				
6,04	5,98	5,69	5,61				
6,11	5,97						
6,07	6,01						
6,02	5,83						
6,20	6,08						
6,27	6,08						
5,86	5,93						
5,92	5,94						
6,05	6,04						
6,29	6,11						
6,31	6,16						
6,11	5,99						
6,45	6,36						
5,89	5,81						
5,95	5,79						
5,65	5,67						
6,28	6,20						

Tabla A.14. Datos experimentales de la evaluación de la influencia de la presencia de relieve sobre los soportes de la composición STD sobre la medida de la humedad por espectrometría NIR.

Acabado relieve		Acabado liso	
Lectura (%)	Humedad (%)	Lectura (%)	Humedad (%)
6,85	6,85	6,88	6,82
6,11	6,15	6,12	6,11
6,17	6,10	6,13	6,12
6,10	6,14	6,63	6,50
6,12	5,98	6,75	6,79
6,15	5,94	6,67	6,72
6,04	6,00	6,75	6,87
5,99	6,00	6,65	6,69
6,22	6,21	6,40	6,36
5,88	5,90	6,12	6,13
5,88	5,99	6,10	6,00
6,02	5,99	6,11	5,92
6,10	5,96	6,05	6,01
6,48	6,39	6,03	6,01
5,85	5,76	6,20	6,17
5,97	5,82	6,09	5,99
5,76	5,72	6,04	5,98
6,30	6,22	6,11	5,97
6,23	6,12	6,07	6,01
6,24	6,19	6,02	5,83
5,91	5,93	6,20	6,08
6,01	6,11	6,27	6,08
5,93	6,06	5,86	5,93
6,01	6,01	5,92	5,94
6,31	6,25	6,05	6,04
6,18	6,13	6,29	6,11
6,10	6,04	6,31	6,16
5,95	5,84	6,11	5,99
5,90	5,86	6,45	6,36
6,15	6,22	5,89	5,81
6,01	5,88	5,95	5,79
5,80	5,76	5,65	5,67
5,78	5,62	6,28	6,20
5,80	5,73		
6,16	6,09		
6,14	6,11		
5,98	6,01		
6,62	6,51		
6,59	6,65		

A.3 Error en la estimación de la densidad aparente en seco mediante el diagrama de compactación

El error cometido en la estimación de la densidad aparente en seco ($\epsilon(D_3)$), mediante la ecuación del diagrama de compactación industrial, puede calcularse haciendo uso de la siguiente expresión:

$$\epsilon(D_3) = \pm t_{\alpha,n} s_{D_3} \quad (\text{A.1})$$

En esta ecuación, $t_{\alpha,n}$ es el parámetro de una ley de distribución de tipo t-Student para un nivel de significación α , con n grados de libertad, y s_{D_3} es la desviación estándar cometida en la estimación de la densidad aparente en seco. Al depender esta de la presión específica máxima y de la humedad del polvo, la desviación estándar de la densidad puede determinarse a partir de las desviaciones estándar de la presión (s_{P_1}) y de la humedad (s_{X_1}) aplicando cálculo diferencial:

$$s_{D_3}^2 = \left(\frac{\partial D_3}{\partial P_1} \Big|_{X_1} \right)^2 s_{P_1}^2 + \left(\frac{\partial D_3}{\partial X_1} \Big|_{P_1} \right)^2 s_{X_1}^2 \quad (\text{A.2})$$

donde las derivadas parciales podrían obtenerse derivando directamente la ecuación 4.10, de forma que:

$$s_{D_3}^2 = \left(\frac{(aX_1 + b)}{(P_1 + \delta_{P_1})} \right)^2 s_{P_1}^2 + (a \ln(P_1 + \delta_{P_1}) + c)^2 s_{X_1}^2 \quad (\text{A.3})$$

Así, haciendo uso de la ecuación A.3, a modo de ejemplo, en las tablas A.15 y A.16 se muestran los errores cometidos en la estimación de las densidades correspondientes a los datos experimentales utilizados para la determinación de los diagramas de compactación de las dos composiciones de trabajo. Para efectuar dichos cálculos se ha considerado un intervalo de confianza del 95 % ($\alpha = 0,05$) y 13 grados de libertad. Además, la desviación estándar en la medida de la presión de la prensa industrial se ha fijado en un valor de 0,15 MPa y la de la medida de humedad en 0,08 %, ambos obtenidos durante las experiencias realizadas en planta.

Como puede observarse, para ambas composiciones, con el grado de significancia considerado, el error cometido en la estimación es prácticamente independiente de la humedad del polvo y de la presión máxima de prensado. Únicamente se aprecia una ligera disminución del mismo con el aumento de la presión de prensado en el caso de la composición EPP+. El error medio en la estimación de la densidad aparente en seco para ambas composiciones se sitúa en $\pm 3 \text{ kg/m}^3$. Es interesante remarcar que el error determinado coincide prácticamente con el propio del método de medida de la densidad aparente por inmersión en mercurio que, como se ha comentado a lo largo del trabajo, resulta ser de $\pm 4 \text{ kg/m}^3$.

Tabla A.15. Errores en la estimación de la densidad aparente en seco mediante el diagrama de compactación industrial de la composición de soporte STD.

		Humedad, X_1 (%)			
Presión, P_1 (MPa)		4,0	5,0	6,1	7,0
	25	3	3	3	3
	35	3	3	3	3
	45	3	3	3	3
	55	3	3	3	3

Tabla A.16. Errores en la estimación de la densidad aparente en seco mediante el diagrama de compactación industrial de la composición de soporte EPP+.

		Humedad, X_1 (%)			
Presión, P_1 (MPa)		4,1	5,1	6,0	7,1
	25	3	3	3	3
	35	3	3	3	3
	45	3	3	3	3
	55	2	2	2	2

A.4 Cálculo de la acción de control para una estrategia de control basada en el tamaño final de la pieza

Para determinar la presión de prensado que permite llevar a cabo una estrategia de control basada en el tamaño final de la pieza se hace necesario aplicar el método de Newton-Rapshon para la resolución de la ecuación 4.33. Este método, también conocido como método de Newton, es una forma rápida de encontrar una buena aproximación de la raíz de una función real del tipo $f(x) = 0$. Para ello utiliza la idea de que una función continua y derivable puede aproximarse mediante una línea recta tangente a ella.

Suponiendo que se desea obtener la raíz de una función continua y derivable $f(x)$, la cual se sabe que está cerca del punto $x = x_0$, el método de Newton-Rapshon indica que una aproximación posible a dicha raíz viene dada por la siguiente ecuación:

$$x_1 = x_0 - \frac{f(x_0)}{f'(x_0)} \quad (\text{A.4})$$

Este procedimiento debe repetirse hasta alcanzarse una determinada precisión mínima deseada h , de manera que $|x_n - x_{n+1}| < h$, y generalizando el método según la ecuación A.5.

$$x_{n+1} = x_n - \frac{f(x_n)}{f'(x_n)} \quad (\text{A.5})$$

Para el caso de la ecuación de control planteada, la función a resolver y su derivada para el valor de la presión de prensado en cada una de las iteraciones de resolución, P_{1n} , se determinan mediante las siguientes expresiones:

$$\begin{aligned} f(P_{1n}) &= (100 - (EP_{1n} + F)) \\ (100 - S_3)(100 - (M(A \ln(P_{1n} + \delta_{P_1}) + B) + N)) - \frac{L_{4SF}}{L_0} 10^6 &= 0 \end{aligned} \quad (\text{A.6})$$

$$\begin{aligned} f'(P_{1n}) &= E(S_3 - 100)(100 - (M(A \log(P_{1n} + \delta_{P_1}) + B) + N)) \\ - \frac{AM(100 - (EP_{1n} + F))(100 - S_3)}{(P_{1n} + \delta_{P_1})} &= 0 \end{aligned} \quad (\text{A.7})$$

Además, la algoritmia de resolución implementada en el programa de simulación itera la determinación del valor de la presión de prensado hasta obtener un $h < 0,001$.

A.5 Patente de invención



(1) Número de publicación: **2 249 993**

(2) Número de solicitud: 200402240

(5) Int. Cl.:

G05D 15/00 (2006.01)

B30B 15/22 (2006.01)

G05D 5/00 (2006.01)

B28B 17/00 (2006.01)

(12)

PATENTE DE INVENCION

B1

(22) Fecha de presentación: **20.09.2004**

(43) Fecha de publicación de la solicitud: **01.04.2006**

Fecha de la concesión: **27.04.2007**

(45) Fecha de anuncio de la concesión: **16.05.2007**

(45) Fecha de publicación del folleto de la patente:
16.05.2007

(73) Titular/es: **ASOCIACIÓN DE INVESTIGACIÓN DE
LAS INDUSTRIAS CERÁMICAS A.I.C.E.
Campus Universitario
Ctra. de Borriol, Km. 0,7
12004 Castellón de la Plana, Castellón, ES**

(72) Inventor/es: **Amorós Albaro, José Luis;
Mallol Gasch, José Gustavo;
Llorens Mesado, Domingo Tomás y
Cantavella Soler, Vicente**

(74) Agente: **Ungria López, Javier**

(54) Título: **Método y dispositivo de control automático de la densidad aparente de piezas cerámicas.**

(57) Resumen:

Método y dispositivo de control automático de la densidad aparente de piezas cerámicas.

El método consiste en efectuar una medida sin contacto y en continuo de la humedad de las piezas compactadas, o del polvo de prensas utilizado en su fabricación, y a partir de ella modificar o no, automáticamente, la presión de prensado de manera que se mantenga constante la densidad aparente en seco de los soportes cerámicos recién prensados.

El dispositivo consta de un sensor (4) que permite medir, sin contacto y en continuo, la humedad a la que se conforma una pieza cerámica (3) en una prensa Industrial (1). La medida del sensor se introduce en un ordenador (5) en el que se calcula la presión máxima de conformado.

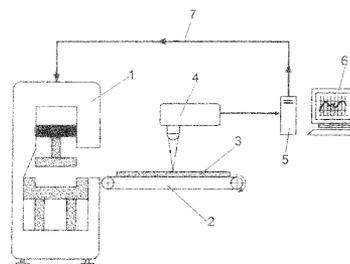


FIG.1

ES 2 249 993 B1

Aviso: Se puede realizar consulta prevista por el art. 37.3.8 LP.

ES 2 249 993 B1

DESCRIPCIÓN

Método y dispositivo de control automático de la densidad aparente de piezas cerámicas.

5 **Objeto de la invención**

La presente invención, tal y como se expresa en el enunciado de esta memoria descriptiva, se refiere a un método y dispositivo de control automático de la densidad aparente de piezas cerámicas cuya finalidad consiste en mantener constante la densidad aparente de los soportes de las baldosas cerámicas conformadas industrialmente.

10 La medida en continuo de la humedad y presión máxima de compactación de las baldosas cerámicas permite conocer su densidad aparente en seco, ya que las tres variables están relacionadas matemáticamente por un diagrama de compactación. A partir de esta relación se calcula la presión necesaria para mantener constante la densidad aparente en seco. Este valor se alimenta al sistema de control de la correspondiente prensa, modificando su funcionamiento en caso necesario.

15 **Antecedentes de la invención**

20 Numerosos trabajos desarrollados por la Asociación de Investigación de las Industrias Cerámicas (AICE) concertada con la Universidad Jaime I para constituir el Instituto Mixto de Tecnología Cerámica (en adelante ITC) establecieron que la porosidad de los soportes cerámicos recién prensados es la variable que gobierna su comportamiento durante las etapas del proceso de fabricación (secado, decoración, cocción, etc.). La variable macroscópica directamente relacionada con la porosidad de las piezas es la densidad aparente de la pieza seca o densidad aparente en seco.

25 En distintas publicaciones del ITC se establece que, para un polvo dado, las variables industriales que determinan la densidad aparente en seco (D_{ap}) de los soportes prensados son: el contenido en humedad del polvo (H) y la presión máxima de prensado (P), relacionadas mediante el diagrama de compactación

$$D_{ap} = (m H + b) \log(P) + M H + B \quad \text{Ecuación 1}$$

30 donde m, b, M y B son parámetros empíricos relacionados con la naturaleza del polvo que se prensa.

Estos conocimientos dieron lugar a tesis doctorales, numerosas publicaciones en revistas científicas especializadas y diversas comunicaciones en Congresos, de los cuales se citan, al final de este apartado, los más relevantes (1 a 16).

35 Puesta de manifiesto la extraordinaria importancia de la densidad aparente en el control del proceso de producción de baldosas cerámicas, en el ITC se desarrolló un método de medida de esta variable por inmersión de trozos de piezas en mercurio (17), que fue patentado por el propio Instituto (P0531109) y cuyo uso se extendió, rápidamente a todas las empresas fabricantes de baldosas cerámicas.

40 Este procedimiento es la base del método actual de control de la operación de prensado en todas las plantas de fabricación de baldosas cerámicas (18). El método consiste en el muestreo manual del flujo de baldosas por parte de un operador que tras su fragmentación, pesada, secado e inmersión en mercurio, determina la densidad aparente de la pieza. La utilización de este sistema ha permitido controlar, de manera discontinua, el proceso de producción de las baldosas cerámicas durante los últimos 20 años.

45 Posteriormente se realizaron mejoras y adaptaciones al uso industrial de este procedimiento que dieron lugar a otras patentes (P92022102, ES2005099, ES20099633 y ES2009165). Sin embargo, el método es destructivo y manual, adolece de la lentitud e imprecisión inherente a la actuación humana y puede resultar peligroso para la salud de los operarios que lo aplican, debido a la necesidad de utilizar mercurio para su realización.

50 Aunque ha habido intentos de mejorar el actual sistema de medida de la densidad aparente, sobre todo en seguridad, rapidez y fiabilidad (19 y 20) y patentes P200202749, P9702478, EP0936457, CN2450661U), los métodos existentes, incluso los que no emplean mercurio, siguen siendo discontinuos, destructivos y lentos, por lo que no permiten el control automático de la operación de prensado.

La práctica industrial requiere de un método continuo, preciso, rápido y, a ser posible, no destructivo y seguro.

60 En esta línea se conocen dos patentes (P9102499 y P9501767). En ambos casos el método se basa en la utilización de los diagramas de compactación (Ecuación 1). En la primera patente se estima la distribución de la densidad aparente de la pieza a partir de la medida de la presión en el interior del alvéolo donde se realiza la compactación de la misma (21 y 22). En el segundo caso, el sistema estima la densidad aparente de las piezas húmedas recién compactadas (densidad aparente en verde), a partir de la medida de la humedad sobre el polvo de prensas y de la presión máxima de compactación.

65 La densidad aparente de las piezas secas (densidad aparente en seco) depende, para un polvo determinado, de la humedad del polvo y de la presión máxima de prensado de acuerdo con los diagramas de compactación (Ecuación 1).

ES 2 249 993 B1

En la práctica industrial, la presión máxima de compactación puede mantenerse constante con relativa facilidad pero las variaciones de humedad del polvo de prensas son habituales y difíciles de evitar. Como resultado final se obtienen piezas con distinta densidad aparente en seco, que se comportan de manera distinta en el proceso de producción y, lo que es más importante, darán lugar a baldosas con tamaño final distinto.

5 **Referencias más relevantes**

Tesis doctorales presentadas por personal de ITC

- 10 (1) **Pastas cerámicas para pavimentos de monococción. Influencia de las variables de prensado sobre las propiedades de las piezas en crudo y sobre su comportamiento durante el prensado y la cocción.**

José Luis Amorós Albaro. Noviembre de 1987.

- 15 (2) **Succión de líquidos en baldosas cerámicas porosas. Relación entre las características microestructurales de la pieza y el fenómeno de succión.**

Vicente Beltrán Porcar. Diciembre de 1988.

- 20 (3) **Mecanismo de la formación y cinética de la oxidación del corazón negro durante la cocción de piezas cerámicas.**

Francisco Negre Medall. Marzo de 1989

- 25 (4) **Efecto de las condiciones de operación, en las distintas etapas del proceso, sobre las propiedades y características del pavimento de muy baja porosidad.**

Vicente Bagán Vargas. Julio de 1991

- 30 (5) **Sinterización de piezas de pavimento gresificado.**

María José Orts Tarí. Septiembre de 1991.

Publicaciones en revistas científicas especializadas de trabajos realizados en el ITC

- 35 (6) **Variables en la compactación de soportes cerámicos de pavimento y revestimiento**

Amorós, J.L.; Blasco, A.; Enrique, J.E.; Beltrán, V.; Escardino, A.

- 40 (7) **Estudio de la compactación de soportes cerámicos (bizcochos) de pavimento y revestimiento. II. Influencia de la presión y humedad de prensado.**

Amorós J.L.; Beltrán, V.; Negre, F.; Escardino, A.

- 45 (8) **Estudio de pastas de gres para pavimentos**

Escardino A.; Amorós, J.L.; Enrique, J.E.

- 50 (9) **Acuerdo esmalte-soporte (I) Causas y factores de los que depende**

Amorós, J.L.; Negre, F.; Belda, A.; Sánchez, E.

Técnica Cerámica, 178, 582-292, 1989.

- 60 (10) **El diagrama de gresificación en la fabricación de pavimentos de gres**

Escardino, A.; Amorós, J.L.; Enrique, J.E.

Ceram. Información, 84, 211-220, 1981.

- 65 (11) **Pastas de gres de monococción. Influencia de las variables del proceso en la calidad del producto acabado**

Amorós, J.L.; Blasco, A.; Beltrán, V.; Negre, F.; Arrébola, C.

ES 2 249 993 B1

Técnica Cerámica, 120, 1368-1384, 1984

(12) **La operación de prensado en la fabricación de pavimentos por monococción. I. Influencia del polvo de prensas sobre las propiedades de las piezas en crudo**

5 **Amorós, J.L.; Bagán, V.; Orts, M.J.; Escardino, A.**

Bol. Soc. Esp. Ceram. Vidr., 27(5), 273-282, 1988.

10 (13) **La operación de prensado en la fabricación de pavimentos por monococción. II. Influencia de la naturaleza del polvo de prensas sobre las propiedades de las piezas de cocido**

Amarós, J.L.; Moreno, A.; Orts, M.J.; Escardino, A.

15 *Bol. Soc. Esp. Ceram. Vidr.*, 29(3), 1990.

(14) **Liquid Suction by Porous Ceramic**

20 **Beltrán, V.; Escardino, A.; Felú, C.; Rodrigo, M^o. D.**

Br. Ceram. Trans. J., 87, 64-69, 1988.

Comunicaciones a Congresos de trabajos realizados en el ITC

25 (15) **Relación entre las variables de prensado y la velocidad de secado de la pieza moldeada**

Amorós, J.L.; Escardino, A.; Gallego, A.; Vaello, A..

XXVII Reunión anual de la Sociedad Española de Cerámica y Vidrio Mérida (España) 24-27 Mayo 1987

30 (16) **Cinética de la oxidación de la materia orgánica en productos cerámicos prensados**

Beltrán, V.; Escardino, A.; Amorós, J.L.

35 *Actas del I Congreso Iberoamericano de Cerámica, Vidrio y Refractarios (S. E. C. V.)*, Vol. I, 317-326 (1983)

Otras publicaciones

(17) **Técnicas experimentales de control de la compactación de pavimentos y revestimientos cerámicos**

40 **Amorós, J.L.; Beltrán, V.; Blasco, A.; Felú, C.; Sancho Tello, M.**

Técnica Cerámica 116m 1234-1246, 1983.

45 (18) **Control de la compactación durante el proceso de fabricación de pavimentos y revestimientos cerámicos**

Amarós, J.L.; Escardino, A.; Beltrán, V.; Enrique, J.E.

Técnica Cerámica, 118, 1307-1314, 1983.

50 (19) **Procedure for measuring the bulk density of ceramic materials without using mercury**

Agramunt, J.V.; Almela, V.; Cantavella, V.; Enrique, J.E.; Felú, C.

55 *Tile Brick Int.*, 11(4), 245-250.

(20) **Alternatives to immersion in mercury for determining tile bulk density**

Enrique, J.E.; García, J.; Amorós, J.L.; Beltrán, V.

60 *Interceram*, 47(1), 12-17, 1998.

(21) **Experimental study of the determination of dry compaction of ware shaped by unidirectional pressing, in continuous operation and in true time.**

65 **Blasco, A.; Llorens, D.; Mallol, G.; Monfort, E.**

Tile & Brick International, 8(6), 424-438, 1992.

ES 2 249 993 B1

(22) Studio della dinamica del ciclo di pressatura e della sua influenza sulla compattazione di piastrelle di ceramica attraverso la sensorizzazione di una prensa industriale

F.Negre; G.Mallol; M.Monzó; E.Monfort; J.Sánchez; J.Portolés

5 *Ceramica informazione*, 348, 145-154, 1995

Descripción de la invención

10 Para lograr los objetivos y evitar los inconvenientes indicados en apartados anteriores, se ha llevado a cabo, la invención descrita que consiste en un método y dispositivo de control automático de la densidad aparente de piezas cerámicas que permite mantener constante la densidad aparente en seco de los soportes de las baldosas cerámicas conformados industrialmente, estando relacionadas matemáticamente las tres variables de humedad, presión máxima de compactación y densidad aparente en seco de dichos soportes mediante diagramas de compactación.

15 Novedosamente, según la invención, el método consiste en efectuar una medida sin contacto y en continuo de la humedad de las piezas compactadas (ya prensadas), o del polvo de prensas utilizado en su fabricación, y a partir de ella modificar o no, automáticamente, la presión de prensado de manera que se mantenga constante la densidad aparente en seco de los soportes cerámicos recién prensados; empleándose algoritmos que describen la interdependencia entre dichas tres variables.

20 El dispositivo cuenta con un sensor de medida, sin contacto, y en continuo, de la humedad a la que ha sido conformada la pieza cerámica en una prensa industrial; la medida del sensor se emplea como variable en un ordenador en el que se han programado las funciones de interdependencia entre la humedad que mide el sensor y la presión que debe aplicar la prensa para que la densidad aparente en seco de la baldosa permanezca constante; encontrándose conectado el ordenador a la prensa para controlar su presión; y disponiendo el ordenador de un terminal gráfico que permite la representación de la evolución de las variables de operación, diálogo de alarmas, introducción de consignas y establecimiento de comunicaciones con el correspondiente automatismo de control de la prensa y con la red industrial de datos de la correspondiente planta de fabricación.

30 El Método y dispositivo descritos presentan las ventajas de que permiten mantener constante el valor de la densidad aparente en seco de las piezas de una forma continua (se analiza toda la producción), no destructiva y segura (no utiliza mercurio). Actualmente el método de control de la prensa es manual, discontinuo y destructivo, empleándose necesariamente mercurio para la medida de la densidad aparente.

35 A continuación, para facilitar una mejor comprensión de esta memoria descriptiva y formando parte integrante de la misma, se acompaña una figura única en la que con carácter ilustrativo y no limitativo se ha representado el objeto de la invención.

40 Breve descripción de la figura

La figura 1 representa un dispositivo de control automático de la densidad aparente de piezas cerámicas realizado según la presente invención y que emplea el método de la misma.

45 Descripción de un ejemplo de realización de la invención

Seguidamente se realiza una descripción de la invención, haciendo referencia a la numeración adoptada en la figura.

50 Así, el sistema de este ejemplo permite, a partir de la medida sin contacto y en continuo de la humedad de piezas compactadas, modificar la presión de prensado para mantener constante la densidad aparente en seco de los soportes cerámicos recién prensados.

55 La figura 1 representa al dispositivo y método de este ejemplo, siendo los componentes esenciales de este dispositivo una prensa de conformado de baldosas cerámicas (1), un sistema de transporte (2), una baldosa cerámica (3) que se encuentra sobre el sistema (2) y que acaba de salir de la prensa (1), un sensor de humedad (4), un ordenador (5), un terminal gráfico de operador para la visualización de las variables de operación (6), y una conexión (7) de comunicación entre la prensa (1) y el ordenador (5).

60 La prensa (1) es una prensa hidráulica de las utilizadas comúnmente en la industria cerámica. La presión máxima aplicada sobre el polvo o barro por esta prensa es el parámetro que se ajusta continuamente y de forma automática en la invención, a fin de mantener constante la compactación para contrarrestar las fluctuaciones de humedad del polvo de prensa.

65 El sistema de transporte (2) consiste en un sistema de transporte de correas motorizadas y su función consiste en desplazar las baldosas conformadas desde la prensa (1) hacia una máquina de secado, siendo también convencional este sistema de transporte (2).

ES 2 249 993 B1

La baldosa (3) es la baldosa cerámica recién prensada sobre la que se mide la humedad de forma continua. La medida de la humedad puede realizarse sobre el polvo de prensa (en distintos puntos previos al conformado) o sobre la pieza recién prensada (después del conformado), siendo este segundo caso el del presente ejemplo.

5 La medida sobre el polvo de prensas puede llevarse a cabo cuando el polvo se introduce en la tolva de alimentación de la prensa o en la propia tolva de alimentación. En ambos casos, previos al conformado, existen inconvenientes importantes con respecto a la medida de la humedad sobre la pieza compactada:

10 - Si la medida se realiza en el punto de alimentación del polvo a la tolva, se produce un desfase temporal entre la medida de humedad y el momento en que el polvo es compactado. Este desfase depende del tamaño de la tolva y de los paros que se produzcan en la prensa, y puede ser de una duración que vaya desde unos pocos minutos hasta varias horas. Durante los periodos de paro la humedad del polvo disminuye y, en consecuencia, la humedad medida no se corresponde con la que tiene el polvo en el momento de su conformado.

15 - Si se mide la humedad cuando el polvo se encuentra en la tolva de alimentación, se reduce el desfase temporal entre la realización de la medida y el prensado del mismo con respecto al caso anterior, pero se requiere un sistema mecánico de muestreo del polvo desde la tolva y otro sistema mecánico de devolución, del mismo al tolván de la prensa. Este conjunto de partes mecánicas complica el sistema de medida, ya que incorpora dispositivos adicionales, necesarios y normalmente no disponibles (que hay que construir a medida) y, además, requiere de un mantenimiento continuado del mismo.

20 En el método descrito y probado industrialmente del presente ejemplo, la medida de la humedad se realiza directamente sobre la pieza recién compactada. Este hecho simplifica la propia medida de la humedad y, lo que es más importante, elimina las diferencias temporales entre la medida de la humedad del polvo y la aplicación de la presión sobre el mismo, aumentando la fiabilidad del sistema y convirtiéndolo en un sistema a tiempo real.

25 El sensor (4) de la figura 1 es un sensor de humedad, normalmente de tipo electro-óptico basado en la absorción de infrarrojos por parte del agua contenida en la matriz cerámica del polvo compactado en longitudes de ondas definidas. Para la implementación del sistema de control de este ejemplo son utilizables sensores de humedad basados en diferentes principios físicos tales como la absorción de ultrasonidos, la absorción-reflexión de microondas por radiofrecuencia, la modificación de la capacidad entre dos placas de un condensador eléctrico, la absorción de un haz de neutrones u otros métodos de medida sin contacto directo con la humedad. El fundamento de la invención, y del presente ejemplo no lo constituye el principio de medida de la humedad, sino la utilización de la propia medida de humedad como variable que permitirá, tras su procesado en una unidad de cálculo que contiene el correspondiente diagrama de compactación, modificar de forma automática la presión máxima de prensado para mantener constante la densidad aparente de la pieza.

30 El ordenador (5) es un ordenador en el que se han programado las funciones de interdependencia entre la humedad medida por el sensor (4) y la presión máxima que debe de ser ejercida por la prensa (1) a fin de mantener constante la densidad aparente en seco de las baldosas de forma independiente a las fluctuaciones de humedad del polvo de prensas que forma la materia de las baldosas que se fabrican.

35 Con la referencia (6) de la figura 1 se esquematiza un terminal gráfico de operador en el que se representa la evolución de las diferentes variables de operación, el diálogo de alarmas y la introducción de las consignas que desean ser mantenidas constantes. A través de este terminal gráfico (6) se establecen las comunicaciones con el autómatas de control de la prensa (1) y con la red industrial de datos de la planta de fabricación.

40 Con la referencia (7) de la figura 1 se representa la comunicación entre el ordenador (5) y la prensa (1). A través de las líneas de esta comunicación (7) se produce el flujo de información necesario para materializar el control automático de la prensa (1).

45 El método y dispositivo descrito en este ejemplo permite mantener constante la densidad aparente de la pieza seca o densidad aparente en seco, cuyo valor, directamente relacionado con su porosidad, condiciona su comportamiento durante el proceso productivo y define el tamaño final de las piezas.

50 55 Cualquier sistema basado en el control de la densidad aparente de la pieza húmeda (densidad aparente en verde) no permite alcanzar el objetivo final. Aún manteniendo constante la densidad aparente en verde de las piezas, si se modifica la humedad del polvo de prensas (situación muy habitual en la realidad industrial), se producirán fluctuaciones en la densidad aparente en seco. Esta situación conducirá a diferencias en el comportamiento de las piezas durante su fabricación. La contracción de cocción de las mismas será distinta y, por tanto, su tamaño final, dando lugar a defectos en el producto acabado (comúnmente denominados "calibres"), aún manteniéndose constante la densidad aparente en verde.

60 65 El método descrito en esta patente, ha demostrado su robustez en condiciones de trabajo continuo permitiendo estrechar las fluctuaciones del tamaño final de las piezas y, en ocasiones, eliminarlas completamente, dando como resultado la obtención de piezas de tamaño (calibre) único y una considerable optimización del proceso de fabricación.

ES 2 249 993 B1

REIVINDICACIONES

5 1. Método de control automático de la densidad aparente de piezas cerámicas, que permite mantener constante la densidad aparente en seco de los soportes de las baldosas cerámicas conformados industrialmente, estando relacionadas matemáticamente las tres variables de humedad, presión de compactación y densidad aparente en seco de dichos soportes mediante diagramas de compactación; **caracterizado** porque consiste en efectuar una medida sin contacto y en continuo de la humedad de las piezas compactadas (ya prensadas), o del polvo de prensas utilizado en su fabricación, y a partir de ella variar automáticamente la presión de prensado de manera que se mantenga constante la densidad aparente en seco de los soportes cerámicos recién prensados; empleándose algoritmos que describen la interdependencia entre dichas tres variables.

15 2. Dispositivo de control automático de la densidad aparente de piezas cerámicas, según la reivindicación 1, **caracterizado** porque cuenta con un sensor (4) de medida, sin contacto y en continuo, de la humedad a la que ha sido conformada una pieza cerámica (3) en una prensa industrial (1); empleándose la medida del sensor (4) como variable en un ordenador (5) en el que se han programado las funciones de interdependencia entre la humedad que mide el sensor (4) y la presión que debe aplicar la prensa (1) para que la densidad aparente en seco de la baldosa (3) permanezca constante; encontrándose conectado (7) el ordenador (5) a la prensa (1) para controlar su presión; y disponiendo el ordenador (5) de un terminal gráfico (6) que permite la representación de la evolución de las variables de operación, diálogo de alarmas, introducción de consignas y establecimiento de comunicaciones con el correspondiente autómata de control de la prensa y con la red industrial de datos de la planta de fabricación.

25

30

35

40

45

50

55

60

65

ES 2 249 993 B1

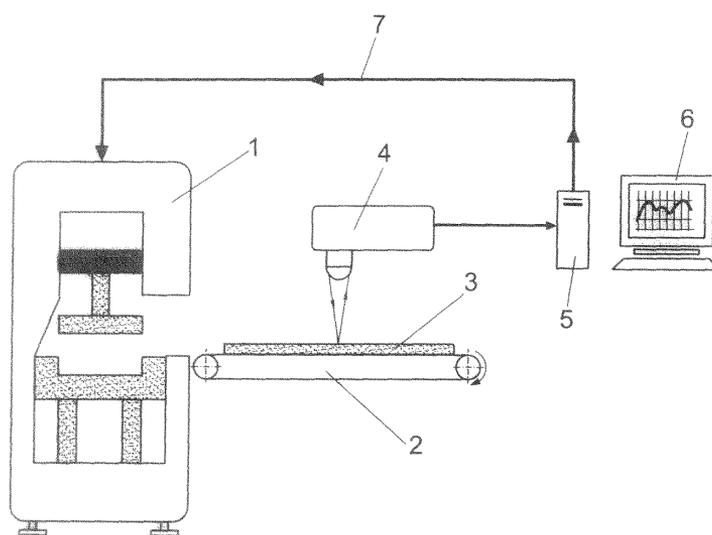


FIG.1

A.6 Empresas en las que se ha implementado la tecnología desarrollada en el trabajo

A continuación se detallan las empresas que han utilizado, hasta el año 2021, la tecnología desarrollada en este trabajo de investigación:

- *Pamesa Cerámica Compacto, SLU*
- *Inalco, Industrias Alcorenses Confederadas, SA*
- *Vives Azulejos y Gres, SA*
- *Rocersa Cerámica, SL*
- *Interceramic, Internacional de Cerámica, SAB de CV*
- *Dal-Tile Corporation, Grupo Mohawk Industries, Inc*
- *Multicerame, SARL*
- *Safcer, Société Algérienne de Fabrication de Carreaux Céramiques et Produits Rouges, SARL*
- *Azulev, SA*
- *Peronda Cerámicas, SA*
- *Grespania, SA*

Nomenclatura

Capítulo 1

ΔCL^*	variación máxima permitida de la contracción lineal de cocción (%)
ΔP_{\max}^*	variación máxima permitida de la presión de prensado para obtener piezas con un tamaño final dentro de la tolerancia definida (MPa)
ΔT_{\max}^*	variación máxima permitida de la temperatura máxima de cocción (°C)
ΔX^*	variación máxima permitida de la humedad del polvo de prensado para obtener piezas con un tamaño final dentro de la tolerancia definida (%)
δ	desviación de la ortogonalidad en baldosas cerámicas según norma UNE-EN 14411:2013 (mm)
$\Delta \rho_s^*$	variación máxima permitida de la densidad aparente en seco de los soportes (kg/m ³)
ϕ	compacidad o densidad relativa
ρ_{ap}	densidad aparente (kg/m ³)
ρ_s^o	densidad aparente en seco objetivo (kg/m ³)
ρ_t	densidad del sólido (kg/m ³)
AA	absorción de agua
C	desviación de la rectitud de lados según norma UNE-EN 14411:2013 (mm)
c_s	contracción del soporte
c_v	contracción del esmalte
D_0	densidad aparente del lecho de polvo depositado en el alveolo (kg/m ³)
D_1	densidad aparente del soporte recién prensado (kg/m ³)

D_2	densidad aparente en húmedo del soporte tras su expansión post-prensado (kg/m^3)
D_3 ó ρ_s	densidad aparente en seco del soporte (kg/m^3)
D_4	densidad aparente de la baldosa cocida (kg/m^3)
h_0	espesor del lecho de polvo alimentado al alveolo del molde (mm)
h_1	espesor del soporte recién prensado (mm)
h_2	espesor del soporte tras su expansión post-prensado (mm)
h_3	espesor del soporte seco (mm)
h_4	espesor de la pieza cocida (mm)
L_0	longitud del lado (en piezas cuadradas) o del lado largo (en piezas rectangulares) del alveolo del molde (mm)
L_1	longitud del lado (en piezas cuadradas) o del lado largo (en piezas rectangulares) del soporte recién prensado (mm)
L_2	longitud del lado (en piezas cuadradas) o del lado largo (en piezas rectangulares) del soporte tras su expansión post-prensado (mm)
L_3 ó L_s	longitud del lado (en piezas cuadradas) o del lado largo (en piezas rectangulares) del soporte seco (mm)
L_4 ó L_c	longitud del lado (en piezas cuadradas) o del lado largo (en piezas rectangulares) de la baldosa cocida (mm)
l_c	longitud de pieza centrada en un determinado calibre (mm)
l_i	longitud de pieza determinada con un equipo de selección automática (mm)
L_p	lado interior de la planca patrón empleada en la determinación de la ortogonalidad de lados según norma UNE-EN 14411:2013 (mm)
m_0	masa de polvo alimentado al alveolo del molde (kg)
m_1	masa del soporte recién prensado (kg)
m_2	masa del soporte tras su expansión post-prensado (kg)
m_3	masa del soporte seco (kg)
m_4	masa de la pieza cocida (kg)
p	porosidad
P_1 ó P_{max}	presión específica máxima aplicada sobre el polvo durante el ciclo de prensado (MPa)

S_2	expansión post-prensado del soporte (%)
S_3	contracción de secado del soporte (%)
S_4 ó CL	contracción lineal de cocción (%)
t	tolerancia dimensional o tolerancia de calibre (mm)
T_4 ó T_{\max}	temperatura máxima de cocción (°C)
T_{amb}	temperatura ambiente (°C)
T_a	temperatura de acomplamiento esmalte-soporte (°C)
W_0	longitud del lado corto (en piezas rectangulares) del alveolo del molde (mm)
W_1	longitud del lado corto (en piezas rectangulares) del soporte recién prensado (mm)
W_2	longitud del lado corto (en piezas rectangulares) del soporte tras su expansión post-prensado (mm)
W_3	longitud del lado corto (en piezas rectangulares) del soporte seco (mm)
W_4	longitud del lado corto (en piezas rectangulares) de la baldosa cocida (mm)
w_c	anchura de pieza centrada en un determinado calibre (mm)
w_i	anchura de pieza determinada con un equipo de selección automática (mm)
X_0 ó X	humedad del polvo de prensas (%)
X_1	humedad del soporte recién prensado (%)
L_{c*}	longitud mínima permitida de una baldosa para ser considerada de un determinado calibre (mm)
L_c^*	longitud máxima permitida de una baldosa para ser considerada de un determinado calibre (mm)

Capítulo 3

ΔP_1^*	variabilidad en la presión máxima de prensado asociada a las diferencias de carga entre los alveolos del molde (MPa)
ΔT_4^*	variabilidad en la temperatura máxima de cocción asociada a la presencia de gradientes térmicos en el horno (°C)
S	lectura del transductor de humedad para “trim”= 0 y “span”= 1 (%)

D_{2e}	densidad aparente en húmedo estimada mediante el diagrama de compactación en un bucle de control anticipativo basado en la densidad aparente en húmedo (kg/m^3)
D_{2SP}	densidad aparente de consigna en un bucle de control anticipativo basado en la densidad aparente en húmedo (kg/m^3)
D_{3e}	densidad aparente en seco estimada mediante el diagrama de compactación en un bucle de control anticipativo basado en la densidad aparente en seco (kg/m^3)
D_{3SP}	densidad aparente de consigna en un bucle de control anticipativo basado en la densidad aparente en seco (kg/m^3)
L_{4m}	longitud medida del lado largo de las piezas cocidas en un bucle de control anticipativo basado en control directo del tamaño final de la pieza (mm)
L_{4SP}	longitud de consigna del lado largo de las piezas cocidas en un bucle de control anticipativo basado en control directo del tamaño final de la pieza (mm)
P_{1m}	presión máxima de prensado medida en un bucle de control anticipativo de la operación de conformado (MPa)
X_{1m}	humedad de los soportes industriales medida por el transductor de humedad (%)
Y_e	valor estimado de una variable genérica controlada en un bucle de control anticipativo
Y_m	valor medido de una variable genérica controlada en un bucle de control anticipativo
Y_{SP}	valor de consigna preestablecido para una variable genérica de control en un bucle de control anticipativo

Capítulo 4

α	precisión del método de medida de la densidad aparente por inmersión en mercurio (kg/m^3)
δ_{D_3}	“offset” de densidad aparente por cambios de compresibilidad del polvo atomizado (kg/m^3)
δ_{P_1}	parámetro corrector de la presión máxima de prensado empleado en el escalado industrial del diagrama de compactación (MPa)
δ_{T_4}	parámetro corrector de la temperatura de cocción empleado en el escalado industrial del diagrama de gresificación (K)

D_{2SP}	densidad aparente en húmedo de consigna (kg/m^3)
D_{3SP}	densidad aparente en seco de consigna (kg/m^3)
L_{4SP}	tamaño final de pieza objetivo (mm)
S_3^v	contracción volumétrica del soporte durante su secado (%)
L_{4*}	longitud mínima permitida de una baldosa cocida para ser considerada de un determinado calibre (mm)
L_{4*}	longitud máxima permitida de una baldosa cocida para ser considerada de un determinado calibre (mm)
V_2	volumen del soporte húmedo (m^3)
V_3	volumen del soporte seco (m^3)
A_c	superficie sobre la que ejerce la fuerza el aceite del circuito hidráulico de la prensa (m^2)
A_p	superficie total de polvo compactada en el molde de la prensa (m^2)
D_c	diámetro del cilindro hidráulico sobre el que la prensa ejerce su fuerza (m)
N	número de piezas conformadas por cada ciclo de prensado
P_c	presión máxima de prensado en el circuito hidráulico de la prensa (MPa)
LCI	límite de control inferior
LCS	límite de control superior
sp_1	desviación típica de la presión máxima de prensado (MPa)

Azulejo

Tipo de baldosa cerámica de porosidad alta (superior a 12 %, grupo BIII), conformada por prensado en semiseco y esmaltada. Se utiliza exclusivamente para revestir paredes en interiores, por lo que también suele denominarse como baldosa de revestimiento poroso.

Baldosa cerámica

Placas de poco espesor fabricadas a partir de composiciones constituidas por arcillas y otras materias primas inorgánicas que son empleadas en el recubrimiento de suelos y paredes, tanto interiores, como exteriores.

Calibre

Cada una de las clases definida por tamaño en las que se clasifican las baldosas cocidas al final del proceso de fabricación. Se habla coloquialmente de la presencia de calibres en la clasificación final, al referirse a la variabilidad del tamaño medio de las piezas de un lote.

Cocción

Proceso de tratamiento térmico generalmente realizado en hornos continuos de rodillos durante el cual se le confiere a la baldosa cerámica sus propiedades finales gracias a la sinterización del material.

Contracción de cocción

Contracción experimentada por las baldosas cerámicas durante su cocción. Aunque puede darse en cualquier tipo de baldosa cerámica, es especialmente importante durante la fabricación de productos de baja o media absorción de agua como el gres porcelánico o el gres esmaltado. En estos materiales, la contracción de cocción tiene lugar como consecuencia del proceso de sinterización, que origina, a medida que aumenta la temperatura de cocción, una progresiva aproximación de las partículas que los constituyen, debido a la formación de una considerable cantidad de fase líquida procedente de la fusión de ciertos componentes presentes en la composición.

Contracción de secado

Contracción experimentada por los soportes durante su secado como consecuencia de la eliminación del agua contenida en su interior. En la fabricación por prensado en semiseco (contenidos en humedad < 8 %) la magnitud de esta contracción es muy baja (<0,2 %).

Densidad aparente

Propiedad macroscópica de las baldosas cerámicas, que relaciona la masa con el volumen aparente de las mismas. Al estar directamente influida por su porosidad es empleada para conocer de manera rápida el grado de compactación alcanzado durante el prensado o el avance del proceso de sinterización durante la cocción.

Descuadre

Defecto dimensional que puede presentarse en las baldosas cocidas, el cual hace referencia a la falta de rectangularidad u ortogonalidad de sus lados.

Esmalte

Material de naturaleza vítrea, aplicado sobre el soporte de algunas baldosas cerámicas formando una fina capa (normalmente de 0,15 a 0,5 mm de espesor). Además de conferirles a las baldosas una determinada apariencia, las impermeabiliza y les aporta propiedades superficiales como la resistencia a la abrasión o la resistencia al deslizamiento.

Expansión post-prensado

Expansión que sufren los soportes cerámicos justo después de su extracción del molde como consecuencia de la reacción elástica experimentada por el material al cesar la aplicación de la presión que lo comprimía. Depende, para una determinada composición, de la presión máxima de prensado y de la humedad de conformado.

Gres esmaltado

Tipo de baldosa cerámica de absorción de agua baja o media-baja (entre 0,5 % y 6 %, grupos B1b y B1a) prensada en semiseco y esmaltada. Es adecuada para su uso en suelos de interior, por lo que se le suele denominar pavimento de gres. Cuando reúne los requisitos de resistencia a la helada pertinentes puede también utilizarse en suelos exteriores.

Gres porcelánico

Tipo de baldosa cerámica de muy baja absorción de agua (inferior a 0,5 %, grupo B1a) de porosidad abierta prácticamente nula y elevada resistencia a la helada que es utilizada en el revestimiento de suelos y paredes, tanto interiores, como en exterior. Generalmente fabricada por prensado en semiseco, pudiendo estar esmaltada o no.

Prensado en semiseco

Proceso de conformado empleado habitualmente en la fabricación de los soportes para baldosas cerámicas en el cual un polvo granulado contenido en un molde metálico es sometido a un esfuerzo axial de compresión. La aplicación de la presión se efectúa siguiendo un ciclo de compactación predefinido, que reduce progresivamente la porosidad del material hasta alcanzar una microestructura en el seno del soporte adecuada para el desarrollo del resto de etapas del proceso y la obtención de unas propiedades físico-químicas determinadas en el producto final.

Soporte

Cuerpo cerámico, generalmente cuadrado o rectangular y espesor habitualmente en el rango entre 5 y 15 mm, elaborado a partir de materias primas

naturales, fundamentalmente de naturaleza arcillosa, que constituye la propia baldosa cerámica en aquellos productos, como algunos tipos de gres porcelánico, que pueden estar no esmaltados, y la capa de soporte para el esmalte, en aquellas baldosas cuyo acabado final lo requiere.

Bibliografía

- [1] 14411:2016, EUROPEAN STANDARD EN, *Ceramic tiles-definitions, classification, characteristics and marking*, 2016.
- [2] 13006/2018, ISO, *Ceramic tiles—definitions, classification, characteristics and marking, annex k and l*, 2018.
- [3] 10545-3/2018, UNE-EN ISO, *Baldosas cerámicas. Parte 3: Determinación de la absorción de agua, de la porosidad abierta, de la densidad relativa aparente, y de la densidad aparente*, 2018.
- [4] ASCER, COACV; COPUT, ITC-AICE; WEBER, ET BROUTIN-CEMARKSA, *Guía de la baldosa cerámica*, IVE: Conselleria d'Obres Públiques, Urbanisme i Transports, 4 Ed. Valencia, (2011).
- [5] SÁNCHEZ, E.; GARCÍA-TEN, J.; SANZ, V.; MORENO, A., *Porcelain tile: almost 30 years of steady scientific-technological evolution*, *Ceramics International*, 36 (2010), pp. 831–845.
- [6] MALLOL, G., *Control and automation in the ceramics industry. Part 1: Evolution and perspectives*, en CFI. *Ceramic forum international*, Göller, 2007.
- [7] PRADES, LL.; SERRANO, J.; LLOPIS, R., *Design and implementation of a monitoring and control system for setting and balancing a tile grinding line*, *Procedia Engineering*, 63 (2013), pp. 252–260.
- [8] SERRANO, J.; ABELLÁN, J.V.; BRUSCAS, G.M., *Design of a machine to rectify ceramic tiles for laboratory tests*, en IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, vol. 1193, IOP Publishing, 2021, p. 012087.
- [9] HUTCHINGS, I.M.; ADACHI, K.; XU, Y. ET AL., *Analysis and laboratory simulation of an industrial polishing process for porcelain ceramic tiles*, *Journal of the European Ceramic Society*, 25 (2005), pp. 3151–3156.
- [10] VICENTE, M.J.; GARCÍA, F.J.; BORDES, M.C. ET AL., *Influencia de algunas variables de proceso sobre las tonalidades en baldosas decoradas por inkjet*, en *Memorias del XVI Congreso mundial de la calidad del azulejo y del pavimento cerámico QUALICER*. Castellón. Cámara Oficial de Comercio, Industria y Navegación, 2020.

- [11] SÁNCHEZ, E.; BARBA, A.; FELIU, C. ET AL., *Materias primas para la fabricación de soportes de baldosas cerámicas*, Castellón, España: Instituto de Tecnología Cerámica-AICE/ITC, 2002.
- [12] BLASCO, A.; AMORÓS, J.L.; SÁNCHEZ-TELLO, M.; BELTRÁN, V., *Estudio de los costes de producción y de la inversión en plantas de pavimento de gres de monococción por vía seca y por vía húmeda. 1a parte*, *Iécnica Cerámica*, 117 (1983), pp. 1266–1274.
- [13] CANTAVELLA, V.; SÁNCHEZ, E.; MALLOL, G. ET AL., *Control of the continuous milling operation*, *Ceram. Acta*, 14 (2002), pp. 12–28.
- [14] GIL, C.; SILVESTRE, D.; GARCÍA TEN, F.J.; QUEREDA, M.F.; VICENTE, M.J., *Preparation of porcelain tile granulates by more environmentally sustainable processes*, *Boletín de la Sociedad Española de Cerámica y Vidrio*, 51 (2012), pp. 67–74.
- [15] MELCHIADES, F.G.; DAROS, M.T.; ZANELATTO, F.C.; BOSCHI, A.O., *Porcelain tiles produced by the dry route*, *Interceram*, 59 (2010), pp. 13–17.
- [16] GARCÍA-TEN, J.; SÁNCHEZ, E.; MALLOL, G.; JARQUE, J.C.; ARROYO, A., *Influence of operating variables on spray-dried granule and resulting tile characteristics*, en *Key Engineering Materials*, vol. 264, Trans Tech Publ, 2004, pp. 1499–1502.
- [17] ALBORS, J.; HERVÁS, J.L., *European tile ceramic industry in the xxi century: challenges of the present decade*, *Boletín de la Sociedad Española de Cerámica y Vidrio*, 45 (2006), pp. 13–21.
- [18] CHIVA, R.; ALEGRE, J., *Organizational learning capability and job satisfaction: An empirical assessment in the ceramic tile industry*, *British Journal of Management*, 20 (2009), pp. 323–340.
- [19] ROS, T.; FULLANA, P.; MEZQUITA, A.; MASONI, P.; MONFORT, E., *How can the European ceramic tile industry meet the EU's low-carbon targets? A life cycle perspective*, *Journal of Cleaner Production*, 199 (2018), pp. 554–564.
- [20] AMORÓS, J.L.; BLASCO, A.; BELTRÁN, V.; NEGRE, F.; ARRÉBOLA, C., *Pastas de gres de monococción; influencia de las variables del proceso en la calidad del producto acabado*, *Técnica Cerámica*, 120 (1984), pp. 1368–1384.
- [21] GALINDO-RENAU, R., *Prensas, moldes y prensado en la fabricación de baldosas cerámicas*, Castellon de la Plana: Marcer SL, 2019.
- [22] PORTOLES, J.; SANCHEZ, J.; NEGRE, F.; MALLOL, G.; MONZO, M., *Estudio de la dinámica del ciclo de prensado y su influencia sobre la compactación de baldosas cerámicas mediante la sensorización de una prensa industrial*, en *Memorias del III congreso mundial de la calidad del azulejo y del pavimento cerámico QUALICER*. Castellón. Cámara Oficial de Comercio, Industria y Navegación, 1994, pp. 73–91.

- [23] AMORÓS, J.L.; MORENO, A.; ORTS, M.J.; ESCARDINO, A., *La operación de prensado en la fabricación de pavimentos por monococción-ii: influencia de la naturaleza del polvo de prensas sobre las propiedades de las piezas en cocido*, Boletín de la Sociedad Española de Cerámica y Vidrio, 29 (1990), pp. 151–158.
- [24] AGUILELLA, M.; FOUCARD, L.; MALLOL, G. ET AL., *Study and automatic control of the ceramic tile extrusion operation*, Boletín de la Sociedad Española de Cerámica y Vidrio, 51 (2012), pp. 83–88.
- [25] MALLOL, G.; MEZQUITA, A.; LLORENS, D. ET AL., *Estudio de la operación de secado de los soportes de las baldosas cerámicas en secaderos verticales*, Técnica Cerámica, 304 (2002), pp. 805–817.
- [26] HUTCHINGS, IAN, *Ink-jet printing for the decoration of ceramic tiles: technology and opportunities*, en Memorias del XI Congreso mundial de la calidad del azulejo y del pavimento cerámico QUALICER. Castellón. Cámara Oficial de Comercio, Industria y Navegación, vol. 10, 2010.
- [27] DONDI, M.; BLOSI, M.; GARDINI, D.; ZANELLI, CH.; ZANNINI, P., *Ink technology for digital decoration of ceramic tiles: an overview*, en Proceedings of the 13th World Congress on Ceramic Tile Quality, QUALICER, 2014, pp. 1–14.
- [28] ORTS TARÍ, MARÍA JOSÉ, *Sinterización de piezas de pavimento gresificado*, Tesis Doctoral, Universitat de València, 1992.
- [29] DE NONI JR, A.; HOTZA, D.; CANTAVELLA, V.; SÁNCHEZ, E., *Influence of composition on mechanical behaviour of porcelain tile. Part I: Microstructural characterization and developed phases after firing*, Materials Science and Engineering: A, 527 (2010), pp. 1730–1735.
- [30] DAL BÓ, M.; CANTAVELLA, V.; SÁNCHEZ, E.; HOTZA, D.; BOSCHI, A., *Modelización mecánica del enfriamiento rápido en sistemas tipo gres porcelánico*, Boletín de la Sociedad Española de Cerámica y Vidrio, 51 (2012), pp. 95–102.
- [31] DE NONI JR, A.; HOTZA, D.; CANTAVELLA, V.; SÁNCHEZ, V., *Influencia del enfriamiento de la etapa de cocción sobre las propiedades mecánicas del gres porcelánico*, Boletín de la Sociedad Española de Cerámica y Vidrio, 46 (2007), pp. 163–170.
- [32] AMORÓS, J.L.; MALLOL, G.; MEZQUITA, A. ET AL., *Mejora de la estabilidad dimensional de piezas de gres porcelánico a través de la medida en continuo de la humedad de los soportes prensados*, Cerámica Información, 311 (2004), pp. 117–126.
- [33] HANZAEI, S. H.; AFSHAR, A.; BARAZANDEH, F., *Automatic detection and classification of the ceramic tiles' surface defects*, Pattern Recognition, 66 (2017), pp. 174–189.
- [34] KUKKONEN, S.; KAELVIAEINEN, H. A.; PARKKINEN, J., *Color features for quality control in ceramic tile industry*, Optical Engineering, 40 (2001), pp. 170–177.

- [35] ELBEHIERY, H.; HEFNAWY, A.; ELEWA, M., *Surface defects detection for ceramic tiles using image processing and morphological techniques*, World Academy of Science, Engineering and Technology, 5 (2005).
- [36] ZANELLI, CH.; CONTE, S.; MOLINARI, CH.; SOLDATI, R.; DONDI, M., *Waste recycling in ceramic tiles: A technological outlook*, Resources, Conservation and Recycling, 168 (2021), p. 105289.
- [37] 10545-2/2019, UNE-EN ISO, *Baldosas cerámicas. Parte 2: Determinación de las dimensiones y del aspecto superficial*, 2019.
- [38] AMORÓS, J.L.; ESCARDINO, A.; SÁNCHEZ, E.; ZAERA, F., *Estabilidad dimensional en piezas de monococción porosa*, en Memorias del II Congreso mundial de la calidad del azulejo y del pavimento cerámico QUALICER. Castellón. Cámara Oficial de Comercio, Industria y Navegación, 1992, pp. 347–376.
- [39] ESCARDINO, A.; AMORÓS, J.L.; NEGRE, F.; FELÍU, C., *Influence of process parameters on the planarity of floor tiles*, Interbrick, (1989), pp. 26–31.
- [40] LORICI, L., *El horno de rodillos y su influencia sobre la planaridad del producto final*, en Memorias del III Congreso mundial de la calidad del azulejo y del pavimento cerámico QUALICER. Castellón. Cámara Oficial de Comercio, Industria y Navegación, vol. 94, 1995, pp. 125–150.
- [41] JARQUE, J.C.; CANTAVELLA, V.; DAROCA, M.J. ET AL., *Influencia de las condiciones de operación del horno de rodillos sobre la curvatura de las piezas*, Técnica Cerámica, 303 (2002), pp. 685–687.
- [42] GIMÉNEZ, S.; BELTRÁN, G.; HORRILLO, S. ET AL., *Estudo em escala piloto da influência das variáveis de queima sobre a curvatura de placas cerâmicas por monoqueima*, Ceram. Ind.(Sevres), 5 (2000).
- [43] ORTS, M.J.; ENRIQUE, J.E.; GOZALBO, A.; NEGRE, F., *Defectos de fabricación de pavimentos y revestimientos cerámicos*, 1991.
- [44] CANTAVELLA SOLER, VICENTE, *Simulación de la deformación de baldosas cerámicas durante la cocción*, Tesis Doctoral, Universitat Jaume I, 1998.
- [45] BALAGUER, J.; TISCAR, J.M.; SABURIT, A.; QUEREDA, F.; AGUILELLA, M., *Modelización de la sinterización de baldosas cerámicas mediante el modelo SOVS*, en Memorias del XVI Congreso mundial de la calidad del azulejo y del pavimento cerámico QUALICER. Castellón. Cámara Oficial de Comercio, Industria y Navegación, 2020.
- [46] AMORÓS, J.L.; BLASCO, A.; CARCELLER, J.V.; SANZ, V., *Acuerdo esmalte-soporte (ii): Expansion termica de soportes y esmaltes ceramicos*, Técnica Cerámica, 179 (1989), pp. 644–657.
- [47] ESCARDINO, A.; AMORÓS, J.L.; NEGRE, F.; FELIU, C., *Defectos de planaridad en las piezas de pavimento gresificado motivados por deformación pirolástica. Influencia de las variables de proceso*, Taulells, 3 (1985), pp. 3–9.

- [48] BERNARDIN, A.M.; MEDEIROS, D.; DA SILVA, H.G.; RIELLA, H., *La piroplasticidad del gres porcelánico*, en Memorias del IX Congreso mundial de la calidad del azulejo y del pavimento cerámico, QUALICER. Castellón. Cámara Oficial de Comercio, Industria y Navegación, 2006, pp. 207–213.
- [49] CANTAVELLA, V.; GARCÍA, F.J.; SÁNCHEZ, E. ET AL., *Delayed curvatures in porcelain tiles: analysis and measurement of influencing factors*, en Memorias del X Congreso mundial de la calidad del azulejo y del pavimento cerámico QUALICER. Castellón. Cámara Oficial de Comercio, Industria y Navegación, 2008.
- [50] SEGADÀES, A. M.; CARVALHO, M. A.; FERREIRA, C., *Using phase diagrams to deal with moisture expansion*, *Ceramics international*, 29 (2003), pp. 947–954.
- [51] CANTAVELLA, V.; MORENO, A.; MEZQUITA, A. ET AL., *Evolución de las tensiones y curvaturas en soportes porosos durante el enfriamiento*, en Memorias del X Congreso mundial de la calidad del azulejo y del pavimento cerámico QUALICER. Castellón. Cámara Oficial de Comercio, Industria y Navegación, 2008.
- [52] BANNIER, EMILIE MARIE YVONNE, *Curvaturas diferidas en piezas de gres porcelánico*, Tesis Doctoral, Universitat Jaume I, 2017.
- [53] BANNIER, E.; GARCÍA-TEN, J.; CASTELLANO, J.; CANTAVELLA, V., *Delayed curvature and residual stresses in porcelain tiles*, *Journal of the European Ceramic Society*, 33 (2013), pp. 493–501.
- [54] MONZÓ, M.; ENRIQUE, J.E.; DE LA TORRE, J.; AMOROS, J.L., *Defectos de los productos de monococción. (V) Defectos producidos en la cocción*, *Técnica Cerámica*, 170 (1989), pp. 18–27.
- [55] ENRIQUE, J.E.; GARCÍA, J.; AMORÓS, J.L.; BELTRÁN, V., *Alternativas al método de inmersión en mercurio para la determinación de la densidad aparente de baldosas cerámicas*, *Técnica Cerámica*, 250 (1997), pp. 18–27.
- [56] AGRAMUNT, J.V.; ALMELA, V.; CANTAVELLA, V.; ENRIQUE, J.E.; FELIU, C., *Eliminación del mercurio en el procedimiento experimental de medida de la densidad aparente de piezas cerámicas*, *Técnicas de laboratorio-Barcelona*, (1995), pp. 598–604.
- [57] AMORÓS, J.L.; BOIX, J.; LLORENS, D. ET AL., *Non-destructive measurement of bulk density distribution in large-sized ceramic tiles*, *Journal of the European Ceramic Society*, 30 (2010), pp. 2927–2936.
- [58] MEZQUITA MARTÍ, ANA, *Desarrollo de un procedimiento de medida de la distribución de la densidad aparente en piezas cerámicas basado en la absorción de rayos x*, Tesis Doctoral, Universitat Jaume I, 2016.
- [59] AMORÓS, J.L.; BLASCO, A.; ENRIQUE, J.E.; BELTRÁN, V.; ESCARDINO, A., *Variables en la compactación de soportes cerámicos de pavimento y revestimiento*, *Técnica Cerámica*, 105 (1982), pp. 792–812.

- [60] MALLOL, G.; LLORENS, D.; BOIX, J. ET AL., *Medida y control de la presión máxima en los alveolos de un molde de fabricación de baldosas cerámicas*, en Memorias del XII Congreso mundial de la calidad del azulejo y del pavimento cerámico QUALICER. Castellón. Cámara Oficial de Comercio, Industria y Navegación, 2012.
- [61] TISCAR CERVERA, JUAN MIGUEL, *Estudio y modelización del comportamiento reológico de materiales cerámicos pulverulentos durante el llenado de moldes*, Tesis Doctoral, Universitat Jaume I, 2018.
- [62] MORENO, A.; MALLOL, G.; LLORENS, D. ET AL., *Estudio de los gradientes transversales de temperatura en un horno monoestrato en diferentes condiciones de operación*, en Memorias del IV Congreso mundial de la calidad del azulejo y del pavimento cerámico QUALICER. Castellón. Cámara Oficial de Comercio, Industria y Navegación, vol. 1, 1996, pp. 307–321.
- [63] BLASCO, A.; ENRIQUE, J.E.; MALLOL, G.; MONFORT, E., *Optimización de las condiciones de funcionamiento en hornos monoestrato (I). Curva de presiones*, Técnica Cerámica, 206 (1992), pp. 585–593.
- [64] BLASCO, A.; ENRIQUE, J.E.; MALLOL, G., *Optimización de las condiciones de funcionamiento en hornos monoestrato (II). Caudal de aire de combustión*, Técnica Cerámica, 218 (1993), pp. 716–729.
- [65] JARQUE, J.C.; MORENO, A.; ENRIQUE, J.E.; BARBA, A., *Optimización de las condiciones de funcionamiento en Hornos monoestrato (IV): Mecanismos de transmisión de energía calorífica*, Técnica Cerámica, 247 (1996), pp. 566–572.
- [66] VARGAS BAGÁN, VICENTE, *Efecto de las condiciones de operación en las diferentes etapas del proceso sobre las propiedades y características de pavimento de muy baja porosidad*, Tesis Doctoral, Universitat de València, 1991.
- [67] RAHAMAN, MOHAMED N., *Ceramic processing and sintering*, CRC press, 2003.
- [68] FERRER, C.; LLORENS, D.; MALLOL, G.; MONFORT, E.; MORENO, A., *Optimización de las condiciones de funcionamiento en hornos monoestrato. Medida de gradientes transversales de temperatura*, Técnica Cerámica, 227 (1994), pp. 653–662.
- [69] BOIX, J.; MALLOL, G.; AGUILELLA, M. ET AL., *Adecuación de las tolerancias dimensionales de las baldosas cerámicas a la tipología de producto y a las condiciones de procesado*, en Memorias del XIII Congreso mundial de la calidad del azulejo y del pavimento cerámico QUALICER. Castellón. Cámara Oficial de Comercio, Industria y Navegación, 2014.
- [70] ALBARO, JOSÉ LUIS AMORÓS, *Pastas cerámicas para pavimentos de monococción. Influencia de las variables de prensado sobre las propiedades de la pieza en crudo y sobre su comportamiento durante el prensado y la cocción*, Tesis Doctoral, Universitat de València, 1988.

- [71] MONDRAGÓN, R.; JULIÁ, J.E.; BARBA, A.; JARQUE, J.C., *El proceso de secado por atomización: formación de gránulos y cinética de secado de gotas*, Boletín de la Sociedad Española de Cerámica y Vidrio, 50 (2013), pp. 159–168.
- [72] JENIKE, A.W.; JOHANSON, J.R., *Review of the principles of flow of bulk solids*, CIM Trans, 73 (1970), pp. 141–146.
- [73] PURUTYAN, H.; PITTENGER, B.; CARON, J.W., *Solve solids handling problems by retrofitting*, Chemical Engineering Progress, 94 (1998), pp. 27–39.
- [74] AMORÓS, J.L.; MALLOL, G.; GARCÍA, F.J.; SÁNCHEZ, E., *Diseño de silos y tolvas para el almacenamiento de materiales pulverulentos. Problemas asociados a la operación de descarga*, Tile & brick international, 17 (2001), pp. 15–23.
- [75] OLTRA BADENES, RAÚL, *Identificación de tendencias de los sistemas integrados de gestión empresarial. Análisis funcional y diseño de herramientas para el desarrollo de un ERP vertical adaptado al sector cerámico*, Tesis Doctoral, Universitat Politècnica de València, 2012.
- [76] AMORÓS, J.L.; FELIU, C.; GINES, F.; MESTRE, S., *La extracción de la pieza del molde durante la fase de prensado. Influencia de algunas variables de operación*, Bol. Soc. Esp. Cerám. Vidr, 33 (1994), pp. 207–211.
- [77] MELCHIADES, F.; DOS SANTOS, L.; NASTRI, S; BOSCHI, A., *Influencia de la naturaleza de los gránulos en la fabricación de piezas de gres porcelánico*, en Memorias del XII Congreso mundial de la calidad del azulejo y del pavimento cerámico QUALICER. Castellón. Cámara Oficial de Comercio, Industria y Navegación, 2012.
- [78] REED, JAMES STALFORD, *Principles of ceramics processing*, Wiley New York, 1995.
- [79] GRAS LLOPIS, MATIAS, *Estimación estadística, modelado y análisis de la transmisión y coste de la variabilidad en procesos multi-etapa. Aplicación en la fabricación de baldosas cerámicas*, Tesis Doctoral, Universitat Jaume I, 2010.
- [80] AMORÓS, J.L.; SÁNCHEZ, E.; GARCÍA, J., *Manual para el control de la calidad de las materias primas arcillosas*, Institut de Tecnologia Ceràmica, 1998.
- [81] PYPPE, J.W., *The determination of moisture in solids: a selected review*, Analytica Chimica Acta, 170 (1985), pp. 159–175.
- [82] NEGRE, F.; JARQUE, J.C.; MALLOL, G; SAEZ, M., *Determinación en continuo y en tiempo real de la humedad del polvo cerámico secado por atomización*, Técnica cerámica, 200 (1992), pp. 34–42.
- [83] JARQUE, J.C., *Control automático de la humedad en una instalación de secado por atomización*, en XL Congreso Nacional de la Sociedad Española de Cerámica y vidrio: Onda, 2000.
- [84] CHEN, Y.; DELANEY, L.; JOHNSON, S.; WENDLAND, P.; PRATA, R., *Using near infrared spectroscopy to determine moisture and starch content of corn processing products*, Journal of Near Infrared Spectroscopy, 25 (2017), pp. 348–359.

- [85] WILLIAMS, PH, *Implementation of near-infrared technology*, Near-Infrared Technology in the Agricultural and Food Industries, and Edition, (2001).
- [86] JAMRÓGIEWICZ, MARZENA, *Application of the near-infrared spectroscopy in the pharmaceutical technology*, Journal of pharmaceutical and biomedical analysis, 66 (2012), pp. 1–10.
- [87] SJÖSTRÖM, M.; WOLD, S.; LINDBERG, W.; PERSSON, J.; MARTENS, H., *A multivariate calibration problem in analytical chemistry solved by partial least-squares models in latent variables*, Analytica Chimica Acta, 150 (1983), pp. 61–70.
- [88] NEGRE, F.; JARQUE, J.C.; FELIU, C.; ENRIQUE, J.E., *Study of the spray-drying operation of ceramic powders on an industrial scale, its control and automation*, en Proceedings of World Congress on Ceramic Tile Quality, 1994, pp. 105–16.
- [89] LLORENS, D.; DE LA DEDICACIÓN, A.; NEGRE, F., *Dispositivo de muestreo para materiales pulverulentos, áridos, filamentosos y otros.*, ES-2049145A2, Nov. 1991.
- [90] MALLOL, G.; LLORENS, D.; FELIU, C.; CASTRO, F., *Medida en continuo de la humedad de los soportes cerámicos prensados*, Cerámica Información, 289 (2002), pp. 81–90.
- [91] JARQUE, J.C.; CANTAVELLA, V.; SEGARRA, C.; SILVA, B.; G. CABRERA; GASCÓN, F., *Comportamiento de composiciones cerámicas frente al secado en condiciones industriales*, Ediceram, 12 (2002), pp. 22–41.
- [92] LAW, AVERILL M.; KELTON, W. DAVID; KELTON, W. DAVID, *Simulation modeling and analysis*, vol. 3, Mcgraw-hill New York, 2007.
- [93] ROBINSON, STEWART, *Simulation: the practice of model development and use*, Bloomsbury Publishing, 2014.
- [94] MALLOL, G.; BOIX, J.; CANTERO, J.I. ET AL., *Simulación por eventos discretos de la fabricación de baldosas cerámicas para la generación de su “modelo digital”*, en Memorias del XVI Congreso mundial de la calidad del azulejo y del pavimento cerámico QUALICER. Castellón. Cámara Oficial de Comercio, Industria y Navegación, 2020.
- [95] BANKS, J.; CARSON, J.S.; NELSON, B.L., *Discrete Event System Simulation, 2nd Edition*, Upper Saddle River, New Jersey: Prentice-Hall, 1996.
- [96] ROBINSON, S., *Discrete-event simulation: from the pioneers to the present, what next?*, Journal of the Operational Research Society, 56 (2005), pp. 619–629.
- [97] JAAMSIM DEVELOPMENT TEAM, *JaamSim: Discrete-Event Simulation Software. Version 2016-14*, URL <http://jaamsim.com>, doi:10.5281/zenodo.57118.
- [98] KING, D.H.; HARRISON, HARVEY S., *Open-source simulation software “jaamsim”*, en 2013 Winter Simulations Conference (WSC), IEEE, 2013, pp. 2163–2171.

- [99] ROBINSON, STEWART, *Conceptual modelling for simulation Part I: definition and requirements*, Journal of the operational research society, 59 (2008), pp. 278–290.
- [100] OLLERO DE CASTRO, P.; FERNÁNDEZ CAMACHO, E., *Control e instrumentación de procesos químicos*, Editorial Síntesis, 1997.
- [101] MARLIN, THOMAS E., *Process Control. Designing Processes and Control Systems for Dynamic Performance Modelling. 2nd Edition*, McGraw-Hill International Editions, 2015.
- [102] KAGERMANN, H.; HELBIG, J.; HELLINGER, A.; WAHLSTER, W., *Recommendations for implementing the strategic initiative INDUSTRIE 4.0: Securing the future of German manufacturing industry; final report of the Industrie 4.0 Working Group*, Forschungsunion, 2013.
- [103] MONOSTORI, L.; KÁDÁR, B.; BAUERNHANSL, T. ET AL., *Cyber-physical systems in manufacturing*, Cirp Annals, 65 (2016), pp. 621–641.
- [104] UHLEMANN, T.; LEHMANN, C.; STEINHILPER, R., *The digital twin: Realizing the cyber-physical production system for industry 4.0*, Procedia Cirp, 61 (2017), pp. 335–340.