



**Departament d'Enginyeria de Sistemes
Industrials y Disseny**

TESIS DOCTORAL

**ESTIMACIÓN ESTADÍSTICA, MODELADO Y
ANÁLISIS DE LA TRANSMISIÓN Y COSTE DE LA
VARIABILIDAD EN PROCESOS MULTI-ETAPA.
APLICACIÓN EN LA FABRICACIÓN DE
BALDOSAS CERÁMICAS.**

Memoria de tesis presentada por

Matías Gras Llopis

Para optar al grado de doctor, dirigida por

Jose Antonio Heredia Álvaro

Castellón, España, Marzo 2010

Dedicatoria

A mi esposa Rosa y a mis hijos Alejandro, Rosa, Ana y
Paula

Agradecimiento

Quiero mostrar mi agradecimiento a las personas que han permitido la realización con éxito de este trabajo.

Al profesor Jose Antonio Heredia por su apoyo y dirección durante para el desarrollo del trabajo y en toda la trayectoria investigadora.

Al personal del departamento de Ingeniería de Sistemas y Diseño industrial así como al del Instituto de tecnología cerámica por su apoyo y a la empresa Keraben Grupo S.A. en la que se ha realizado la aplicación experimental.

A mi esposa y a mis hijos por padecer mis horas de trabajo apoyándome en todo momento.

INDICE

INTRODUCCION	11
CAPITULO 1. JUSTIFICACION, OBJETIVOS Y METODOLOGÍA	15
1.1.- Justificación	16
1.2.- Objetivos y metodología	18
1.3.- Definiciones	24
CAPITULO 2. APLICACIÓN EN EL PROBLEMA DIMENSIONAL DE LA PRODUCCION DE BALDOSAS CERAMICAS	27
2.1.- El sector cerámico Español	28
2.1.1.- Baldosas cerámicas.....	28
2.1.2.- Posición del sector cerámico español.....	30
2.2.- El problema de la variación dimensional en la producción de baldosas cerámicas	32
CAPITULO 3. TRATAMIENTO DE LA VARIABILIDAD EN LOS PROCESOS..	39
3.1.- El problema de la variabilidad	40
3.1.1.- La variabilidad en los procesos.....	40
3.1.2.- El coste de la variabilidad.....	43
3.1.3.- Procesos robustos.....	48
3.1.4.- Tolerancias.....	49
3.1.5.- La capacidad de los procesos.....	50
3.2.- Herramientas de análisis estadístico	53
3.2.1.- Los gráficos de control.....	53
3.2.2.- El análisis de varianza.....	60
3.2.3.- Tratamiento de errores.....	64
3.3.- La variabilidad en los procesos multietapa	64
3.3.1.- Modelos de trasmisión de variabilidad.....	67
3.4.- Conclusiones	79

CAPITULO 4. EL PROCESO CERAMICO Y LAS VARIABLES QUE AFECTAN A LA DIMENSION DE LAS BALDOSAS	81
4.1.- El proceso cerámico.....	82
4.2.- La variación dimensional en la producción de baldosas cerámicas....	84
4.3.- las etapas del proceso y los factores que generan a la variación dimensional.....	87
4.3.1.- Materias primas.....	88
4.3.2.-Molienda.....	92
4.3.3.-Atomización.....	95
4.3.4.-Prensado.....	103
4.3.5.-Cocción.....	112
4.4.- Conclusiones.....	117
CAPITULO 5. PROPUESTA DE METODO PARA EL MODELADO DE LA TRASMISION DE VARIA BILIDAD, SU COSTE Y LA MEJORA DEL PROCESO	121
5.1.- Resumen de la metodología propuesta.....	122
5.2.- Análisis de resultados del proceso.....	124
5.3.- Modelo de transmisión de variabilidad, estimación y validación.....	128
5.3.1.- Modelo general de transmisión de variabilidad.....	130
5.3.2.- Estimación de componentes y validación del modelo.....	138
5.4.- Estimación de un modelo de costes de variabilidad.....	140
5.4.1.-Costes de fabricación.....	145
5.4.2.-Componentes de los costes de variabilidad.....	146
5.4.3.-Estimación del modelo.....	150
5.5- Mejora del proceso.....	151
5.5.1.- Análisis de soluciones.....	152
5.5.2.- Combinación de actuaciones y selección de alternativa óptima....	156
5.6.- Conclusiones.....	159
CAPITULO 6 DESCRIPCION DEL PROCESO ANALIZADO.....	163
6.1.- Datos generales del proceso.....	164
6.2.- Equipos, materiales y condiciones de operación.....	166
6.2.1.- Preparación de polvo atomizado.....	166

6.2.2.- Conformación del soporte.....	171
6.2.3.- Cocción.....	173
6.2.4.- Clasificación.....	175
CAPITULO 7 APLICACIÓN EXPERIMENTAL. ESTIMACION DEL MODELO DE TRASMISION DE VARIABILIDAD.....	179
7.1.- Modelo general.....	180
7.1.1.- Identificación de las variables de proceso.....	181
7.1.2.- Modelo de transmisión de variabilidad	187
7.2.- Estimación de componentes del modelo.....	192
7.2.1.- Toma de muestra y medición.....	192
7.2.2.- Modelos de relación entre variables.....	194
7.2.3.- Análisis de resultados de la característica de calidad.....	196
7.2.4.- Estimación de la varianza de los componentes.....	204
7.3.- Cálculo y validación de los modelos.....	219
7.3.1.- Composición de varianzas etapa de prensado.....	220
7.3.2.- Composición de varianzas del proceso completo.....	222
7.3.3.- Contribución de las etapas.....	226
7.4.- Tolerancias e intervalos de variación.....	228
7.5.- Conclusiones.....	229
CAPITULO 8.- ESTIMACION DEL MODELO DE COSTES DE VARIABILIDAD..	231
8.1.- Modelo general.....	232
8.1.1- Costes de producción.....	232
8.1.2- Relación entre los costes de calidad y producción.....	233
8.2.- Estimación del modelo de costes.....	235
8.2.1.- Estimación de los componentes del coste de calidad.....	235
8.2.2.- Cálculo el modelo.....	241
8.3.- Conclusiones.....	242
CAPITULO 9.- SELECCIÓN DE LA ALTERNATIVA OPTIMA PARA LA MEJORA DEL PROCESO.....	243
9.1.- Situación y objetivos.....	244

9.1.1.- Situación del proceso.....	244
9.1.2.- Objetivos.....	246
9.2.- Análisis de soluciones de mejora	248
9.2.1.- Materias primas.....	248
9.2.2.- Atomización.....	252
9.2.3.- Prensado.....	255
9.2.4.- Cocción.....	257
9.2.5.- Variabilidad del equipo de medida.....	260
9.2.6.- Modificación del modelo de relación.....	260
9.3.- Selección de alternativas.....	263
9.3.1.- Resultados de las diferentes opciones de mejora.....	263
9.3.2.- Selección de la alternativa que maximiza la capacidad y el ahorro	264
9.4.- Limitaciones.....	269
 CAPITULO 10. – VALIDACION INDUSTRIAL.....	 271
 10.1.- Condiciones de operación.....	 272
10.2.- Resultados del proceso.....	272
10.3- Composición de varianzas.....	280
 CAPITULO 11 CONCLUSIONES Y NUEVOS DESARROLLOS.....	 283
 CAPITULO 12 BIBLIOGRAFIA.....	 287
 ANEXOS.....	 297

Introducción

La variabilidad es un problema que no está suficientemente resuelto en muchos procesos, son muchas las situaciones en las que las variaciones de algunas características funcionales del producto acabado superan el rango definido por las especificaciones del mercado encontrándonos con procesos “incapaces” que generan un porcentaje de productos fuera de especificaciones; en muchas de estas situaciones no se dispone además de información precisa sobre cómo se genera esta variación ni del coste que supone, encontrándonos con procesos en los que ni la asignación de tolerancias ni el diseño de los planes de control se ha realizado adecuadamente.

Este trabajo tiene dos objetivos: el primero es plantear una metodología capaz de estudiar y modelar la transmisión de variabilidad y su coste para poder disponer de herramientas que permitan mejorar el proceso; el segundo es aplicar la propuesta a un caso concreto “variabilidad dimensional de la producción de baldosas cerámicas”.

Por un lado, para la estimación del “modelo de transmisión de variabilidad” el método propuesto utiliza diversas herramientas estadísticas como los gráficos de control y ANOVA para estimar a partir de la información del propio proceso, los modelos de relación entre variables, la variación de las mismas, la del resultado final y detectar y cuantificar el efecto de factores que no teniendo efecto sobre el resultado medio si lo tienen sobre la variación; por otro lado, para la estimación del “modelo de costes de variabilidad” se utilizarán los conceptos de “costes de calidad” combinados con las funciones de pérdida como herramienta para estimar el impacto económico asociado a diferentes resultados de variación.

La aplicación del método se desarrolla para estudiar y mejorar el problema de la variación dimensional en un proceso de producción de baldosas cerámicas de baja absorción de agua. España es líder mundial en la producción de este tipo de materiales y este es un caso típico de proceso multi-etapa con transmisión de variabilidad en el que la variación observable en los resultados de la característica de

calidad final “dimensión” es consecuencia de la generada y transmitida a lo largo del mismo y esta no suele cumplir con los requisitos actuales del mercado.

Se han publicado recientemente tres artículos que contienen parte de las propuestas y resultados de esta Tesis:

- Análisis y modelado de la transmisión de variabilidad dimensional en un proceso de producción de baldosas cerámicas. J. Heredia ; M. Gras *“Boletín de la Sociedad española de Cerámica y Vidrio” 2009*
- Empirical procedure for modelling the variation transmission in a manufacturing process. J. Heredia; M. Gras *“Quality Engineering – American Society for Quality” 2010*
- Statistical estimation of variation transmission model in a manufacturing process J. Heredia; M. Gras *International Journal of advanced manufacturing technology” 2010*

JUSTIFICACION, OBJETIVOS Y APLICACION

Capítulo 1.

Justificación, Objetivos y Metodología

1.1.- JUSTIFICACION

1.2.- OBJETIVOS Y METODO

1.3.- DEFINICIONES

1.2 JUSTIFICACION

No hay dos productos exactamente iguales ni ningún proceso capaz de producir dos elementos idénticos y aunque las diferencias pueden ser mínimas siempre existirán; la razón de esta variación es que cualquier proceso a pesar de lo bien diseñado o controlado que esté siempre tendrá una variabilidad inherente aún funcionando en condiciones óptimas. Conocer cuál es el resultado de variación esperable en las mejores condiciones de operación de un proceso y disponer de modelos matemáticos que expliquen las causas que la generan y su impacto económico en el coste es la base para evaluar y tomar decisiones para mejorarlo.

Es en la etapa de diseño, cuando a partir del conocimiento de las relaciones entre las variables de proceso y la característica de calidad del producto se definen los procedimientos de control y se asignan las tolerancias a las variables para obtener un resultado final acorde con los requisitos funcionales establecidos; esta actividad requiere un conocimiento detallado del proceso, tanto de las variaciones esperables en cada etapa como de los modelos que determinan sus relaciones.

La variabilidad observable a la salida de un proceso multi-etapa es consecuencia de la generada y transmitida a lo largo del mismo en sus diferentes operaciones secuenciales; en muchos casos el desconocimiento del comportamiento real de cada variable en cada etapa puede llevar al error de infravalorar el efecto de algunas o a aplicar procedimientos de control y asignar tolerancias que no están de acuerdo con su capacidad y con los requisitos exigibles, lo que lleva a situaciones en las que o bien el procedimiento de control es incapaz de realizar su función o bien se acaban obteniendo resultados de variación que serían mejorables. Puede haber también en los procesos, factores de variación que no afectan al resultado final promedio de la característica de calidad pero si a su variación e incluso casos en las que los que el efecto de estos factores sobre la variación no puede medirse directamente y solo puede estimarse a partir de su efecto en la respuesta.

El tratamiento inadecuado de todas estas situaciones puede llevar a tener procesos estadísticamente “incapaces”, es decir, que no son capaces de ofrecer resultados acordes con las tolerancias determinadas por el mercado que por otro lado es cada vez más exigente y requiere menores variaciones.

Conocer todas las causas de variación, los modelos de relación entre las variables y disponer de un modelo matemático que explicase la variabilidad del proceso permitiría seleccionar los planes de control, tolerancias y actuaciones necesarias para obtener el resultado requerido. En muchos casos, las simulaciones a escala piloto no reproducen el comportamiento real del proceso y la traslación de los resultados a escala industrial supone cambios en los modelos de relación, apareciendo además factores de variación que no pueden simularse previamente; esto puede implicar que las tolerancias asignadas y los planes de control definidos en la fase de diseño puedan resultar ineficaces.

La fabricación con procesos incapaces de cumplir con las especificaciones de calidad establecidas es bastante más común de lo que puede esperarse y son muchos los procesos en los que el material fuera de especificaciones representa porcentajes importantes de la producción que en ocasiones puede llegar a representar hasta el 30% de la misma. En muchos de estos procesos se aplican soluciones para minimizar el impacto económico, como crear subgrupos con distintas especificaciones o definir diferentes niveles de calidad con distintas tolerancias pero el problema no puede resolverse con un enfoque orientado a modificar las exigencias del producto acabado y solo es posible resolverlo con un enfoque preventivo orientado hacia a la mejora del proceso.

Como ejemplo de estas situaciones este autor puede detallar experiencias profesionales en procesos de fabricación en los que este problema es muy relevante y no está resuelto, como el proceso de fabricación de baldosas cerámicas en las que la variabilidad dimensional o de tonalidad provoca que no más del 80 % del producto en un mismo lote puede agruparse con las mismas características, o el proceso de producción de varistores eléctricos en el que no más del 70 % del las unidades tienen valores de tensión nominal en el intervalo exigido o el de aislantes electromagnéticos (Ferritas) en el que la variación de la absorción electromagnética en la frecuencia especificada presenta unas variabilidades muy superiores al intervalo de tolerancias y obliga a crear subgrupos de producto de diferente calidad para distintas aplicaciones.

El estudio y modelado de la transmisión de variabilidad está muy desarrollado en procesos de ensamblaje y mecanizado con múltiples etapas pero no tanto en procesos de transformación en los que las variables identificables en las distintas etapas son distintas y cuyas relaciones solo pueden estimarse con exactitud a partir de la información obtenida en el propio proceso; por este motivo, este trabajo plantea la

utilización de herramientas estadísticas (modelos de regresión, gráficos de control y ANOVA) para estimar a partir de los datos del proceso los modelos de relación y los resultados de variabilidad asegurando que los datos proceden de situaciones estables y son estadísticamente significativos.

Los conceptos de calidad como cumplimiento con las especificaciones están obsoletos; no solo basta obtener los materiales que cumplan con sus requisitos funcionales sino que hay que hacerlo con la mínima variación. La variabilidad está directamente relacionada tanto con el concepto de calidad como con el de coste y en un mercado completamente competitivo ofrecer productos “consistentes” es decir con la mínima variación es sinónimo de calidad y supone un valor diferencial de primera magnitud. La relación entre coste y variación ha sido estudiada por múltiples autores, destacando las aplicaciones de Taguchi (1980); todos los fabricantes y clientes entienden la “consistencia” del producto como un valor añadido esencial pero no es frecuente disponer de modelos que cuantifiquen la relación de variabilidad con coste por lo que en la mayoría de ocasiones la decisión para realizar inversiones en mejora no pueden basarse en criterios cuantificables de ahorro. Disponer de un modelo de costes junto a uno que explique cómo se genera y transmite la variabilidad permitirá identificar las deficiencias del proceso y tomar las decisiones de mejora más adecuadas.

El método planteado se aplicará para el estudio y mejora del problema de la variación dimensional en un proceso de producción de baldosas cerámicas de baja absorción de agua. Este es un caso típico de proceso multi-etapa cuyos resultados de variación dimensional superan las tolerancias establecidas por el mercado y en los que un porcentaje de la producción puede considerarse como defectuosa al presentar valores de dimensión fuera de las tolerancias establecidas para la dimensión nominal; esta situación obliga a los fabricantes a clasificar el producto acabado en subgrupos de diferentes dimensiones “calibres” para poder facilitar la colocación del material lo que supone un aumento de coste por el incremento de posiciones en el almacén, la complejidad logística de la gestión de un stock separado en diferentes “calibres”, la necesidad de sobredimensionar los lotes de fabricación y en muchas ocasiones las reclamaciones de los clientes insatisfechos con el resultado del material. La reducción de esta variabilidad es un objetivo prioritario de todos los fabricantes; España es líder mundial en la producción de este tipo de materiales y cuenta actualmente con la mejor tecnología y conocimiento de los procesos pero el problema de la variación dimensional no está todavía suficientemente resuelto; además, la evolución del

producto a formatos cada vez más grandes y de las exigencias de los clientes que cada vez están menos dispuestos a asumir cualquier problema de variación exige soluciones de mejora para este problema.

1.3 OBJETIVOS Y METODO

El objetivo final de la propuesta es mejorar el resultado de calidad del proceso, entendiendo como mejora la reducción de la variación observable en la característica de calidad final del producto. Tomar decisiones para optimizar el resultado del proceso no es posible sin conocer las causas que generan la variabilidad y el impacto económico que representa; para esto, se propone un método para estimar un modelo explicativo de la transmisión de variabilidad y un modelo de costes capaz de evaluar el impacto económico que tiene sobre el coste de fabricación cada resultado de variación. La combinación de estas dos herramientas permitirá diagnosticar las causas fundamentales del problema y decidir que inversiones o mejoras en el sistema de sensores, medición y control del proceso son las más recomendables en términos de resultados en el proceso y de inversión así como asignar las tolerancias adecuadas a todo el proceso para cumplir los objetivos establecidos. La aplicación se realizará en un proceso real de fabricación de baldosas cerámicas en el que se estudiará el problema de la variabilidad dimensional del producto acabado.

El esquema básico de trabajo propuesto es el descrito en la figura 1.1 y se compone de tres bloques fundamentales para los que se propone la metodología y objetivos.

Estimación de un modelo de transmisión de variabilidad

El objetivo es estimar empíricamente a partir de los datos obtenidos en el propio proceso un modelo que explique donde se genera y como se transmite la variabilidad en procesos de transformación multi-etapa en los que las características que definen la calidad en cada una de las etapas son diferentes y tienen relaciones que pueden modelarse matemáticamente y donde además puede haber factores que no afectando al valor medio de la característica de calidad puedan tener un efecto significativo sobre su variación y cuya presencia y contribución al problema no puede medirse directamente y solo puede estimarse a partir de un análisis de su efecto en la respuesta .

La estimación de los modelos de relación y de la contribución a la variabilidad generada por cada componente se realiza utilizando herramientas estadísticas como el análisis de regresión, gráficos de control y ANOVA; la utilización de estas permite obtener información del proceso con niveles de confianza estadísticos predeterminados y asegurar asimismo que la información procede de procesos trabajando en régimen estable.

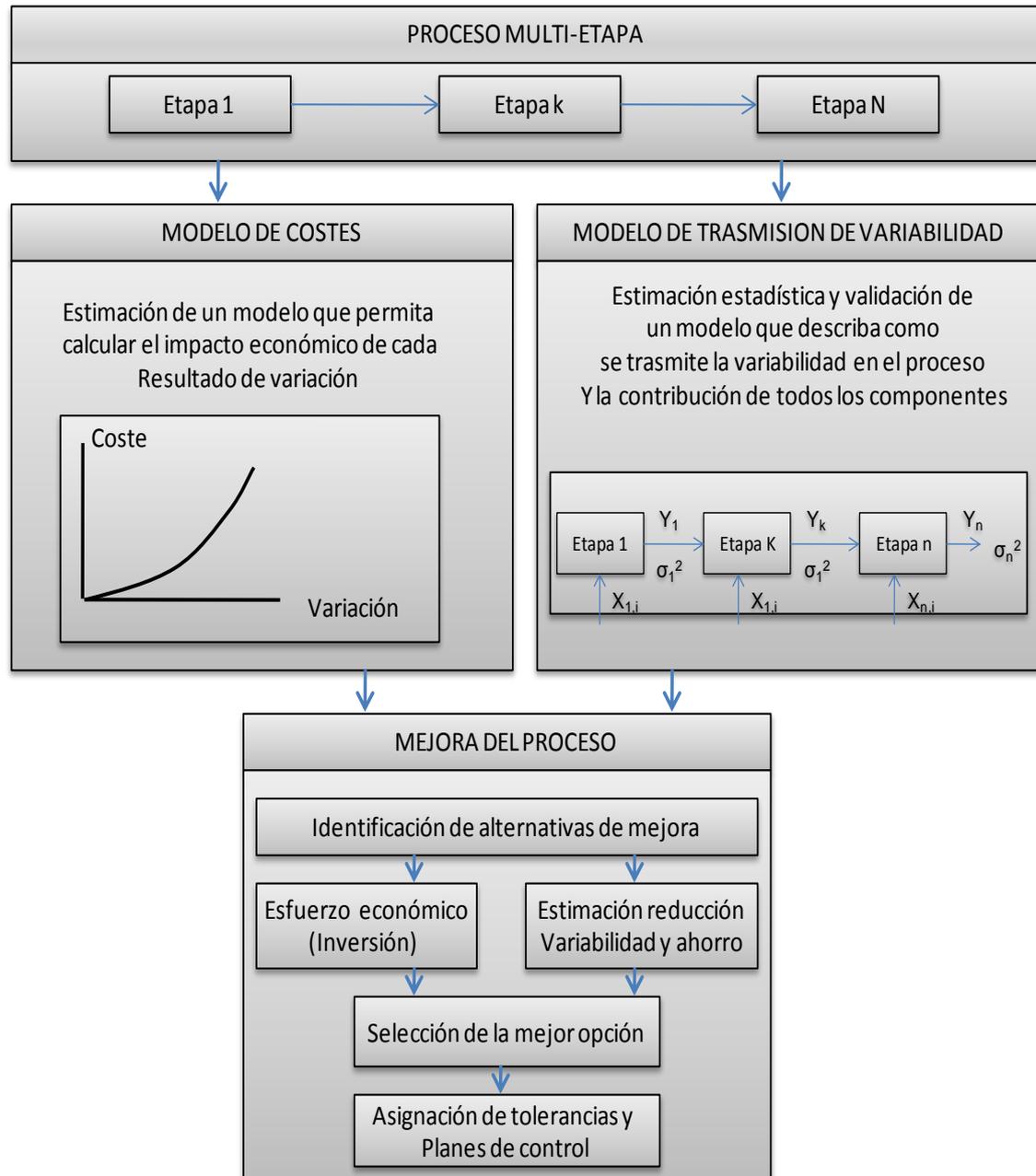


Figura 1.1: Esquema general de la propuesta

Se han publicado diversas técnicas matemáticas para tratar de forma sistemática la transmisión de la variación a través de las distintas fases proceso productivo; por una parte, encontramos los resultados conocidos de la estadística sobre la transmisión del error cuando se conoce la relación funcional que conecta el resultado final con las variables que lo componen, así como la estructura de error de estas componentes se puede estudiar cómo se transmiten las variaciones de los componentes al resultado final. Los fundamentos teóricos de esta técnica se pueden consultar en cualquier manual de estadística, (por ejemplo, Box y Hunter (2000)). A pesar de lo conocido de estos resultados y de su potencial para ayudar a mejorar la calidad de los procesos de fabricación, la realidad es que había sido poco aplicado hasta recientemente.

En 1957 S. J. Morrison presentó su método para la transmisión del error que en 1998 volvió a publicar con la intención de revivir el interés por este enfoque; en 1997 Hu discute el problema de la variación y su propagación en procesos de fabricación multi-etapa utilizando el término “corrientes de variación” (“Stream of variation” SoV).. Una buena introducción y recopilación del estado del arte de este enfoque se recoge en el libro de Shi, J (2007).

El método que se desarrolla en esta tesis se basa fundamentalmente en la propuesta de Morrison para establecer un modelo de “composición de varianzas” pero la mejora con la utilización de algunas de las propuestas descritas en la metodología SoV y fundamentalmente con la incorporación de las citadas herramientas de análisis estadístico para estimar los componentes de las ecuaciones a partir de los datos obtenidos en el proceso, verificando que los datos proceden de una situación estable y pudiendo además estimar la contribución al problema de factores que no teniendo efecto sobre el resultado medio de la característica de calidad si lo tienen sobre su variabilidad.

El resultado final de la propuesta consiste en disponer de un “modelo de transmisión de variabilidad” en el que aparece reflejada la variación generada por cada uno de los factores analizados y la contribución de cada uno de ellos así como de cada etapa al resultado final; detallando las ecuaciones de los modelos de composición de varianzas capaces de predecir la variación final del proceso (varianza de la característica de calidad) a partir de la de cada componente y por tanto predecir la reducción de variación que puede lograrse con cualquier modificación. El modelo debe validarse para confirmar las hipótesis con las que se ha construido; para ello se contrasta el

resultado de varianza medido en la característica de calidad final con el predicho; la diferencia que incorpora el error derivado de factores que no se hayan tenido en cuenta deberá ser suficientemente baja para considerar el modelo válido.

Estimación de un modelo de costes de variabilidad

Disponer de un modelo que explique la transmisión de variabilidad permite predecir el resultado que puede obtenerse con cada mejora del proceso. Estimar el ahorro que supone cualquier mejora es imposible si no se conoce cuál es el impacto económico sobre el resultado final del proceso de cada situación de variación. El segundo objetivo del trabajo (figura 1.1) es pues determinar un procedimiento que permita estimar una función de “costes de variabilidad”

La relación entre coste y variabilidad ha sido estudiada por múltiples autores, destacando las aplicaciones de Taguchi (1980) con sus modelos de pérdida; sus aportaciones a la ingeniería de la calidad son unánimemente reconocidas como una de las más importantes en los últimos tiempos y a él se deben ideas que relacionan directamente calidad con variabilidad y con costo así como el énfasis específico en las etapas de diseño de producto o proceso como vía principal en la mejora de la calidad basada en la prevención. Este autor introduce los conceptos actuales de calidad considerando que el concepto de variación lleva implícita siempre una pérdida de valor y asociando por tanto la variabilidad con calidad y con costo.

El método propuesto, utiliza para estimar el modelo que relaciona la variabilidad con coste la clasificación de los costes de calidad introducida por Feigenbaum (1961) en la que se separan los costes de prevención, inspección y fallos, evaluando el impacto económico de cada uno de estos grupos con una visión de coste diferente al concepto tradicional. Diversos autores como Mefford (1989) defienden que los beneficios indirectos que se derivan de una mejora de la calidad son infra estimados utilizando el análisis tradicional de costes. El método que se plantea en este trabajo introduce una propuesta capaz de estimar y validar el modelo de costes de variabilidad a partir del conocimiento del impacto económico de la situación medida en el proceso y la repercusión de cada uno de los costes de calidad en el mismo.

Mejora del proceso

(Figura 1.1). Disponiendo de un modelo matemático que permita predecir las reducciones de variación de la característica de calidad final que pueden obtenerse con cada inversión para la mejora de las distintas etapas del proceso y combinándolo con el modelo de costes de variabilidad, es posible simular el efecto, coste y resultado económico neto de las distintas posibilidades de mejora y decidir cuál es la más recomendable en términos económicos y, una vez determinada, definir los planes de control más adecuados y realizar la asignación de tolerancias para obtener el resultado esperado.

Aplicación práctica

La aplicación experimental se desarrolla en un proceso de fabricación de baldosas cerámicas de baja absorción de agua; de las diferentes características de calidad que definen una baldosa cerámica la dimensión es una de las más importantes y esta cumple las condiciones para las que se plantea el método propuesto; es decir, sus resultados de variación son consecuencia del efecto de diferentes factores identificables a lo largo del proceso y estos no están de acuerdo con las especificaciones del mercado por lo que el impacto económico del problema es muy relevante.

Aunque estos procesos están muy automatizados y tienen identificadas las variables que influyen sobre el resultado dimensional final, siguen siendo sin embargo procesos incapaces de cumplir con los requisitos del mercado. No se ha encontrado ninguna publicación que analice el comportamiento del proceso en su conjunto ni tampoco que trate el efecto de la variación sobre el coste del producto; uno de los propósitos de este trabajo es analizar un proceso real, estimando su modelo de transmisión de variabilidad y la función de costes y, que permitan decidir qué acciones de mejora son las más recomendables con el objetivo último de establecer un proceso capaz.

Los resultados de este trabajo corresponden a los de un proceso concreto con una maquinaria, producto, materias primas y nivel de automatización determinados y no son cuantitativamente trasladables a otro proceso similar ya que los resultados de variación y los valores de los coeficientes y componentes de los modelos corresponden al caso estudiado; no obstante, los factores de variación identificados

son los mismos en todos los procesos similares y las conclusiones son cualitativamente trasladables.

Aunque la característica de calidad estudiada es la dimensión de la baldosa; el procedimiento de trabajo descrito puede aplicarse a la modelización de la variabilidad de cualquier otra característica de calidad, no solo en la producción de baldosas cerámicas sino en cualquier proceso de transformación multi-etapa.

1.3 DEFINICIONES

Se detallan a continuación algunos conceptos que se utilizarán repetidamente en el desarrollo del trabajo.

- Característica de calidad: La calidad del producto se define a partir de un conjunto de variables para las que se han requerido valores predeterminados en la fase de diseño de modo que se garantice su funcionalidad. Característica de calidad es la variable objeto de estudio cuyo resultado de variabilidad se desea mejorar.
- Tolerancias: Rango aceptable en la variación respecto al valor objetivo.
- Asignación de tolerancias: también definible como distribución de tolerancias o reparto de tolerancias; corresponde a la definición de los valores de las tolerancias a lo largo del proceso.
- Producto defectuoso: con independencia del tratamiento comercial que se aplique, se considera producto defectuoso a aquel cuyo valor de la característica de calidad está fuera del rango determinado por las tolerancias.
- Factores de variación: Causas identificables a lo largo del proceso de fabricación que provocan variaciones en el resultado medido de la característica de calidad; estos factores incluyen tanto a las propias variables del proceso, como los errores de los sistemas de medición o cualquier otra causa que pueda generar variación del resultado.

-
- Variabilidad Variación de la característica o variable objeto de estudio; esta se define a partir de un intervalo de variación (habitualmente $\pm 3\sigma$) calculado a partir de la desviación típica de la variable.
 - Modelo de transmisión de variabilidad: Modelo que describe donde se genera y como se transmite la variabilidad en el proceso, detallando los diferentes factores de variación, su posición en el proceso, sus relaciones y su contribución al resultado final.
 - Composición de varianzas : Modelo matemático que relaciona un resultado de variación final (varianza) final de una característica de calidad del producto acabado o de cualquier producto intermedio con la variación de los factores que la generan (varianzas).
 - Costes de calidad Impacto económico de las operaciones relacionadas con el control y prevención de la calidad e impacto económico resultante de los fallos de calidad.
 - Coste de variabilidad: Impacto económico que supone un resultado de variabilidad determinado en un proceso
 - Modelo de costes de variabilidad Modelo matemático que relaciona la variación de la característica de calidad con el impacto económico que supone.
 - Proceso en “estado de control estadístico” proceso con una variabilidad mínima conocida y predecible, solo consecuencia de causas de variación comunes.

Capítulo 2.

Aplicación en el problema dimensional de la producción de baldosas cerámicas.

2.1.- EL SECTOR CERAMICO ESPAÑOL

2.1.1.- Baldosas cerámicas

2.1.2.- Posición del sector cerámico español.

2.2.- EL PROBLEMA DE LA VARIACION DIMENSIONAL EN LA PRODUCCION DE BALDOSAS CERAMICAS

2.1.- EL SECTOR CERAMICO ESPAÑOL

España es líder mundial en la producción de pavimentos y revestimientos cerámicos de alta calidad; los productos cerámicos españoles están presentes en todos los mercados del mundo y solo Italia compite directamente en calidad, diseño y tecnología. La producción cerámica en España está concentrada en la provincia de Castellón de la plana, donde actualmente hay más de 250 empresas que facturan en total 3.800 millones €/año generando 25.000 puestos de trabajo directos y 7.000 indirectos; junto a esta industria se ubican en la misma zona todas las empresas fabricantes de materias primas (Esmaltes) y servicios auxiliares, siendo el motor económico fundamental de la provincia y uno de los más activos de la comunidad Valenciana.

2.1.1.- BALDOSAS CERÁMICAS

Las baldosas cerámicas se subdividen en diferentes grupos con distintas características que definen su funcionalidad según proponen Gras M. et al (1998) en su propuesta de clasificación funcional de baldosas cerámicas y la Guía de la Baldosa Cerámica (2007).

- *Pavimentos cerámicos esmaltados*: Grupos BI_b y BII_a según la norma EN 14411 ISO 13006 (Absorción de agua menor 3% BI_b y absorción de agua entre 3% y 6% BII_a) . Los materiales fabricados en España con esta clasificación son los más competitivos del mercado internacional tanto por su nivel de calidad como de diseño; fundamentalmente por la excelente calidad de las materias primas españolas y por el elevado grado de optimización y conocimiento de los fabricantes locales; estos productos se fabrican en formatos medios y pequeños y son los habitualmente utilizados en el interior de las viviendas
- *Pavimentos de gres porcelánico*: Grupo BI_a según la norma EN 14411 con absorciones de agua menores de 0,5 %. Estos se fabrican con materias primas que consiguen niveles de porosidad de soporte prácticamente nulas; lamentablemente no se dispone en España de suficientes yacimientos de materia prima con la calidad requerida para fabricar estos materiales y en la mayoría de los casos se debe recurrir a materiales importados con el

consiguiente sobrecoste. Su aplicación funcional en el interior de viviendas no presenta ventajas técnicas respecto a los pavimentos del grupo anterior pero son materiales en general más resistentes a los efectos medioambientales y tanto por estas prestaciones como por el efecto estético de la dimensión mayor suelen ser los preferidos por los prescriptores para proyectos y utilizaciones especiales (grandes superficies, fachadas ventiladas, suelos técnicos etc). La variación dimensional del producto se agrava al aumentar el tamaño de formato por lo que este tipo de productos suelen someterse a un proceso de rectificación mecánica tras el proceso de fabricación final que aunque supone un incremento de coste importante, se justifica por el alto valor de del material. En este tipo de productos, España mantiene un excelente nivel de calidad pero la competencia de países como Italia, con niveles de calidad equivalentes o países de extremo oriente con abundantes yacimientos de materias primas y costes de producción muy inferiores es cada vez más intensa

- *Revestimientos de pasta roja o pasta blanca fabricados por la tecnología de bicocción:* (Grupo BIII según EN 14411 ISO 13006 con absorción de agua superior al 10 %) esta tecnología de fabricación era la habitual hasta los años 90 y la utilizada desde los inicios de la producción cerámica y consiste en una cocción preliminar del soporte, la posterior esmaltación del soporte cocido y una última cocción del soporte esmaltado. Sigue siendo una tecnología comúnmente utilizada en muchos países para la producción de revestimientos cerámicos de distintos formatos. Los productos fabricados en este grupo son los habitualmente utilizados para recubrir las paredes.
- *Revestimientos de pasta roja o pasta blanca fabricados con la tecnología de monococción porosa:* (Grupo BIII según EN 14411 ISO 13006 con absorción de agua superior al 10 %). Productos con el mismo uso que los descritos en el punto anterior pero fabricados con otra tecnología; esta se desarrolló en España con un gran impacto en todo el mercado por la calidad y reducción de coste que supone evitar la cocción previa del soporte que se realiza en los revestimientos descritos en el punto anterior; los productos de revestimiento españoles fabricados por monococción porosa son los más reconocidos en todos los mercados. España dispone además de excelentes materias primas para fabricar los productos de pasta roja y no tanto para la producción de materiales de pasta blanca pero debido a razones puramente estéticas,

determinados mercados prefieren el producto de soporte blanco pese a su incremento de precio; no obstante España, tiene un reconocimiento de calidad y “denominación de origen” reconocida en todos los mercados.

- *Otros productos* Adicionalmente a los materiales descritos en los grupos anteriores y que representan la mayor parte de la producción, el sector cerámico español también fabrica un volumen importante de materiales cerámicos complementarios como decorados y piezas especiales que complementan estéticamente los productos “base”. Hay además algunas empresas que siguen fabricando materiales con procesos clásicos de conformación de soporte por colado o extrusión pero estas tecnologías han quedado en desuso por su falta de competitividad.

2.1.2.- POSICION DEL SECTOR CERAMICO ESPAÑOL

España ha sido durante varios años el segundo fabricante mundial de materiales cerámicos solo superada por China y en algunos momentos por Italia, aunque desde el año 2004 la producción española superó a la italiana fundamentalmente por el enorme impacto de la producción de revestimientos de monococción porosa y el crecimiento del mercado interno. Los mercados de la cerámica española son además del propio país que ha llegado a suponer más de un 45 % de las ventas, los de mayor valor añadido; principalmente toda la Unión Europea, Este de Europa y Estados Unidos.

No obstante a la situación privilegiada del sector en los pasados años, la crisis económica mundial, la propia crisis del sector de la construcción en España, la evolución de los tipos de cambio del dólar y el desarrollo tecnológico de determinados países está haciendo cambiar esta situación de liderazgo. La tabla 2.1 muestra la evolución de los diferentes países productores y mercados. Fuente : (Ceramic World Review 2009).

Como se observa en esta tabla, España ya no ocupa el liderazgo que tenía en volumen de producción mundial; hasta el año 2006 su producción ocupaba el segundo lugar en el ranking pero en 2008 se ha visto superada por países como Brasil y de nuevo Italia que ha sabido soportar con una mejor posición en determinados mercados la caída de la demanda; es destacable además el fuerte nivel de crecimiento de la

producción en países como Brasil, Irán e Indonesia y la fuerte caída de la producción en España, Italia y Turquía siendo España el país con el mayor índice de caída; hay que señalar además que estas cifras alcanzan hasta el año 2008 y que la situación en 2009 es esperable ofrezca peores indicadores.

<i>Pais</i>	<i>2004</i>	<i>2005</i>	<i>2006</i>	<i>2007</i>	<i>2008</i>	<i>% Producción Mundial</i>	<i>% Var. 08/07</i>
China	2300	2500	3000	3200	3400	40	6,3
Brasil	566	568	594	637	713	8,4	12
Italia	589	570	569	559	513	6,0	-8,3
España	596	609	608	585	495	5,8	-15,3
India	270	298	340	385	390	4,6	1,3
Iran	175	190	210	250	320	3,8	28
Indonesia	163	175	170	235	278	3,3	18,1
Vietnam	138	176	199	254	270	3,2	6,3
Turquia	216	261	265	260	225	2,6	-13,5
Mexico	177	196	210	215	205	2,4	-4,8

Tabla 2.1 Evolución de la producción anual (Millones m²) de los diez países con mayor volumen (Ceramic World Review 2009).

El fuerte crecimiento de determinados países se explica además de por el aumento de demanda de sus mercados de acceso, por las fuertes inversiones que se están realizando en los mismos con instalaciones de última generación que finalmente suponen no solo un aumento del volumen de producción sino en muchos casos

también una mejora sustancial de la calidad de sus productos; si se tiene en cuenta que además estos países disponen de mano de obra de menor coste, acceso a buenas materias primas y muchas facilidades para la producción se concluye que la única vía para que el sector cerámico español pueda mantener los niveles deseables de producción y rentabilidad es mantener un nivel de liderazgo tecnológico, de calidad y de diseño.

La producción cerámica española se ha caracterizado siempre además de por su calidad y elevado volumen de producción, por otros factores diferenciales como su capacidad de desarrollar tecnología, el diseño de sus productos y la constante apuesta por la innovación de las empresas realizada tanto internamente en las mismas como por los proveedores y con el apoyo de centros públicos de investigación básica y aplicada que ha permitido llevar al sector a los mejores niveles de competitividad. La única vía para la supervivencia de este sector en el futuro es la apuesta por la innovación y el diseño y la aportación continua de soluciones tecnológicas que permitan mejora de calidad de los procesos y reducciones de coste; factores diferenciales con los demás países que están hoy compitiendo con la cerámica española pero que siguen siendo en la mayoría de los casos compradores y no desarrolladores de soluciones tecnológicas.

2.2.- EL PROBLEMA DE LA VARIACION DIMENSIONAL EN LA PRODUCCION DE BALDOSAS CERAMICAS

La variación dimensional es uno de los problemas de calidad más importantes en la producción de baldosas cerámicas de pavimento (grupos BI_a, BI_b y BII_a) ; la elevada contracción de la baldosa durante el proceso de cocción como consecuencia de los procesos de sinterización y reducción de porosidad implica una reducción de volumen que en ocasiones supera el 7 % y esto supone que variaciones en esta contracción se trasladan a variaciones dimensionales de modo que durante un mismo lote de producción se obtienen baldosas con diferencias de dimensión que pueden llegar a provocar problemas importantes durante la colocación del material y que pese a la utilización de juntas de separación entre las piezas para corregir pequeñas diferencias dimensionales, el aspecto estético final no sea satisfactorio para el cliente (figura 2.1). El problema está fundamentalmente restringido a la producción de materiales de pavimento ya que los productos de revestimiento debido a su diferente composición

tienen unas transformaciones en los procesos de cocción diferentes y sus contracciones son mucho menores (menos del 1 %) por lo que el problema se minimiza; la solución obvia que sería utilizar los revestimientos como pavimentos no es válida ya que la resistencia a la rotura de los revestimientos es mucho menor, y son materiales porosos lo que desaconseja su uso como pavimentos.

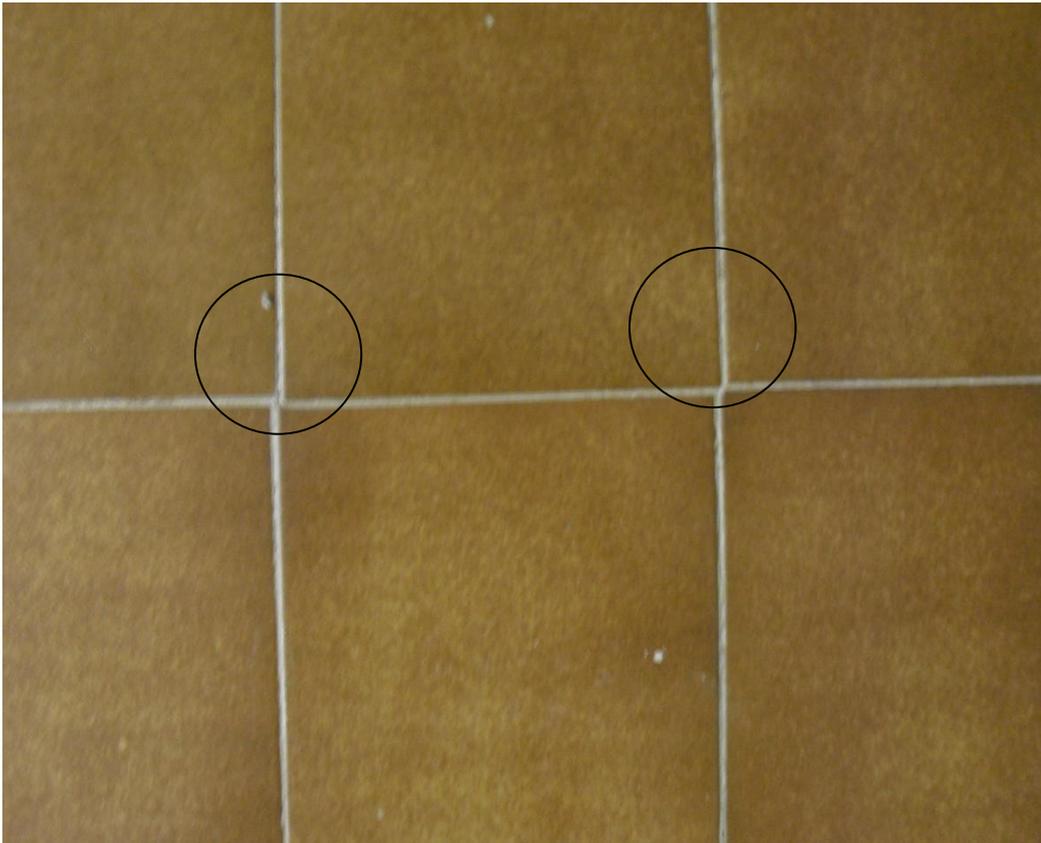


Figura 2.1: Problemas de colocación del material por diferencias dimensionales

La distribución de los valores de dimensión de las distintas baldosas observable a la salida de los procesos suele presentar una variabilidad superior a las tolerancias establecidas por el mercado; estas se definen con criterios relacionados con los procesos de colocación del producto. “Calibre” es una denominación comercial que define un lote de un mismo formato caracterizado porque todas las piezas que lo componen están en un mismo rango de dimensiones; la amplitud del rango que define un “calibre” se define por la propia empresa de acuerdo con criterios comerciales y/o de la política de calidad pero suele oscilar alrededor de 1 mm.

La solución habitualmente aplicada por los fabricantes de pavimento ante este problema es subdividir el producto en diferentes “calibres” que se comercializan por separado. El “calibre” no puede ser considerado como un defecto en el sentido estricto de la palabra sino como un criterio para la selección, clasificación y comercialización de las baldosas en función de su tamaño real pero es evidente que la producción de piezas de diferentes subgrupos en un mismo formato resulta un problema importante y un coste adicional ya que además del deterioro de imagen ante los clientes que no tienen por qué aceptar subgrupos de un mismo producto, su gestión requiere un mayor coste logístico, un mayor esfuerzo y coste en la comercialización y la venta de los “picos” o producciones residuales lo que frecuentemente hace disminuir el margen de beneficios.

Como referencia del problema se ha realizado un análisis del producto almacenado en la empresa sobre la que se realiza la aplicación encontrando que como promedio y para el total de formatos que se producen suelen obtenerse hasta cuatro grupos de “calibres” diferentes en la totalidad de materiales fabricados en todos los formatos representando el calibre central cuyo rango coincide con la dimensión nominal no más del 65 % de la producción almacenada; es obvio deducir que el incremento de espacio de almacén es notable y puede llegar a ser más de un 30 % del que se necesitaría en caso de no tener el problema además de los problemas logísticos derivados de la gestión de un almacén en el que el producto está separado en subgrupos que pese a ser iguales en diseño y calidad no pueden suministrarse conjuntamente.

El problema se agrava enormemente cuando se aumenta el tamaño del formato ya que el rango establecido para el calibrado no es proporcional al aumento de la dimensión de una baldosa y se acaban aplicando las mismas tolerancias absolutas de 1 mm tanto para un formato de 300x300 mm como para una pieza de doble tamaño como un formato de 600x600 mm; esto supone que la misma variabilidad de proceso que en un formato de 300 mm genera tres “calibres”, en un formato de 600 mm genera seis; esta situación es consecuencia de los criterios con los que se define el rango de aceptación de un “calibre” que son siempre criterios de colocación; en la colocación del producto se admite una “junta” de separación entre baldosas de 1 o 2 mm, esta compensa las pequeñas diferencias dentro de un mismo “calibre” pero cuando se colocan baldosas más grandes el tamaño de la junta no cambia y las diferencias superiores a 1 mm no permiten colocar el material adecuadamente.

Actualmente muchos fabricantes aplican para los formatos grandes la solución de rectificar mecánicamente las baldosas; con esta solución el problema desaparece ya que la operación de rectificado ofrece con variabilidades muy inferiores y aseguran agrupar toda la producción en un mismo “calibre”; pero esta solución además de la inversión en instalación de rectificado (más de 300.000 € para una línea capaz de producir 1.000.000 m² anuales) supone un sobre coste de operación (entre 1 y 2€/m²) lo que representa un incremento de coste cercano al 20 o 30 % que en la mayoría de los casos solo puede ser asumido para los productos de formato grande y que van a comercializarse a precios elevados.

El problema de la variabilidad dimensional no es el único problema de variación que afecta a la producción de baldosas cerámicas; los cambios de tonalidad del producto por cambios en las condiciones de operación del proceso son también un problema equivalente y al igual que la dimensión, obliga a los fabricantes a separar al producto en grupos de diferente tonalidad. El número total de subgrupos que resultan de un mismo lote de producción teniendo en cuenta que tanto la primera calidad como la segunda se agrupan en diferentes “calibres” y “tonos” y solo la tercera calidad se clasifica incluyendo todas las variaciones pueden calcularse por la formula:

$$N^{\circ} \text{ Subgrupos} = (N^{\circ} \text{ calibres} \times N^{\circ} \text{ Tonos}) \times 2 + 1$$

Dado que es habitual obtener tres “calibres” o más así como dos o más tonos en un mismo lote, se entiende que el número de subgrupos generados de un lote puede ser fácilmente de 10 o más en función de la eficacia y control del proceso. La variabilidad del proceso es pues un problema de primera magnitud que no solo genera costes en la empresa sino que tiene un elevado impacto sobre la percepción del cliente que suele ser reacio a aceptar suministros de diferentes subgrupos y tener que asumir el problema de colocarlos separados; esta situación reafirma los conceptos que relacionan calidad con variabilidad y confirman que cualquier fabricante puede lograr un importante aumento de su competitividad y percepción ante el cliente con cualquier actuación que minimice este problema.

La metodología que se plantea en este trabajo se aplica para la mejora de la variabilidad dimensional de las baldosas pero es perfectamente aplicable para estudiar y mejorar cualquier otro problema de variación en procesos de transformación multi-etapa con características similares.

ESTADO DEL ARTE

Capítulo 3.

Tratamiento de la Variabilidad en los procesos

3.1.- EL PROBLEMA DE LA VARIABILIDAD

3.1.1.- La variabilidad en los procesos

3.1.2.- El coste de la variabilidad

3.1.3.- Procesos robustos

3.1.4.- Tolerancias

3.1.5.- Capacidad de los procesos

3.2.- HERRAMIENTAS DE ANALISIS ESTADISTICO

3.2.1.- Los gráficos de control

3.2.2.- El análisis de varianza

3.2.3.- Tratamiento de errores

3.3.- LA VARIABILIDAD EN LOS PROCESOS MULTI-ETAPA

3.3.1.- Modelos de transmisión de variabilidad

3.4.- CONCLUSIONES

3.1.- EL PROBLEMA DE LA VARIABILIDAD

3.1.1.- LA VARIABILIDAD EN LOS PROCESOS

No hay dos productos iguales ni ningún proceso capaz de producir dos elementos exactamente iguales; en realidad, las características de calidad de dos productos procedentes de un mismo proceso nunca son idénticas; las diferencias pueden ser mínimas y su valor dependerá del nivel de precisión del proceso y del sistema de medición que utilicemos. La razón de esta variación es que cualquier proceso, a pesar de lo bien diseñado o de lo cuidadosamente mantenido que esté siempre tendrá una variabilidad inherente aún funcionando en las condiciones óptimas.

La variabilidad mínima inherente a los procesos trabajando en condiciones estables suele denominarse “variabilidad natural” o “ruido de fondo” o “ruido blanco” y resulta del efecto acumulado de muchas causas pequeñas localizadas a lo largo del proceso que son básicamente inevitables y que se conocen como “causas comunes”; cuando el ruido de fondo de un proceso es aceptablemente pequeño y se considera que es el mínimo alcanzable se dice que es un “sistema estable de causas aleatorias”. Un proceso en el que su variabilidad solo sea consecuencia de estas causas aleatorias, también llamadas comunes se dice que está bajo “control estadístico”.

En los procesos cuya variabilidad es solo consecuencia de las causas comunes (procesos en estado de control estadístico) la característica de calidad se distribuye habitualmente según un modelo probabilístico normal $N(\mu, \sigma)$ cuya media μ coincide con el valor nominal de la citada característica y su variación se cuantifica a partir del valor de la desviación típica σ o varianza σ^2 . (Si bien los valores individuales pueden no distribuirse según una ley normal, si lo hacen las medias de muestras de n elementos. Teorema central del límite). La representación habitual de los valores obtenidos a la salida de estos procesos en el tiempo suele corresponder a gráficos como el descrito en la figura 3.1, en los que se observa un comportamiento de los valores puramente aleatorio dentro de un intervalo que podemos considerar como el de variación natural definido como $\pm 3\sigma$ y en el que se puede pensar que las diferencias entre valores obtenidos en muestras distintas son puramente aleatorias y solo consecuencia de estas causas comunes.

Característica de calidad

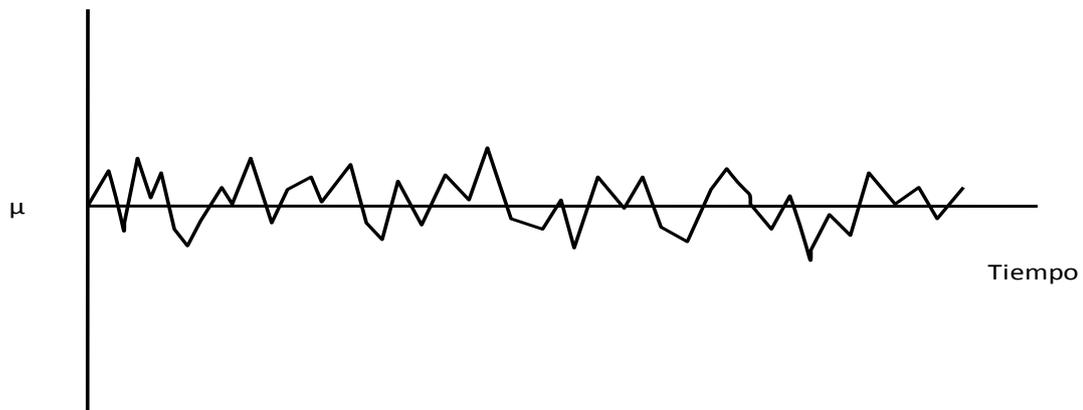


Figura 3.1: Variación de la característica de calidad en un proceso en estado de control estadístico

El histograma que se obtiene para los valores de la característica de calidad una vez agrupados en intervalos “clases” suele aproximarse al modelo probabilístico normal siempre que el número de muestras representadas sea suficiente como para dar una buena aproximación de la distribución; podemos utilizar como ejemplo la distribución obtenida en la característica de calidad “dimensión de la baldosa” a la salida de un horno cerámico en “estado de control estadístico”, cuyos datos se distribuyen como podemos ver en la figura 3.2:

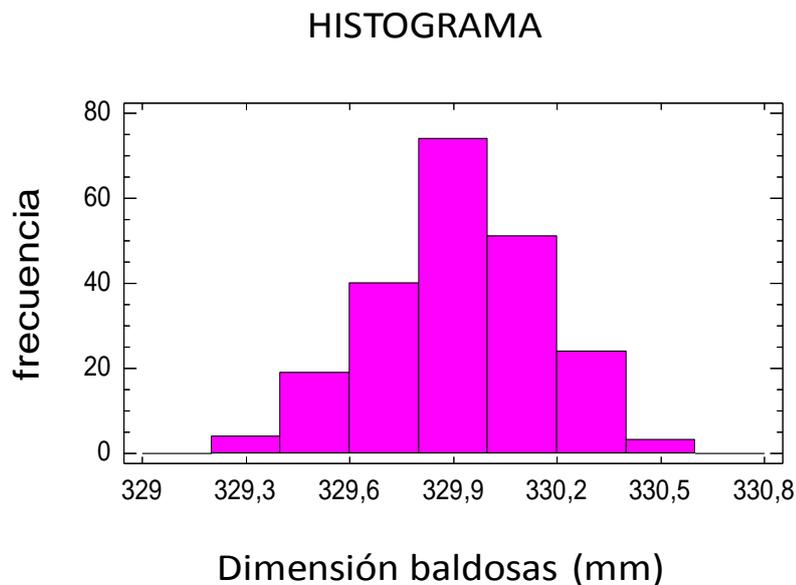


Figura 3.2: Histograma de la distribución de datos de dimensión de las baldosas obtenido a la salida de un horno cerámico en estado de control estadístico

En las salidas de los procesos pueden presentarse ocasionalmente otros tipos de variabilidad; esta aparece como consecuencia de incidentes: máquinas mal ajustadas, errores de los operarios o defectos en las materias primas; esta variabilidad es en general grande cuando se compara con el ruido de fondo y suele ser inaceptable; llamamos a estas fuentes de variabilidad “causas asignables o especiales”. Cuando un proceso opera bajo causas asignables se dice que está “fuera de control”.

Lo normal es que los procesos de fabricación operen en estado de control, produciendo productos aceptables durante largos periodos de tiempo; ocasionalmente, sin embargo aparecen causas asignables aparentemente al azar que provocan el cambio a un estado de fuera de control en el que una gran proporción de las salidas del proceso no cumplen las especificaciones y la variabilidad del proceso es muy superior. (figura 3.3)

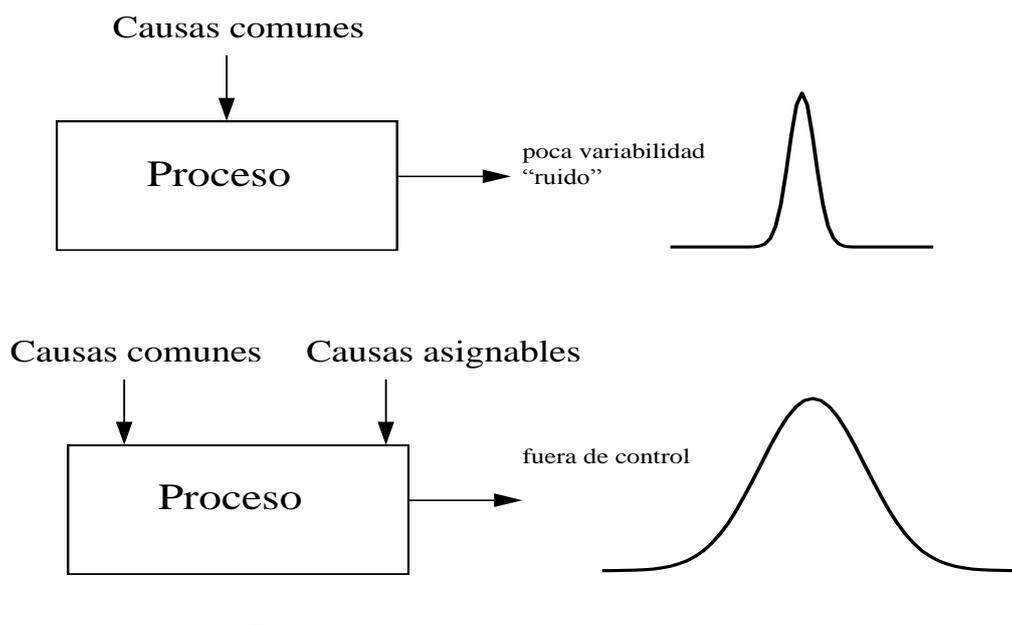


Figura 3.3 Efecto de las causas de variabilidad en el proceso. Adaptado de (Prat, 1994)

La determinación de la variación mínima que puede obtenerse en un proceso cuando está en estado de control es pues fundamental tanto para conocer las limitaciones del propio proceso así como para poder controlarlo adecuadamente y requiere la monitorización detallada de la salida del mismo y la aplicación de los métodos estadísticos adecuados que permitan discriminar las diferentes situaciones e identificar cuando realmente el proceso está en “estado de control”.

3.1.2. EL COSTE DE LA VARIABILIDAD

La variabilidad se ha entendido clásicamente como algo natural, inherente e inevitable en cualquier proceso de fabricación y se ha trabajado convencionalmente con la idea de que cualquier proceso con una variación controlada que resulte inferior al intervalo de especificaciones establecido es suficientemente aceptable (producto de calidad = producto que cumple con las especificaciones establecidas). Durante el diseño del producto y del proceso se fijan la variabilidad de las características de calidad y las tolerancias de fabricación y queda por tanto establecida la probabilidad de obtener producto fuera de los límites de tolerancias de fabricación; es decir productos defectuosos ya que tienen que ser reprocesados, separados o eliminados.

Los costes asociados a la probabilidad de productos defectuosos han sido identificados desde que Juran inició el estudio de los costes de la calidad (Juran 1951). A partir de la clasificación de Feigenbaum (1961) de los costes de calidad en costes de prevención, evaluación y costes de fallos, numerosos autores han enumerado los componentes de los mismos e investigado las relaciones entre las diferentes categorías.

Los costes de fallos han sido habitualmente los más inmediatos y fáciles de estimar; en términos de contabilidad diríamos que el esfuerzo se ha centrado históricamente en los costes que varían con el número de productos individuales; el resto de conceptos de costes que varían con la cantidad de lotes o con la cantidad de distintos conceptos de productos han sido agregados en los llamados “costes ocultos de la calidad”; el término oculto viene a reflejar la incapacidad de cuantificar sus componentes.

Deming (1982) acusa a las empresas de centrarse en los efectos directos de la falta de calidad como reprocesados o desperdicios ignorando efectos indirectos significativos y Mefford (1989) defiende que los beneficios indirectos que se derivan de una mejora de la calidad son infra estimados utilizando el análisis tradicional de costes. Los costes de calidad se entienden actualmente como el coste que representa para la empresa el esfuerzo para fabricar con la calidad requerida y el coste resultante de fabricar mal; estos se subdividen en los grupos correspondientes a la prevención, inspección, fallos internos y fallos externos; los componentes de cada uno de estos grupos puede consultarse en cualquier manual de gestión de calidad como Juran

(1980) o ASQ (1995), que en un enfoque relacionado con la variación y sus repercusiones corresponden a:

- *Costes de prevención*: Incluye los esfuerzos realizados para la prevención de la variabilidad fundamentalmente identificables como los costos incurridos en las etapas de diseño de productos y procesos, los correspondientes al diseño del sistema de control y todos los costes asociados con la reingeniería de procesos orientada a resolver los problemas de calidad
- *Costes de inspección*: Incluye todos los costes asociados a los procedimientos de control de procesos para detectar y corregir las desviaciones de los mismos y evitar la producción de unidades fuera de especificaciones.
- *Costes de fallos internos*: Incluye los costes derivados de la aparición de productos defectuosos detectados durante el proceso o a la salida del mismo (unidades fuera de especificaciones, reprocesados, pérdidas...)
- *Costes de fallos externos*: Son el coste generado por los problemas causados tras la detección de los fallos por el cliente, básicamente incluye las reclamaciones por calidad, devoluciones e indemnizaciones.

Con este enfoque, la medida de los costes de calidad evaluando el impacto económico de cada uno de estos grupos aporta una visión diferente al concepto tradicional de costes. La estimación de los costes de calidad asociados al problema de la variabilidad se utilizará como indicador económico de este problema en la propuesta de metodología de este trabajo y se desarrollará en la aplicación concreta a la mejora del problema de variación dimensional de las baldosas cerámicas.

En general, las primeras actuaciones para la mejora de un proceso y la reducción de los costes derivados de los fallos se centran en la inspección y es este coste el que suele incrementarse y se compensa con la reducción del coste derivado de los fallos pero el enfoque más recomendable a medio plazo es el énfasis en la prevención; una prevención eficaz de la variabilidad no solo permite reducir los costes de fallos sino también reducir el coste de inspección.

Función de costes de variabilidad

Intentando relacionar directamente el problema de la variabilidad con el coste, Taguchi (1980) plantea un modelo de pérdida económica. Sus aportaciones a la ingeniería de la calidad son unánimemente reconocidas como una de las más importantes en los últimos tiempos (Box 1988) , (Kackar 1985) , (Ross 1988) y a él se deben ideas que relacionan directamente calidad con variabilidad y con coste así como el énfasis específico en las etapas de diseño de producto o proceso como vía principal en la mejora de la calidad basada en la prevención. Este autor introduce los conceptos actuales de calidad considerando que el concepto de variación lleva implícita siempre una pérdida de valor y asociando por tanto la variabilidad con calidad y con coste.

REDUCCION VARIABILIDAD = MEJORA CALIDAD

Genichi Taguchi introduce una medida de la calidad de un producto basada directamente en su variabilidad y en la pérdida económica que supone la variación de las características de calidad respecto de los valores nominales para los cuales está definido. Matemáticamente, Taguchi modela su concepto de calidad a través de una “función de pérdida”: en general dada una característica de calidad “Y” con valor nominal “ τ ”, la relación existente entre diferentes valores de tal característica de calidad y las pérdidas económicas ocasionadas por tales variaciones pueden ser aproximadas por una función cuadrática:

$$P(y) = K(y-\tau)^2 \quad \text{Ec.3.1}$$

Tal función puede ser interpretada como una función determinante de la calidad de un producto cuya característica de calidad tiene el valor y; aunque la relación real sea más compleja $P(y)$ puede ser considerada como una aproximación. La figura 3.4 representa la función $P(y)$; como se observa, cuando más alejado se esté del valor nominal mas perdidas se ocasionan y por tanto menor calidad tiene el producto.

Función de pérdida P(y)

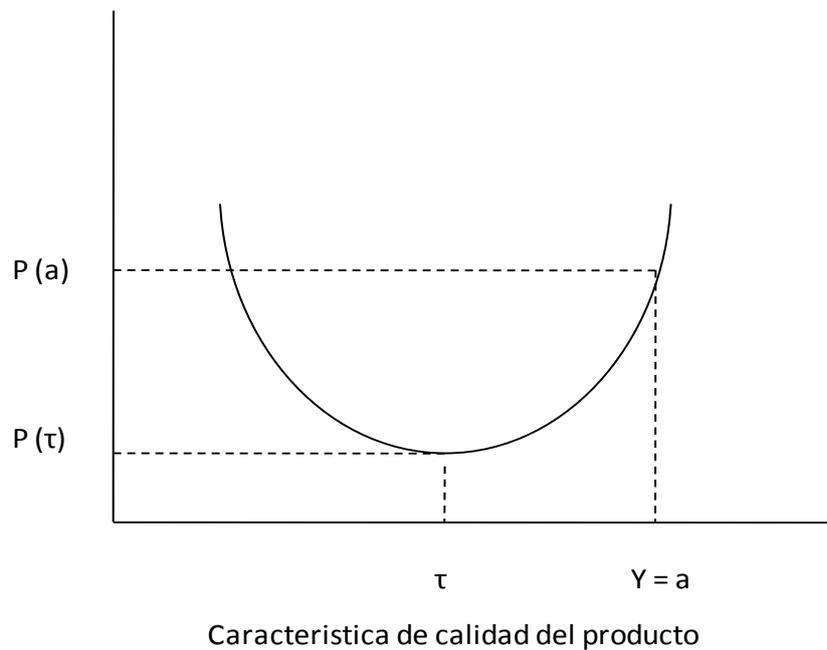


Figura 3.4: Función de pérdida de Taguchi. Adaptado de (Prat, 1994)

Cuando el producto está en el valor nominal τ el coste del producto es el mínimo que se puede obtener, cualquier desvío del producto de este valor supone una pérdida aunque el producto está en el intervalo de especificaciones establecido. La constante k puede obtenerse identificando el valor de las pérdidas asociadas a cualquier valor de la característica de calidad distinta al valor nominal. Por ejemplo, si se conoce la pérdida en el valor a , k podrá obtenerse mediante la fórmula:

$$k = \frac{P(a)}{(a-\tau)^2} \quad \text{Ec.3.2}$$

Por consiguiente, la pérdida esperada para un proceso en su conjunto en cuanto a una característica de calidad determinada, se obtendrá promediando la calidad de las diferentes unidades producidas. Esta calidad se obtiene hallando el valor esperado de la función de pérdida $P(y)$,

$$L(y) = E(P(y)) = E(k(y-\tau)^2) = k(\sigma^2 + (\mu-\tau)^2) \quad \text{Ec.3.3}$$

Donde μ y σ^2 representan la media y la varianza que presenta la característica de calidad una vez está en manos del cliente. Dado que en general se procurará que

$$\mu = E(y) = \tau \quad \text{Ec.3.4}$$

Se tendrá

$$L(y) = k\sigma^2 \quad \text{Ec.3.5}$$

Por lo que se deduce, que no basta centrar un proceso en su valor nominal, sino que hay que hacerlo con la mínima variabilidad.

Heredia (2001) plantea en su propuesta de sistema de indicadores para la mejora y el control integrado de la calidad un modelo más detallado para estimar la función de costes; este autor identifica las actividades cuyo coste se ve influido por la variabilidad y detalla los componentes del modelo incluyendo:

- Costes de aplazar entregas
- Costes de fabricación
- Costes adicionales de gestión y mantenimiento del inventarios
- Pérdida de calidad cuando el proceso está bajo control
- Pérdida de calidad cuando el proceso está fuera de control
- Costes de inspección y control

Este autor desarrolla asimismo toda una metodología para el diseño conjunto de tolerancias y gráficos de control utilizando la función de costes de variabilidad.

3.1.3.- PROCESOS ROBUSTOS

En la práctica, la reducción de la variabilidad basada únicamente en la inspección y control de procesos es insuficiente; los procesos son cada vez más complejos y muchas características de calidad vienen afectadas por factores de difícil control. Intentar atacar el problema mediante el control de tales fuentes de variación resulta en muchas ocasiones caro y a veces imposible; el enfoque adecuado es la minimización de la variabilidad en la etapa de diseño del producto o proceso, consiguiendo establecer los parámetros que determinen la máxima "Robustez"

Un producto o proceso robusto se define como aquel menos sensible a las variaciones provocadas por factores no controlados y que por tanto mantenga sus características de calidad constantes y con un mínimo nivel de variabilidad. La preocupación creciente de las empresas en la utilización de procesos robustos ha sido motivada por las demandas actuales del cliente en un entorno muy competitivo y es en la fase de diseño del producto o del proceso de producción cuando se pueden tomar medidas contra cada una de las diferentes causas de variación y seleccionar la opción que la minimiza, realizando una experimentación que permita identificar la contribución de cada uno de los factores en estudio a la variabilidad final y seleccionar la opción más adecuada. Taguchi comenzó a aplicar las técnicas de diseño de productos robustos a comienzos de los años 80 utilizando un conjunto de matrices prediseñadas (ortogonal arrays) que minimizan el número de experiencias y combinan la experimentación con los factores (de control) de los que se pretende obtener el valor nominal óptimo con los factores frente a los que quiere robustecerse el producto (factores de ruido).

La utilización de las técnicas de Taguchi se restringe habitualmente a la fase de diseño y solo es aplicable en experimentación de procesos en los casos en los que se conoce con detalle sus factores de variación y en los que es posible experimentar; según algunos autores (Morrison 1998, Box 1986, Fung 1986) consideran que en procesos complejos, las formulas de los modelos de transmisión de variabilidad proporcionan una mejor aproximación a la modelización de la composición de varianzas de un proceso que estos métodos clásicos basados en diseños de experimentos y análisis de varianza.

3.1.4.- TOLERANCIAS

La gestión y tratamiento de tolerancias – disciplina que estudia la variabilidad de las características geométricas y las incertidumbres que afectan a todo el proceso de diseño-fabricación- inspección- es una disciplina merecedora de alto interés y dedicación; la publicación de Romero F y Serrano J (2001) sobre el tratamiento integrado de las tolerancias en diseño-fabricación-inspección detalla el estado actual del arte de esta disciplina.

Las variaciones observables en un proceso para las diferentes variables implican la asignación de unos rangos de variación definidos mediante tolerancias para especificar y controlar la variación de modo que se garantice la funcionalidad del

producto. La gestión de las tolerancias contiene todo el conjunto de actividades de diseño, fabricación e inspección involucradas en el control y optimización del efecto de la variación y que permiten obtener productos robustos y fiables; estas actividades pertenecen a todas las etapas del ciclo de vida. El tratamiento de las tolerancias incluye todo el conjunto de procedimientos para el control de tolerancias durante el proceso y para la síntesis de tolerancias: asignación de las tolerancias aplicables para las diferentes variables de proceso de modo que se garantice la condición final; utilizando para ello los modelos de composición de tolerancias (predicción de la tolerancia final a partir de la de los componentes).

Es evidente que el establecimiento de la estrategia de producción es el que impone la necesidad de asignar un margen de variación a los valores objetivo de las condiciones funcionales que permitirán la posibilidad de establecer un margen de variabilidad; carece de sentido asignar tolerancias que no puedan obtenerse con las capacidades de los procesos y equipos de fabricación, con las técnicas y equipos de medida y con los procedimientos de regulación y control establecidos; para ello, es necesario analizar las características de las funciones de distribución de la variabilidad de los procesos que reproduzcan lo más fidedignamente posible el comportamiento de las variables y disponer de un modelo que defina como la variabilidad se tramite entre las diferentes etapas de proceso.

Para evaluar los modelos de composición de tolerancias pueden utilizarse métodos estadísticos, en estos casos la tolerancia resultante se obtiene mediante criterios estadísticos tratándose la de cada componente como una variable con una función de distribución especificada.

Desde un punto de vista estadístico, cualquier asignación de tolerancias lleva implícita una probabilidad de tener productos fuera del rango establecido, la variabilidad natural del proceso establece unos límites de variación que en el caso de una variable que se distribuya según una función normal corresponden a

$$\mu \pm Z_{\alpha/2}\sigma \quad \text{Ec. 3.6}$$

Un valor de $\alpha = 0,0027$ define un intervalo (6σ) que el que habitualmente se considera como intervalo natural de variación, siendo normal controlar el proceso con límites estadísticos calculados con el mismo criterio; dado que los valores de σ se estiman a

partir de las muestras obtenidas en el proceso y su valor real es desconocido se recomienda determinar la amplitud del intervalo de tolerancias como:

$$\mu \pm Ks \quad \text{Ec. 3.7}$$

La constante K pueden encontrarse en tablas (P ej Montgomery C. 2005) en función del tamaño de muestra con el que se han realizado las estimaciones y el nivel de confianza que se desee determinar.

3.1.5.- LA CAPACIDAD DE LOS PROCESOS

(Resumido de Montgomery 2005). En el diseño de un proceso y su sistema de control es fundamental contrastar la variabilidad natural que presenta el mismo con los requisitos que puedan establecerse en forma de tolerancias o especificaciones, una asignación de tolerancias inadecuada que suponga intervalos menores que el de variación natural implicará la producción sistemática de material defectuoso “fuera de especificaciones”.

La capacidad se cuantifica a partir de diversos indicadores (índices de capacidad) que básicamente son una comparación entre la variabilidad que puede obtenerse en un proceso dado “en estado de control” y el rango de variación que exigimos en el mismo. El indicador básico de capacidad es Cp

$$Cp = \frac{USL-LSL}{6\sigma} \quad \text{Ec 3.8}$$

Siendo USL y LSL los valores correspondientes a las especificaciones exigibles al proceso y 6σ el intervalo natural de variación con un nivel de confianza estadístico de 0,00027. El valor de σ puede estimarse a partir de los valores de desviación típica obtenidos en la muestra o a partir del rango medio obtenido en secuencias de muestras tomadas del proceso:

$$\hat{\sigma} = \bar{R}/d_2 \quad \text{Ec.3.9}$$

Atendiendo al valor obtenido para el índice de capacidad C_p los procesos pueden clasificarse:

- Procesos incapaces: $C_p < 1$. Son procesos en los que su variación es superior a las especificaciones establecidas y por tanto siempre están generando un porcentaje de defectuosas.
- Procesos Capaces: $C_p > 1$. Son procesos capaces de cumplir con las especificaciones establecidas, tanto más cuanto mayor sea este índice.

La siguiente tabla 3.1 (Montgomery 2005) detalla los índices de capacidad recomendables para los diferentes procesos:

<i>Proceso</i>	<i>Índice capacidad</i>
Existente	1,30
Nuevo	1,50
Con restricciones de seguridad	1,50
Nuevo y con restricciones de seguridad	1,67

Tabla 3.1 Valores mínimos recomendados para los índices de capacidad

Puede en muchas situaciones ocurrir que pese a tener un intervalo de variación menor que las especificaciones establecidas y por tanto un índice C_p superior a 1, el proceso esté sin embargo descentrado, es decir su valor medio \bar{X} no corresponda con el requerido y por tanto genere un porcentaje de unidades defectuosas sistemáticamente; esto no supone un problema en procesos en los que la posición puede modificarse fácilmente pero puede resultar crítico en la evaluación de procesos en los que no pueda modificarse esta situación; esta situación obliga a definir índices de capacidad que tengan en cuenta el descentrado del proceso, siendo los más comúnmente utilizados:

$$C_{pu} = \frac{USL - \mu}{3\sigma} \quad C_{pl} = \frac{\mu - LSL}{3\sigma} \quad \text{Ec.3.10}$$

Así como $C_{pk} = \min(C_{pu}, C_{pl})$

Chan (1988) y Boyles (1991) introducen un indicador adicional único que tiene en cuenta no solo el hecho de que el proceso esté descentrado sino el valor de esta diferencia ($\mu - T$) siendo T el valor requerido y μ la posición real del proceso:

$$C_{pm} = \frac{USL - LSL}{6\tau} \quad \text{Ec.3.11}$$

Siendo $\tau^2 = \sigma^2 + (\mu - T)^2$ Ec.3.12

En la práctica, C_{pm} se estima:

$$\hat{C}_{pm} = \frac{\hat{c}_p}{\sqrt{1 + V^2}} \quad \text{Ec.3.13}$$

$$V = \frac{\bar{x} - T}{s} \quad \text{Ec.3.14}$$

La utilización de los índices citados permite evaluar la idoneidad de un proceso completo o una etapa de los mismos para cumplir las expectativas y predefinir cual es la variación admisible para trabajar con un valor de capacidad prefijado.

3. 2.- HERRAMIENTAS DE ANALISIS ESTADISTICO

3.2.1 LOS GRAFICOS DE CONTROL

Los primeros intentos para entender la variabilidad de los procesos y establecer herramientas estadísticas para su control aparecieron en los años 30 con las primeras publicaciones de Shewhart (1931); desde esa fecha el control estadístico de procesos (SPC) ha ido evolucionando hasta convertirse en una herramienta indispensable para la evaluación, control y mejora de los procesos.

Los gráficos de control son una de las primeras aplicaciones desarrolladas y todavía hoy ampliamente difundidas ya que permiten analizar con unos errores estadísticos acotados los resultados obtenidos a partir de muestras tomadas a la salida de los procesos y proporcionan información para la mejora del ayudando a identificar como se puede reducir la variabilidad del mismo (Montgomery 1994), estableciendo un ciclo de mejora continua. (figura 3.5)

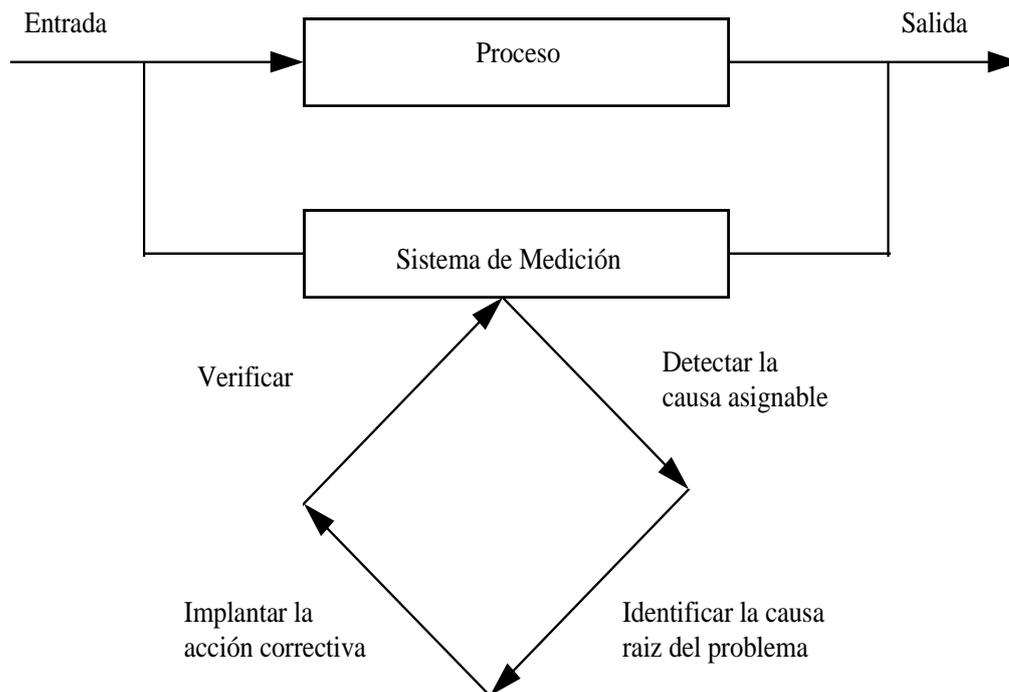


Figura 3.5: Ciclo de mejora de calidad. Adaptado de (Heredia, 2001)

Gráficos de control de Shewhart

Los gráficos de control de Shewhart presuponen que la característica de calidad a controlar es independiente y que cuando el proceso está en “estado de control” se distribuye según una ley normal $N(\mu, \sigma)$. Un gráfico de control consiste básicamente en la comparación a intervalos regulares de los valores obtenidos en la característica de calidad de una muestra aleatoria de varios elementos representativos del proceso con unos límites calculados estadísticamente y que tienen en cuenta la variabilidad mínima del proceso en estado de control; es decir, el gráfico de control controla a un proceso con unos criterios adaptados a las posibilidades del mismo y con unos errores estadísticos acotados.

El objetivo de los gráficos de control es detectar las situaciones en las que el proceso está “fuera de control”, es decir, ha aparecido alguna causa asignable que ha provocado bien una variación de la posición del mismo o un aumento de su variabilidad (figura 3.6)

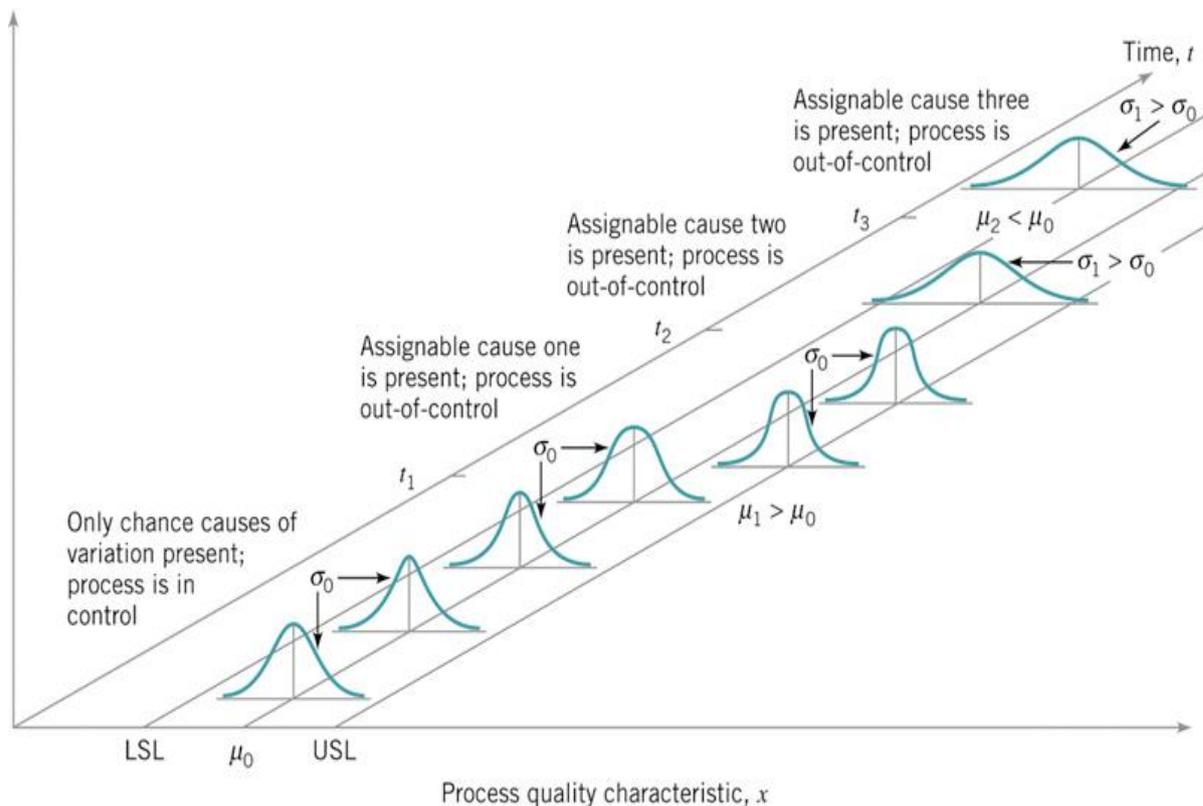


Figura 3.6 Evolución de un proceso ante la aparición de causas asignables. Adaptado de (Montgomery 2005)

Cuando en un gráfico de control el muestreo periódico de los resultados del proceso señala la existencia de una causa asignable, los operarios e ingenieros deben identificar la causa raíz del problema y preparar un plan de acción para eliminar su efecto.

Los gráficos de control incluyen una Línea Central (LC) que representa el valor medio de la característica de calidad correspondiente al estado de control estadístico; las otras dos líneas horizontales se llaman Límite de Control Inferior (LCL) y Límite de Control Superior (UCL); estos límites de control se calculan teniendo en cuenta la variabilidad del proceso y unos errores estadísticos acotados de forma que aproximadamente todos los puntos de la muestra caigan entre ellos; mientras estos

puntos quedan entre los límites de control se asume que el proceso está bajo control y por tanto no es necesario intervenir en el proceso; por contra, el que un punto caiga fuera de los límites se interpreta un suceso estadísticamente improbable y por tanto como una evidencia de que el proceso está fuera de control y que se requiere actuar sobre él. La línea central y los límites se calculan con unos errores estadísticos acotados que determinan el valor de k , es decir, el intervalo en el que estadísticamente es improbable que aparezca un valor con un nivel de confianza establecido::

$$LC = \mu \quad \text{Ec.3.15}$$

$$LCL = \mu - k\sigma \quad \text{Ec.3.16}$$

$$UCL = \mu + k\sigma \quad \text{Ec.3.17}$$

Donde k es la distancia entre los límites de control y la línea central. El valor de k dependerá de los valores que se predeterminen para los errores estadísticos siendo habitual utilizar valores de $k=3$ que corresponde a error estadístico $\alpha = 0,0027$

Los más utilizados para controlar la evolución de una variable en procesos continuos, son los gráficos X-R, en los que se sigue simultáneamente la evolución en el tiempo de los estadísticos:

- Media \bar{X} , calculada a partir de datos de muestreo y que representa la posición del proceso.
- Rango R , calculado a partir de los datos del muestreo y que evalúa dispersión.

Un aspecto fundamental para la correcta utilización de los gráficos de control es efectuar el muestreo de acuerdo con lo que Shewhart llama subgrupos racionales. Las muestras o subgrupos deben escogerse para que en lo posible la variabilidad de las observaciones dentro de cada subgrupo incluya la variabilidad común o natural y excluya la asignable o especial, de esta forma las causas especiales generarán puntos fuera de los límites de control.

Se utilizan dos métodos generales para la formación de subgrupos: el primer método consiste en agrupar unidades producidas al mismo tiempo (o tan próximas como sea posible) , así se minimiza la variabilidad debido a causas asignables dentro de la muestra y se máxima la variabilidad entre distintas muestras; el segundo método consiste en seleccionar unidades que sean representativas de todas las unidades fabricadas desde el último muestreo; esencialmente, cada subgrupo es una muestra aleatoria de toda la producción en el intervalo de muestreo. Este método se suele utilizar cuando se pretende tomar una decisión de aceptar o no todas las unidades que se han fabricado desde el último muestreo y cuando se utiliza se debe interpretar los gráficos con cuidado ya que si el cambio del proceso se produce en diferentes niveles, al ser la variabilidad dentro de la muestra lo que determina la amplitud de los límites de control esta será muy amplia y esto dificultará el detectar cambios en el proceso, de hecho podemos hacer que cualquier proceso de la impresión de estar bajo control utilizando observaciones alejadas para formar la muestra.

Hay otros criterios para formar grupos racionales; por ejemplo, en el caso de un proceso en el que varias máquinas envían sus salidas a un flujo común “procesos multi-flujo”, si muestreamos todo el resultado común será muy difícil detectar si alguna máquina se encuentra fuera de control; un método lógico sería tomar muestra de la salida de cada máquina. Este criterio también se aplica a diferentes estaciones de trabajo, diferentes operadores, diferentes cabezales de una misma máquina, etc. El concepto de subgrupo racional es muy importante y la selección adecuada de las muestras requiere un estudio cuidadoso del proceso con el objetivo de obtener la mayor información útil posible de los gráficos de control.

En los gráficos descritos anteriormente, el proceso se controla a partir de muestras de n unidades pero en muchas situaciones las muestras son de tamaño unitario. El gráfico de control para medidas individuales utiliza el rango móvil de dos observaciones sucesivas para estimar la variabilidad del proceso. El rango móvil se define como

$$M_i = |X_i - X_{i-1}| \quad \text{Ec.3.18}$$

Además de ser una técnica probada para la mejora de la productividad, la utilización de estos gráficos reduce los desperdicios y reprocesados, ayuda a la prevención de

defectos y a mantener el proceso bajo control lo que es coherente con la filosofía de “hacerlo bien a la primera”; sus ventajas fundamentales son:

- Permiten identificar y evaluar el comportamiento de un proceso “en estado de control y por tanto su variabilidad natural.
- El proceso se controla a través de unos límites calculados estadísticamente y por tanto adaptados al comportamiento real del proceso y no basados en especificaciones de producto.
- Los límites van evolucionando con el tiempo ya que tal y como se detectan las causas asignables y se eliminan se pueden calcular unos nuevos límites más estrictos con lo que se va reduciendo la variabilidad.
- Permiten la detección de tendencias y señales de proceso fuera de control más allá de la obtención de piezas fuera de los límites establecidos.
- Se puede estimar la capacidad real del proceso al conocer su variación natural y compararla con las especificaciones establecidas

Verificación de la hipótesis de normalidad

La hipótesis básica de la que parten los gráficos de Shewhart es la independencia de la variable a controlar y su distribución estadística normal con media μ y desviación típica σ de modo que en un proceso en estado de control, el valor esperable de la variable es:

$$X_t = \mu + \varepsilon_t \quad \text{Ec.3.19}$$

Siendo ε_t independiente y con distribución $N(0, \sigma)$.

Comprobar la normalidad de la distribución de los datos puede realizarse a partir de los coeficientes de asimetría y curtosis de la distribución, cuyo cálculo puede consultarse en cualquier manual de estadística como Box, G. y Hunter (1993). Estos coeficientes definen la forma de la distribución: asimétricamente positivas o negativas o con diferentes grados de concentración de los valores en la región central de la

distribución (curtosis), aceptándose normalmente que una distribución puede considerarse normal si ambos coeficientes están en el intervalo ± 2 .

La verificación estadística de la hipótesis de normalidad puede realizarse contrastando la bondad de ajuste de la distribución (Montgomery D.C. y Runge C. 1994); este test requiere un muestreo aleatorio de tamaño n de la población cuya distribución es en principio desconocida. Los n elementos se subdividen en k intervalos o clases en los que se evalúa la frecuencia de datos obtenida O_i , para cada intervalo i , este valor se compara con la frecuencia esperada E_i determinada por una distribución normal; el estadístico:

$$\chi_0^2 = \sum_{i=1}^k \frac{(O_i - E_i)^2}{E_i} \quad \text{Ec. 3.20}$$

Sigue una distribución Chi-cuadrado con $k-p-1$ grados de libertad donde p representa el número de parámetros de la distribución estimados a partir de la muestra. Se rechazará la hipótesis de que la distribución de la población es normal si el valor calculado para el estadístico es mayor que el determinado por la distribución Chi-cuadrado:

$$\chi_0^2 \geq \chi_{\alpha, k-p-1}^2 \quad \text{Ec.3.21}$$

El control de procesos multi-flujo

Llamamos procesos MMP “Multiple Stream Processes” o procesos multi-flujo a aquellos en los que los productos fabricados en un momento determinado pueden proceder de diferentes procesos que trabajan simultáneamente en paralelo, mezclándose su producción en una única línea; denominaremos “flujo” o “stream” a cada uno de los procesos que trabaja en paralelo. Estos procesos son muy comunes, podemos citar como ejemplos representativos la producción de una línea de mecanizado en la que los productos proceden de dos líneas trabajando simultáneamente en paralelo, o las piezas cerámicas procedentes de una prensa en la que el molde de conformación prensa simultáneamente varias unidades; cuando estos procesos están en estado de control se asume que la posición y variabilidad de los diferentes “flujos” que trabajan simultáneamente son las mismas, pero pueden

producirse situaciones que lleven al proceso global fuera de control tanto por que se desvíen simultáneamente todos los “flujos” o porque lo haga solo uno de ellos; situación en la que aparece un factor de variación adicional que es la “diferencia entre flujos”

Podemos como ejemplo tomar la distribución de datos de la dimensión de las baldosas cerámicas obtenidas en diferentes posiciones a la salida de un horno monoestrato detallada en la figura 3.7.

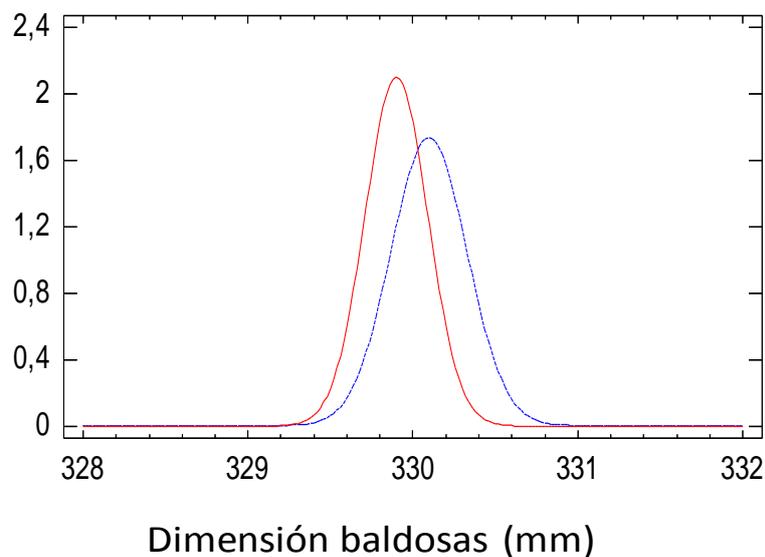


Figura 3.7: Distribución de las dimensiones de piezas obtenidas en el centro y lados de un horno monoestrato

En este caso se han agrupado por separado los valores obtenidos para las piezas procesadas por el lado del horno y por el centro; estos hornos se diseñan con anchura suficiente para procesar conjuntos de piezas simultáneamente pero en caso de presentarse alguna heterogeneidad en el interior del mismo, el tratamiento térmico final de los grupos de piezas no es exactamente el mismo generando diferencias dimensionales y puede considerarse que el horno en lugar ser un único proceso, está formado por varios “flujos” que corresponden a las piezas ubicadas en las diferentes posiciones.

Para controlar estos procesos pueden utilizarse diferentes gráficos de control “group control charts” para monitorizar cada una de las líneas por separado pero esta solución requiere un sobreesfuerzo de control en muchos casos no asumible. Runger

y Fowler (1998) consideran la posibilidad de combinar el empleo de un gráfico de control genérico para la totalidad de la producción junto a un control basado en el análisis de varianza (ANOVA) contrastando las diferencias entre los resultados de los diferentes “flujos”; es esta propuesta la que se aplicará en la detección de situaciones “multiflujo” y para la estimación de su contribución a la variabilidad en este trabajo.

3.2.2.- EL ANALISIS DE LA VARIANZA (ANOVA)

El análisis de varianza es la herramienta estadística básica para comprobar la existencia o no de diferencias significativas entre conjuntos de datos; en muchas situaciones el error de medición o la propia variabilidad del proceso analizado hace muy difícil evidenciar diferencias significativas, especialmente cuando el orden de variación de estas es razonablemente pequeño y no es posible estimar con claridad si hay o no diferencias entre diferentes subgrupos ya que estas se confunden con la variación del conjunto de datos.

Las diferencias entre conjuntos de datos pueden corresponder a diferentes resultados de una experimentación de la que se quiere evaluar la existencia o no de un efecto determinado de un factor en estudio (por ej.: valores de una variable en un experimento) o a diferentes muestras de producto entre las que quieren detectarse diferencias; en el primer caso los niveles del factor están fijados y el modelo de análisis de varianza se denomina de efectos fijos; en el segundo caso en que el factor de interés tiene posibles niveles definidos al azar el análisis de varianza corresponde al modelo de efectos aleatorios. Su desarrollo metodológico puede consultarse en cualquier manual de estadística como Montgomery y Runger (1994)

La idea básica del análisis de la Varianza, consiste en la evaluación y comparación estadística de las diferentes causas de variabilidad separando la variabilidad total obtenida entre todos los datos en:

- La variabilidad aleatoria consecuencia del “error”, es decir, la generada por multitud de factores no controlados de efectos poco significativos siempre presentes.
- La variabilidad generada por el efecto del factor en estudio

Modelo general:

Supongamos que se desea comparar a muestras (Niveles del factor) ; la respuesta que se observa para cada una de ellas es una variable aleatoria y los datos observados pueden aparecer como se muestra en la Tabla.3.2. Una entrada en la Tabla.3.2, y_{ij} , representa la observación j tomada para la muestra i .

Tratamiento	Observaciones	Totales	Promedio
1	$y_{11} \quad y_{12} \quad \dots \quad y_{1n}$	y_1	$\bar{y}_{1\cdot}$
2	$y_{21} \quad y_{22} \quad \dots \quad y_{2n}$	y_2	$\bar{y}_{2\cdot}$
....
a	$y_{a1} \quad y_{a2} \quad \dots \quad y_{an}$	y_a	$\bar{y}_{a\cdot}$
		$y_{..}$	$\bar{y}_{..}$

Tabla 3.2 tabla general del ANOVA

Podemos describir cualquiera de las observaciones de la Tabla.3.2 mediante el modelo lineal

$$Y_{ij} = \mu + \tau_i + \varepsilon_{ij} \begin{cases} i = 1, 2, \dots, a \\ j = 1, 2, \dots, n \end{cases} \quad \text{Ec.3.22}$$

Donde:

- y_{ij} es una variable aleatoria que denota la observación (ij) ,
- μ es un parámetro común a todos los tratamientos denominado media global,
- τ_i es el efecto del tratamiento i ,
- ε_{ij} es la componente del error aleatorio.

Tanto τ_i como ε_{ij} son variables aleatorias independientes con distribuciones normales, teniendo la primera de ellas media cero y varianza σ^2_τ y la segunda media cero y varianza σ^2 ; la varianza de la respuesta es:

$$V(Y_{ij}) = \sigma^2_{\tau} + \sigma^2 \quad \text{Ec.3.23}$$

Verificar la significación o no de la varianza generada por el factor σ^2_{τ} supone un contraste de hipótesis estadístico:

$$H_0: \sigma^2_{\tau} = 0 \quad \text{Ec.3.24}$$

$$H_1: \sigma^2_{\tau} > 0 \quad \text{Ec.3.25}$$

Si la hipótesis nula es verdadera, cada observación se compone solo de la media global μ más el efecto del componente de error aleatorio ε_{ij} , por tanto, si la hipótesis nula es verdadera la diferencia entre los diferentes niveles del factor no causa ningún efecto y por tanto no podemos considerar significativo el efecto del factor. Por el contrario si la hipótesis nula se rechaza quiere decir que si hay un efecto del factor sobre la varianza del resultado. Para realizar el análisis de la varianza, se divide la variabilidad total en los datos de la muestra en dos componentes: la suma de cuadrados de diferencias entre la media de los tratamientos y la media global y la suma de cuadrados de las diferencias entre las observaciones dentro de un tratamiento con respecto a su media:

$$\sum_{i=1}^a \sum_{j=1}^n (v_{ij} - \bar{y}_{..})^2 = n \sum_{i=1}^a (v_{i.} - \bar{y}_{..})^2 + \sum_{i=1}^a \sum_{j=1}^n (v_{ij} - \bar{y}_{i.})^2 \quad \text{Ec.3.26}$$

Que corresponde a la nomenclatura

$$SS_{Total} = SS_{Tratamiento} + SS_{Error} \quad \text{Ec.3.27}$$

También hay una división del n^0 de grados de libertad que corresponden a la suma de cuadrados

$$GL_{Tot} = GL_{Factor} + GL_{Error} : an - 1 = a - 1 + a(n - 1). \quad \text{Ec.3.28}$$

Llamaremos " CM ": "Cuadrado medio" al cociente entre las sumas de cuadrados y los grados de libertad correspondientes:

$$CM_{Tratamientos} = SS_{Tratamientos} / (a-1) \quad \text{Ec.3.29}$$

$$CM_{Error} = SS_{Error} / a(n-1) \quad \text{Ec.3.30}$$

Se puede demostrar que los valores esperados de estos cocientes son:

$$E(CM_{Tratamientos}) = \sigma^2 + n\sigma_\tau^2 \quad \text{Ec.3.31}$$

$$E(CM_{Error}) = \sigma^2 \quad \text{Ec.3.32}$$

Si la hipótesis nula es verdadera, (Ec 3.24) σ_τ^2 vale 0 y por tanto $CM_{Tratamientos}$ y CM_{Error} estiman la misma varianza σ^2 ; teniendo en cuenta además que $CM_{Tratamientos}$ y CM_{Error} son además independientes, su ratio:

$$F_0 = CM_{Tratamientos} / CM_{Error} \quad \text{Ec.3.33}$$

Es una variable que se distribuye según la función F con a-1 y a(n-1) grados de libertad. Si el valor del cociente F_0 de la Ec.3.33 supera al valor crítico establecido por la función estadística con un nivel de significación α predeterminado (Ec 3.34), se rechazará la hipótesis nula y se concluirá que si hay efecto significativo del factor y que por tanto genera una variabilidad σ_τ^2 :

$$F_0 > F_{\alpha, a-1, a(n-1)} \quad \text{Ec.3.34}$$

Rechazada la hipótesis nula podemos estimar los componentes de la varianza a partir de las Ec. 3.31 y 3.32:

$$\sigma^2 = CM_{Tratamiento} \quad \text{Ec.3.35}$$

$$\sigma_\tau^2 = (CM_{Tratamientos} - CM_{Error})/n \quad \text{Ec.3.36}$$

3.2.3.- TRATAMIENTO DE ERRORES

Determinar el error (variabilidad) generada por los sistemas de medición es un aspecto fundamental en cualquier mejora de proceso, generalmente en cualquier resultado de medición la variación resultante estimada es consecuencia por un lado de la generada realmente en el proceso y de la generada por la repetitividad (diferencias entre distintas medidas consecutivas) del sistema de medida utilizado; cuantitativamente, la

varianza medida es el resultado de la varianza real del proceso y de la del sistema de medición

$$\sigma_{Total}^2 = \sigma_{Real}^2 + \sigma_{Error\ medición}^2 \quad \text{Ec. 3.37}$$

El valor de $\sigma_{Error\ medición}^2$ debe incorporarse como una causa más de variabilidad que explique el resultado de la característica de calidad final y su valor debe conocerse para cada uno de los sistemas de medida del proceso a fin de poder determinar la variación real generada en cada caso. La estimación de la variabilidad del sistema de medida puede realizarse recurriendo a métodos de estimación estadística.

3.3.- LA VARIABILIDAD EN LOS PROCESOS MULTI-ETAPA

Hay múltiples definiciones en la literatura sobre la definición de un proceso, podemos tomar por ejemplo la de de Harrington (1997) que define un proceso común un conjunto lógico de actividades relacionadas y conectadas que toma entrada de proveedores, les añade valor y produce una salida para clientes. Muchos procesos de fabricación no consisten en una simple etapa sino en una secuencia (procesos multi-etapa), en los que podemos considerar la salida de una etapa como proveedor de la siguiente y viceversa: la entrada de una etapa como un cliente de la siguiente. Los procesos actuales de fabricación de baldosas cerámicas representan perfectamente a este tipo de proceso y sus etapas básicas las podemos representar esquemáticamente como en la figura 3.8

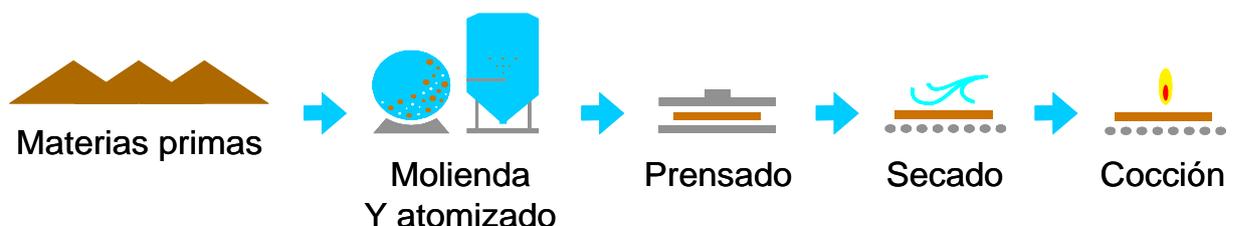


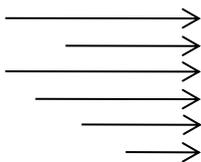
Figura 3.8: Esquema de proceso multi-etapa. Proceso cerámico

En general, estos procesos multi-etapa pueden ser muy variados y realmente complejos incluyendo un gran número de etapa y pueden encontrarse en la literatura reciente muchas aplicaciones prácticas como Zhou, et al (2003) o Djurdjanovic et al (2001) que estudian procesos de etapas sucesivas de mecanizado con múltiples operaciones e inspecciones de producto.

En la práctica, podemos encontrarnos procesos multietapa en los que la característica de calidad puede ser la misma a lo largo de las diferentes etapas, como los procesos de ensamblaje o los procesos de transformación mecánica; o procesos como los químicos en los que cada una de las etapas puede tener una característica de calidad distinta y en los que el producto va transformándose a lo largo del mismo hasta obtener la característica de calidad final. Ejemplo de este tipo puede ser el proceso cerámico esquematizado anteriormente en el que una de las características de calidad final es la dimensión de la baldosa cerámica obtenida tras el proceso de cocción pero en el que las variables que determinan la calidad de las diferentes fases del proceso (materias primas, molienda y atomizado, prensado, secado...) son completamente diferentes (humedad de la tierra, densidad aparente...).

La transferencia de material de una a otra etapa permite considerar a una etapa como proveedor de la siguiente y por tanto concluir que en las situaciones en las que haya una relación entre la variable de calidad de salida y la de entrada, la variabilidad de estos procesos se transmite y acumula etapa tras etapa considerando que cada una de ellas lleva implícita una variación adicional sobre el resultado acumulado hasta la misma; situación que no ocurre en los procesos de una etapa como se representa esquemáticamente en las figuras 3.9 y 3.10

Causas comunes de
variación



Variación a la salida

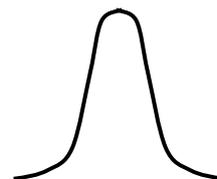


Figura 3.9: Variabilidad de una etapa de proceso independiente

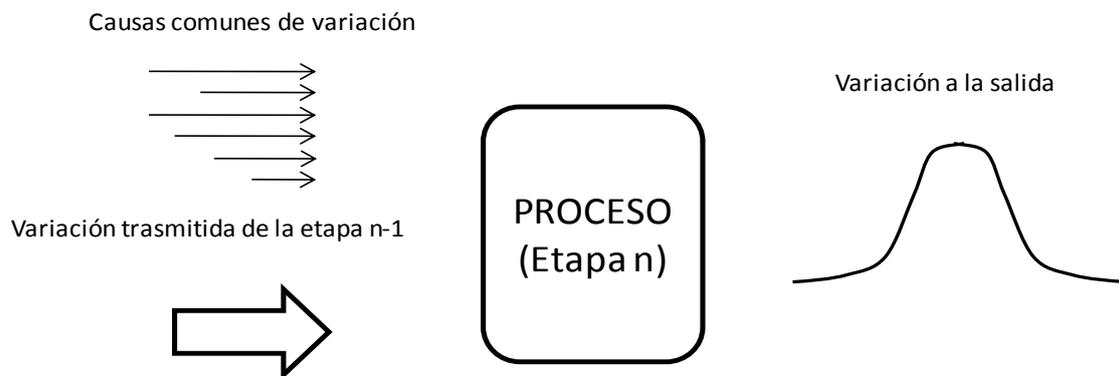


Figura 3.10: Variabilidad de una etapa de proceso con variación transmitida de la etapa anterior

El desarrollo de modelos explicativos de la transmisión de variabilidad en los procesos corresponde a un enfoque preventivo de mejora de la calidad; conocer la contribución real que tiene cada una de las variables y cada una de las etapas al resultado final de calidad permite identificar las etapas críticas y las acciones de mejora para reducir la variabilidad. La monitorización y control de cada una de las etapas individuales por separado utilizando técnicas de control permite conocer y controlar el comportamiento de cada una por separado pero este enfoque está basado en las inspección y no proporciona un modelo completo explicativo de la variación de todo el proceso.

La utilización de los métodos de diseño de experimentos proporciona un modelo explicativo de las relaciones entre las variables y el resultado final, identifica la contribución de cada una de las variables del proceso tanto sobre la respuesta como sobre su variabilidad pero su principal inconveniente es que el modelo obtenido tras un análisis de experimentos se basa en variaciones provocadas durante la experimentación y no tratan directamente la dinámica del proceso. Hay múltiples publicaciones sobre diferentes enfoques para desarrollar modelos completos explicativos de la transmisión de variabilidad de los procesos multi-etapa; puede encontrarse una buena revisión de los mismos en la publicación de Xiang, liming y Tsung (2008).

La modelización de la transmisión de la variabilidad en los procesos se ha estudiado por diversos autores y con diferentes enfoques, siendo los más destacables los modelos de síntesis de varianzas planteados por Morrison en 1957 y revisados en 1999, los modelos SoV “Stream of Variation” (Hu 1997), (Shi2007), (Zhou y Shi 2004) y los modelos basados en modelos autorregresivos (Agravall R. y Lawless J.F. 1999) y (Lawless J.F. y Mackay R.J. 1999).

3.3.1.- MODELOS DE TRASMISION DE VARIABILIDAD

3.3.1.1 La síntesis de varianzas

En 1957 S. J. Morrison presentó su método para la transmisión del error “Variance synthesis”, pero este concepto no se desarrolló realmente hasta la década de los 80 y prácticamente pasó desapercibido hasta llegar a las publicaciones de Taguchi y Wu (1985) así como Box y Fung (1986); autores que introdujeron todos los conceptos de control Off – line , diseño de parámetros de proceso y desarrollaron realmente los enfoques actualmente difundidos y aplicados en multitud de procesos orientados a minimizar la variabilidad y a operar con procesos “robustos”

Morrison presenta de nuevo en 1998 los conceptos de la síntesis de Varianzas con la intención de revivir el interés por este enfoque considerando este autor que las formulas de los modelos de transmisión de error proporcionan una mejor aproximación en la modelización de la composición de varianzas de un proceso que los clásicos métodos basados en diseños de experimentos y análisis de varianza. Los conceptos de transmisión de error se entienden matemáticamente y tal y como se puede consultar en cualquier manual de estadística: si la característica X es función de variables independientes:

$$X = f(x_1, x_2, x_3, \dots, x_n) \quad \text{Ec.3.38}$$

La varianza de X se determina:

$$V(x) = \left[\frac{\delta X}{\delta x_1} \right]^2 V(x_1) + \left[\frac{\delta X}{\delta x_2} \right]^2 V(x_2) + \dots + \left[\frac{\delta X}{\delta x_n} \right]^2 V(x_n) \quad \text{Ec.3.39}$$

Esta fórmula es exacta para funciones lineales.

La característica de calidad a la salida de un proceso depende de las variables de proceso con un modelo de relación determinado. Desde un enfoque estadístico, cada ecuación de valores medios debería ser reemplazada por una ecuación en términos de varianza de las variables de proceso que debieran estar basados en medidas realizadas en el propio proceso; esta ecuación de varianzas "modelo de composición de varianzas" resulta muy útil ya que puede permitir una predicción de la varianza total de un nuevo proceso que se esté diseñando si se conoce la varianza de cada una de los componentes utilizados en procesos previos y puede por tanto permitir una selección de las condiciones de diseño que minimicen la varianza

Consideremos la siguiente función lineal de variables aleatorias que determina el resultado de un proceso::

$$Y = a_0 + a_1 x_1 + a_2 x_2 + a_3 x_3 , \quad \text{Ec.3.40}$$

La variable Y representaría a una característica de calidad a la salida del proceso y las variables x_i son las identificables a lo largo del proceso cuya relación con la característica de calidad es lineal y determinada por los coeficientes a_i .

Tomando varianzas a ambos lados se tiene

$$\sigma_Y^2 = a_1^2 \sigma_{x_1}^2 + a_2^2 \sigma_{x_2}^2 + a_3^2 \sigma_{x_3}^2 \quad \text{Ec.3.41}$$

Para el caso de funciones no lineales la práctica habitual es considerar aproximaciones lineales en la zona de interés; afortunadamente, en la mayoría de las aplicaciones industriales los intervalos de aplicación son lo suficientemente limitados para que estos ajustes den buenos resultados aunque se debe comprobar que esto es así. La varianza de la característica de calidad Y , es pues una función de los diferentes factores de proceso que influyen en la misma cuya relación la determinan los coeficientes a_i .

En los procesos reales es habitual conocer aunque sea de un modo empírico, las relaciones entre las variables de proceso y la característica de calidad final; asimismo lo habitual es centrar los esfuerzos en controlar las variaciones de esta característica

de calidad (normalmente los valores de posición reflejados en un gráfico de control) modificando las variables de proceso pero, salvo que se desarrolle un modelo de composición de varianzas, no puede realmente evaluarse la contribución de cada factor a la variación final.

Las recomendaciones de Morrison para la minimización de la variabilidad de los procesos tienen pues este enfoque que el autor resume en el siguiente planteamiento de actuación:

1. Medir la variabilidad del producto final estimando la varianza estadística
2. Identificar todos los factores de proceso que puedan contribuir a la variabilidad
3. Utilizar el equipo adecuado para determinar la variabilidad de cada uno de los factores en el tiempo
4. Calcular la varianza de la característica de calidad asociada a cada factor.
5. Recurrir a la experimentación (bien en laboratorio o en planta) para determinar los coeficientes parciales que relacionan la respuesta en la característica de calidad con la variable de proceso.
6. Calcular la contribución de cada variable de proceso identificada a la varianza
7. Listar los factores en orden según su contribución.
8. Si la varianza justificada por las variables seleccionadas explica la varianza de la característica final, se dispone ya de una ruta clara de actuación para reducir la varianza final actuando en los factores más destacados.
9. En el caso en el que la varianza justificada por el modelo no explique suficientemente la variabilidad de la característica final, Morrison sugiere una revisión de las variables del proceso seleccionadas incluyendo algunas adicionales hasta que la variabilidad quede suficientemente explicada.

10. Realizar un estudio de cada uno de los factores que contribuyen a la varianza final para determinar cómo puede reducirse su variación individual.

La ejecución de este planteamiento depende de las circunstancias particulares de cada tipo de Industria, esencialmente del conocimiento del proceso y de la capacidad de determinar cuáles son realmente las variables de proceso que deben incluirse en el estudio; disponer de un modelo explicativo de la variabilidad permite identificar la contribución de cada variable al resultado final y listar los factores según su contribución al problema, pudiendo priorizar las actuaciones de mejora.

El modelo tiene aspectos muy interesantes ya que combina la experimentación para definir los modelos de relación entre variables con la determinación de la variabilidad generada por cada una de ellas en la situación real de funcionamiento de los procesos e incluye un enfoque para la validación mediante el contraste de la variabilidad predicha con la real observada, pero tiene algunas carencias importantes:

- No se define con qué criterio deben seleccionarse las variables con las que se calculará el modelo de composición de varianzas y simplemente sugiere ir añadiendo variables si el modelo no es suficientemente explicativo.
- En el cálculo de la contribución de cada variable de proceso y de la variabilidad obtenida en el producto final no incluye ningún sistema que permita asegurar que los datos que se incorporen al en el modelo proceden de un proceso en estado de control.
- No se describe ninguna metodología para tratar la presencia de factores que no tienen efecto sobre la media (y por tanto no aparecen en el modelo de relación entre variables y resultado final) pero si sobre la variabilidad; situaciones frecuentes en procesos "multi-flujo".
- El modelo tampoco incorpora un tratamiento de los errores de medición y en muchos casos la variabilidad generada por los propios sistemas de medición puede ser significativamente grande comparada con la variación de la propia variable.

El modelo de síntesis de varianzas es adecuado si el objetivo es explicar la aportación de cada una de las variables a la variabilidad final del proceso pero debe completarse incorporando herramientas que permitan identificar e incluir a todos los componentes de la varianza así como definir con que metodología se determina la contribución de cada factor de variación asegurándose que esta se ha evaluado en condiciones estables.

3.3.1.2 El enfoque SoV “Stream of variation”

El enfoque SoV “Stream of variation” tiene como objetivo desarrollar métodos basados en modelos matemáticos para estudiar la reducción de la variabilidad tanto en la etapa de diseño como en la de fabricación de procesos multi-etapa.; los primeros desarrollos de este enfoque se realizaron en la industria del automóvil en USA entre 1990 y 1997, desarrollándose un modelo general a partir de 1999.

Las investigaciones se iniciaron a finales de los años 80 por la necesidad de reducir la variabilidad en los procesos de fabricación de automóviles en USA; los fabricantes americanos perdían competitividad frente a los japoneses y europeos siendo una de sus carencias fundamentales de calidad la excesiva variabilidad de sus productos. La variación dimensional (seis sigma) de los fabricantes japoneses era de 2 mm mientras que los europeos trabajaban con una variabilidad de 3,5 mm y los productores americanos superaban los 3 mm.

El profesor Wu de la universidad de Michigan, abordó en 1990 en colaboración con GM, Chrysler, Ford; un proyecto de reducción de variación de ese sector en un proyecto de reducción de variación “Two milimeter program” ; este proyecto tenía como objetivo la reducción de la variación al nivel mínimo posible : “el intervalo de variación seis sigma de todos los atributos de calidad dimensionales de un automóvil debían reducirse por debajo de los 2 mm” . Bajo el liderazgo del profesor Wu, varios investigadores estudiaron diversos aspectos del problema de la reducción de variación del ensamblaje de automóviles desarrollando una base teórica de diagnosis de fallos basada en modelizaciones geométricas y modelización de la variación y análisis de defectos integrando la variación dimensional de los elementos y las propiedades de los materiales: Hu (1997), Ceclareg, Shi (1995) Appley d and Shi (1998).

Fruto de este trabajo, la universidad de Michigan presentó en 1995 un software específico para la integración de la información del proceso, el análisis de los datos y la diagnosis de causas de variación para el proceso de ensamblaje de chasis; el impacto fue muy significativo y a finales de la década la mayor parte de fabricantes implicados habían logrado los objetivos marcados. Los modelos aplicados en este trabajo inicial se extendieron en 1997 a los procesos de mecanizado en procesos multi-etapa.

El término “Stream of variation” lo plantea por primera vez Hu en 1997 tratando de forma genérica el problema de la variación y su trasmisión en procesos de múltiples etapas; el desarrollo cronológico de la metodología se puede dividir en dos fases: Estudios iniciales y desarrollos de la tecnología (1990 – 1997) y unificación de la metodología SoV basada en los modelos de estado (1997 – 2000).

La primera fase se orientó al desarrollo de métodos para el análisis de los datos procedentes de los sistemas de medición de proceso para encontrar las causas fundamentales de variabilidad en procesos de ensamblaje, el desarrollo de esta fase corresponde a los investigadores citados anteriormente. Aunque en esta primera fase de desarrollo se consiguieron fuertes avances, la metodología estaba únicamente orientada únicamente a objetivos particulares de reducción de la variabilidad en el ensamblaje y fundamentalmente orientados en la mayoría de los casos a procesos de una única etapa no incorporando un modelo unificado para la reducción de la variación en procesos de fabricación multi-etapa.

La utilización de un modelo de ecuaciones de estado para describir la variación y su propagación llevó a un nuevo estado de desarrollo de esta metodología (Shi, Jin 1997) y resolvió dos puntos fundamentales en la reducción de variabilidad en procesos multi-etapa: la falta de modelos analíticos para modelizar la trasmisión de variabilidad y la falta de metodologías sistemáticas para el análisis y optimización de la propagación de la variabilidad.

Con el modelo planteado en la metodología SoV como base, se han realizado múltiples trabajos para su aplicación en diseño de producto y procesos, así como control de procesos de fabricación; estos enfoques y su evolución se representan en la figura 3.11 donde se pueden observar los tres enfoques fundamentales de diseño, modelización y fabricación.

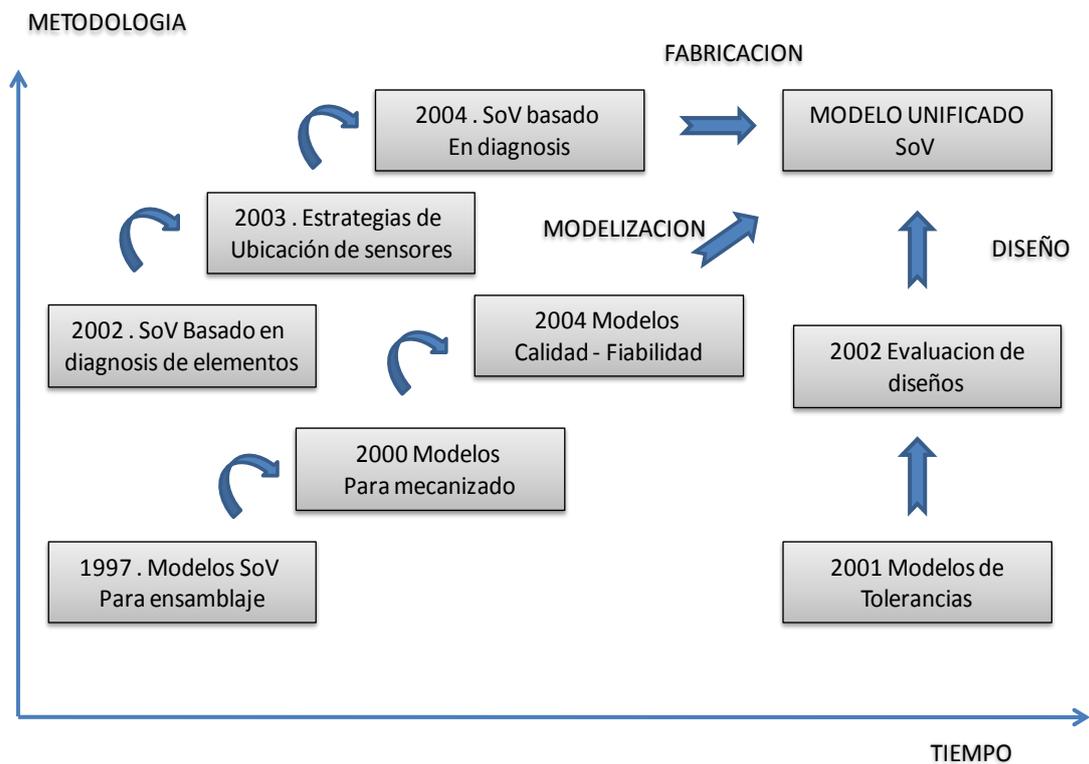


Figura 3.11: Desarrollo de la metodología SoV. Adaptado de (Shi, 2007)

Durante los últimos años se han publicado abundantes artículos sobre diversos aspectos de la investigación relacionada con la metodología SoV que han ido fraguando hacia un enfoque unificado con aplicaciones al ensamblaje y al mecanizado. Una buena introducción y recopilación del estado del arte de este enfoque se recoge en el libro de Shi, J (2007) "Stream of variation modelling and analysis for multistage manufacturing processes".

La metodología SOV se ha ido expandiendo y aplicando a muchos procesos complejos multietapa como los de ensamblaje de chasis de automóvil en los que múltiples elementos tienen procesos de ensamblaje previos, los procesos de mecanizado en múltiples etapas o procesos de estampación que implican varias etapas de moldeo para generar el producto final. En todos estos procesos, los errores finales dimensionales en una etapa determinada son consecuencia de las variaciones generadas en la misma y los transmitidos de las etapas anteriores.

El modelo SoV, refleja la complejidad de las relaciones entre los datos de un proceso en el que intervienen múltiples etapas y diversos "atributos" de calidad identificables

en cada una de ellas que determinan la calidad del producto en un momento determinado, así, si se define X_i como la característica de calidad en una etapa genérica i .

- La característica de calidad se establece a partir de los diferentes “Atributos” de calidad ($M1, M2, M3, \dots$) mediante una matriz de datos.
- Los diferentes atributos de calidad M_i pueden estar autocorrelacionados entre sí y varían a lo largo del tiempo.
- Los resultados Y_i de la determinación de la característica X_i están a su vez condicionados por los errores del sistema de medición

Todos estos tipos de correlaciones observables en los resultados de medición son los que la metodología SoV intenta tratar mediante un modelo matemático de ecuaciones de estado que describen la variación y su propagación en un procesos de N etapas como el descrito genéricamente en la figura 3.12

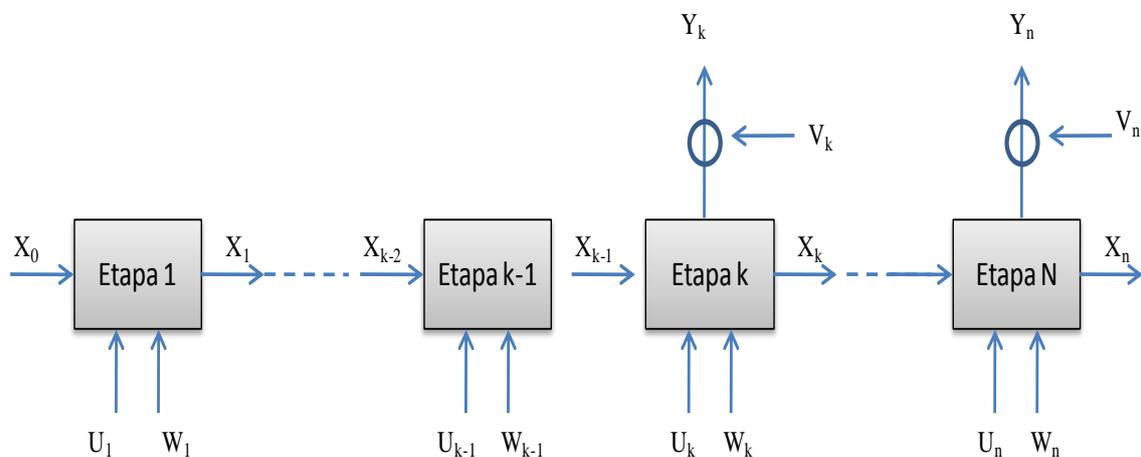


Figura 3.12: Esquema de proceso multietapa. (Adaptado de Shi, 2007)

Donde la información de calidad del producto se representa por el vector X_k , los errores del proceso conocidos que generan variabilidad en cada etapa son los inputs U_k y los errores no controlados (ruido) son los inputs W_k . Matemáticamente, el modelo se describe con la siguiente formulación:

$$X_k = A_{k-1} X_{k-1} + B_k u_k + w_k, \quad k = 1, 2, 3, \dots, N \quad \text{Ec.3.42}$$

$$Y_k = C_k X_k + v \quad \text{Ec.3.43}$$

- $k = 1, 2, 3, \dots, N$ es el número de etapa; X_k es un vector que representa la característica de calidad del producto (o pieza intermedia) tras la etapa k . siendo Y_k el vector que representa el resultado de la medida de la calidad en esa etapa y U_k los errores generados en la etapa k
- A_{k-1} es el coeficiente que relaciona los resultados de la etapa $k-1$ con la etapa k y determina el impacto de la transmisión de variación; B_k es el coeficiente que relaciona los errores o variaciones generados en la etapa k con el resultado de esa etapa y C_k es la matriz de medidas.
- Los vectores w_k y v_k representan los errores del modelo y de medición.

La ecuación 3.43 modela la relación entre los valores reales de la característica de calidad y los medidos y la ecuación 3.42 contiene toda la información básica que puede incorporarse desde la etapa de diseño disponiendo de un modelo matemático explicativo de la transmisión de error a lo largo del proceso que permite la evaluación y optimización de alternativas de diseño así como la definición de tolerancias.

El tratamiento de la transmisión de variación con la metodología SoV permite disponer de un modelo completo en el que se incorporan todas las causas de variación, se detalla cada una de las etapas y se incorporan los errores de medición; este modelo permite optimizar los procesos en la fase de diseño así como determinar las tolerancias más adecuadas. Los desarrollos publicados relacionados con esta metodología están básicamente orientados a procesos de ensamblaje y mecanizado fundamentalmente del sector de automoción, donde la definición de las características de calidad y las relaciones entre las variables de proceso son complejas, asociadas a características dimensionales e interviniendo un gran número de atributos interrelacionados; esta metodología supone como prerequisite que la información de producto y proceso está disponible desde la fase de diseño; Appley y Shi (2001) han planteado asimismo y utilizado en procesos de ensamblaje de automóvil una metodología que modeliza y analiza la variación de un sistema complejo a partir de los resultados de medida de producto.

Las situaciones en las que se han desarrollado aplicaciones de esta metodología son en general mucho más complejas que las habituales en los procesos de transformación como el que se plantea en este trabajo, en los que la definición de los atributos de calidad de definen por variables de características completamente distintas en cada etapa y en los que el número de etapas y variables críticas identificables en cada una son relativamente pocas.

La metodología SoV parte además de la base de que el conocimiento del comportamiento del proceso y de las relaciones entre las variables es suficientemente conocido y está predeterminado en la etapa de diseño; esto es así en procesos como los descritos de mecanizado o ensamblaje, en los que la calidad de un componente o el resultado de una etapa está determinado por atributos dimensionales que pueden medirse directamente o sobre los que se han predeterminado unas tolerancias; pero en muchos procesos de transformación y debido a la dificultad de simular las condiciones industriales, los modelos de relación entre las variables determinados habitualmente off-line pueden no ser los mismos que los observados en el proceso; además en muchas situaciones no se dispone de sensores apropiados para medir la variable en el proceso por lo que su efecto solo puede determinarse a partir de su efecto en la respuesta.

El tratamiento de tolerancias en procesos de transformación es además diferente al enfoque de los procesos de mecanizado ya que la variabilidad de cada una de las etapas que en muchos casos no se conoce adecuadamente puede no estar de acuerdo con las tolerancias requeridas; no obstante el enfoque SoV es el más recomendable para tratar la transmisión de variabilidad y sus conceptos básicos son los que se aplicarán en esta propuesta.

3.3.1.3 El tratamiento de la transmisión de variabilidad mediante modelos autorregresivos

Las publicaciones de Agrawal y Lawness (1999) de la universidad de Ontario junto a J.A Robinson de General Motors, plantean un modelo autorregresivo como método para representar y modelizar la transmisión de variación en situaciones en las que la misma característica de calidad puede determinarse en diferentes etapas del proceso planteando la utilización de modelos de regresión simple y análisis de la varianza para

determinar cuanta variabilidad se trasmite de una etapa a otra. Su propuesta de modelo de transmisión de variabilidad se desarrolla del siguiente modo: se asume que si una característica Y se mide en cada una de las K etapas del proceso y llamamos Y_i al valor de esta característica en la etapa i; el modelo siguiente es adecuado en muchas situaciones:

$$Y_1 = N(\mu_1, \sigma_1^2) \quad \text{Ec.3.44} \quad \text{Distribución en la etapa 1}$$

$$Y_i = \alpha_i + \beta_i Y_{i-1} + \varepsilon_i \quad \text{Ec.3.45} \quad \text{Distribución en la etapa i}$$

La ecuación 3.45 representa el modelo de relación entre la característica de calidad entre la etapa i y la etapa i-1 y donde

- ε_i es un término de error independientes y que determina la variabilidad aleatoria de la etapa Y_i y se distribuye como $N(0, \sigma_{iA}^2)$
- β_i es el coeficiente que relaciona el grado de varianza transmitido entre las dos etapas

Más específicamente, este es un modelo autoregresivo de primer orden en el que la distribución de Y_i depende de Y_{i-1} . Este modelo puede ser justificado en la mayoría de los contextos de procesos secuenciales de fabricación en los que la característica de calidad es la misma en las diferentes etapas. El proceso en la etapa i solo “conoce” lo que le llega de la etapa i-1 y si el proceso es estable el modelo representado por las ecuaciones anteriores es válido constantemente.

Si llamamos μ_i a $E(Y_i)$ y σ_i^2 a $Var(Y_i)$, de las ecuaciones anteriores se concluye:

$$\mu_i = \alpha_i + \beta_i \mu_{i-1} \quad \text{Ec. 3.46}$$

$$\sigma_i^2 = \beta_i^2 \sigma_{i-1}^2 + \sigma_{iA}^2 \quad \text{Ec.3.47}$$

El primer término de la ecuación 3.47 representa la variación transmitida a la etapa Y_i desde la etapa i-1 y el segundo término representa la variación añadida en la etapa i. Se concluye de este modelo que podemos reducir la variación de Y_i tanto reduciendo σ_{iA}^2 como σ_{i-1}^2 o haciendo que β_i sea lo menor posible. El interés es reducir la varianza a la salida de la última etapa σ_k^2 ya que esta representa la variación de Y al final del

proceso. Esta depende de la varianza de la etapa k y la transmitida de la etapa k-1 y asimismo, la de la etapa k-1 depende de la transmitida por la etapa k-2 y así sucesivamente:

$$\sigma_k^2 = \beta_k^2 \beta_{k-1}^2 \sigma_{k-2}^2 + \beta_k^2 \sigma_{k-1,A}^2 + \sigma_{kA}^2 \quad \text{Ec.3.48}$$

y, si continuamos hasta la etapa 1

$$\sigma_k^2 = (\beta_k \beta_{k-1} \dots \beta_2) \sigma_{1A}^2 + (\beta_k \beta_{k-1} \dots \beta_3) \sigma_{2A}^2 + \beta_k^2 \sigma_{k-1,A}^2 + \sigma_{kA}^2 \quad \text{Ec.3.49}$$

Esta ecuación descompone la variación de Y_k en componentes atribuibles a cada una de las etapas $i=1 \dots k$ y puede utilizarse para identificar las etapas que necesitan mejorarse para reducir σ_k^2 . La utilidad de la ecuación 3.46 depende por supuesto de la validez de los modelos autorregresivos de las ecuaciones.

El modelo completo llega a una composición de varianzas que incluye como términos del modelo la aportación de cada una de las etapas; es decir, es una visión del proceso desde el punto de vista de las etapas y no de las variables. Su aplicación es interesante porque modela de un modo simple la transmisión de variación pero su principal limitación es que presupone que la característica de calidad es la misma a lo largo de todo el proceso. En el caso de no cumplirse esta hipótesis, y si se conoce la relación entre la característica de calidad de cada etapa y la final, se podría llegar al mismo modelo reemplazando la variación de la característica de calidad de cada etapa por su equivalencia con la final del proceso utilizando los coeficientes del modelo de relación.

3.4.- CONCLUSIONES

La variabilidad de cualquier característica de calidad observable a la salida de un proceso es inevitable; esta podrá ser mayor o menor dependiendo de las condiciones de funcionamiento, diseño y control del mismo pero siempre existirá. El valor de la misma, comparado con las especificaciones o tolerancias establecidas determina la capacidad del proceso para obtener la totalidad o parte de la producción de acuerdo con los requisitos establecidos e independientemente de su magnitud, tiene un impacto económico que puede modelarse matemáticamente.

Conocer las variables de proceso que contribuyen a la variabilidad y disponer de modelos que expliquen como esta se genera y trasmite a lo largo del proceso permitirá no solo identificar las variables críticas, sino también disponer de una herramienta que permita asignar las tolerancias más adecuadas, identificar prioridades de mejora y diseñar los procedimientos de control más adecuados.

La utilización de técnicas estadísticas como los gráficos de control y en Análisis de varianza permite evaluar a partir de los resultados observables en el proceso, cual es la variabilidad mínima esperable en las condiciones de trabajo diseñadas y establecer los componentes un modelo que pueda describir el problema.

Capítulo 4.

El proceso cerámico y los factores que generan la variabilidad dimensional de las baldosas

4.1.- EL PROCESO CERAMICO

4.2.-LA VARIACION DIMENSIONAL EN LA PRODUCCION DE BALDOSAS CERÁMICAS

4.3.- ETAPAS DEL PROCESO Y VARIABLES LOS FACTORES QUE GENERAN LA VARIACIÓN DIMENSIONAL

4.3.1.- Materias primas

4.3.2.-Molienda

4.3.3.-Atomización

4.3.4.-Prensado

4.3.5.-Cocción

4.4.- CONCLUSIONES

4.1.-EL PROCESO CERAMICO

Las baldosas cerámicas son “Placas de poco grosor fabricadas con arcillas, sílice, fundentes, colorantes y otros materiales generalmente utilizadas como revestimiento para suelos, paredes y fachadas. Se fabrican mediante molturación, tamizado, amasado, humidificación etc. Y se moldean por prensado, extrusión, colado u otro procedimiento generalmente a la temperatura ambiente; seguidamente son secadas y cocidas a altas temperaturas. Pueden ser esmaltadas, no esmaltadas o engobadas y son incombustibles e inalterables a la luz” (Norma ISO 13006)

Las baldosas cerámicas de pavimentos de monococción se fabrican mediante un proceso en línea altamente automatizado que comprende las siguientes operaciones básicas: preparación de la pasta, prensado, secado, esmaltado-decoración, cocción, clasificación y embalaje. Una descripción detallada del mismo así como de la maquinaria habitualmente empleada puede consultarse en el libro de SACMI – ATC “Tecnología cerámica aplicada” (2004)

Este proceso de transformación fisicoquímica de materiales en sucesivas etapas en serie, con diferentes operaciones es un claro ejemplo de proceso multi-etapa y que puede describirse genéricamente mediante diagramas de flujo como el esquematizado en la figura 4.1



Figura 4.1: Proceso de transformación multi-etapa

La caracterización de cada una de las operaciones del proceso comprende el estudio de las propiedades del flujo de entrada, las variables del proceso y los parámetros de regulación, control y seguridad de los equipos empleados y su influencia en las propiedades del flujo de salida; las características del flujo de entrada y las variables que intervienen en la operación influyen en la característica del producto de salida que es a su vez el flujo de entrada de la siguiente operación.

En la figura 4.2 se representa un esquema general de las operaciones básicas del proceso de producción de baldosas cerámicas de baja absorción de agua que se utiliza actualmente por la mayoría de fabricantes y que incluye la preparación de polvos cerámicos mediante molienda en vía húmeda y atomización, el prensado en semi-seco, secado en ciclos rápidos, decoración con esmaltes, cocción en hornos monoestrato y clasificación y embalaje final.

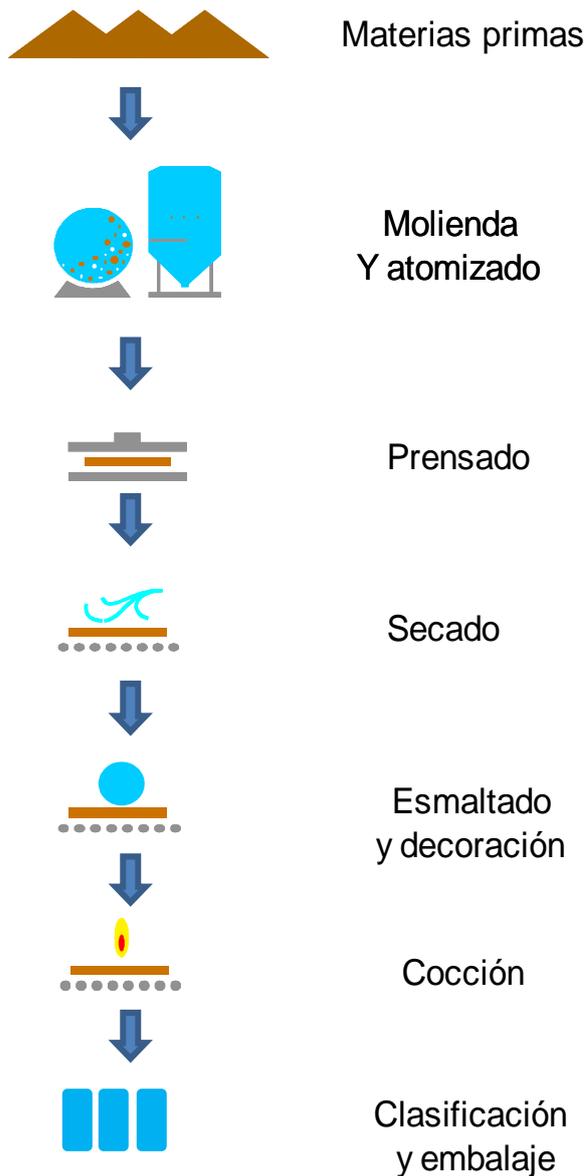


Figura 4.2: Esquema de proceso habitual de fabricación de baldosas cerámicas de baja absorción de agua

4.2. LA VARIACION DIMENSIONAL EN LA PRODUCCION DE BALDOSAS CERAMICAS

Las variaciones dimensionales observadas en baldosas cerámicas de baja absorción de agua que de algún modo pueden alterar la armonía del diseño o dificultar su colocación, son tal y como describen en sus trabajos de estudio de las variables de proceso, Amorós JL et al (1984) y Escardino A et al (1981), consecuencia de pequeñas variaciones de la contracción lineal experimentada por el material durante la última etapa del transformación del proceso (cocción), en la que en el soporte cerámico es sometido a altas temperaturas (1130 – 1200 °C) según el tipo de material y composición y donde se desarrollan una serie de fenómenos fisicoquímicos por las reacciones entre una mezcla de materias primas moldeada en las etapas anteriores.

Cuando el soporte cerámico se trata a temperaturas superiores a 1000 °C, se empieza a producir una vitrificación de la composición y este fenómeno genera cambios en la porosidad y contracción de la mezcla de materias primas. Kingery (1976) estudia la vitrificación de composiciones cerámicas y describe que durante la cocción se produce una fase vítrea viscosa que rodea a las partículas más refractarias, que bajo la fuerza de tensión superficial que se genera en los finos poros de la pieza tiende a aproximar a las partículas aumentando la contracción y reduciendo la porosidad.

Este autor sostiene que la vitrificación de una pasta cerámica tiene lugar en dos fases sucesivas: durante la primera fase se va reduciendo progresivamente la porosidad abierta hasta anularse a la vez que aumenta la contracción de la pasta; cuando la porosidad abierta es prácticamente nula, no se ha completado aun la vitrificación. Durante la segunda fase, el sistema puede considerarse formado por un conjunto de huecos (poros) esféricos, de pequeño tamaño incluidos en la pasta; en cada hueco, la tensión superficial de la fase líquida presente tiende a compactar la pasta favoreciendo así la contracción pero al mismo tiempo y a medida que se va aumentando la temperatura, la expansión de los gases ocluidos en dichos huecos tiende a aumentar la porosidad cerrada de la pasta disminuyendo la contracción.

Estos dos fenómenos contrapuestos se ponen de manifiesto claramente en la representación de la contracción línea y la porosidad frente a la temperatura “diagrama de gresificación” (figura 4.3); estos diagramas, asociados a un tipo de composición

determinada permiten establecer la temperatura de cocción adecuada para obtener una valor de porosidad final y contracción preestablecidos y determinan como las variaciones de T^a se trasmiten a variaciones de contracción lineal y por tanto de la dimensión final (figura 4.4).

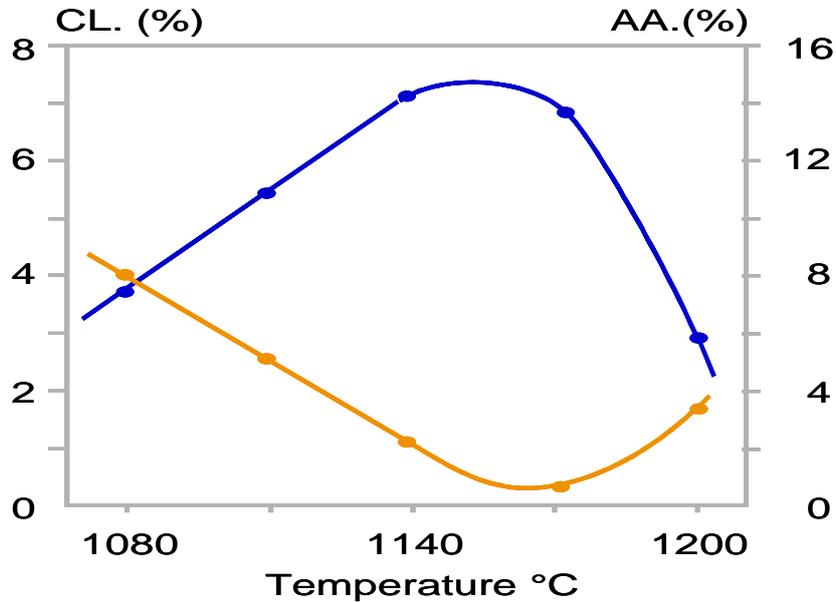


Figura 4.3: Diagrama de gresificación de una pasta de pavimento cerámico. Adaptado (Cursos ITC)

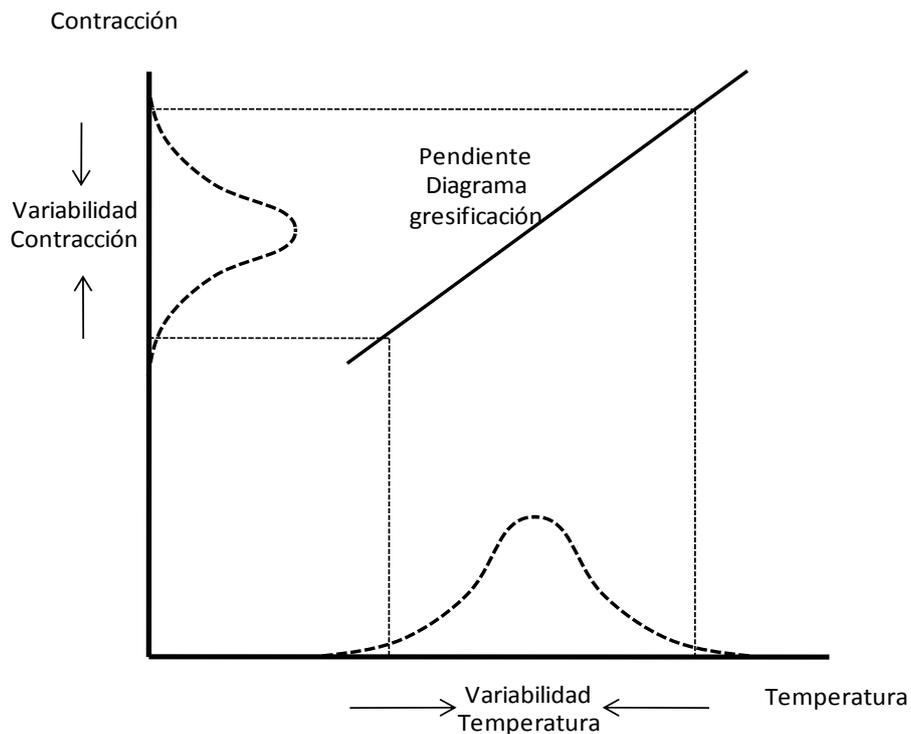


Figura 4.4: Trasmisión de la variabilidad de la temperatura a la contracción lineal

Puede encontrarse una descripción detallada del fenómeno de sinterización de piezas de pavimento gresificado en la tesis doctoral de Orts M.J.(1991)

El diagrama de gresificación es el que determina el comportamiento de un soporte cerámico durante la fase de cocción, Escardino A et al (1981) confirman que la composición, la distribución de partículas, la presión de prensado y el ciclo de cocción modifican la forma del diagrama, bien cambiando la pendiente del mismo o desplazándolo y por tanto modifican el valor de contracción que se obtiene en el proceso (figura 4.5) aumentando la variabilidad.

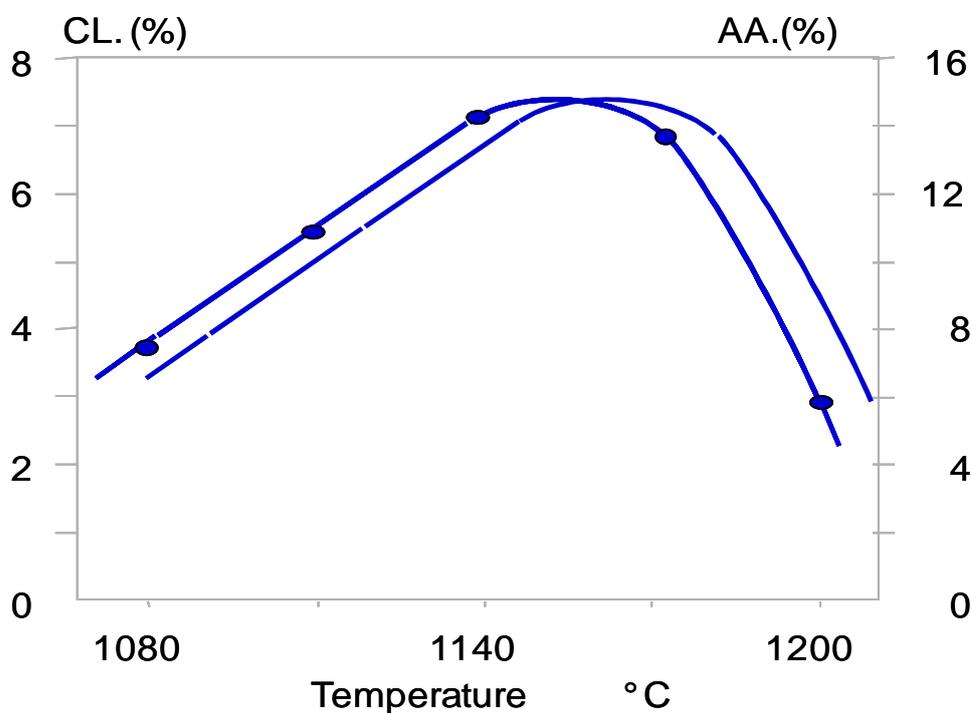


Figura 4.5: Cambio en la forma del diagrama de gresificación

Si las características del soporte a cocer permanecieran constantes, la forma del diagrama de gresificación no variaría y la única variable que afectaría a la contracción lineal sería la temperatura de cocción, pero en la práctica, esto no es así, ya que las características del soporte también varían debido a la acción de las variables de proceso detalladas por los autores citados, y estas variaciones provocan cambios en la forma del diagrama provocando que pese a mantener la temperatura de cocción constante, la dimensión final de la baldosa cocida varíe.

4.3 LAS ETAPAS DEL PROCESO Y LOS FACTORES QUE GENERAN LA VARIACION DIMENSIONAL

Hay abundante bibliografía que identifica las etapas de proceso relacionadas con la variación dimensional y que estudia las relaciones de las mismas con el problema; estos trabajos se detallan posteriormente en la descripción de las diferentes etapas. Las publicaciones más destacadas orientadas a un análisis completo del proceso son las de Escardino A et al (1981) , Amorós JL et al (1984) Amorós JL (1987) y Bagan V (1991) que estudian la influencia de las variables del proceso en la calidad del producto acabado en los procesos de fabricación de baldosas cerámicas y detallan el efecto de aquellas que implican cambios en el diagrama de gresificación y que por tanto son causas de variación dimensional; identificando como variables críticas además de la composición, la distribución de tamaños de partícula tras el proceso de molienda, las variables de prensado humedad y presión y las de cocción. Estos autores identifican asimismo a la densidad aparente en seco de la pieza prensada, como la variable fundamental de esta etapa que tiene una relación directa con la contracción del soporte en la etapa de cocción.

La conclusión de todos estos trabajos de investigación, es la identificación de las etapas de proceso que tienen relación con el problema de la variabilidad dimensional y que son:

- Las materias primas
- El proceso de molienda
- Atomización
- Prensado
- Cocción.

Las etapas de secado y decoración no presentan relación con este problema. El secado genera modificaciones dimensionales en la pieza prensada, por la contracción lineal asociada al fenómeno de secado (J.L Amorós 1987) pero las variaciones que puedan presentarse entre diferentes piezas sometidas a secados diferentes se anulan durante el proceso de cocción en el que todas las piezas son secadas completamente en las primeras fases de este proceso.

La etapa de decoración del producto tampoco tiene ninguna influencia sobre la dimensión final de la baldosa; la capa de esmalte solo se aplica superficialmente y si bien modifica el grosor de la pieza, no altera sus dimensiones laterales; por otro lado no se ha descrito ninguna situación en que la aplicación superficial de la capa de decoración altere las características fisicoquímicas del soporte sobre el que se aplique.

4.3.1.-LAS MATERIAS PRIMAS

La composición del soporte se denomina “pasta” y la influencia de las diferentes materias primas en el comportamiento de la pasta durante el proceso puede consultarse en cualquier manual de fabricación e baldosas cerámicas como por ejemplo: Sacmi ATC (2004) , Apuntes de tecnología cerámica (1991), Cantavella M (2004) o Barba A et al (2002)

Una pasta cerámica es la mezcla equilibrada de materias primas que aportan plasticidad y permiten su moldeado (arcillas y caolines) y de materias primas no plásticas o “desgrasantes” (feldespatos, cuarzo y talco), para su tratamiento en el proceso de fabricación se emplean aditivos como los desfloculantes y ocasionalmente ligantes o plastificantes. Las materias primas son productos naturales procedentes de minas a los que se ha sometido a procesos de homogeneización en lotes de gran tamaño.

Cada uno de los componentes de una composición determinada tiene una misión concreta, Garcia J et al (1998) bien para la realización de una o varias etapas del proceso o bien para conferir determinadas propiedades al producto acabado. La selección de componentes y de las proporciones en que intervienen se realiza teniendo en cuenta estas finalidades.

Las variaciones en las características de una materia prima o en los porcentajes de los diferentes productos que definen una formula supondrán obviamente diferentes comportamientos del material que pueden generar diferencias sensibles en el comportamiento durante el proceso tanto en la etapa de prensado en la que cambios en la composición pueden provocar diferentes resultados como en la etapa de cocción, alterando la forma del diagrama de gresificación.



Figura 4.6: Imagen de una explotación de materias primas arcillosas

Estas materias primas proceden de yacimientos naturales en los que los materiales están habitualmente depositados en capas de mayor o menor grosor; su extracción requiere un cuidadoso proceso de explotación en el que deben desecharse las capas de producto no deseadas. La explotación de las minas es en muchas ocasiones bastante compleja por la gran cantidad de materiales que hay que apartar y mover así como por el cambio de propiedades que pueda aparecer en el producto explotado; la homogeneización previa al suministro de material es un proceso crítico y sus deficiencias pueden generar cambios importantes en el comportamiento de una materia prima singular que repercuten en la composición.

Además de las materias primas predeterminadas para una composición para obtener un comportamiento en el proceso y un producto final establecido, en los procesos de fabricación de baldosas cerámicas es frecuente la recuperación de las aguas residuales procedentes de las operaciones de limpieza de todo el proceso como parte del agua utilizada en el proceso de molienda; este sistema está muy extendido y es la vía más recomendable tanto para la inertización de los materiales potencialmente contaminantes como para lograr un ahorro importante de agua en el proceso Enrique JE et al (2000).

Esta operación de reciclado supone la incorporación como componente de la formulación de los lodos fundamentalmente procedentes de los procesos de limpieza en su mayor parte originados en los procesos de decoración y preparación de esmaltes; estos lodos están compuestos de los mismos esmaltes utilizados para decorar la superficie de las piezas y aunque su porcentaje en la composición es muy bajo, son productos especialmente fundentes que pueden alterar el comportamiento del soporte si su aporte no es homogéneo.

La composición determina la sensibilidad del producto a los cambios del proceso, así, la pendiente del diagrama de gresificación identifica el grado en el que la variabilidad de la temperatura se trasmite a la variabilidad de la contracción de modo que se puede minimizar la variabilidad dimensional del recurriendo a formulaciones que den la máxima "robustez", es decir, menos sensibilidad del producto a cambios de las variables del proceso especialmente la temperatura de cocción. Esta situación es la que se observa en las composiciones en la figura 4.7 Donde se representan las curvas Contracción lineal/Temperatura para dos composiciones tipo A y B.

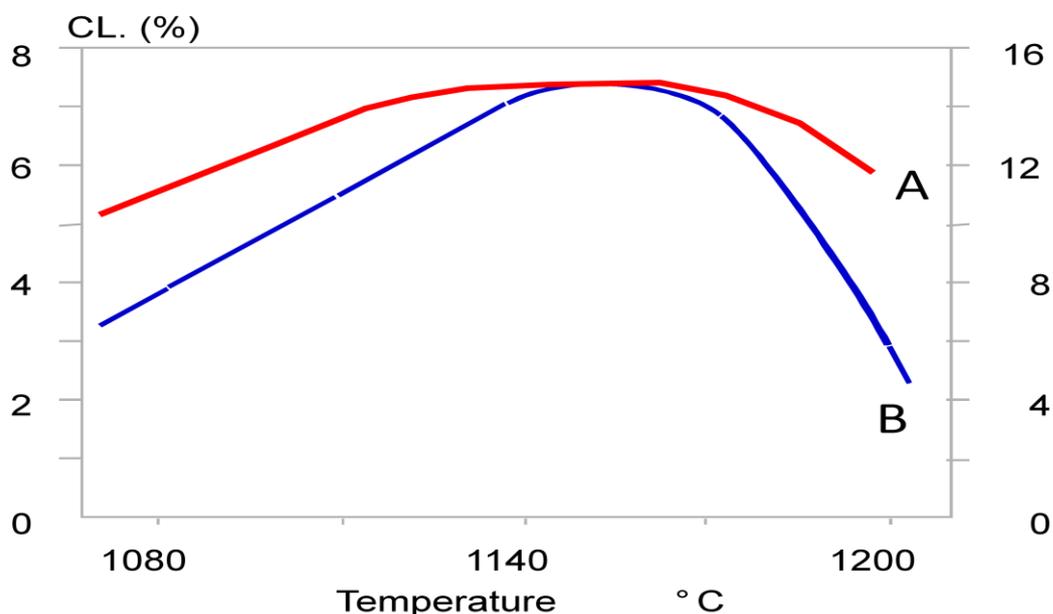


Figura 4.7: Diagrama de gresificación de diferentes composiciones con diferente sensibilidad a los cambios de temperatura

Se puede observar que los mismos cambios de temperatura, generaran menor variación de contracción en la composición A que en la B, y que si se trabaja a las

temperaturas en las que la contracción lineal es máxima, pequeñas variaciones de temperatura no tienen ningún efecto sobre la contracción. Esta modificación de la relación supone una reducción de variabilidad final (figura 4.8)

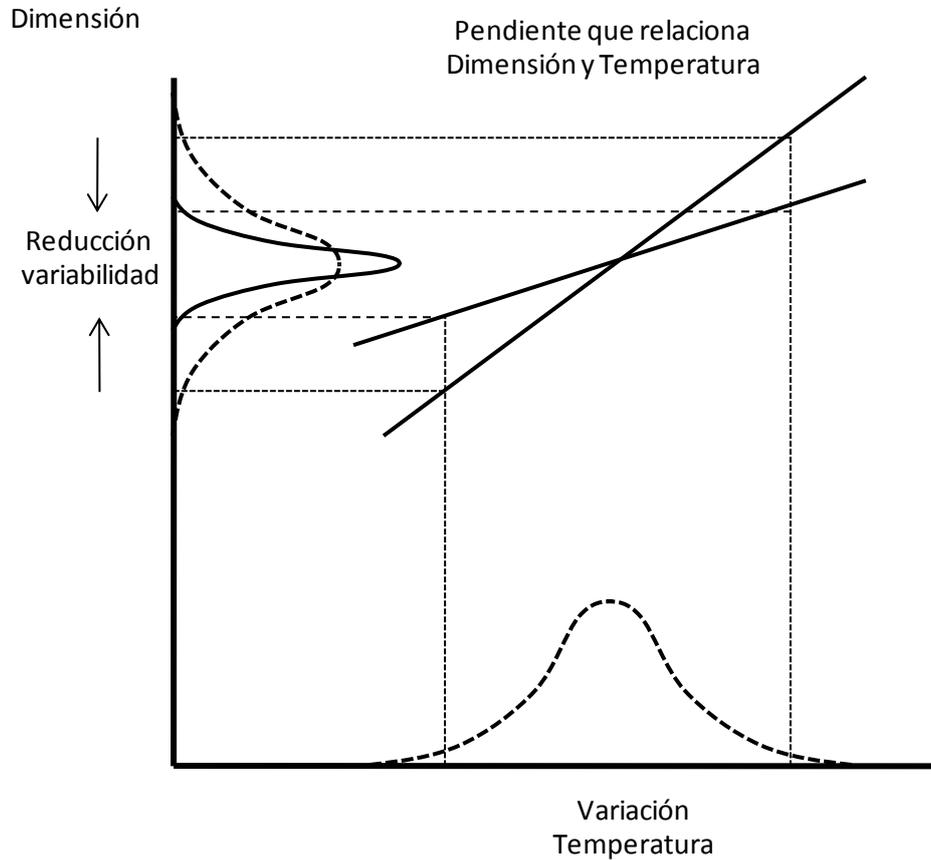


Figura 4.8: Modificación del efecto de la temperatura

Tanto los proveedores de las diferentes materias primas como los fabricantes cerámicos aplican métodos de homogeneización de materiales y controles fisicoquímicos a fin de mantener constantes las características de las materias primas y por consiguiente de la formulación resultante de la mezcla pero si estos procesos de homogeneización tanto de las materias primas como de los residuos que se reciclan no se realizan de modo que garanticen la homogeneidad, pueden observarse cambios en el comportamiento del producto.

Las variables críticas para una composición determinada respecto al problema dimensional son pues las características fisicoquímicas de cada materia prima y de la mezcla de las mismas; así como las características de los residuos reciclados Tabla 4.1

Variable	Efecto
Características fisicoquímicas de las materias primas	Cambios en el diagrama de gresificación y en el comportamiento del soporte en prensado
Características de los residuos reciclados en el proceso	Cambios en el diagrama de gresificación.

Tabla 4.1 Efectos en proceso provocados por las materias primas

4.3.2.-PROCESO DE MOLIENDA

La mezcla de materias primas, tras un proceso de pesado y dosificación pasa a la etapa de molienda; el proceso más extendido actualmente es el de molienda vía húmeda ya que es el que permite una mayor homogeneización de los componentes de la fórmula.

El objetivo de esta etapa es la reducción del tamaño de partícula de los componentes de la composición y la obtención de una suspensión homogénea de sólidos en agua con una distribución de tamaños adecuada para la realización de las etapas posteriores así como disminuir los defectos puntuales achacables a impurezas de las materias primas y aumentar la velocidad de reacción en cocción ya que aumenta la superficie específica de las partículas y por tanto el número de contactos entre ellas.

Las composiciones para la fabricación de polvos atomizados se molturan en suspensión con agua mediante molinos Alsing discontinuos o continuos, comúnmente denominados molinos de bolas. Los molinos discontinuos están formados por una carcasa cilíndrica metálica dotada de movimiento rotatorio y equipada con un revestimiento interior que puede ser de bloques de sílex recortados en formas rectangulares, bloques de porcelana, cerámica aluminosa, alúmina o láminas y anclajes de caucho. En el interior del molino se disponen elementos molturantes de diferentes tamaños, de sílex, esteatita o alúmina que ocupan aproximadamente la mitad del diámetro del molino. El movimiento rotatorio del molino hace que los elementos molturantes caigan en forma de cascada continua, provocando un efecto de molienda por impacto junto a un efecto de molienda por abrasión por abrasión.

El molino continuo está formado también por una carcasa cilíndrica metálica dotada de movimiento rotatorio y equipado con un revestimiento interior de láminas y anclajes de caucho; la longitud del molino es mucho mayor y el molino está dividido en dos o tres cámaras por diafragmas de caucho con aberturas que permiten el paso de la barbotina (figura 4.9)

La barbotina resultante en ambas técnicas de molienda, se tamiza mediante vibrotamices y se almacena en grandes tanques donde se mantiene con agitación intermitente con ayuda de grandes palas accionadas eléctricamente.

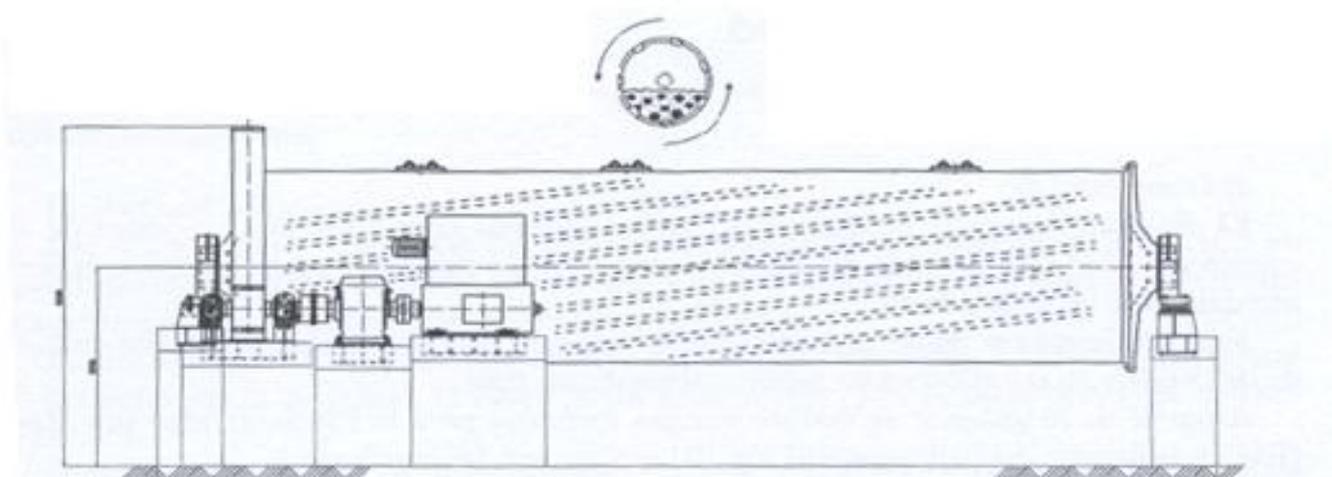


Figura 4.9: Esquema de molino continuo

Los parámetros de este proceso son los relacionados con las condiciones de operación de molienda tal y como se puede consultar en los libros de SACMI ATC (2004) Galindo (2008) o apuntes de tecnología cerámica (1991) y son: velocidad de giro y carga de elemento molturante (cantidad, distribución de tamaños y densidad del elemento), que están predeterminados en el diseño del molino así como las proporciones de solido/agua/desfloculantes.

Las variables de salida de esta etapa de proceso son las asociadas a la reología de la barbotina obtenida (Viscosidad y densidad) y la distribución de tamaños de partícula que puede definirse exactamente a través de su distribución completa de tamaños o de un modo más simple a través de su rechazo (% de partículas superiores a un tamaño determinado).

El tamaño de partícula; más concretamente su distribución, afecta al proceso de prensado. Lewis HD et al (1966) establecen la distribución de tamaños de partícula óptimos para minimizar la porosidad, Kingery WD demuestra que la densidad de la pieza prensada está íntimamente relacionada con la distribución de partículas y Reeds JS et al (1982), Halloran JW (1984) Frish (1986) estudian la dependencia de la microestructura de una pieza prensada del tamaño de partícula concluyendo que una molienda excesiva resulta en un empaquetamiento deficiente que se traduce en una mayor porosidad en crudo. Los estudios específicos sobre baldosas cerámicas de Amorós JL (1987), Escardino A et al (1981) , Amorós JL et al (1983) concluyen que la distribución granulométrica de las partículas tiene un marcado efecto sobre la densidad aparente obtenida en el proceso de prensado y sobre la contracción lineal durante el proceso de cocción, demostrando que a menor tamaño de partícula para una misma composición se obtiene mayor contracción lineal a una misma temperatura, desplazando todo el diagrama de gresificación a mayores valores de contracción lineal.

Las condiciones reológicas de la barbotina, condicionan el comportamiento de la barbotina en el proceso siguiente de atomización de modo que barbotinas con diferentes densidades o viscosidades generaran polvos cerámicos con características distintas que pueden afectar a la etapa de prensado al generar polvos cerámicos con diferentes capacidades de deformarse elástica y plásticamente (James P.J. 1983) Amorós JL (1987) y diferente densidad afectando al proceso de carga en los alveolos de la prensa.

Podemos concluir que las variaciones de densidad, viscosidad de barbotina y distribución de tamaños de partícula resultantes del tiempo de molienda y la carga del molino son las principales variables de esta etapa, cuya variación afecta directamente a las características del polvo atomizado así como posteriormente a las etapas de prensado y cocción.

Se han realizado proyectos para controlar automáticamente esta etapa como plantean Moschini M. (2004) y Mallol G. et al (2002) pero no se prevé una aplicación a corto plazo (Mallol G. 2006) . La siguiente tabla 4.2 describe las variables de este proceso y su relación con las siguientes etapas.

Variable	Efecto
Distribución de tamaño de partículas	Modifica el comportamiento de la composición en las etapas de prensado y cocción
Viscosidad de la barbotina	Afecta a las características de densidad y fluidez del polvo atomizado
Densidad de la barbotina	Afecta a las características de densidad y fluidez del polvo atomizado

Tabla 4.2 variables del proceso de molienda

4.3.3.-PROCESO DE ATOMIZACION

El secado por atomización de la suspensión preparada tras la molienda es el proceso más extendido en el sector de baldosas cerámicas; consiste en un proceso de secado en el cual una suspensión es pulverizada en finas gotas, entra en contacto con el aire caliente procedente del generador para producir un producto de humedad constante, granulado, formado por pequeñas esferas huecas. figuras.4.10 y 4.11

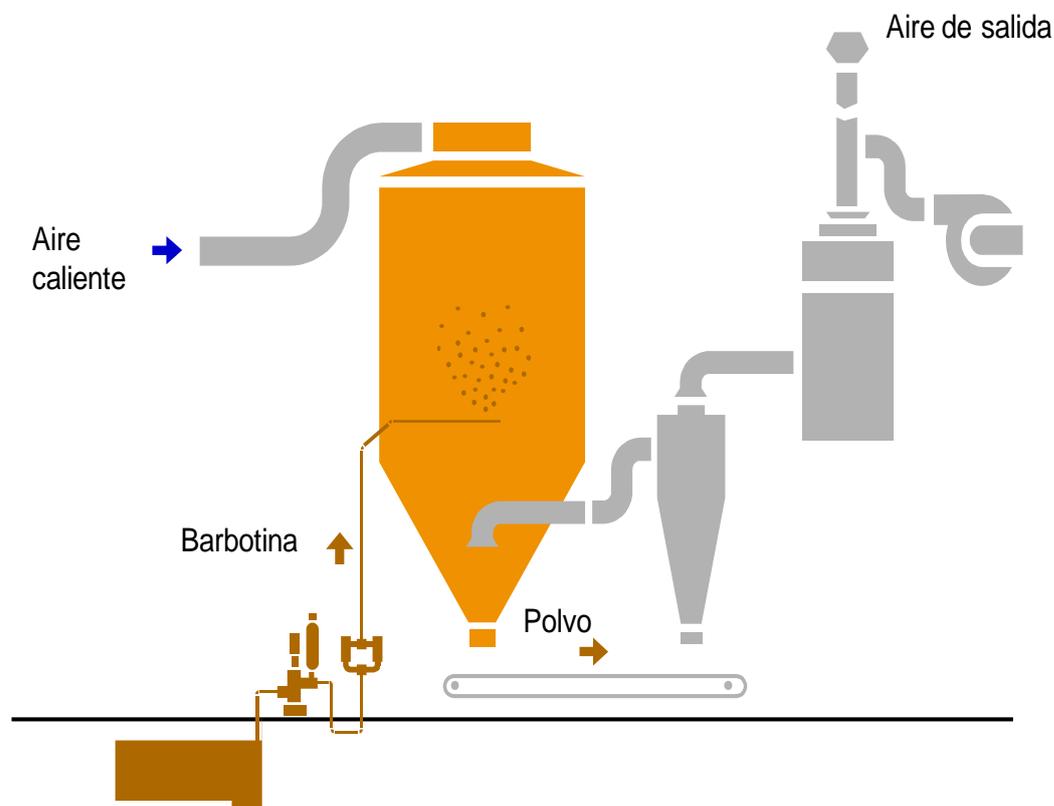


Figura 4.10: Proceso de secado por atomización

La barbotina almacenada en balsas procedente de la etapa anterior es bombeada a presión constante por bombas de pistones al sistema de distribución y pulverización del atomizador, este está formado por una serie de conducciones “cañas” rematadas por boquillas de pulverización. El pulverizado de la barbotina se encuentra con una corriente de aire caliente (sobre los 600 °C) en la torre de secado que bien es producido por un generador o procede de la recuperación de gases de instalaciones auxiliares como cogeneradores eléctricos y transportado al distribuidor de aire caliente. El atomizado es descargado en una cinta transportadora y se almacena en silos, donde se mantiene unos días en reposo para compensar las eventuales diferencias de humedad que puedan haberse generado en su fabricación y de ahí se transporta a la siguiente etapa del proceso. Las variables de este proceso que determinan la velocidad de secado de las partículas y por tanto su humedad son, el caudal de barbotina y las temperaturas y caudales de aire de secado.



Figura 4.11: Imagen de una instalación de atomización. (Keraben S.A.)

El polvo atomizado (figura 4.12) está formado por gránulos con formas geométricas más o menos esféricas con tamaños comprendidos entre 500 y 50 μm , recubiertos por una corteza semi-impermeable formada por las sales solubles cristalizadas procedentes de las arcillas de la composición o de los desfloculantes empleados y por partículas coloidales arrastradas por el agua de secado; los gránulos tienen un poro o hueco central cuyo tamaño depende de las características de la operación de atomizado y del comportamiento reológico de la barbotina (Reeds J.S. 2000)

Brewer JA Moore RH Reeds JS (1981), Dimilia RA et al (1983) Niess et al (1984) y Amorós JL (1987) demuestran que el comportamiento de los granulos de atomizado al prensarlos está muy influenciado por la estructura del granulo y la humedad y Sanchez E, et al (1998) estudian los modelos de empaquetamiento con diferentes granulometrías



Figura 4.12: Gránulos de polvo atomizado

Las variables que determinan la calidad del polvo atomizado, además de las correspondientes a su composición y distribución de tamaño de partícula detallada en los puntos anteriores son pues fundamentalmente su distribución granulométrica, densidad y humedad, estos condicionan además de su comportamiento en prensado, su fluidez tal y como demuestran Amorós JL (2000) (1987) y Galindo (2008)

La distribución granulométrica

La distribución granulométrica (distribución de tamaños de los aglomerados que forman el polvo atomizado) figura 4.13, afecta a la fluidez y densidad del polvo, variables directamente relacionadas con la operación de llenado de alveolos tal y como describe Galindo (2008) y Amoros et al (1988) . Los diferentes modelos teóricos de empaquetamiento describen las relaciones de tamaños entre esferas que optimizan el empaquetamiento , Sánchez E. (1998) ha publicado estudios sobre los modelos de empaquetamiento de los polvos cerámicos, concluyendo que el empaquetamiento óptimo se consigue con una granulometría que incluya una mezcla de aglomerados esféricos de diferentes tamaños.

Los efectos sin embargo de la granulometría sobre el comportamiento de la pieza cocida no son sin embargo relevantes tal y como describe Amorós JL. et al (1987) cuando estudia las variables que influyen en la compactación de soportes y concluye que a presiones superiores a 150 Kg /cm² (la presión de prensado de las baldosas cerámicas suele ser superior a 300 Kg/cm²), la contracción lineal de la baldosa durante la cocción es independiente del estado del aglomerado utilizado.

Giusseppe A y Revel G (2006) proponen un método de medición on line de la distribución granulométrica del polvo atomizado, no obstante, estos trabajos están en fase de desarrollo en su aplicación industrial.

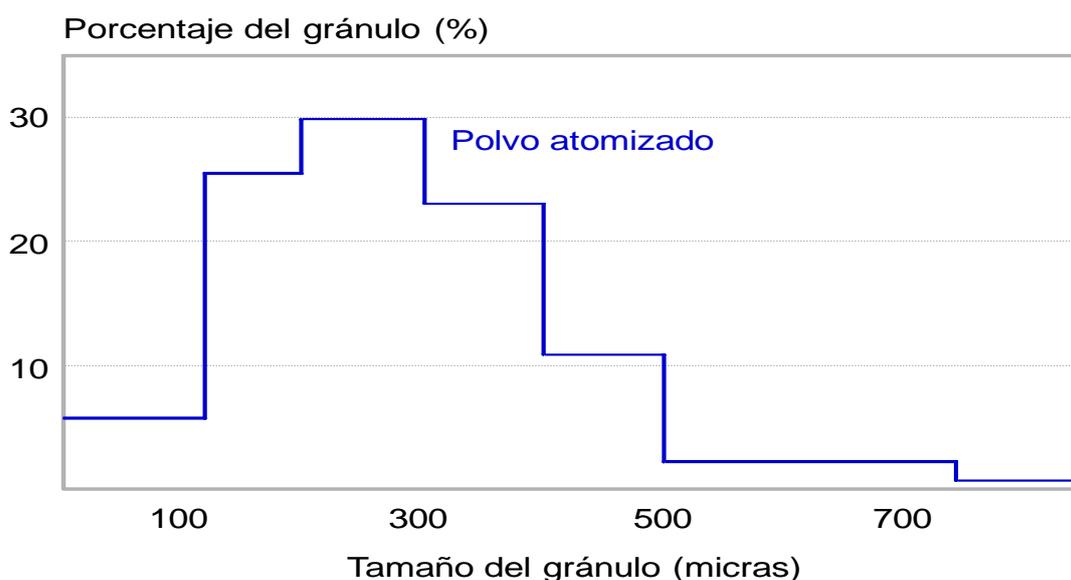


Figura 4.13: Distribución granulométrica. Adaptado (Cursos ITC)

La granulometría del polvo es consecuencia de las características de la barbotina y de los parámetros de trabajo de la instalación de atomización, especialmente del diámetro de las boquillas de pulverización y de la presión de trabajo de la barbotina (Sacmi ATC 2004)

La densidad del polvo

La densidad aparente del polvo tiene una influencia sobre las características de la pieza prensado Amorós Et al (1988) Bagan V (1991) comparan diferentes procedimientos de preparación de polvo de prensas concluyendo que un aumento de la densidad del polvo implica una mayor densidad del producto prensado. Esta densidad aparente del polvo depende tal y como demuestra Amorós JL (1987) de la densidad del material o materiales que forman la composición y de su porosidad, que a su vez depende de la forma y distribución granulométrica de las partículas ya que los gránulos de mayor tamaño presentan menor densidad, del procedimiento de preparación del aglomerado y del volumen relativo de los huecos internos; Bagan V (1991), Amorós JL (1987) y Amorós et al (1982) confirma que la densidad de los gránulos aumenta cuando lo hace la densidad de la barbotina para atomización. Un valor bajo de esta variable supone un elevado contenido en aire a evacuar y una relación entre la altura de llenado de molde y el espesor de la pieza prensada demasiado alta, ambas circunstancias ocasionan trastornos durante el desarrollo de la operación de prensado como trata Fischer E (1986).

La fluidez

La fluidez del polvo, es consecuencia de su densidad aparente, granulometría y humedad e influye marcadamente en todas las operaciones de transporte de polvo y llenado de alveolos de prensa. Para garantizar un adecuado llenado de alveolos se requiere que el polvo tenga una buena fluidez, para lo que es necesario que los gránulos sean de forma esférica, de tamaño medio grande, elevada densidad y fuerzas intergranulares no adherentes Reed J.S. (2000), Amorós JL et al (2000)(1986). Los citados trabajos introducen los parámetros para determinar la fluidez de polvos cerámicos; proponiendo la medición de velocidad de flujo y del índice de Hausner propuesto por Berrin L et al (1972) y estableciendo las relaciones entre estos índices y la distribución granulométrica (figura 4.14)

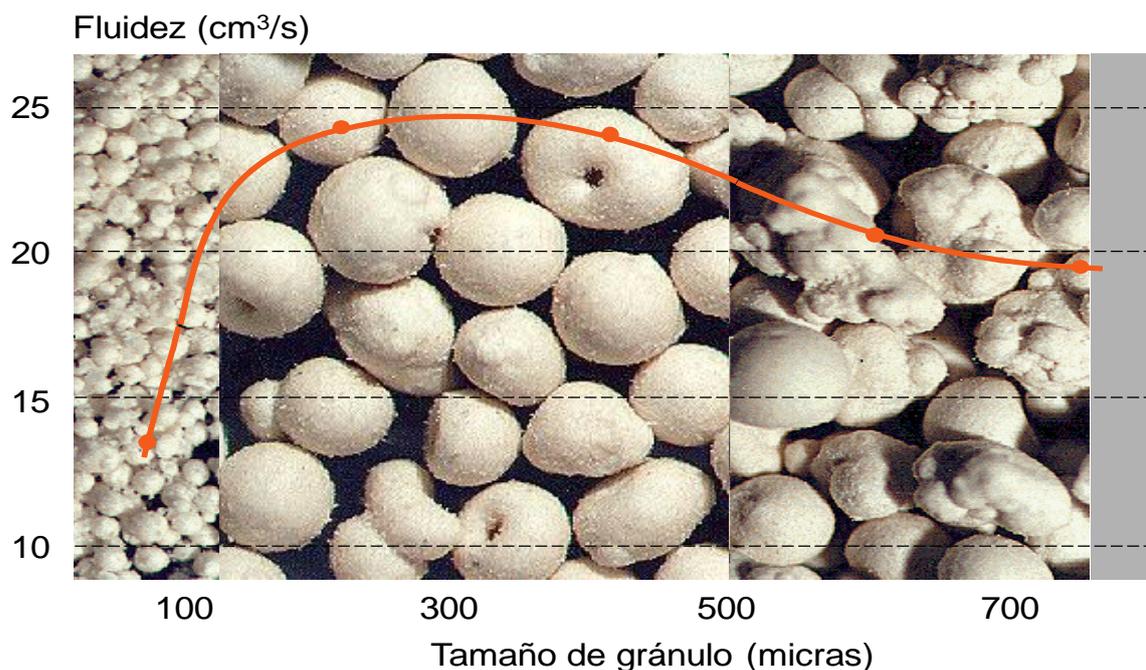


Figura 4.14: Relación entre la fluidez y la granulometría. Adaptado (Cursos ITC)

La medida de la fluidez y densidad aparente de los polvos para la fabricación de baldosas cerámicas se realiza en la actualidad con un equipo propuesto por Amorós JL y Beltrán V (1986)

La humedad

El agua actúa como lubricante durante el proceso de prensado reduciendo el rozamiento entre partículas y facilitando la compactación; si se mantiene constante la presión de prensado la densidad aparente de las baldosas prensadas aumenta a medida que lo hace la humedad, Amorós J L et al (1982) (1983) (1987); esto se debe a que la acción lubricante del agua favorece la deformación de los gránulos y por tanto disminuye la porosidad intergranular y reduce el rozamiento entre las partículas facilitando su empaquetamiento por efecto de la presión. Este efecto se mantiene en todo el rango habitual de humedades si bien a valores más elevados de humedad, cuando el agua ocupa prácticamente la totalidad de los poros se invierte y el aumento de la humedad se traduce en una reducción de la porosidad en crudo; la humedad a la que se produce este cambio se denomina humedad crítica y su valor es muy superior a las habituales de trabajo si bien disminuye a medida que aumenta el valor de la presión de prensado tal y como demuestran Amorós JL et al en sus trabajos sobre la influencia de las variables de proceso (1982).(1984)

La relación entre la humedad del polvo y la densidad aparente del soporte prensado está ampliamente documentada siendo las referencias más detalladas J.L Amorós (tesis doctoral 1987), Amorós et al (1983) Bagan V (1991) y Contoli L (1985) en su estudio de variables que influyen en el prensado de pavimentos y revestimiento en su estudio de variables que influyen en la compactación de soportes cerámicos de pavimento; estos autores proponen los modelos de relación Presión – Humedad – densidad aparente que se utilizan en el control de la operación de prensado y que se describen en el punto siguiente.

A diferencia de las variables granulometría o fluidez, que suelen permanecer constantes mientras no se cambien los parámetros fundamentales del trabajo de los equipos de secado por atomización, la humedad suele presentar una variación muy significativa en periodos cortos de tiempo tal y como se puede observar en la figura 4.15 en la que se registran series de valores de humedad obtenidos a la salida de un atomizador industrial. Se han llevado a cabo numerosos trabajos que han supuesto un avance notable en el control automático de la humedad, recurriendo a medidores de infrarrojos junto a un muestreador de polvo atomizado como desarrollan Negre, F et al. (1994)

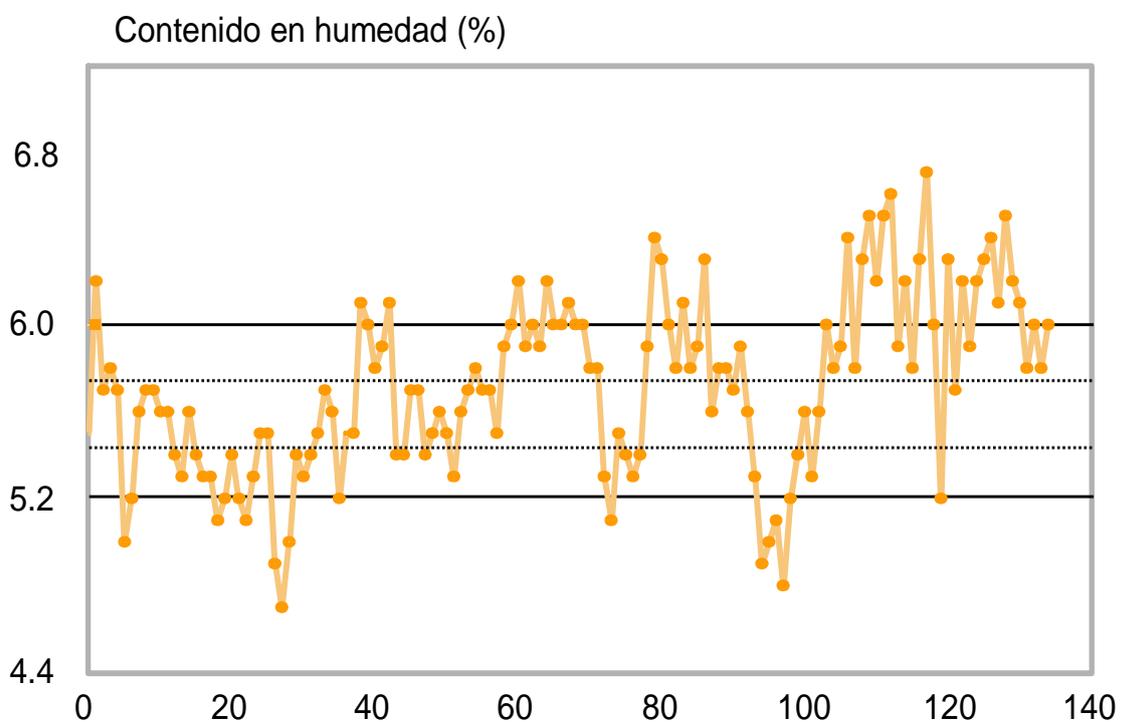


Figura 4.15: Variación de humedad a la salida de un atomizador. Adaptado (Cursos ITC)

En la práctica, es además habitual recurrir a operaciones posteriores para reducir al mínimo la variabilidad de la humedad como el almacenamiento en silos con tiempos de reposo que permitan una homogeneización y la alimentación a la siguiente etapa mezclando tierra de varios silos que descargan simultáneamente y que reducen la variación final.

Podemos concluir que la etapa de atomizado genera variabilidad en las características de granulometría, humedad, densidad y fluidez del polvo atomizado, esta variabilidad se trasmite y afecta al proceso siguiente de prensado; por otro lado, esta etapa trasmite las variaciones generadas en las etapas anteriores en la composición y tamaño de partícula de de la composición.

La siguiente tabla 4.3 describe las variables del proceso de atomización y su relación con las siguientes etapas.

Variable	Efecto
Caudal de barbotina (Presión de bombeo)	Modifica la humedad del polvo y la granulometría
Caudal de aire de secado	Modifica la humedad del polvo
Temperatura de aire de secado	Modifica la humedad del polvo
Granulometría del polvo	Afecta a las características de fluidez del polvo atomizado
Densidad del polvo	Afecta a las características de fluidez del polvo atomizado
Humedad del polvo	Afecta a las características de fluidez del polvo atomizado y al comportamiento en prensado
Fluidez del polvo	Afecta al llenado de alveolos en prensado

Tabla 4.3 Variables del proceso de atomizado

4.3.4.-PRENSADO

El prensado es una operación de conformado basado en la compactación de un polvo contenido en un molde rígido o flexible mediante la aplicación de presión cuyos objetivos son moldear las piezas con la geometría y dimensiones preestablecidas de modo que no se produzcan defectos consecuencia de una incorrecta realización de esta operación y contribuir a configurar una microestructura adecuada en la pieza cruda, Reed (2000) Amorós (1987)

Existen diferentes modalidades de prensado en función del modo como se aplique esta presión: el prensado isostático y el prensado uniaxial; el prensado isostático consiste en la aplicación de presión en dirección normal a la totalidad de la superficie que se conforma, esta técnica es válida para el conformado de piezas con geometrías complejas. En el prensado uniaxial, la compactación del polvo contenido en un molde se realiza mediante la aplicación axial de la presión a través de punzones rígidos, considerando el prensado unidireccional si la presión se aplica solo a través de los punzones superiores y axial bidireccional si la aplicación de la presión se realiza a través de los dos punzones (superior e inferior). El prensado axial unidireccional es una técnica apropiada para conformar materiales de geometrías sencillas, con espesores pequeños y grandes superficies como las baldosas cerámicas en las que la relación entre espesor y superficie es inferior a 0,03 tal y como describe Galindo (2008).

El ciclo de prensado es el programa de compactación de las baldosas y comprende un conjunto de operaciones sincronizadas, como la carga de los alveolos, primera prensada, desaireación para facilitar la salida de aire, segunda prensada hasta alcanzar la presión máxima aplicada y extracción como se representa esquemáticamente en la figura 4.16

El ciclo de prensado influye directamente sobre la distribución uniforme del polvo en los alveolos y el reparto uniforme de la presión en toda la superficie y en todos los alveolos prensados simultáneamente. Defectos derivados de la inadecuada realización de alguna de estas fases derivan en una falta de uniformidad de la pieza en crudo, problema descrito por diversos autores como describen Contoli (1983) Redd J (1976) Amorós (1987) Sánchez J et al (1994) Galindo (2002). Errores en este ciclo generan variabilidad en el resultado del producto prensado.

La adecuada realización de la operación de prensado así como la microestructura de la pieza resultante depende en gran manera de las características del polvo empleada tal y como se ha descrito en el punto anterior; estas afectan al llenado del molde en caso de que la reología del polvo no sea la adecuada ya que una fluidez inadecuada dificulta un llenado homogéneo del molde y un valor bajo de densidad aparente del polvo supone un elevado contenido en aire a evacuar y una relación entre la altura de llenado de molde y el espesor de la pieza prensada demasiado alta, ambas circunstancias ocasionan trastornos durante el desarrollo de la operación de prensado ; Reed (1988) Fischer E (1986) Galindo (2008) y pueden generar heterogeneidades en la distribución de polvo que se traduzcan en heterogeneidades en diferentes zonas de una pieza prensada.

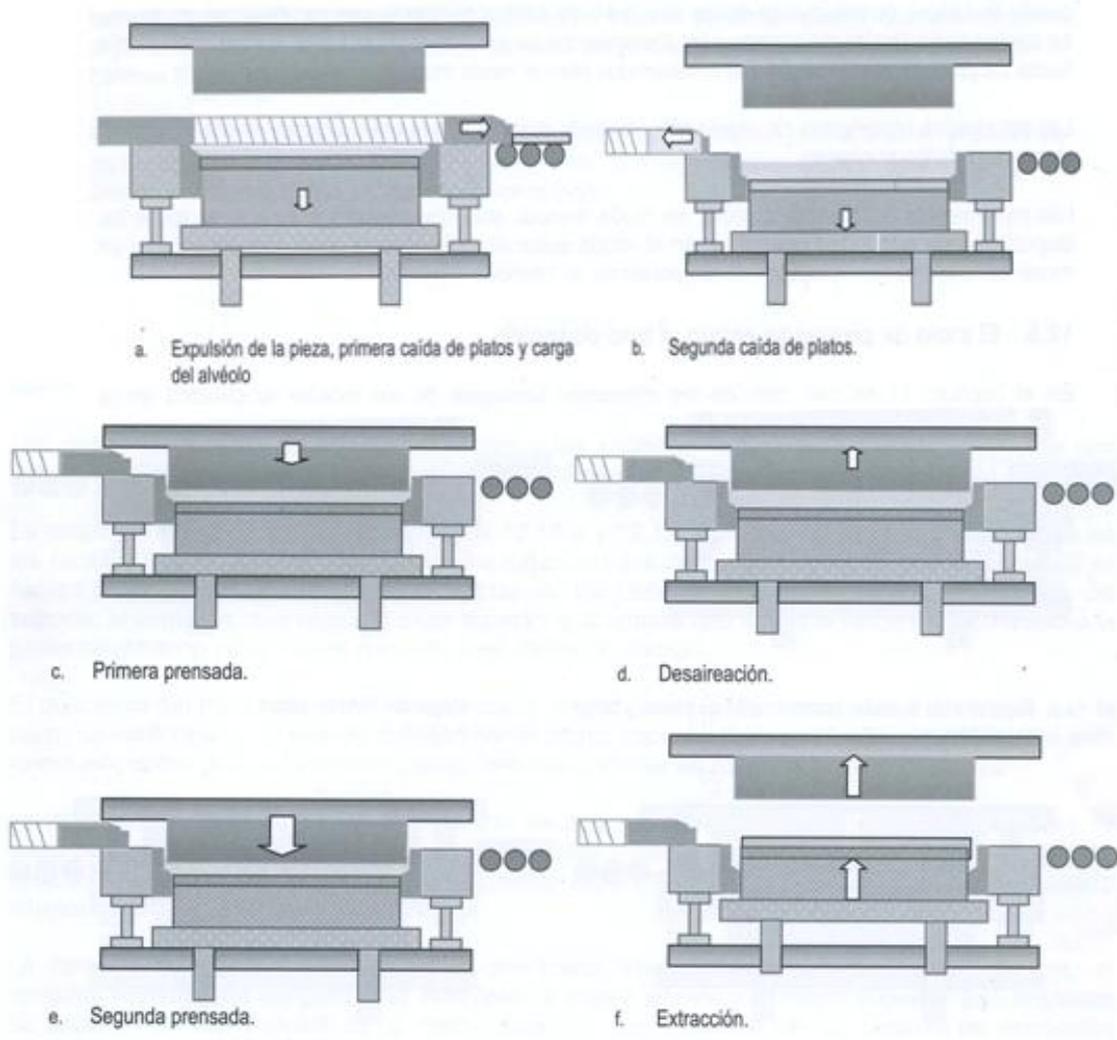


Figura 4.16: Ciclo de prensado

La microestructura de la pieza prensada definida a partir de su porosidad y compacidad es una característica fundamental, Amorós et al (1982)(1987)(2000). La porosidad de una pieza conformada se define como la relación entre el volumen ocupado por sus poros V_p y el volumen aparente V_a

$$\varepsilon = \frac{V_p}{V_a} \quad \text{Ec. 4.1}$$

Los valores de porosidad oscilan entre 0 y 1 e informan sobre el grado de compactación alcanzado por el polvo tras la operación de conformado.

La compacidad ϕ por su parte, se define como la relación entre el volumen real ocupado por el sólido V_s y el volumen aparente:

$$\phi = \frac{V_s}{V_a} \quad \text{Ec. 4.2}$$

sus valores oscilan entre 0 y 1.

Ambos parámetros son complementarios de modo que $\varepsilon + \phi = 1$

Dada la complejidad que supone el control industrial de la porosidad o la compacidad, es habitual determinar experimentalmente otro parámetro relacionado directamente con ambos y de más fácil medida como es la densidad aparente en seco ρ_a que se define como el cociente entre el peso de una pieza seca W_s y el volumen que ocupa o volumen aparente V_a

$$\rho_a = \frac{W_s}{V_a} \quad \text{Ec.4.3}$$

El empleo de la densidad aparente de la pieza seca como característica fundamental del proceso de prensado está ampliamente documentado; las primeras investigaciones en este sentido en el campo de las baldosas cerámicas se realizaron en la década de los 80, siendo referencia de estos trabajos, Amorós JL et al (1982) (1983) Amorós JL (Tesis doctoral 1987), Escardino A et al (1981) V Bagan (1991) y Contoli (1985).

En todos estos trabajos se demuestra que las piezas con diferente compactación presentan diferencias en sus diagrama de gresificación, de modo que valores mayores de densidad aparente corresponden a menor tamaño de los poros de la pieza cruda, lo que aumenta su reactividad de las partículas y se traduce por una parte en un incremento de la formación de fase líquida y de vitrificación y por otra en la disminución de la contracción lineal en cocción tal y como demuestran los trabajos citados anteriormente y como se puede observar en el grafico siguiente (figura 4.17) .

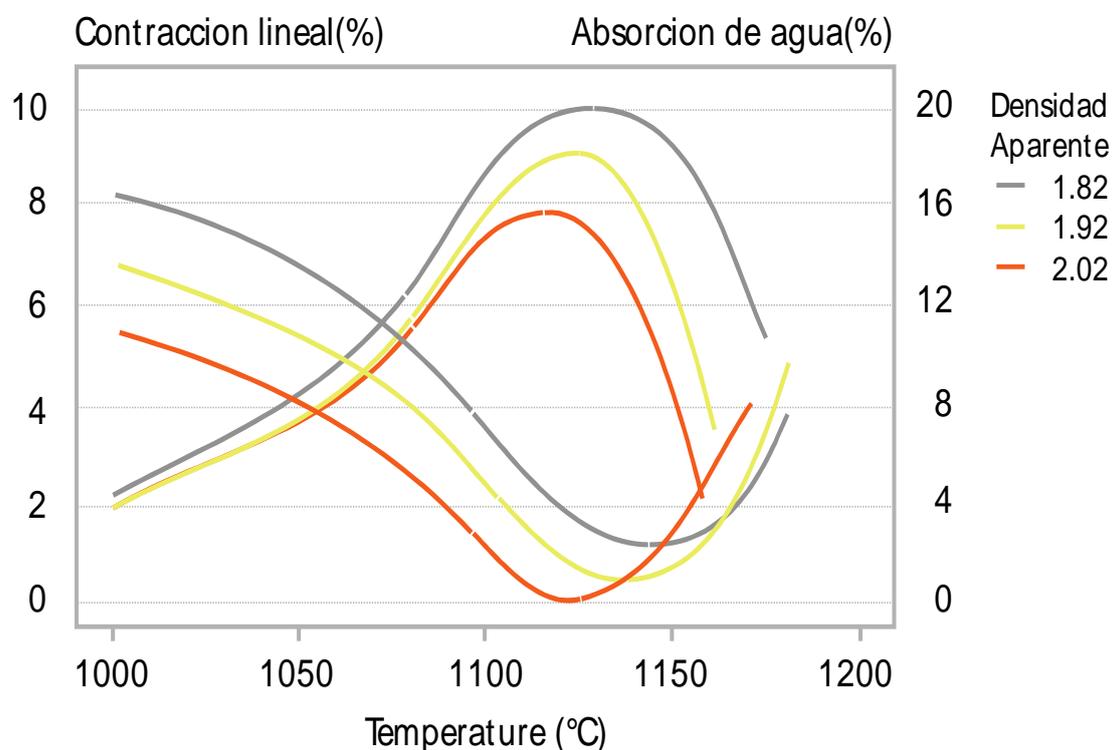


Figura 4.17: Variaciones del diagrama de gresificación para diferentes densidades aparente. Adaptado (Cursos ITC)

Una pieza con mayor densidad aparente en seco contraerá menos que tras la cocción que una que esté más compactada. Este gráfico describe asimismo como la variabilidad de la densidad aparente se trasmite a la variabilidad dimensional al modificar la relación T^a – contracción lineal.

El mecanismo de la compactación mediante prensado de polvos atomizados se basa en el modelo propuesto por Reed (1988; trabajos posteriores, Amorós JL (1987) han

demostrado su validez para el prensado unidireccional de polvos cerámicos atomizados. Según este modelo, a medida que se aumenta la presión de prensado aumenta la densidad aparente y por tanto se reduce la porosidad, identificándose tres tramos en los que la relación entre la densidad aparente y el logaritmo de la presión es lineal. (figura 4.18)

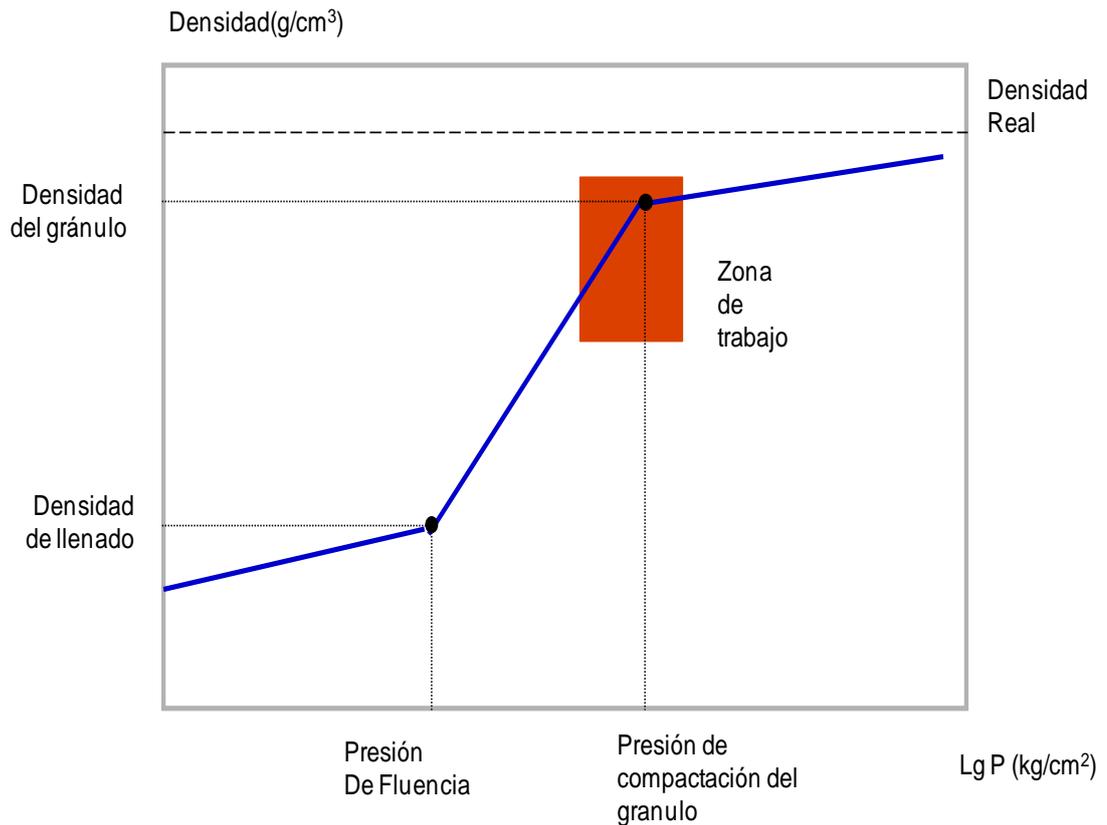


Figura 4.18: Modelo de compactación de un polvo atomizado. Adaptado (Cursos ITC)

El primer cambio de pendiente define la presión de fluencia, esta es una medida de la resistencia mecánica de los aglomerados y está marcadamente influenciada por el contenido en humedad del aglomerado y su distribución granulométrica tal y como describen los autores citados anteriormente; hasta este valor de presión, los gránulos se reorientan hasta un punto en el que la reordenación es prácticamente completa y cambia el mecanismo de compactación.

En el segundo tramo, el mecanismo predominante de compactación es el de deformación plástica y rotura de gránulos con una reducción de porosidad

intergranular hasta un valor “presión de compactación del granulo” en el que la densidad aparente de todo el sistema es igual a la densidad aparente de los gránulos.

En el tercer tramo, se produce una disminución de la porosidad intragranular por flujo de partículas. En la práctica los mecanismos de la fase II y III pueden solaparse de modo que se dé simultáneamente la deformación plástica de los gránulos y la reordenación de partículas. Amorós JL (1987) confirma en su tesis que durante las fases II y III los valores de densidad aparente no dependen del tamaño del aglomerado.

La relación entre los valores obtenidos de densidad aparente para un polvo cerámicos determinado a diferentes condiciones de presión y humedad describen sus “diagramas de isocompactación”, propuestos para su uso en los procesos de baldosas cerámicas por Amorós JL et al (1982) (1983) en su estudio de la influencia de la presión y humedad en la compactación de soportes cerámicos y por Bagan V (tesis doctoral 1991) y ampliamente utilizados en la actualidad para controlar la operación de prensado. Ejemplo de este modelo puede observarse en el gráfico de las figuras 4.19 y 4.20

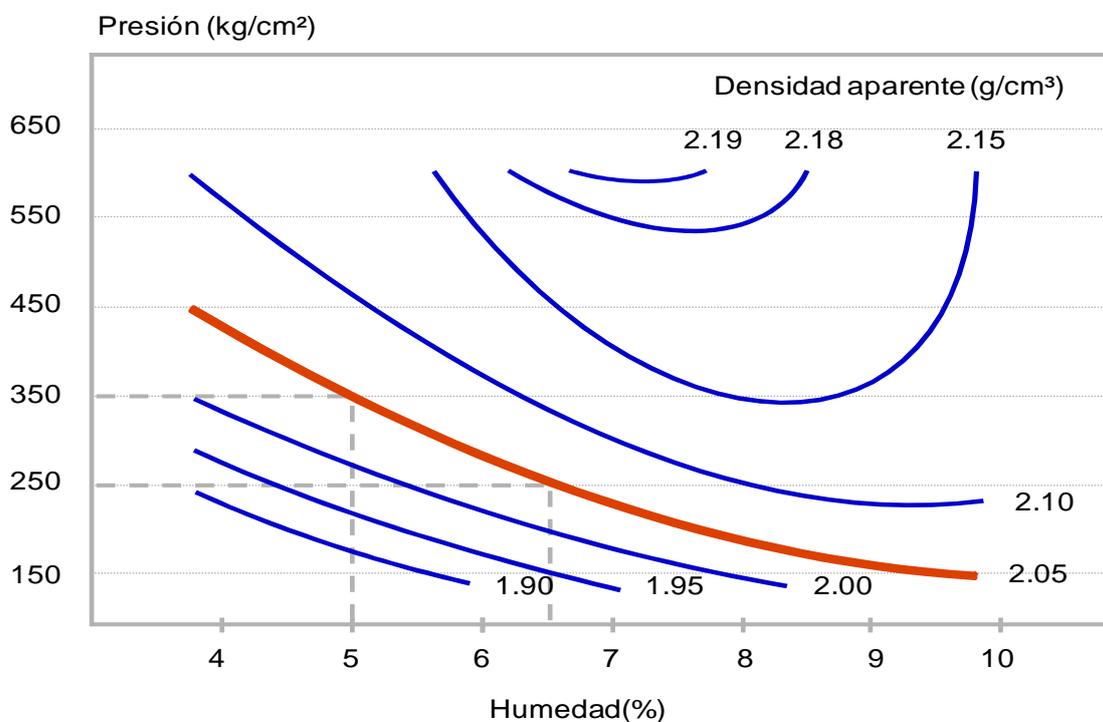


Figura 4.19: Diagrama de isocompactación. Adaptado (Cursos ITC)

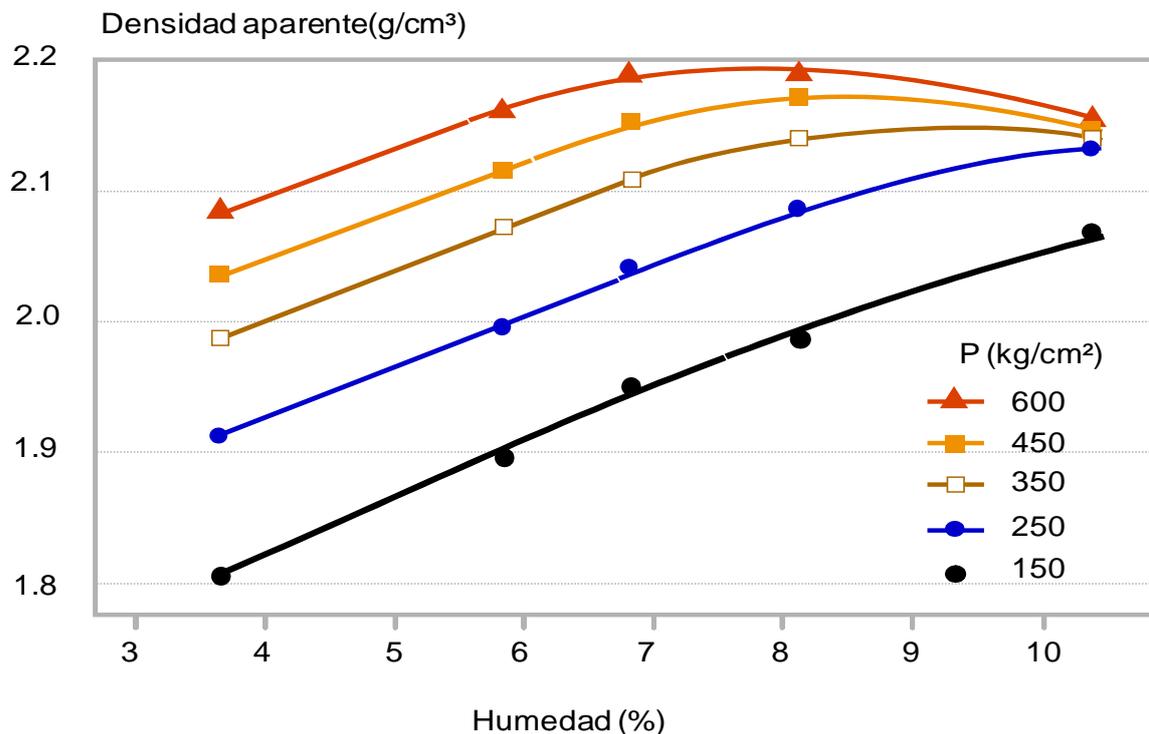


Figura 4.20: Efecto de la humedad y presión de prensado sobre la densidad aparente. Adaptado (Cursos ITC)

El modelo de relación planteado por estos autores puede describirse como:

$$D_{ap} = \beta_0 + \beta_1 \log P + \beta_2 H \quad \text{Ec. 4.4}$$

La medida de la densidad aparente se realiza de forma manual o semiautomática mediante el procedimiento de inmersión en mercurio desarrollado por Amorós JI et al (1983) y posteriormente patentado o los desarrollados más recientemente para evitar el empleo de mercurio desarrollados por Agramunt JV et al (1995) Enrique JE et al (1997).

Se han realizado diversos trabajos para intentar sustituir este ensayo dado su carácter discontinuo y manual sin que hasta el momento se haya encontrado una solución suficientemente satisfactoria para su uso como control industrial; cabe destacar los trabajos de Gras M (Patente 1999) para desarrollar un dispositivo de control de densidad aparente mediante ultrasonidos, los de Marchetti y Revel G (2002) con sistemas de medida por ultrasonidos sin contacto y los de Feliu C y Llorens d (2006) de medida en continuo mediante la absorción de rayos x o los trabajos de Mallol G et

al combinando sensores extensiométricos en el punzón de la prensa para medir la distribución de la presión en el soporte durante su compactación junto con el empleo de sensores de infrarrojos para determinar la humedad del polvo.

No obstante estos intentos, la densidad aparente del producto prensado no puede determinarse todavía hoy en continuo y debe recurrirse a su determinación off-line mediante muestreo o utilizando medidas indirectas de la humedad y presión de prensado para controlar su resultado como plantea Mallol G (2004).

Además de las diferencias entre densidad aparente entre piezas distintas, los fallos en la dosificación de polvo por deficiencias en su fluidez o por errores del sistema de dosificación o defectos geométricos del molde pueden generar diferencias de densidad aparente entre distintas zonas de la pieza que generan problemas de descuadres; no obstante, el empleo de punzones isostáticos con cámara de aceite deformable introducidos desde 1999 suele compensar estos problemas siempre que su variación no sea excesiva.

La etapa de prensado genera pues variaciones en el comportamiento del soporte que condicionan el resultado de la etapa siguiente de cocción, estas variaciones son consecuencia de las observadas en la densidad aparente que implican cambios en el diagrama de gresificación; además de esta variación, la etapa de prensado no genera pero trasmite al proceso siguiente los cambios en las características fisicoquímicas de la composición que pueden tener un efecto equivalente.

Es interesante además destacar en este sentido que las prensas actuales procesan más de una pieza en cada operación (figura 4.21), lo que supone un caso típico de proceso "multi-flujo" en el que los cambios en la presión aplicada a la pieza pueden producirse tanto por un cambio de la presión total aplicada por el sistema hidráulico de la prensa que afecta por igual a todos los alveolos del molde o por diferencias sistemáticas en la presión aplicada en diferentes alveolos de la prensa por defectos de construcción del molda o por deformaciones del sistema prensa molde tal y como describe Galindo (2008) y como intentaron determinar Sánchez J et al (1995) en su estudio para la sensorización de una prensa industrial, siendo esta potencial diferencia entre piezas de una misma operación un potencial factor de variación adicional.



Figura 4.21: Prensado simultaneo de varias pieza. (Keraben S.A.)

La siguiente tabla describe las variables del proceso de prensado y sus relaciones

Variable	Efecto
Fluidez del polvo atomizado	Afecta la operación de llenado de alveolos
Presión de prensado	Modifica la densidad aparente de la pieza
Humedad	Modifica la densidad aparente de la pieza
Composición de materias primas	Modifica su comportamiento en prensado y la densidad aparente
Tamaño de partícula en molienda	Modifica el comportamiento en prensado y la densidad aparente
Densidad aparente	Modifica el diagrama de gresificación y el comportamiento del soporte en la cocción
Deformaciones en el molde/prensa o defectos de carga	Generan piezas en una misma prensada con diferentes densidades aparentes

Tabla 4.4 Variables del proceso de prensado

4.3.5.-COCCION

La cocción de baldosas cerámicas se realiza actualmente en hornos industriales continuos en los que se alimentan filas de producto en un único estrato que se deslizan sobre una base de rodillos (hornos mono estrato) (figura 4.22)



Figura 4.22: Alimentación de piezas en el horno. (Keraben S.A.)

El material crudo avanza por el horno, encontrando sectores cada vez más calientes (zona de precalentamiento) hasta alcanzar la zona de temperatura máxima (zona de cocción) que se extiende durante un cierto tramo para posteriormente encontrarse con una zona de fuerte enfriamiento que se suaviza posteriormente para evitar problemas debidos a la transformación del cuarzo presente en la composición, para luego ser retomado de manera turbulenta hasta la salida del horno donde las baldosas ya pueden considerarse como “producto acabado” y salen del horno a una temperatura de aproximadamente 60 °C.

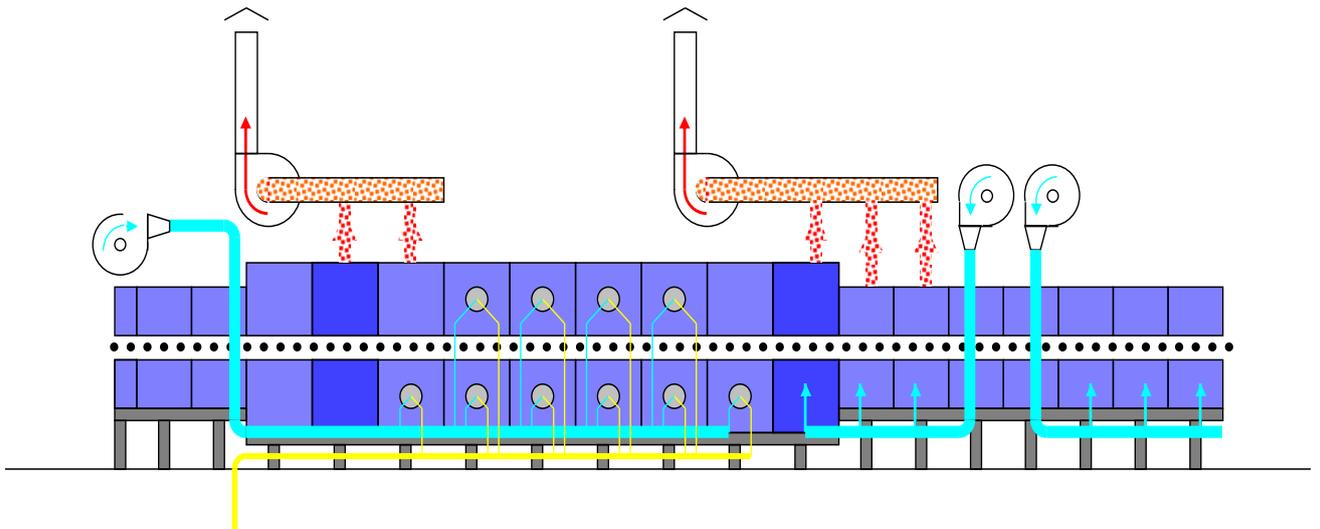


Figura 4.23: Esquema de horno cerámico

Los gases calientes resultantes de las zonas en las que se realiza la combustión se transportan en contracorriente hacia la entrada del horno, estos calientan al material que está entrando en el mismo y finalmente son emitidos a la atmósfera. El enfriamiento del material se realiza mediante convección forzada con aire que se inyecta directamente sobre el material que ha finalizado la etapa de cocción, reutilizándose en la mayoría de los casos el mismo para utilizarlo como aire de combustión.



Figura 4.24: Grupos de quemadores. (Keraben S.A.)

El ciclo de cocción de estos hornos es de aproximadamente 40 minutos, el combustible habitual es gas natural o GLP que se quema directamente en la cámara del horno mediante grupos de quemadores con la mezcla de combustible y aire soplado en los conductos adecuados, que puede ser subdividido en aire de tipo primario, como comburente para el combustible, y secundario, para la obtención de la atmosfera de cocción adecuada.

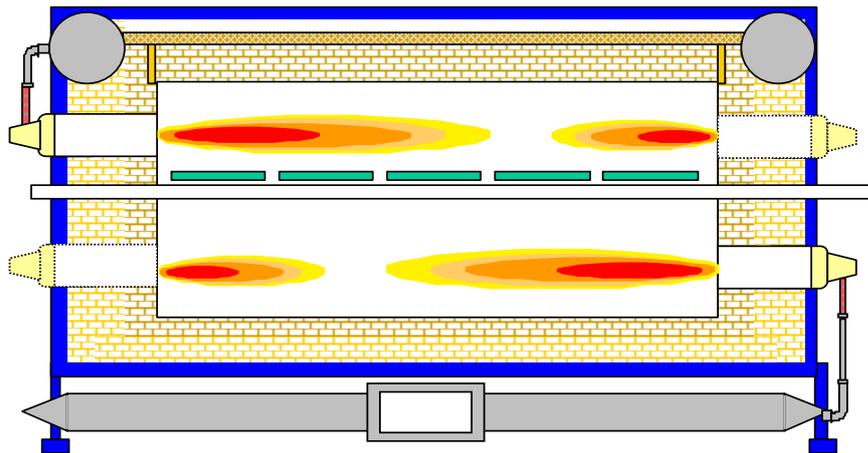


Figura 4.25: Detalle del interior del horno

El tratamiento térmico del producto se describe a partir de la “curva de cocción”, que es la representación de las temperaturas del horno a lo largo del proceso y cuya forma corresponde habitualmente a la representada en la Fig. 4.26

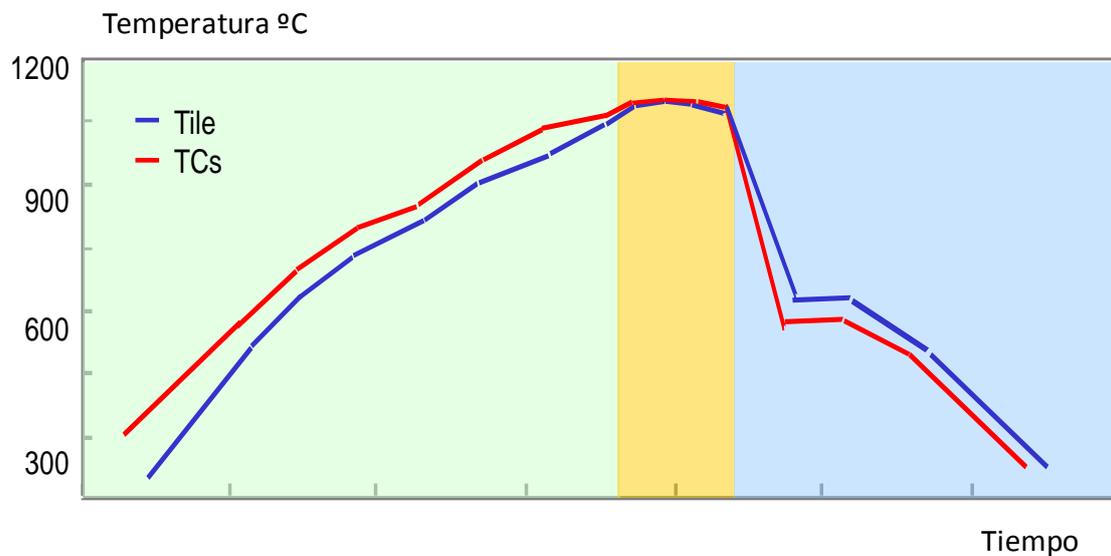


Figura 4.26: “Curva de cocción”

Para determinar el perfil de temperaturas y el ciclo de cocción óptimos para cada caso concreto, se consideran por una parte las tensiones térmicas a que están sometidas las piezas en los distintos estados de cocción y por otra, el conjunto de transformaciones químicas y estructurales que secuencialmente se desarrollan a lo largo de la operación.

Es importante señalar que la curva de cocción se descompone realmente en dos: la correspondiente a la zona superior del horno que está sobre el tapete de material y la correspondiente a la zona inferior; el horno está dotado de sistemas de combustión independientes para estas dos zonas y se observan diferencias entre las mismas en cada momento del proceso, estas diferencias son consecuencia de tratamientos térmicos diferenciales requeridos por la capa decorada para lograr un óptimo acoplamiento del esmalte y el soporte.

Durante la etapa de precalentamiento, el material pierde el contenido en agua presente en la baldosa cruda y tienen lugar una serie de reacciones de descomposición de impurezas (oxidación de la materia orgánica y de compuestos inorgánicos) que debe completarse antes de llegar a la etapa de máxima temperatura. La etapa de cocción propiamente dicha se realiza en el tramo de máxima temperatura, habitualmente (1130 – 1170 °C) y varía en función de la composición seleccionada y es en esta zona en la que se producen los fenómenos de vitrificación con la correspondiente reducción de porosidad y contracción de la pieza.

El enfriamiento de las piezas se realiza en tres etapas diferentes: enfriamiento forzado a alta temperatura, enfriamiento lento para evitar roturas de material por la transformación del cuarzo α a cuarzo β (Proceso que genera tensiones internas y que puede producir su ruptura) y enfriamiento forzado hasta llevar a la pieza a baja temperatura.

A Escardino et al (1981) estudian las variables de cocción que determinan la contracción de la pieza en este proceso y determinan como críticas la temperatura de cocción y el tiempo de permanencia de la pieza a la temperatura máxima. Con un tiempo de permanencia prefijado, la relación entre la temperatura y la contracción define el diagrama de gresificación comentado a inicio de este capítulo; los cambios en el tiempo de permanencia provocan desplazamientos del diagrama de gresificación de modo que aumentos de tiempo tienen efectos similares a aumentos de temperatura.

En general, el tiempo de permanencia durante la producción de un lote es un parámetro de proceso fijado y que no presenta variaciones una vez se ha predeterminado ya que en caso contrario supondría la acumulación o separación del flujo del material en el horno lo que imposibilitaría la circulación por el mismo. La temperatura máxima aplicada si puede presentar sin embargo variaciones significativas que generan diferencias de contracción y por tanto variabilidad dimensional:

- Cada zona de cocción dispone de sensores de temperatura ubicados en la zona del horno correspondiente (próxima a la superficie de la pieza), un grupo de quemadores y un controlador PID que modifica los caudales de gas de combustión para mantener el valor de temperatura preestablecido en la zona. La variabilidad generada por este sistema de regulación supone directamente variaciones en las lecturas de temperatura de la zona correspondiente.
- La temperatura con la que se regulan los sistemas de combustión corresponde a la temperatura de la cámara del horno en ese punto; esta no tiene porque corresponder con la temperatura de la superficie de la pieza ni con la del interior de la misma Cantavella V E Monfort E (1996) estudian un modelo de perfil interno de temperaturas en la pieza y Cantavella V y Moreno A (2006), cuantifican experimentalmente utilizando una baldosa sensorizada las diferencias reales entre la superficie de la pieza, el interior de la misma y la zona del horno concluyendo que existen diferencias importantes entre la temperatura de la zona del horno y la real de la pieza, en especial en momentos en los que la velocidad de calentamiento o enfriamiento es elevada y que además la pieza presenta diferencias también importantes entre la zona superior e inferior.
- Los cambios en la alimentación del material en el horno (pequeños huecos, piezas más o menos agrupadas) generan cambios en la masa de material a cocer y alteran el equilibrio térmico del horno. Los sistemas de regulación actúan frente a estas situaciones pero en muchas ocasiones el sistema no responde con la velocidad requerida y se generan cambios en la temperatura de la zona. La constancia del flujo de alimentación al horno depende fundamentalmente de la precisión con la que trabaja el sistema automático que forma las filas de piezas y las alinea, comúnmente llamado “mesa de entrada”

- Los sensores que miden la T^a están solo ubicados en puntos situados longitudinalmente en el horno en la zona central y no pueden detectar diferencias transversales de temperatura en una zona determinada (gradientes); la presencia de estos gradientes de temperatura es consecuencia de la regulación del sistema de combustión (presiones de trabajo de los mecheros), del grado de aislamiento de las paredes del horno y las velocidades de flujo de aire determinadas por la curva de presiones y su presencia ha sido estudiada y confirmada por Mallol G et al (1994) mediante el empleo de rodillos sensorizados (patente AICE 1994) capaces de medir un perfil transversal de temperatura en diferentes zonas del horno. Estos autores concluyen que habitualmente, la temperatura de las zonas del horno próximas a las paredes en la zona de cocción es menor que en el centro y que cambios en las presiones del aire de combustión tienen incidencia sobre la distribución de temperaturas que pueden generar una variabilidad dimensional importante que solo se corrige si se revisan los parámetros del equipo.

Podemos concluir, que el horno genera variabilidad fundamentalmente por las variaciones de temperatura descritas anteriormente; esta variabilidad, junto a la transmitida de las etapas anteriores por las variaciones descritas en el soporte cerámico son las que generan la variación final dimensional de la pieza.

Variable	Efecto
Temperatura de cocción	Modifica la contracción de la pieza
Ciclo de cocción	Modifica la contracción de la pieza
Diferencias de temperatura "gradientes"	Provoca diferencias entre piezas procesadas en diferentes posiciones del horno

Tabla 4.5 variables del proceso de cocción

4.4 CONCLUSIONES

El siguiente diagrama causa efecto de Ishikawa (figura 4.27) resume los factores identificados en las distintas etapas que pueden generar una variación en la contracción lineal del soporte durante la etapa de cocción y que por tanto provocar la variabilidad observada en la dimensión de las baldosas.

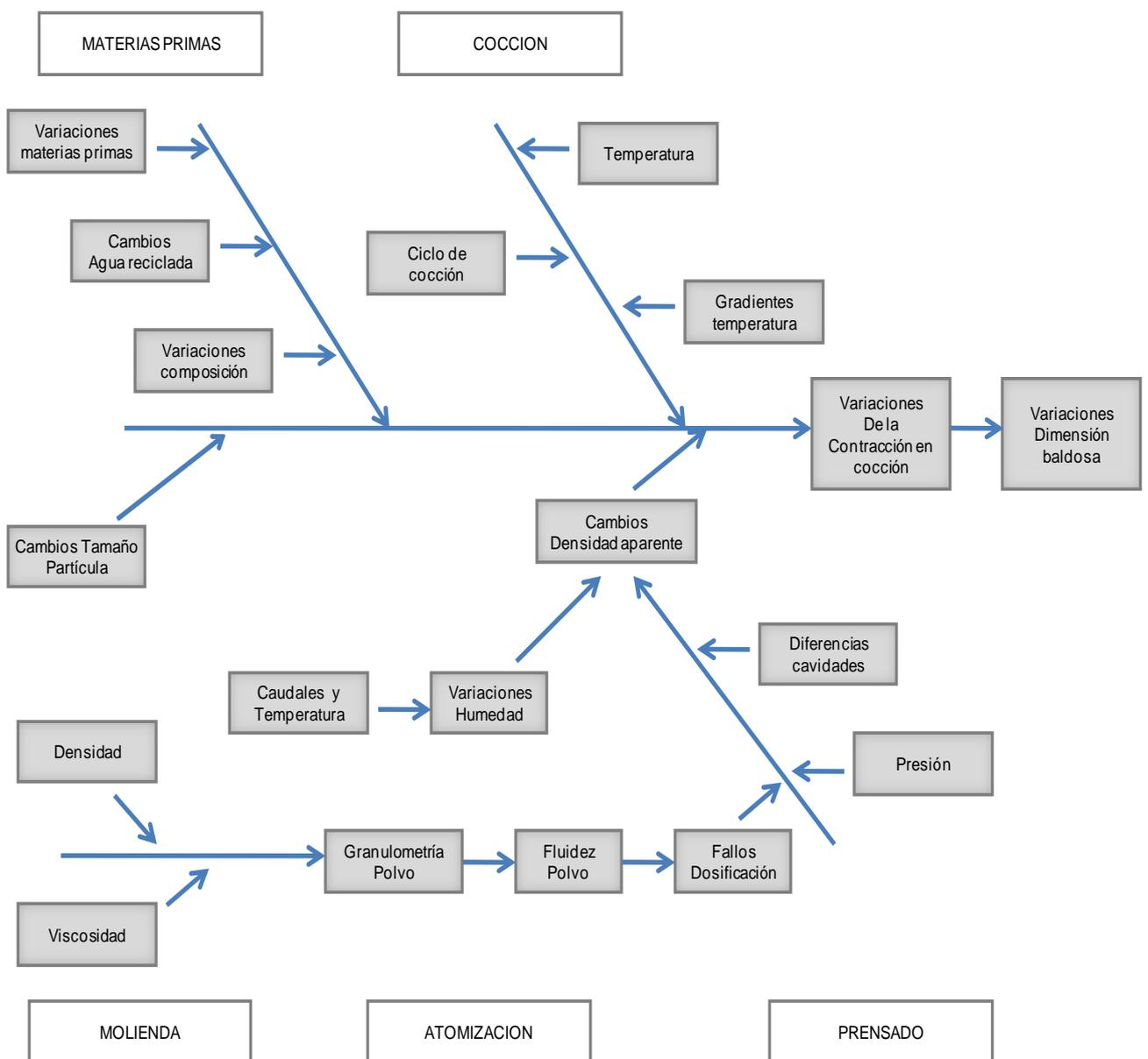


Figura 4.27: Diagrama causa efecto de los factores que generan variación dimensional

PROPUESTA

Capítulo 5.

Propuesta de método para el modelado de la transmisión de variabilidad, su coste y la mejora del proceso

5.1.- RESUMEN DE LA METODOLOGIA PROPUESTA

5.2.- ANALISIS DE RESULTADOS DE PROCESO

5.3.- MODELO DE TRASMISION DE VARIABILIDAD, ESTIMACION Y VALIDACION

5.3.1.- Modelo general

5.3.2.- Estimación de componentes y validación del modelo

5.4.- ESTIMACION DE UN MODELO DE COSTES

5.4.1.-Costes de fabricación

5.4.2.-Componentes de los costes de variabilidad

5.4.3.-Estimación del modelo

5.5- MEJORA DEL PROCESO

5.5.1.- Análisis de opciones de inversión

5.5.2.- Combinación de actuaciones y selección de alternativa óptima

5.6 CONCLUSIONES

5.1. RESUMEN DE LA METODOLOGIA PROPUESTA

El esquema de trabajo se detalla en la figura. 5.1 e incluye cuatro bloques: evaluación de resultados del proceso, estimación y validación de un modelo que explique la transmisión de variabilidad, estimación de un modelo de costes de variación y mejora del proceso utilizando los modelos anteriores.

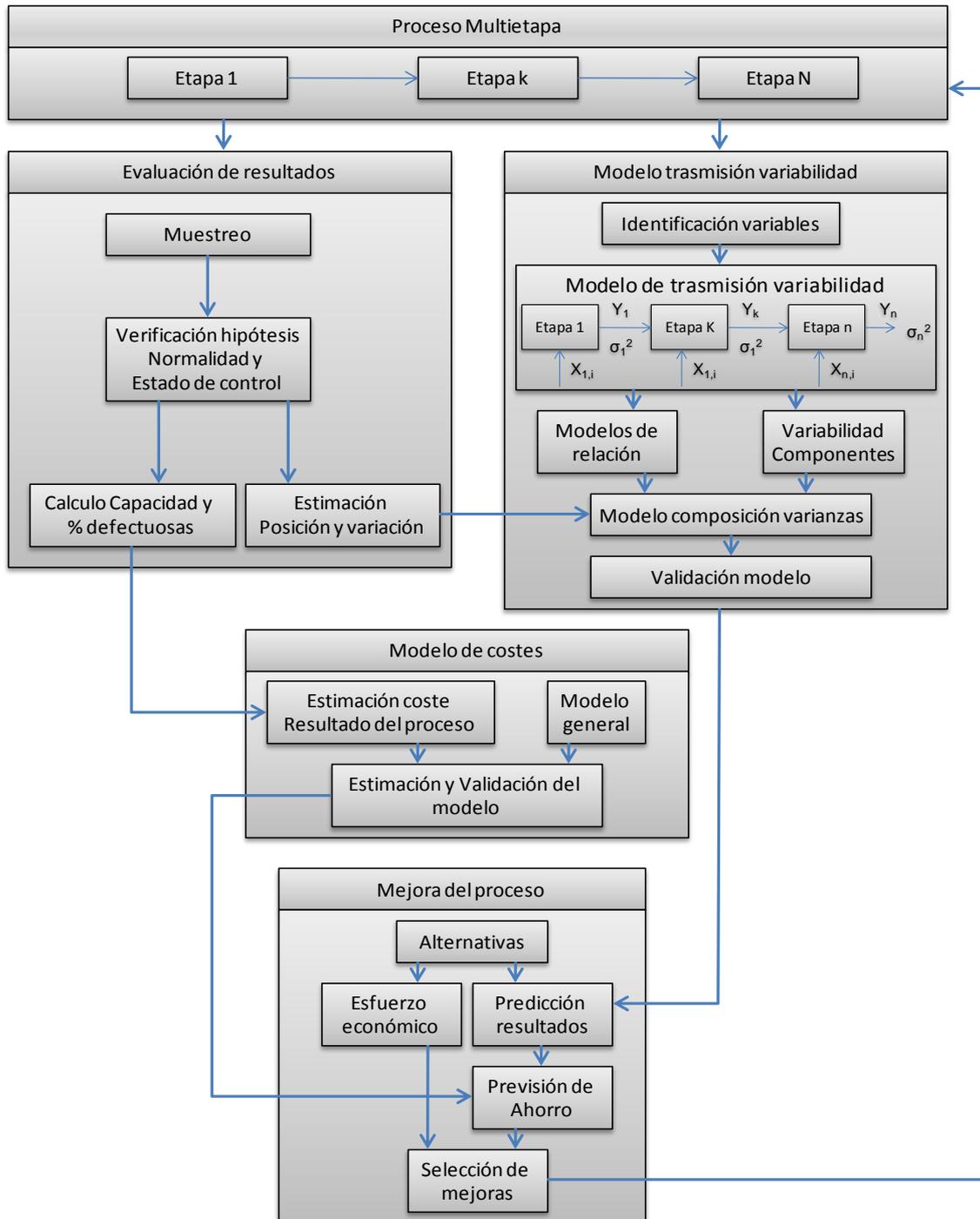


Figura 5.1: Modelo general

1.- Análisis de resultados del proceso

El primer paso es conocer el punto de partida, es decir, cual es el resultado del proceso en la situación de trabajo y para ello debe recurrirse a un muestreo de los resultados del mismo durante un periodo que pueda considerarse representativo de la situación que se desea evaluar y optimizar para, a partir de esta información poder verificar las hipótesis de distribución de los resultados y que el proceso ha estado en una situación de “estado de control” durante el periodo analizado.

Los resultados obtenidos permitirán estimar los estadísticos que representan la distribución de datos, calcular los índices de capacidad y los porcentajes de defectuosas que se estén obteniendo y establecen la base a partir de la que se puedan realizar y evaluar las mejoras.

2.- Modelo de trasmisión de variabilidad

Se propone una metodología para poder describir y explicar donde se genera y como se trasmite la variabilidad en el proceso así como las relaciones entre las diferentes variables y etapas de modo que puedan estimarse los modelos de composición de varianzas de todo el proceso y de cada etapa en particular, cuantificando la aportación de cada variable y cada operación al problema. Es la herramienta fundamental para posteriormente poder predecir los resultados de las acciones de mejora. La propuesta para la preparación del modelo de trasmisión de variación y la estimación y validación del modelo de composición de varianzas utiliza parte de las ideas introducidas por Morrison en su “Síntesis de varianzas” y de la metodología SoV.

3.- Estimación del modelo de costes de la variabilidad

El modelo de costes de variabilidad vincula la variación a indicadores económicos y además de cuantificar el impacto en los costes totales de fabricación de la situación evaluada, permite estimar los ahorros potenciales de cada una de las propuestas de mejora. La metodología que se propone plantea un modelo de coste similar al propuesto por Taguchi pero lo estima utilizando los componentes de los costes de calidad planteando finalmente un modelo matemático que describe la relación entre coste unitario y variabilidad.

4.- Mejora del proceso (selección de alternativas)

El proceso de mejora supone un análisis de las diferentes soluciones aplicables para reducir la variabilidad de los componentes, bien a través de cambios en los procedimientos de control o a través de inversiones en sensores o rediseño de procesos; identificando para cada una de ellas la mejora esperable, la inversión asociada y el beneficio económico de su aplicación. De las diversas soluciones de mejora posibles, la utilización conjunta del modelo de transmisión de variabilidad, el modelo de costes de variabilidad y la inversión; permitirá seleccionar la opción económicamente más rentable.

5.2. ANALISIS DE LOS RESULTADOS DEL PROCESO

La primera operación es el análisis de los resultados de calidad del proceso durante un periodo de producción que corresponda a la situación que se desea evaluar y mejorar. Este tiene como objetivos comprobar que el proceso ha estado durante dicho periodo “en estado de control”, es decir, no han aparecido causas especiales de variación y que por tanto su resultado corresponde a una situación estable y representativa del proceso para a partir de ahí estimar los estadísticos que identifiquen la distribución de datos de salida que se utilizarán para validar el modelo de transmisión de variabilidad y calcular el modelo de costes.

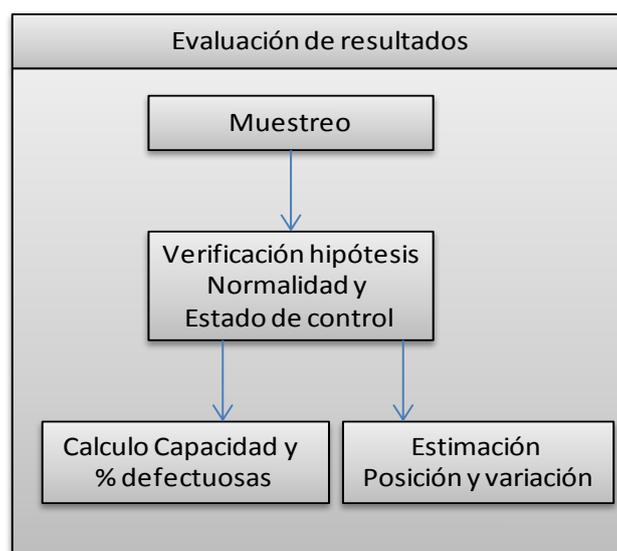


Figura 5.2: Estimación de resultados del proceso

El análisis incluye una toma de muestra durante el periodo definido para, analizando los resultados poder verificar la hipótesis de normalidad de la distribución de datos y de proceso “en estado de control” y estimar los índices de capacidad y % de defectuosas.

Toma de muestra y determinación de frecuencias de muestreo

La determinación del periodo de evaluación así como la frecuencia de muestreo y tamaño de muestra con el que se va a evaluar el resultado es fundamental; si el periodo seleccionado no representa la situación que se desea modelizar y optimizar o la frecuencia y tamaño de muestra es inadecuado los resultados obtenidos no representarán la realidad del proceso y las conclusiones serán erróneas.

La definición del periodo de análisis dependerá de las características particulares de cada proceso; en los casos en los que el proceso fabrique productos en diferentes lotes de producción lo más adecuado es establecer la totalidad del periodo de fabricación de un lote como el periodo representativo de la situación que se desea evaluar o mejorar; en las situaciones en las que el proceso esté continuamente fabricando lo mismo o que los periodos de producción de un lote sean demasiado largos lo más recomendable será determinar un periodo de tiempo que la experiencia y conocimiento del proceso permita asumir como representativo del resultado general.

La frecuencia de muestreo debe ser suficiente como para detectar durante el periodo en estudio los posibles cambios del proceso, se puede utilizar la misma frecuencia de muestreo con la que se controla el proceso siempre que esta sea suficiente o utilizar los criterios de definición de frecuencia de muestreo descritos para la utilización de gráficos de control que se estiman a partir de la longitud del recorrido medio que pueden consultarse en cualquier manual de estadística como Montgomery (2005) o Prat A (1994)

El tamaño de muestra suele estar condicionado por las propias condiciones del muestreo y el coste de la inspección; lo más recomendable es trabajar con muestras de 5 o más elementos que formen subgrupos racionales de modo que cada conjunto de muestras incorpore información no solo sobre la posición del proceso en ese momento sino también sobre su variabilidad. Trabajar con muestras individuales suele implicar una peor estimación de la varianza del proceso pero igualmente podemos

utilizar la metodología de trabajo descrita para gráficos de control con muestras individuales.

Verificación de la hipótesis de normalidad

Una de las hipótesis de trabajo es que la característica de calidad evaluada en la población de producto fabricada durante el periodo en estudio se distribuye según una ley normal $N(\mu, \sigma)$. Esta situación suele ser la más habitual en procesos en los que el resultado de la característica de calidad final es el resultado de múltiples factores independientes con variaciones aleatorias. La verificación de esta hipótesis se puede realizar a partir de los datos obtenidos en el muestreo utilizando el “contraste de hipótesis sobre la normalidad de la distribución de datos” descrito en el capítulo 3.

Análisis de resultados

El análisis de los datos obtenidos mediante las técnicas descritas para los gráficos de control descritos en el cap. 3 (figura 5.3) permite evaluar si el proceso ha estado durante todo el periodo en estudio en estado de control o si por lo contrario se detectan situaciones durante el periodo en las que los valores obtenidos no corresponden a la situación descrita; en el caso de identificarse alguna de estas situaciones, esta debería investigarse y comprobar si corresponde a algún momento en el que alguna causa especial de variación pueda haber generado el cambio; en esta situación, los valores correspondientes a esta muestra deberían eliminarse del estudio y recalcularse los límites.

Una vez establecidos los límites definitivos del gráfico, se pueden realizar las estimaciones de μ y σ que determinarán el resultado del proceso y que en función del tamaño de muestra seleccionado corresponden a:

$$\hat{\mu} = \bar{\bar{Y}}$$

$$\hat{\sigma} = \frac{\bar{R}}{d_2}$$

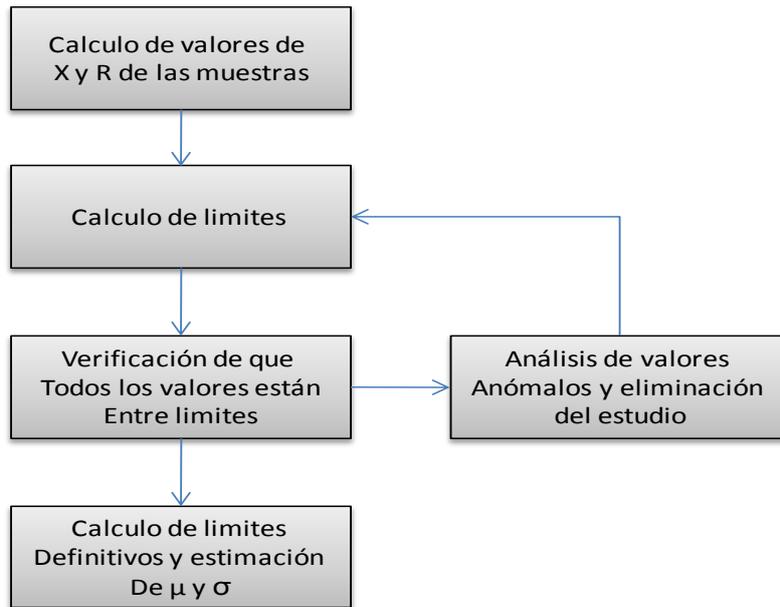


Figura 5.3: Análisis de datos mediante gráficos de control

Calculo de índices de capacidad

La comparación de los resultados del proceso identificados por los estadísticos estimados en el punto anterior, con el intervalo de tolerancias establecido (Límites de especificaciones LSL y USL) permite calcular los índices de capacidad general:

$$Cp = \frac{USL - LSL}{6\sigma}$$

O el más adecuado en caso de descentrado del proceso descrito en el capítulo 3

$$\hat{C}_{pm} = \frac{\hat{C}_p}{\sqrt{1+V^2}} \quad V = \frac{\bar{x}-T}{s}$$

Estos índices representan la adecuación del proceso a los requisitos, en general deben ser superiores a 1,30 tal y como recomienda Montgomery y en cualquier caso cualquier mejora de resultados se puede evaluar mediante estos indicadores. En el proceso de mejora del proceso, se aplicará una restricción a la soluciones para que ofrezcan índices de capacidad superiores a 1

Estimación de la producción de unidades defectuosas

Valores inferiores a 1 en cualquiera de los índices de capacidad implican que parte de la producción está fuera de las especificaciones establecidas y podemos por tanto considerar a estos productos como defectuosos, tanto por no ser aptos para los requisitos del cliente y ser una pérdida directa o por que pese a poder ser aceptables, su desviación fuera de las especificaciones implica un costo adicional.

Conociendo los valores de $\hat{\mu}$ y $\hat{\sigma}$ así como los valores de las especificaciones, puede estimarse el porcentaje de unidades que están fuera de las mismas utilizando el modelo de distribución normal; este valor, junto al coste asociado al producto fuera de especificaciones permitirán estimar el impacto económico.

5.3.- MODELO DE TRASMISION DE VARIABILIDAD, ESTIMACION Y VALIDACION.

El objetivo es desarrollar y validar un modelo que describa la trasmisión de variabilidad en todo el proceso, capaz de explicar los resultados de variación desde cualquier enfoque y que una vez validado permita identificar la repercusión de cada factor de variación sobre el resultado final y estimar las mejoras que puedan obtenerse con las diferentes acciones.

El método es de aplicación en procesos multi-etapa en los que los productos van transformándose en sucesivas operaciones, donde las características que definen la calidad a la salida de cada etapa son diferentes y en los que la información relativa al comportamiento de las variables y sus modelos de relación debe obtenerse en el propio proceso; habitualmente procesos químicos de transformación de materiales como el proceso cerámico de fabricación de baldosas de baja absorción de agua que se utilizará como aplicación experimental.

La propuesta para la preparación del modelo de trasmisión de variación y la estimación y validación de los modelos de “composición de varianzas” utiliza parte de las propuestas introducidas por Morrison en su “Síntesis de varianzas” y de la metodología SoV, ambos descritos en el capítulo 3. Toda la metodología incluye además la utilización de herramientas estadísticas para establecer los modelos de

relación entre variables y estimar la variabilidad generada por los distintos factores a partir de la información obtenida en el propio proceso asegurando que los datos proceden de situaciones estables y medir la contribución al resultado de factores que solo tienen efecto sobre la variabilidad; los resultados predichos por el modelo se contrastarán con los obtenidos para validarlo.

Las etapas básicas de este proceso (figura 5.4) incluyen:

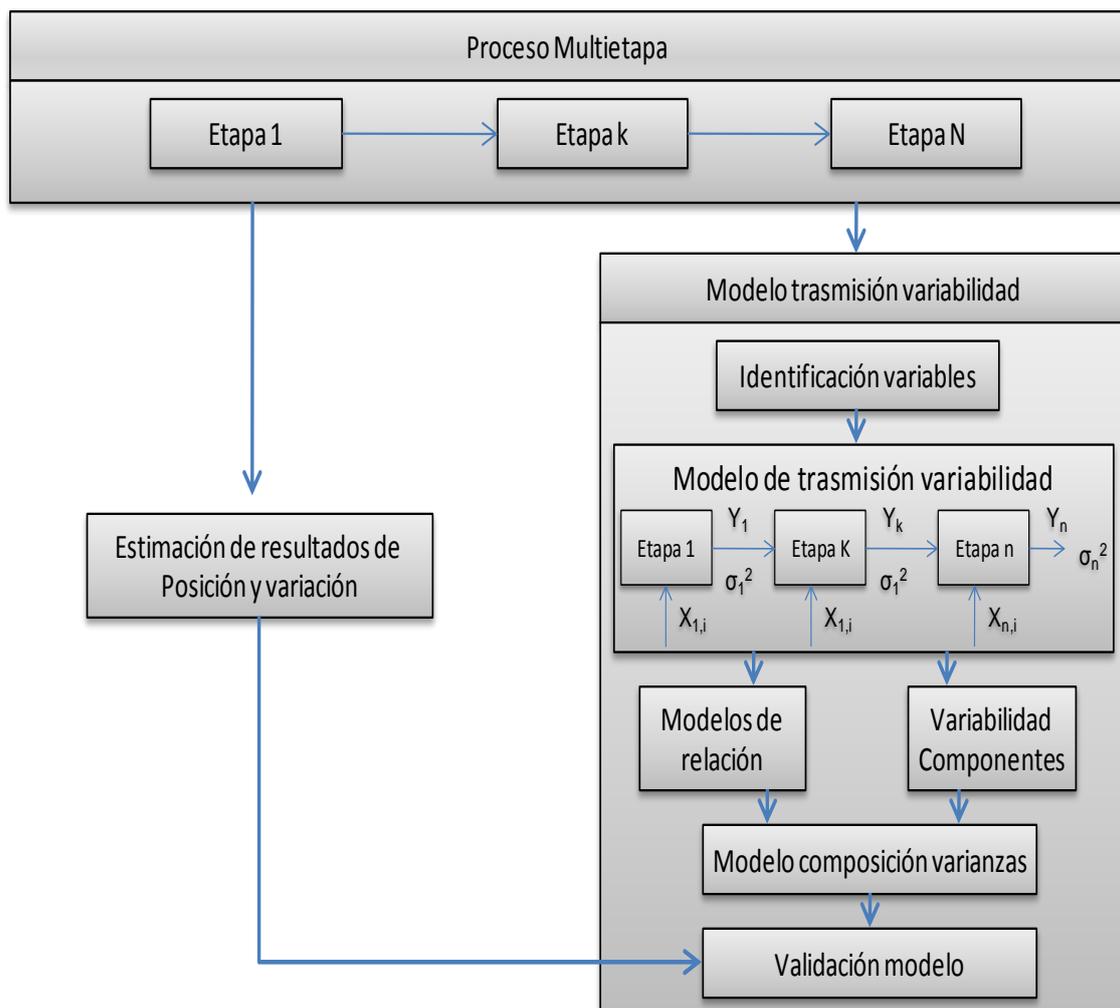


Figura 5.4: Proceso para estimación y validación del modelo de transmisión de variabilidad

- Definir un modelo general que describa la transmisión de variabilidad en el proceso que incluya los factores y sus modelos de relación.

- Estimar los coeficientes de los modelos de relación y la variabilidad de los diferentes componentes.
- Determinar un modelo de composición de varianzas que sea capaz de predecir la variabilidad final (varianza de la característica de calidad) a partir de la de cada uno de los factores que influyen en el resultado, incorporados al modelo.
- Validar el modelo comparando el resultado predicho con el obtenido en el resultado.

5.3.1.- MODELO GENERAL DE TRASMISION DE VARIABILIDAD

La propuesta utiliza un modelo descriptivo similar al empleado en los métodos SoV para poder describir el resultado de la totalidad del proceso o de cualquiera de las etapas por separado; utilizando una nomenclatura específica e incorporando en cada etapa todos los factores que generan variabilidad. La propuesta incluye varios condicionantes que lo simplifican y no exigen la notación matricial y complejidad matemática descrita en las propuestas SoV:

- La característica de calidad del producto acabado para la que se desea modelar la transmisión de variabilidad se define a partir de una variable (Por ejemplo la dimensión de la baldosa).
- La variabilidad se genera en el proceso por un conjunto de factores identificables en las distintas etapas, pero estos son independientes entre sí.
- Las relaciones entre el resultado de calidad y las variables de proceso pueden explicarse suficientemente en el intervalo de operación a partir de modelos lineales.
- La distribución de los valores de la característica de calidad y de los valores de las variables del proceso pueden aproximarse a un modelo de distribución normal.

Estas hipótesis suponen una situación mucho más simplificada que la descrita en la metodología SoV; es obvio que la calidad del producto acabado la determinan un

conjunto de variables que definen sus características funcionales pero el objetivo de este trabajo es modelar la variabilidad de aquella sobre la que desea realizarse la mejora; con la metodología propuesta puede en cualquier caso repetirse el procedimiento para desarrollar modelos explicativos para cada una de estas características.

La consideración de independencia de los factores de variación y la aproximación con modelos lineales lleva implícito un error en el caso de que no se cumplan estas condiciones pero habitualmente, en el rango de variación observable en el proceso los modelos lineales suelen ser suficientemente explicativos y durante el desarrollo de la aplicación se verificará estadísticamente la validez del ajuste lineal.

En cualquier caso, los errores provocados por estas simplificaciones formaran parte del error del modelo y este se estimará contrastando la variabilidad predicha con la obtenida ; la diferencia debe ser suficientemente baja para considerar aceptables estas aproximaciones.

Modelo general

Consideremos de modo genérico un proceso con N etapas como el descrito en la figura 5.5 cuya característica de calidad final está definida por el valor de una variable Y_n y en el que calidad de salida de cada etapa se caracteriza a partir de diferentes variables Y_{kj}

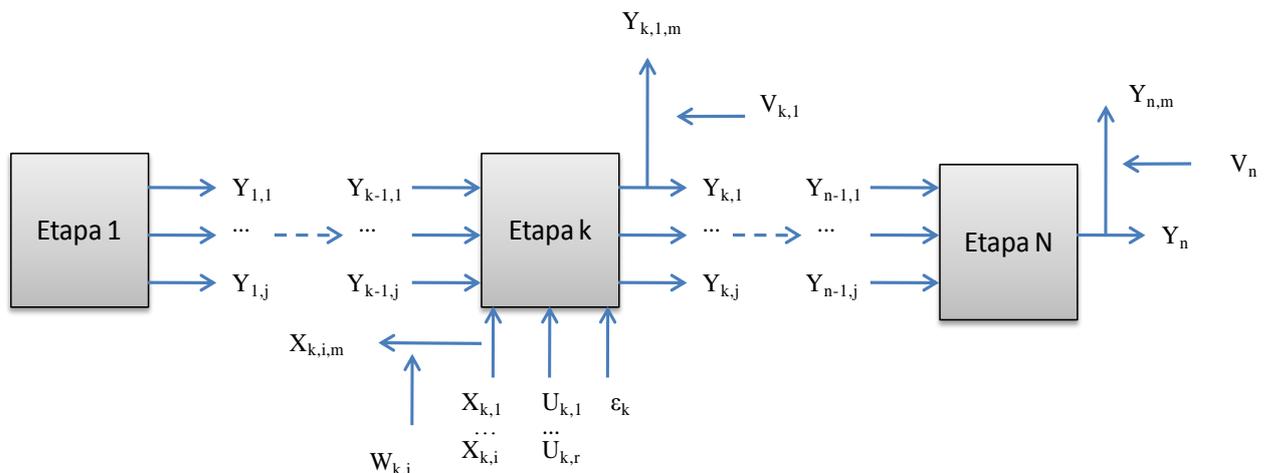


Figura 5.5: Modelo general de las N etapas del proceso

En este proceso las etapas son secuenciales de modo que en una etapa genérica k , además de sus variables propias de entrada, tenemos las que proceden de la etapa $k-1$, " $Y_{k-1,j}$ " y que a su vez son las de salida de dicha etapa; asimismo, la salida de la etapa k es la entrada de la etapa $k+1$. Además de las variables procedentes de la etapa anterior, en cada etapa encontramos sus propias variables " X_{ki} " y pueden aparecer unos factores " U_{kr} " que no afectan al valor promedio de las variables de salida " Y_{kj} " si afectan a su variabilidad, además de una variabilidad aleatoria " ε_k " (error) consecuencia de factores no considerados.

Para modelar la relación entre tres etapas del proceso podemos recurrir a un esquema más detallado como el de la figura 5.6

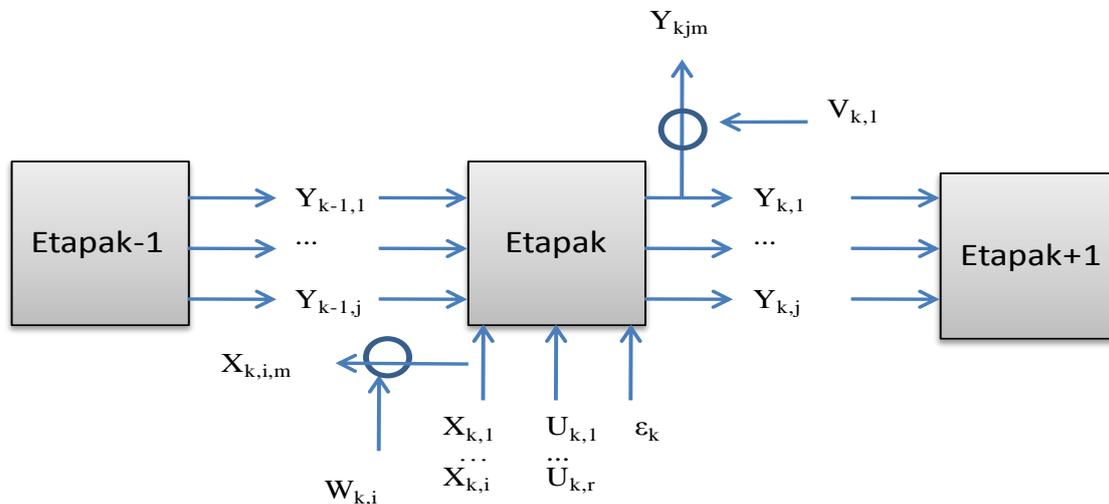


Figura 5.6: Relación entre tres etapas del proceso

Nomenclatura

Y_{kj} : Características de calidad independientes a la salida de la etapa k

Y_{kjm} : Valor medido de la característica de calidad Y_{kj}

V_{kj} : Error de medición de Y_{kjm}

X_{ki} : Variables de entrada propias de las etapas k

X_{kim} : Valor medido de cualquier variable $X_{k,i}$

W_{ki} : Error de medición de cualquier variable X_{ki}

U_{kr} : Variables que solo afectan a la variabilidad de Y_k y solo se detectan por su efecto sobre Y_k

ε_k : Error del modelo (variación aleatoria de la etapa k)

Distribuciones

$$Y_{kj} : N (Y_{k0}, \sigma^2_{Ykj})$$

$$Y_{kjm} : N (Y_{k0}, \sigma^2_{Ykjm})$$

$$V_{kj} : N (0, \sigma^2_{vkj})$$

$$X_{ki} : N (X_{ki0}, \sigma^2_{xki})$$

$$X_{kim} : N (X_{kim0}, \sigma^2_{xkim})$$

$$W_{ki} : N (0, \sigma^2_{wkim})$$

$$U_{kr} : N (0, \sigma^2_{Ukr})$$

$$\varepsilon_k : N (0, \sigma^2_{\varepsilon k})$$

En este esquema:

- La primera etapa de proceso no tiene variabilidad transmitida de la anterior ya que no existe.
- La última etapa de proceso solo tiene una variable de salida Y_n que es la que define la característica de calidad objeto de estudio y determina el resultado de calidad de todo el proceso.
- Las variables Y_{kj} cuya distribución es $N (Y_{kj}, \sigma^2_{Ykj})$ son las de salida de la etapa k y de entrada en la etapa k+1; determinan la calidad del producto generado en la etapa k y son las que transmiten la variabilidad a la siguiente.
- Las variables Y_{k-1j} cuya distribución es $N (Y_{k-1,j}, \sigma^2_{Yk-1,j})$ son las de salida de la etapa k-1, son variables de entrada en la etapa k .
- Las variables X_{ki} con distribución $N (X_{ki0}, \sigma^2_{xki})$ son propias de cada etapa k.
- Los factores de variación U_{kr} con distribución $N(0, \sigma^2_{Ukr})$ no tiene efecto sobre el valor medio de las variables de salida de la etapa pero si sobre su variabilidad y esta en la mayoría de los casos solo puede medirse a partir del análisis de la respuesta. Estos aparecen en situaciones como las descritas para los procesos "Multiflujo "tratados en el capítulo" 3 y genéricamente los denominaremos U_{kr}

- En cada etapa hay un componente de variación correspondiente al termino de error “ ε_k ” que contribuye a la variabilidad y que incluye el efecto de factores no incorporados al modelo
- Los valores medidos para las variables “ Y_{kjm} ” y “ X_{kim} ” son diferentes a los reales “ Y_{kj} ” y “ X_{ki} ”, por el efecto de los errores de medición cuya variabilidad es $\sigma_{V_{k,j}}^2$ y $\sigma_{W_{k,i}}^2$.

Modelo de relación

Se considera que un modelo lineal explica suficientemente la relación entre cualquier variable de salida de la etapa Y_{kj} con las variables propias de dicha etapa X_{ki} y las que proceden de la etapa anterior Y_{k-1j} :

$$Y_{kj} = \beta_0 + \sum_i \beta_i X_{k,i} + \sum_j \gamma_j Y_{k-1,j} + \varepsilon_k \quad Ec. 5.1$$

Podemos hacer la misma reflexión para todas las $Y_{k-1,j}$ de la ec (5.1) pero en la etapa k-1, relacionándolas con las variables $X_{k-1,i}$, y con las $Y_{k-2,j}$ de modo que en la ecuación (5.1) los términos $Y_{k-1,j}$ se reemplazarían por términos explicativos a partir de las $X_{k-1,i}$ e $Y_{k-2,j}$ Si se sigue así sucesivamente hacia atrás en todas las etapas del proceso hasta llegar a la primera etapa que no tiene ninguna variable de entrada, llegando a un modelo que explicaría cualquier variable de salida en una etapa k a partir de las variables $X_{k,i}$ de las etapas anteriores.

Podemos hacer la misma reflexión para el proceso completo y la relación de su única variable de Salida Y_n y todas las variables de todas las etapas:

$$Y_n = \beta_0 + \sum_{k,i} \beta_{k,i} X_{k,i} \quad Ec. 5.2$$

Componentes de varianza de la etapa k

Los valores que se obtienen para cualquier variable de salida Y_{kj} de una etapa se distribuyen según un modelo $N(\bar{Y}_{kj}, \sigma^2_{Y_{kj}})$; esto supone que cualquier valor Y_{kj} ofrecerá un desplazamiento respecto al valor medio de la distribución \bar{Y}_{kj} ; que es consecuencia de la variación de las variables de entrada $Y_{k-1,j}$, de la variación generada por las variables de la propia etapa $X_{k,i}$, del efecto de los factores U_{kr} que no afectan al valor medio pero sí a su variación y del efecto de un componente aleatorio de variación $\sigma^2_{\varepsilon_k}$

Podemos explicar la varianza de cualquier variable de salida de una etapa k con un, tratamiento equivalente al planteado por Agravall et al (1999) descrito en el capítulo 3, y en el que se trata la transmisión de variabilidad como un modelo autoregresivo, considerando que la variabilidad resultante de la etapa es consecuencia de la generada en la misma y la transmitida desde la anterior, de este modo, la varianza de cada una de las Y_{kj} ($\sigma^2_{Y_{k,j}}$) puede explicarse a partir de la generada por las variables X_{ki} que puede calcularse a partir los términos correspondientes $\sigma^2_{X_{k,i}}$, la transmitida por la etapa anterior a través de los $Y_{k-1,j}$ que puede calcularse a partir los términos correspondientes $\sigma^2_{Y_{k-1,j}}$, la generada por los factores U_{kr} , cuya contribución es $\sigma^2_{U_{k,r}}$ y un término de error

$$\sigma^2_{Y_{k,j}} = \sum_i \beta_i^2 \sigma^2_{X_{k,i}} + \sum_r \sigma^2_{U_{k,r}} + \sum_j \gamma_j^2 \sigma^2_{Y_{k-1,j}} + \sigma^2_{\varepsilon_k} \quad \text{Ec. 5.3}$$

Los dos primeros términos de la ecuación describen la varianza generada en la etapa k y el tercer término la transmitida desde la etapa anterior. Siguiendo un proceso equivalente, podemos explicar cualquiera de las $\sigma^2_{Y_{k-1,j}}$ a partir de las $\sigma^2_{X_{k-1,i}}$ las $\sigma^2_{Y_{k-2,j}}$ y las $\sigma^2_{U_{k-1,r}}$ y reemplazar todos los términos correspondientes en la ec (5.3) llegando a un modelo explicativo de la variabilidad de cualquier $Y_{k,j}$ a partir de las variables X e U de todas las etapas anteriores y un término de error que incluye los errores de los modelos de relación de todas las etapas y las variabilidades de cada una de ellas no explicada. En la última etapa, solo hay una variable de salida Y_n , y, siguiendo el mismo procedimiento se llega al modelo:

$$\sigma_{Y_N}^2 = \sum_{k,i} \beta_{ki}^2 \sigma_{X_{k,i}}^2 + \sum_{k,r} \gamma_{kr}^2 \sigma_{U_{k,r}}^2 + \sigma_{\varepsilon_k}^2 \quad \text{Ec 5.4}$$

Que representa la composición de varianzas de todo el proceso; nótese que los coeficientes γ_r^2 relacionan el efecto sobre la variabilidad en la respuesta de cada Y_{kj} generada por cada U_{kr} , estos valen 1 en la Ec.5.3 ya que el efecto de la variabilidad de los mismos se mide directamente sobre su efecto en la respuesta $\sigma_{Y_{kj}}^2$ pero su efecto sobre la variabilidad final $\sigma_{Y_N}^2$ está corregido por los mismos coeficientes que relacionan las variables Y_{kj} con Y_N .

Incorporación de errores de medición

La varianza de los sistemas de medición debe estimarse para poder discriminar en el valor medido de cada término de varianza $\sigma_{X_{k,i,m}}^2$ y $\sigma_{Y_{k,j,m}}^2$, el valor real; los términos de la varianza de los sistemas de medición son $\sigma_{W_{k,i}}^2$ y $\sigma_{V_{k,j}}^2$; los valores reales de los componentes de varianza se determinan conociendo estos términos; por diferencia:

$$\sigma_{X_{k,i}}^2 = \sigma_{X_{k,i,m}}^2 - \sigma_{W_{k,i}}^2 \quad \text{Ec. 5.5}$$

$$\sigma_{Y_{k,j}}^2 = \sigma_{Y_{k,j,m}}^2 - \sigma_{V_{k,j}}^2 \quad \text{Ec. 5.6}$$

Tabla modelo de la trasmisión de variabilidad

Puede ilustrarse finalmente todo el modelo de trasmisión de variabilidad con una tabla resumen que incorpora todos los componentes clasificados en cada una de las etapas (Tabla 5. 1)

Variables		ETAPA 1				ETAPA K				ETAPA N	
		Y _{1,1}		Y _{1,j}		Y _{k,1}		Y _{k,j}		Y _n	
Ref.	varianza	Coef.	Componente Varianza	Coef.	Componente Varianza	Coef.	Componente Varianza	Coef.	Componente Varianza	Coef.	Componente Varianza
X ₁	σ ² _{X₁}	β _{1,1,1}	σ ² _{X₁} * β _{1,1,1}	β _{1,1,j}	σ ² _{X₁} * β _{1,1,j}	β _{1,k,1}	σ ² _{X₁} * β _{1,k,1}	β _{1,k,j}	σ ² _{X₁} * β _{1,k,j}	β _{1,n}	σ ² _{X₁} * β _{1,n}
X _i	σ ² _{X_i}	β _{i,1,1}	σ ² _{X_i} * β _{i,1,1}	β _{i,1,j}	σ ² _{X_i} * β _{i,1,j}	β _{i,k,1}	σ ² _{X_i} * β _{i,k,1}	β _{i,k,j}	σ ² _{X_i} * β _{i,k,j}	β _{i,n}	σ ² _{X_i} * β _{i,n}
U ₁	σ ² _{U₁}	γ _{1,1,1}	σ ² _{U₁} * γ _{1,1,1}	γ _{1,1,j}	σ ² _{U₁} * γ _{1,1,j}	γ _{1,k,1}	σ ² _{U₁} * γ _{1,k,1}	γ _{1,k,j}	σ ² _{U₁} * γ _{1,k,j}	γ _{1,n}	σ ² _{U₁} * γ _{1,n}
U _r	σ ² _{U_r}	γ _{r,1,1}	σ ² _{U_r} * γ _{r,1,1}	γ _{r,1,j}	σ ² _{U_r} * γ _{r,1,j}	γ _{r,k,1}	σ ² _{U_r} * γ _{r,k,1}	γ _{r,k,j}	σ ² _{U_r} * γ _{r,k,j}	γ _{r,n}	σ ² _{U_r} * γ _{r,n}
Varianza Y _{kj}		σ ² _{Y₁₁}		σ ² _{Y_{1j}}		σ ² _{Y_{k1}}		σ ² _{Y_{kj}}		σ ² _{Y_n}	

Tabla 5.1 Componentes del modelo de trasmisión de varianza

Los términos corresponden::

- En la primera columna aparecen todas las i variables de entrada del proceso X_{ki} con independencia de la etapa en que se encuentren y las r variables U_{kr} y en la segunda columna se incluye su variabilidad σ²_{X_{k,i}} y σ²_{U_{k,r}}
- En columnas aparecen las etapas de proceso desde 1 a N siendo k cualquier etapa intermedia y en cada una, las diferentes variables de salida Y_{kj} que determinan la característica de calidad siendo una única en la etapa N
- Para cada una de las variables de salida de una etapa genérica k, Y_{kj} se incluyen en una primera columna los coeficientes β²_{ki} que relacionan X_{k,i} con a Y_{jk} y los coeficientes γ²_{k,r} que relacionan U_{k,r} con Y_{jk} Todos estos coeficientes valen 0 cuando no existe relación.

- La segunda columna, para cualquier variable de salida de la etapa k , Y_{jk} incluye los términos de la contribución a su variabilidad de cada variable de proceso anterior a esa etapa, calculados a partir de la varianza de las mismas y los coeficientes correspondientes del modelo de relación. Esta columna representa el modelo de composición de varianzas de la variable Y_{jk} que predice su variabilidad cuyo valor aparece en la base de la columna.
- En la última columna aparece la única variable de salida de todo el proceso Y_n , su variabilidad final $\sigma^2_{Y_n}$ y los coeficientes que relacionan todas las variables de entrada de todas las etapas con la misma.

La tabla representa un esquema completo de la transmisión de variabilidad en todo el proceso y permite múltiples enfoques de análisis; tanto orientado a variables como a etapas, y permite calcular fácilmente:

- La composición de varianzas de todo el proceso; corresponde a la suma de todos los componentes de la última columna, es decir:

$$\sigma_{Y_N}^2 = \sum_{k,i} \beta_{ki}^2 \sigma_{X_{k,i}}^2 + \sum_{k,r} \gamma_{k,r}^2 \sigma_{U_{k,r}}^2 + \sigma_{\varepsilon_k}^2 \quad Ec 5.4$$

- La composición de varianzas de cualquier variable de salida Y_{jk} ; que está descrita en su columna independiente
- La contribución de cada variable; las filas representan la variabilidad acumulada por el efecto de cada variable en cada una de las Y_{kj} , siendo el valor que aparece en la última columna la contribución final de la misma.

5.3.2. ESTIMACION DE COMPONENTES Y VALIDACION DEL MODELO

La estimación de los diferentes componentes y del resultado final se realiza a partir del análisis estadístico de los resultados del proceso utilizando para ello gráficos de control, análisis de varianza y análisis de regresión; debe asegurarse que toda la

información se ha obtenido en un proceso trabajando en régimen estable “proceso en estado de control estadístico” de modo que el resultado corresponda a su variabilidad natural, es decir, sin el efecto de causas especiales y durante un periodo representativo del mismo.

La toma de datos del proceso para la estimación de los componentes de la varianza debe realizarse durante un periodo que sea representativo del funcionamiento del mismo (un lote de producción completo o un intervalo de tiempo suficientemente largo como para que represente el comportamiento real); es asimismo fundamental asegurar la trazabilidad de los datos de modo que los resultados medidos a la salida del proceso correspondan al efecto de las variables de proceso durante el mismo periodo.

La validación del modelo se realizará contrastando el resultado predicho con el medido durante el periodo; la diferencia corresponderá al error del modelo que debe ser suficientemente bajo. El esquema de trabajo se detalla en la figura 5.7

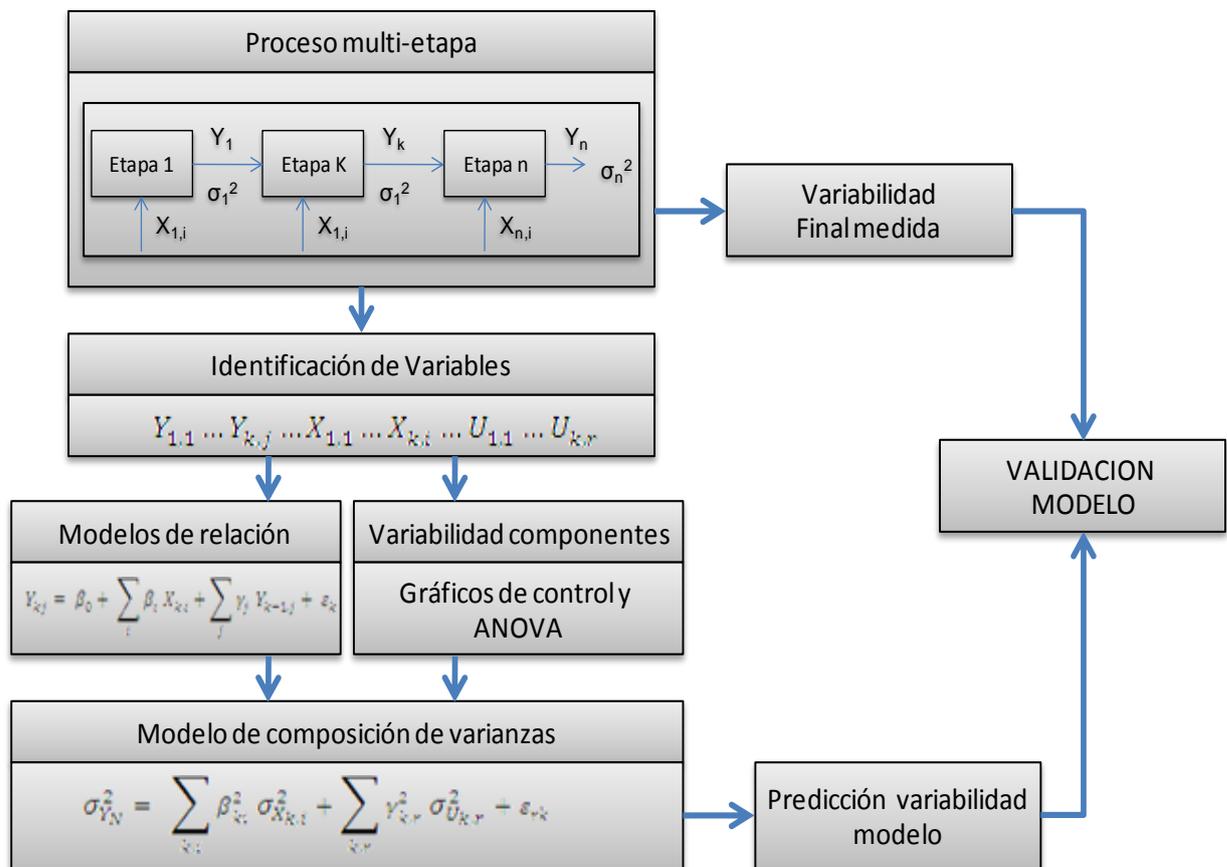


Figura 5.7: Estimación y validación del modelo

Identificación de variables

Deben incluirse todas las variables de proceso que puedan tener un efecto sobre la variabilidad en cualquiera de las etapas y por tanto en la de la característica de calidad final; estas pueden identificarse bien a partir del conocimiento histórico del proceso o recurriendo a la experimentación. En muchos procesos como es el caso de la fabricación de baldosas cerámicas, el conocimiento previo del proceso está muy desarrollado y documentado por lo que en estos casos la identificación de variables se realiza en base al conocimiento del mismo. En las situaciones en las que el conocimiento del proceso pueda resultar insuficiente se sugiere la utilización de estrategias de experimentación previas; las propuestas de Taguchi con sus Ortogonal arrays para minimizar la experimentación que pueden consultarse en cualquier manual de estadística resultan especialmente útiles para reducir el número de experimentos cuando el número de variables es muy elevado

Modelo de relación entre variables

Para poder establecer las relaciones entre las diferentes variables de proceso y la respuesta las distintas etapas se requiere modelar matemáticamente la relación, de modo que puedan determinarse los coeficientes que se utilizarán en el modelo de composición de varianzas. El modelo propuesto debe describir la relación entre una variable de salida de la etapa k Y_{kj} y las variables de entrada de dicha etapa, junto a las que proceden de la etapa anterior, con la forma genérica:

$$Y_{kj} = \beta_0 + \sum_i \beta_i X_{k,i} + \sum_j \gamma_j Y_{k-1,j} + \varepsilon_k \quad \text{Ec 5.1}$$

El modelo presupone que las relaciones entre las variables y la respuesta pueden considerarse lineales; en muchos casos esta hipótesis puede no ser cierta y los modelos de relación ser diferentes pero el error de una aproximación lineal en el rango de variación industrial puede ser suficientemente aceptable. La metodología propuesta incluye el empleo de técnicas de regresión para estimar el modelo a partir de datos obtenidos industrialmente realizando pequeñas modificaciones del proceso en rangos muy próximos al de operación.

En los casos en que no sea posible la experimentación a escala industrial puede recurrirse a simulaciones de laboratorio pero en algunas ocasiones la simulación de

condiciones industriales es difícil y los resultados pueden no corresponder exactamente a los modelos a escala industrial y los coeficientes estimados pueden ser diferentes. En cualquier caso, los errores tanto de un modelo de regresión estimado a escala de laboratorio o el error por considerar una aproximación lineal formarán parte del error completo del modelo, dado que finalmente se realizará una validación comparando la variabilidad predicha con la obtenida, esta permitirá estimar el error total que debe ser suficientemente bajo si las hipótesis son ciertas.

Estimación de la variabilidad de los componentes del modelo (factores de variación)

El que una variable pueda tener una relación sobre la respuesta no implica que su efecto en un proceso controlado sea significativo y puede ocurrir que sus variaciones sean indetectables ya que estén en un orden de magnitud similar a los términos de error. En este método se sugiere considerar previamente a todas las variables en el modelo de transmisión de variabilidad pero posteriormente estimar durante el periodo estudiado cual ha sido la variación real de cada una de ellas e incluir solo aquellas cuya variación haya sido significativa, de modo que la variabilidad generada por cualquier variable no considerada pasará a formar parte del error del modelo.

La estimación de la variabilidad de cada componente se realiza a partir de los resultados monitorizados en el proceso durante el periodo indicado, que tal y como se comentó anteriormente debe tener suficiente trazabilidad para asegurar que los datos corresponden al mismo periodo en el que se estima el resultado final del proceso. La estimación se realiza sobre los valores medidos de las variables y el valor real de la varianza se estima teniendo en cuenta el término de error del sistema de medición:

$$\sigma_{X_{k,i}}^2 = \sigma_{X_{k,i,m}}^2 - \sigma_{W_{k,i}}^2 \quad \text{Ec 5.5}$$

$$\sigma_{Y_{k,j}}^2 = \sigma_{Y_{k,j,m}}^2 - \sigma_{V_{k,j}}^2 \quad \text{Ec 5.6}$$

Dependiendo de los sistemas empleados para monitorizar cada una de las variables se debe recurrir a diferentes técnicas estadísticas para estimar su variabilidad:

- a) *Estimación mediante gráficos de control:* En las situaciones en las que no se disponga de sensores on-line para monitorizar el comportamiento de la variable hay que recurrir a un muestreo durante el periodo en estudio

tomando subgrupos racionales periódicamente; se recomienda utilizar los criterios de definición de frecuencia de muestreo descritos para la utilización de gráficos de control que se estiman a partir de la longitud del recorrido medio; y que pueden consultarse en cualquier manual de estadística como Montgomery (2005). La información obtenida durante el muestreo se analiza mediante gráficos de control, verificando la estabilidad del proceso durante el periodo y estimando los estadísticos de media y variación.

- b) *Estimación de la variabilidad mediante la monitorización on-line por sensores:* En las situaciones en las que el resultado de la variable pueda obtenerse on – line mediante sensores, la estimación de su variabilidad $\sigma_{X_{k,i}}^2$ se realiza a partir de los resultados ofrecidos por el sensor tras analizarlos estadísticamente mediante gráficos de control para asegurar que la variación observada no incluye el efecto de ninguna causa especial.
- c) *Estimación de la variabilidad de factores a partir de su efecto en la respuesta.* La variabilidad generada por variables que solo tienen efecto sobre la variación ($\sigma_{U_{k,r}}^2$) y cuya contribución a la variabilidad solo puede estimarse a partir de su efecto en la respuesta puede estimarse separando subgrupos de muestras y analizando la contribución a la variabilidad mediante un análisis de la varianza. La estimación de los componentes de la varianza descrita en el capítulo 3 mediante ANOVA permite estimar su significación estadística y cuantificarla.

Validación del modelo

El modelo propuesto debe realizar una predicción de la variabilidad final de todo el proceso y esta debe contrastarse con la estimada en el análisis de resultados del proceso; la diferencia entre ambas es el error del modelo ε_k que incorpora los errores de los modelos de relación utilizados y la contribución a la variabilidad de las variables que no se han incluido en el mismo. Este error deberá ser suficientemente pequeño para considerar el modelo como válido, en caso contrario deberá reconsiderarse si bien las aproximaciones de los modelos de relación no son válidas, el proceso no se ha monitorizado adecuadamente o si se han desestimado factores.

5.4.- ESTIMACION DE UN MODELO DE COSTES DE VARIABILIDAD

Cualquier mejora de un proceso debe cuantificarse en términos económicos, siendo el indicador más indicado la reducción de coste por unidad fabricada; las actuaciones para reducir la variación del proceso suponen en muchos casos inversiones directas y estas deben compensarse con el ahorro que pueda obtenerse al reducir la variación que solo puede estimarse si se dispone de un modelo que relacione esta con coste. La metodología que se propone, aproxima un modelo de costes de variabilidad utilizando los conceptos de costes de calidad para calcular el impacto económico de diferentes situaciones de variación del proceso (figura 5.8)

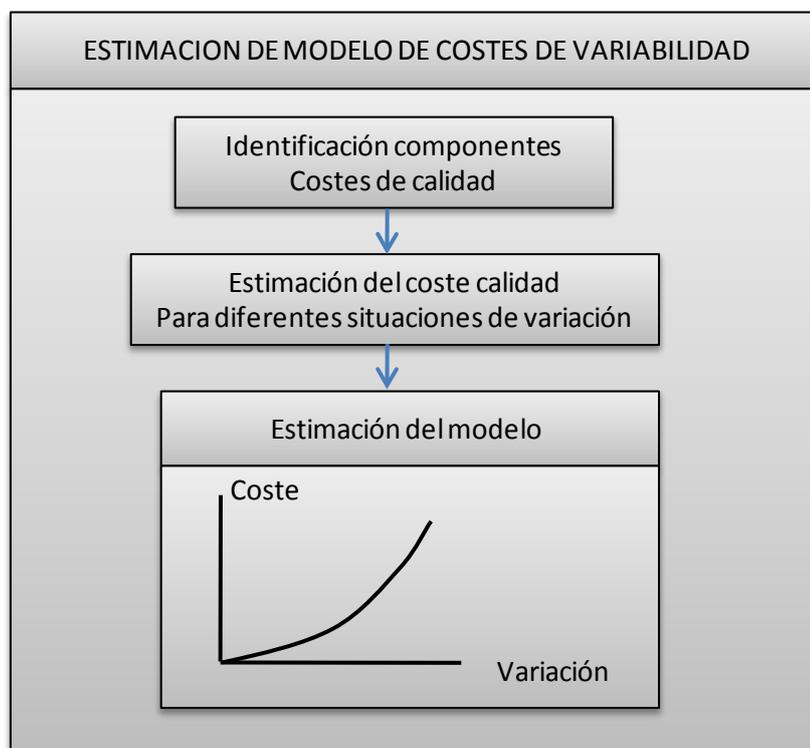


Figura 5.8: Metodología para estimar la función de costes

Para modelar el impacto económico de la variabilidad de una característica de calidad del producto, el mejor indicador es el coste que supone la misma sobre los costes totales de fabricación; estos costes por unidad de producto son conocidos en cualquier proceso y son uno de los indicadores económicos clave que determina el nivel de competitividad del mismo. Si se cuantifica el impacto económico sobre los mismos

generado por la variación se puede establecer un indicador “Coste de Variabilidad” “Cv.” que debe tener una relación con la variabilidad que debe aproximarse a la propuesta por Taguchi

$$Cv = k\sigma^2 \quad \text{Ec.5.7}$$

Este modelo no tiene por qué ser exacto pero debe ser una buena aproximación. Heredia (2001) plantea modelos más complejos para estimar la función de costes de variabilidad que tiene en cuenta modelos que estiman el coste de demoras de entrega, el coste de fabricación de materiales defectuosos, el de de la gestión de inventarios y el de inspección y control; en cualquiera de las aproximaciones se establece que la relación entre coste y variabilidad no es lineal.

En esta propuesta se considera que la relación entre coste y variación puede aproximarse suficientemente a partir de un polinomio de segundo grado que puede estimarse conociendo valores de coste asociados a diferente situaciones de variabilidad; esta aproximación debe ser suficiente para comparar el efecto económico de diferentes mejoras. Para estimar este modelo se considera que el valor de coste de variación en una situación hipotética de variabilidad nula debiera ser cero, ya que al no existir el problema no habría ni que prevenirlo ni controlarlo ni aparecerían incrementos de coste como consecuencias del mismo; identificando dos valores de coste para dos resultados distintos de variación, puede ajustarse un polinomio de segundo grado (figura 5.9)

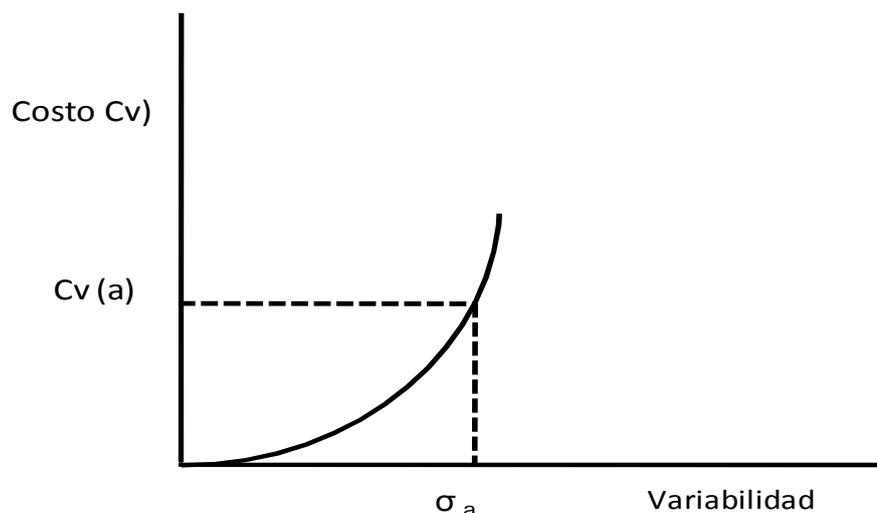


Figura 5.9: Relación coste – variabilidad

5.4.1.- COSTES DE FABRICACION

Los costes de fabricación son un indicador conocido en todos los procesos industriales e identifican el esfuerzo económico realizado para fabricar una unidad de producto; estos suelen separarse en diferentes conceptos que en general suelen corresponder a un modelo que incluye los componentes detallados en la tabla 5.2

<i>Componente de coste</i>	<i>detalle</i>
Materiales	Materias primas, embalajes, consumibles de proceso...
Energía	En general, Gas, electricidad...
Mantenimiento	Repuestos, reparaciones.
Personal	De producción, diseño, mantenimiento, gestión de calidad, logística, dirección de procesos...
Diseño	Coste de prototipos, materiales de diseño, pruebas...
Logísticos	Aprovisionamientos, expediciones, almacenaje
Perdidas internas	Productos no comercializables, perdidas de materiales en proceso; reprocesados..
Reclamaciones	Reprocesados, indemnizaciones
Generales de estructura	Servicios generales de producción.
Amortizaciones	Amortizaciones, leasing...

Tabla 5.2 Componentes de los costes de fabricación

Es evidente que los diferentes componentes del coste de fabricación se agrupan según criterios de producción industrial (costes fijos o variables, costes por productos, operaciones etc.) y que en general no aparece ningún concepto que pueda asociarse directamente al problema de la variabilidad más allá de los conceptos de reclamaciones por calidad o perdidas en proceso por producto fuera de especificaciones que en muchas situaciones se contabilizan por separado y de los que

puede extraerse directamente esta información; en cualquier caso, todo impacto económico en el proceso por cualquier concepto forma parte del valor del coste final y solo se necesita un criterio adecuado para poder identificar en estos costes los diferentes valores asociados al problema de la variabilidad cuyo impacto económico quiere estimarse.

5.4.2.- COMPONENTES DE LOS COSTES DE VARIABILIDAD

El método que se plantea en esta propuesta es utilizar los conceptos de “costes de calidad” para poder estimar, a partir de los valores de los costes de fabricación, el valor que corresponde a los gastos derivados de la prevención y control de la variación así como de los problemas consecuencia de la misma. Los costes de calidad fueron introducidos por Juran y pueden consultarse en cualquier de publicación de gestión de calidad como Juran J.M. “Quality planning and análisis” (1980) y a partir de la clasificación de Feigenbaum de los costes de calidad en costes de prevención, evaluación y costes de fallos, numerosos autores han enumerado los componentes de los mismos.

Utilizando el modelo general de costes de calidad y los componentes particulares del mismo que pueden consultarse en cualquier manual de calidad como (ASQ (1995), podemos estimar a partir de la información de los costes de fabricación, que parte de ellos es consecuencia del problema de la variación de la característica de calidad en estudio.

Costes de prevención de la variabilidad

Son los esfuerzos realizados para la prevención del problema de la variabilidad e incluye los siguientes componentes:

- *Costes de diseño o rediseño de producto*: Incluye el impacto económico derivado de las actividades de diseño o rediseño de producto relacionadas con la minimización de su variabilidad; son una parte de los costes de personal de diseño y de materiales y energía utilizados en este proceso.

- *Ingeniería de procesos*: Costes asociados al estudio y puesta en marcha de las modificaciones de los proceso para hacerlos menos sensibles a las variaciones; fundamentalmente es el coste de los recursos humanos utilizados.
- *Inversión en sistemas de control y adquisición de datos*. Incluye la amortización del gasto derivado de la adquisición de equipos de control de materias primas, proceso y producto acabado.
- *Planificación de la calidad*: Diseño y puesta en marcha del sistema de aseguramiento de calidad del proceso.
- *Formación*: Esfuerzo realizado para capacitar a los recursos humanos en relación con el problema de la variabilidad y su control

Costes de inspección:

Incluye todos los costes asociados a la inspección de materiales, procesos y producto acabado para controlar la variabilidad.

- *Recursos humanos dedicados a la inspección*: Coste del tiempo que el personal de producción o inspección dedica a la inspección de la variación
- *Costes de las operaciones de inspección*: Consumibles, gastos de la inspección de materias primas, productos en proceso y acabado, subcontratación de inspecciones externas.
- *Mantenimiento de equipos de inspección*: Reparaciones y repuestos para el mantenimiento de los equipos y costes de calibración.

Costes de fallos internos:

Incluye los costes derivados de la aparición de productos defectuosos detectados durante el proceso o a la salida del mismo

- *Perdidas internas de producto*: Rechazo en los productos durante el proceso y producto acabado no comercializable por exceso de variación.
- *Reprocesados*: Reprocesado o reinspección de productos detectados fuera de especificaciones, recursos humanos dedicados a esta actividad y el costo de los materiales y energía requeridos.
- *Interrupciones de proceso*: Tiempos muertos por paros de proceso derivados de la detección de situaciones fuera de control o pérdidas de rendimiento por cambio de las condiciones de procesado.
- *Logísticos*: Costes derivados de la manipulación y almacenaje de lotes de productos que deberían ser idénticos pero deben diferenciarse por el problema de la variación y costes derivados del sobredimensionamiento del volumen de las producciones.
- *Perdidas de valor de material*: Reducciones del precio de los productos por estar fuera de especificaciones.

Costes de fallos externos:

Son el coste generado por los problemas causados por la variabilidad del producto cuando este está en manos del cliente:

- *Reprocesados*: Reprocesado de materiales devueltos por los clientes
- *Solución de reclamaciones*: Costos derivados de ofrecer al cliente soluciones para la utilización de productos fuera de especificaciones
- *Indemnizaciones*: Compensaciones económicas o indemnizaciones por daños.

Relación entre los componentes de los costes de calidad y los costes de producción

La siguiente tabla (5.3) detalla la relación de cada uno de los componentes de los costes de calidad con el esquema habitual de costes de producción, identificando para

cada concepto de coste de calidad, que costes de producción están relacionados; las zonas sombreadas identifican estas relaciones. Esta relación no debe interpretarse como que el valor de coste de calidad es el mismo que el de coste de producción sino como que una parte de este último que habrá que identificar contribuye al coste de calidad asociado.

Costos de calidad		Costos de fabricacion									
		Material	Energia	Mantenimiento	Personal	Diseño	Logisticos	Perdidas internas	Reclamaciones	Amortizaciones	Perdida valor producto defectuoso
Prevencion	Diseño y rediseño producto										
	Ingenieria de procesos										
	Equipos de inspeccion										
	Planificacion de calidad										
	Formacion										
Inspeccion	Personal de inspeccion										
	Costos de inspeccion										
	Mantenimiento equipos Inspeccion										
Fallos internos	Perdidas internas										
	Reprocesados										
	Paros proceso										
	Logisticos										
	Perdida valor material										
Fall. externos	Reprocesados										
	Solucion reclamaciones										
	Indemnizaciones										

Tabla 5.3 Relación entre los componentes de los costes de calidad y los costes de producción

5.4.3.- ESTIMACION DEL MODELO

El modelo de coste debe aproximarse a un modelo general como el propuesto por Taguchi:

$$Cv = k\sigma^2 \quad \text{Ec 5.8}$$

Un modelo que relacione coste con desviación típica estimado empíricamente debería tener un término cuadrático muy significativo y explicar como el incremento de coste con la variabilidad no sigue un modelo lineal; para estimarlo se necesitan tres valores de coste y su correspondiente valor de σ .

Es evidente que para una situación de variabilidad nula ($\sigma=0$) el coste de la variabilidad sería también nulo ya que no se requeriría ni prevenirla, ni controlarla ni tampoco generaría fallos.

Un segundo valor de coste es el correspondiente al resultado de variación del proceso cuyo valor de σ^2 se estima con la metodología descrita en el 5.2 (análisis de resultados del proceso); tal y como se describe en el citado punto, la monitorización del proceso durante el periodo en estudio y el análisis estadístico de los resultados permite conocer los valores de variación así como los porcentajes de productos que se están obteniendo fuera de especificaciones. Disponiendo de esta información y de los costes de producción correspondientes a la producción analizada, así como la relación entre costes de calidad y producción descrita en la figura 5.3 y calculando la contribución del problema en cada concepto de coste, es posible estimar el valor de los costes de calidad asociados al problema de la variación tal y como se ha detallado en el punto anterior.

Para la estimación del modelo se requiere disponer de un tercer valor de coste y variación. Obtener otro valor sería posible si pudiera repetirse todo el procedimiento descrito de evaluación de proceso cuando su resultado de variación fuera diferente, pero este enfoque no es válido ya que si el proceso está en estado de control (hipótesis fundamental del análisis propuesto) no debe dar resultados de variabilidad significativamente distintos en diferentes fabricaciones.

La propuesta que se introduce puede ser una buena aproximación en el caso en que el proceso analizado tenga un índice de capacidad menor a 1; es decir, genere un porcentaje de producto fuera de especificaciones que suponga un impacto económico importante por fallos y cuyo valor se ha medido en el análisis de costes; esta situación debiera ser la habitual analizada por el modelo ya que en principio, lo que se trata es de mejorar procesos que están teniendo problemas sistemáticos de calidad por excesiva variabilidad.

Podemos realizar una aproximación para calcular un tercer valor de coste asociado a un resultado diferente de variabilidad si presuponemos que en el caso en el que la variabilidad del proceso se redujera a un valor tal que el intervalo estadístico 6σ (Intervalo que incluye prácticamente a la totalidad de producto) fuera equivalente a las especificaciones y el proceso estuviera centrado; es decir, $C_{pm}=1$, el valor de los costes de fallos sería prácticamente nulo. Esta aproximación puede considerarse ya que si analizamos los componentes de costes de fallos observaremos que todos ellos son consecuencia de la producción de material fuera de especificaciones, que en una situación de variabilidad equivalente al intervalo 6σ solo supone el 0,27% del producto; de este modo, el valor de coste asociado a una variabilidad $\sigma = (USL-LSL) /6$ es solo el de los costes de inspección y prevención y su valor puede utilizarse para ajustar el modelo.

Disponiendo pues de estos tres valores de variabilidad (nula, para índice de capacidad = 1 y la obtenida), así como los correspondientes costes puede aproximarse un modelo de relación como un polinomio de segundo grado en el que el término de segundo orden debería ser muy significativo. (figura.5.9), aproximándose suficientemente al modelo propuesto por Taguchi (Ec.5.8)

5.5.- MEJORA DEL PROCESO

El proceso de mejora tiene como objetivo último seleccionar la mejor alternativa de inversión que permita reducir la variabilidad del proceso al menos hasta un valor en el que el índice de capacidad C_{pm} sea superior a 1; no obstante se recomiendan índices superiores a 1,30 (Montgomery 2005) para trabajar con suficiente margen de seguridad.

Diversas alternativas ofrecerán diferentes niveles de reducción de variabilidad que pueden estimarse a partir del modelo de transmisión de variabilidad estimado para el proceso y supondrán diferentes inversiones y ahorros que pueden estimarse a partir de la función de costes; la mejor alternativa será aquella que cumpla con el requisito establecido de capacidad generando el máximo ahorro y con el mínimo coste. El esquema de trabajo es el propuesto en la figura 5.10

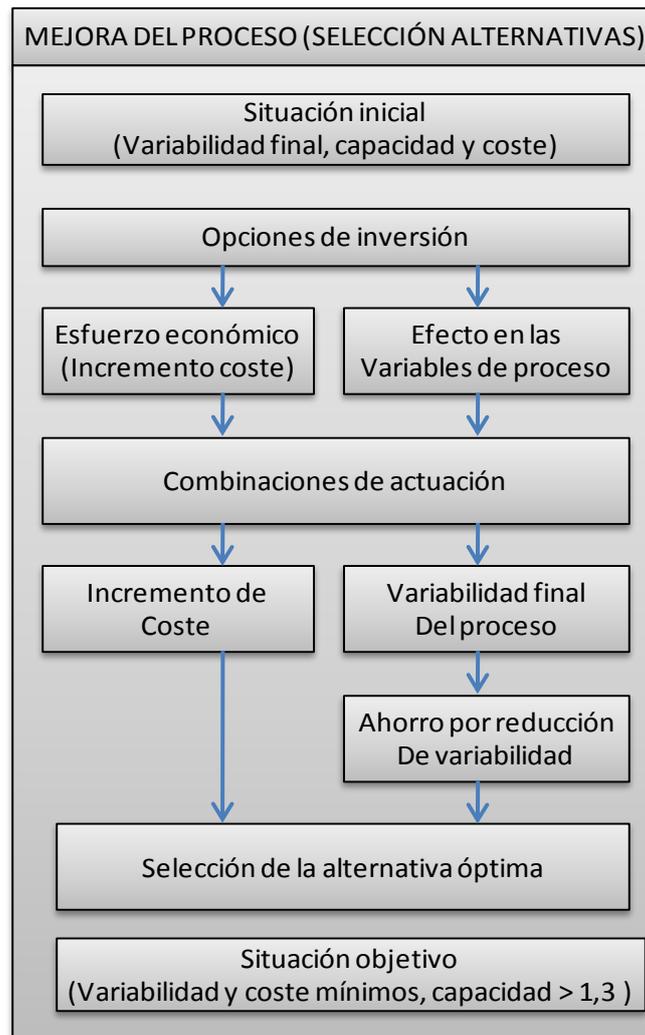


Figura 5.10: Proceso de selección de la alternativa óptima para la mejora del proceso

5.5.1.- ANALISIS DE SOLUCIONES

Considerando el modelo de composición de varianzas (Ec 5.4), se deduce que la reducción de la variabilidad final $\sigma_{Y_N}^2$ puede conseguirse tanto a partir de una

reducción la de cada variable individual, como modificando los coeficientes del modelo de relación

$$\sigma_{Y_N}^2 = \sum_{k,i} \beta_{ki}^2 \sigma_{X_{k,i}}^2 + \sum_{k,r} \gamma_{k,r}^2 \sigma_{U_{k,r}}^2 + \sigma_{\varepsilon_k}^2 \quad \text{Ec 5.4}$$

En el primer caso, cualquier reducción de la variabilidad de los factores que la generan $\sigma_{X_{k,i}}^2$ y $\sigma_{U_{k,r}}^2$, supone una reducción de la variabilidad de la respuesta, tal y como puede observarse en la figura 5.11; esta será mayor o menor dependiendo de la pendiente definida en el modelo de relación y determinada por los coeficientes β_{ki}^2 o $\gamma_{k,r}^2$

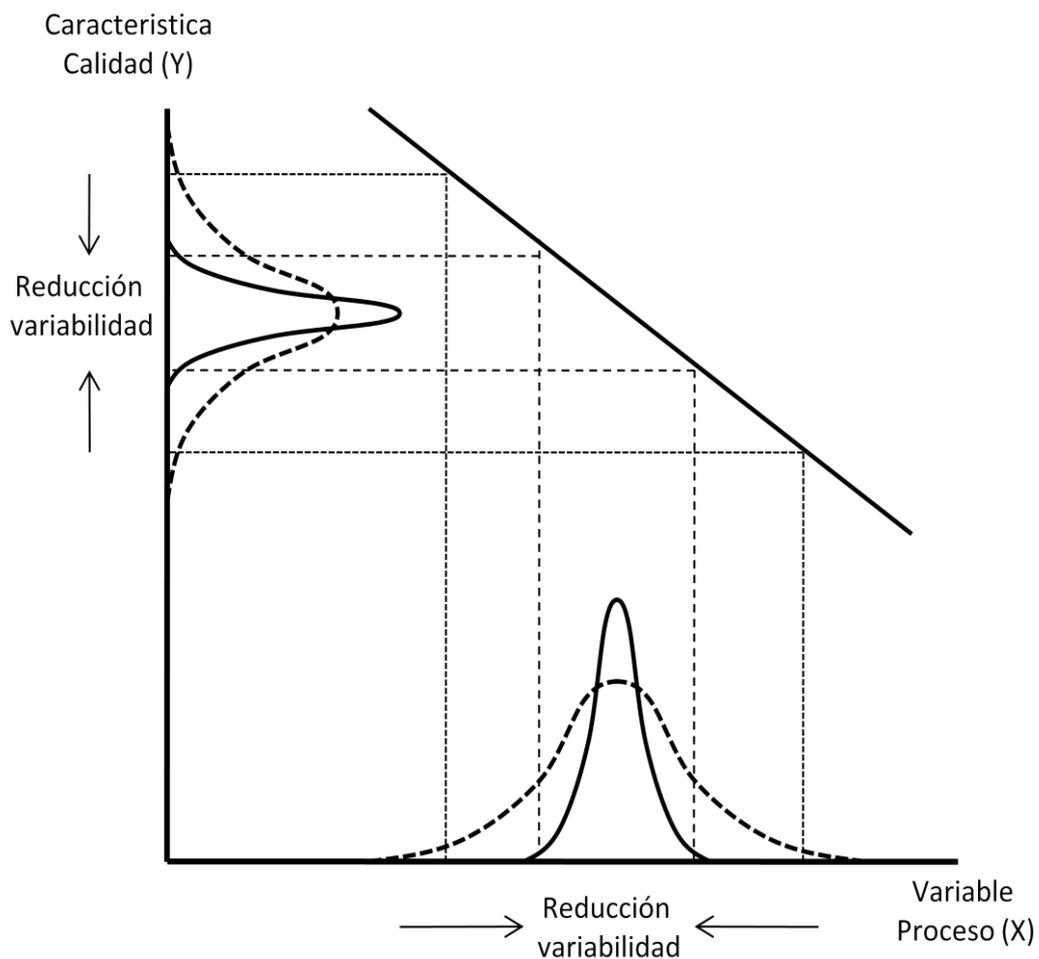


Figura 5.11: Reducción de variabilidad de la característica de calidad Y

En el segundo caso, una modificación del modelo de relación (Ec 5.1), que cambie los valores de los coeficientes β_{ki} y $\gamma_{k,r}$, supone una reducción de variabilidad final sin que cambien la de la variables ya que el cambio del coeficiente permite disponer de un proceso más robusto, en el que el efecto de la variabilidad en la variable tiene mucho menos efecto en la respuesta como puede observarse en la (figura 5.12)

$$Y_{kj} = \beta_0 + \sum_i \beta_i X_{k,i} + \sum_j \gamma_j Y_{k-1,j} + \varepsilon_k \quad \text{Ec. 5.1}$$

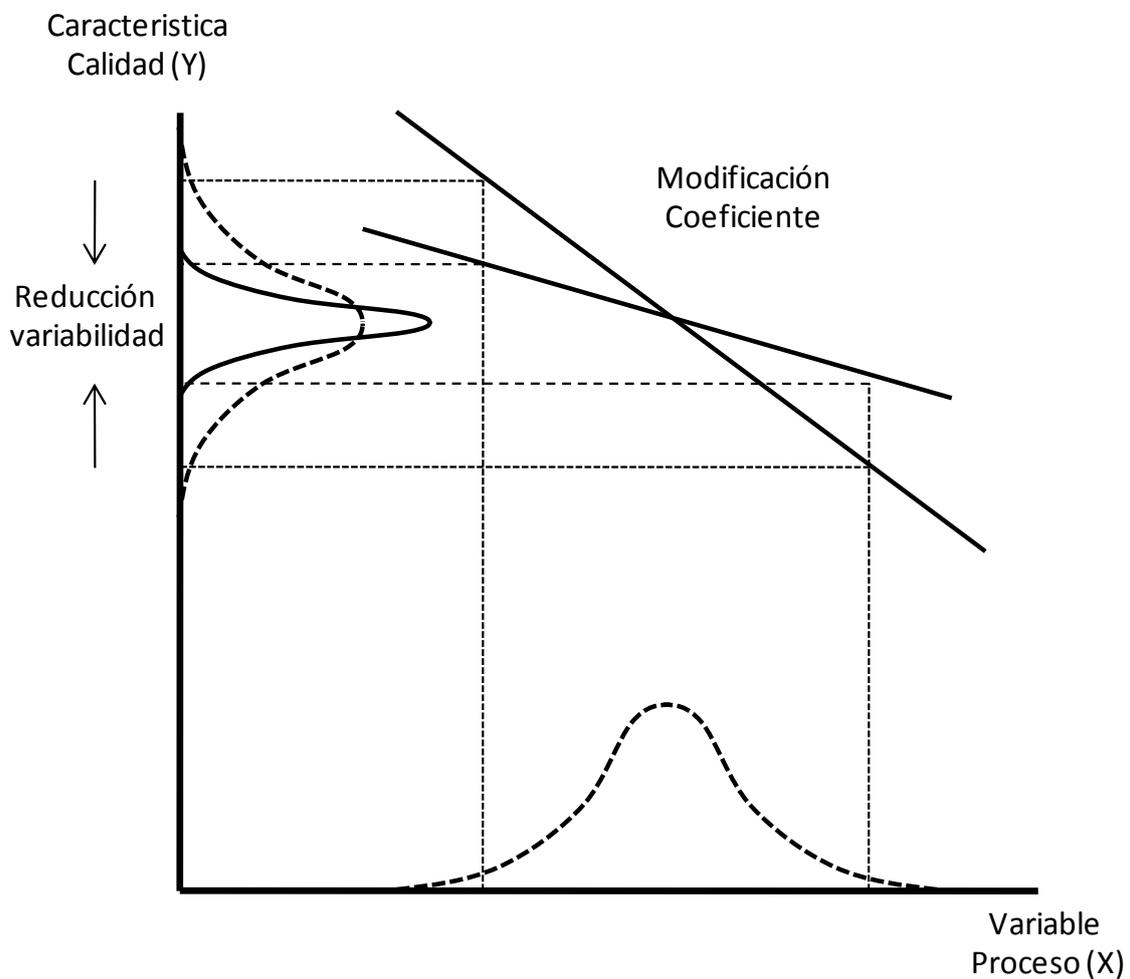


Figura 5.12: Reducción de la variabilidad como consecuencia de la modificación de los coeficientes de relación

Esta segunda opción supone un proceso más robusto; es decir, más insensible a mostrar variaciones como consecuencia de los cambios en las variables de proceso.

Puede pues concluirse que la mejora del proceso implica soluciones que pueden resumirse en

- *Reingeniería de procesos*: Búsqueda de soluciones en el mercado que reduzcan la variabilidad de las variables en las diferentes etapas del proceso; esta opción supone inversión en adquisición de maquinaria o modificación de la existente.
- *Mejora de sistemas de control*: En muchas ocasiones, la variabilidad puede reducirse mejorando el sistema de control; la instalación de sensores on-line en situaciones donde el proceso se esté controlando manualmente y la automatización del control suele suponer un control más efectivo y capaz de detectar cambios con más precisión, lo que lleva finalmente a una reducción de la variabilidad
- *Modificación/Implantación de procedimientos de control*: En las situaciones en las que el control manual mediante muestreo sea insustituible, la potencia de los gráficos de control puede mejorarse tanto incrementando la frecuencia como modificando el tamaño de muestra; asimismo, deben implantarse procedimientos de control en las situaciones en las que se detecten factores de variación que no estén siendo controlados; finalmente todos estos cambios en los planes de control deben ir acompañados de una reasignación de tolerancias que esté de acuerdo tanto con la variabilidad real de cada etapa del proceso como con el resultado final perseguido.
- *Modificación de los coeficientes de los modelos de relación*: Esta modificación puede lograrse estudiando nuevas alternativas de materiales menos sensibles a la variación. Por ejemplo, en el caso propuesto para el estudio, pueden estudiarse mezclas de materias primas para la composición que muestren menor sensibilidad a los cambios del proceso.

Todas estas actuaciones suponen bien una inversión que habrá que amortizar, un gasto en investigación y experimentación o un incremento del gasto en personal, equipos etc. dedicados al control del proceso lo que finalmente supondrá un

incremento de coste cuantificable. Para cada una de estas actuaciones deberá conocerse cuál es la reducción de la variabilidad que puede esperarse en la variable sobre la que se actúa.

5.5.2.- COMBINACION DE ACTUACIONES Y SELECCIÓN DE LA ALTERNATIVA ÓPTIMA.

Para cada variable en cada etapa de proceso puede haber diversas soluciones y estas pueden combinarse entre sí llevando a un conjunto de opciones que será más o menos amplio en función del número de variables sobre las que se actúe y el número de soluciones disponibles para cada una; cada una de las combinaciones llevará asociado un incremento de coste correspondiente a la suma de los incrementos de costes de las soluciones que incluya.

La utilización del modelo de composición de varianzas:

$$\sigma_{Y_N}^2 = \sum_{k,i} \beta_{ki}^2 \sigma_{X_{k,i}}^2 + \sum_{k,r} \gamma_{k,r}^2 \sigma_{U_{k,r}}^2 + \sigma_{\varepsilon_k}^2 \quad \text{Ec 5.4}$$

Permite predecir cuál será la varianza de la característica de calidad final esperable en el proceso para cada una de las combinaciones, conocida la de cada factor de variación en particular e incluyendo la de los términos de error que siempre existirá; conocido este valor, la función de costes de variabilidad permitirá estimar el ahorro en coste unitario respecto a la situación inicial; conocidos los valores de inversión y ahorro para cada combinación el ahorro neto corresponde a la diferencia.

La alternativa óptima será aquella con la menor varianza que consiga el máximo ahorro neto, es decir, la máxima reducción de variabilidad con la combinación de soluciones más económica. Para identificarla se puede tratar la información tal y como se detalla en la tabla 5.4.

Opciones mejora variables			Combinaciones de actuación				
Ref.	Incremento de coste	varianza esperada	1	2	3	.....	n
X_1	$C_{X1,1}$	$\sigma^2_{X1,1}$					
	$C_{X1,t}$	$\sigma^2_{X1,t}$					
X_i	$C_{Xi,1}$	$\sigma^2_{Xi,1}$					
	$C_{Xi,t}$	$\sigma^2_{Xi,t}$					
U_1	$C_{U1,1}$	$\sigma^2_{U1,1}$					
	$C_{U1,t}$	$\sigma^2_{U1,t}$					
U_r	$C_{Ur,1}$	$\sigma^2_{Ur,1}$					
	$C_{Ur,t}$	$\sigma^2_{Ur,t}$					

Variabilidad final esperada	σ^2_{Y1}	σ^2_{Y2}	σ^2_{Y3}	....	σ^2_{Yn}
Índice de capacidad	C_{pm1}	C_{pm2}	C_{pm3}	....	C_{pmn}
Incremento coste por inversión	ΔC_1	ΔC_2	ΔC_3	....	ΔC_n
Ahorro por reducción variabilidad	A_1	A_2	A_3	....	A_n
Ahorro neto	An_1	An_2	An_3	...	An_n

Tabla 5.4 comparación entre combinaciones

- La primera columna detalla todas las variables de proceso identificadas X_i y U_r .
- La segunda columna detalla el incremento de coste correspondiente a cada una de las soluciones aplicables para reducir la variabilidad

- La tercera columna incluye la varianza esperada de la variable para cada una de las soluciones.
- Las n columnas detallan combinaciones de actuación.
- Para cada combinación se estima la varianza final esperada, el índice de capacidad, en incremento de coste esperado por las inversiones, el ahorro esperado por la reducción de variabilidad y el ahorro neto final.

La combinación más adecuada será aquella que minimice la variabilidad con el máximo ahorro neto; para la selección de las más interesantes puede recurrirse a una representación gráfica como la de la figura 5.13

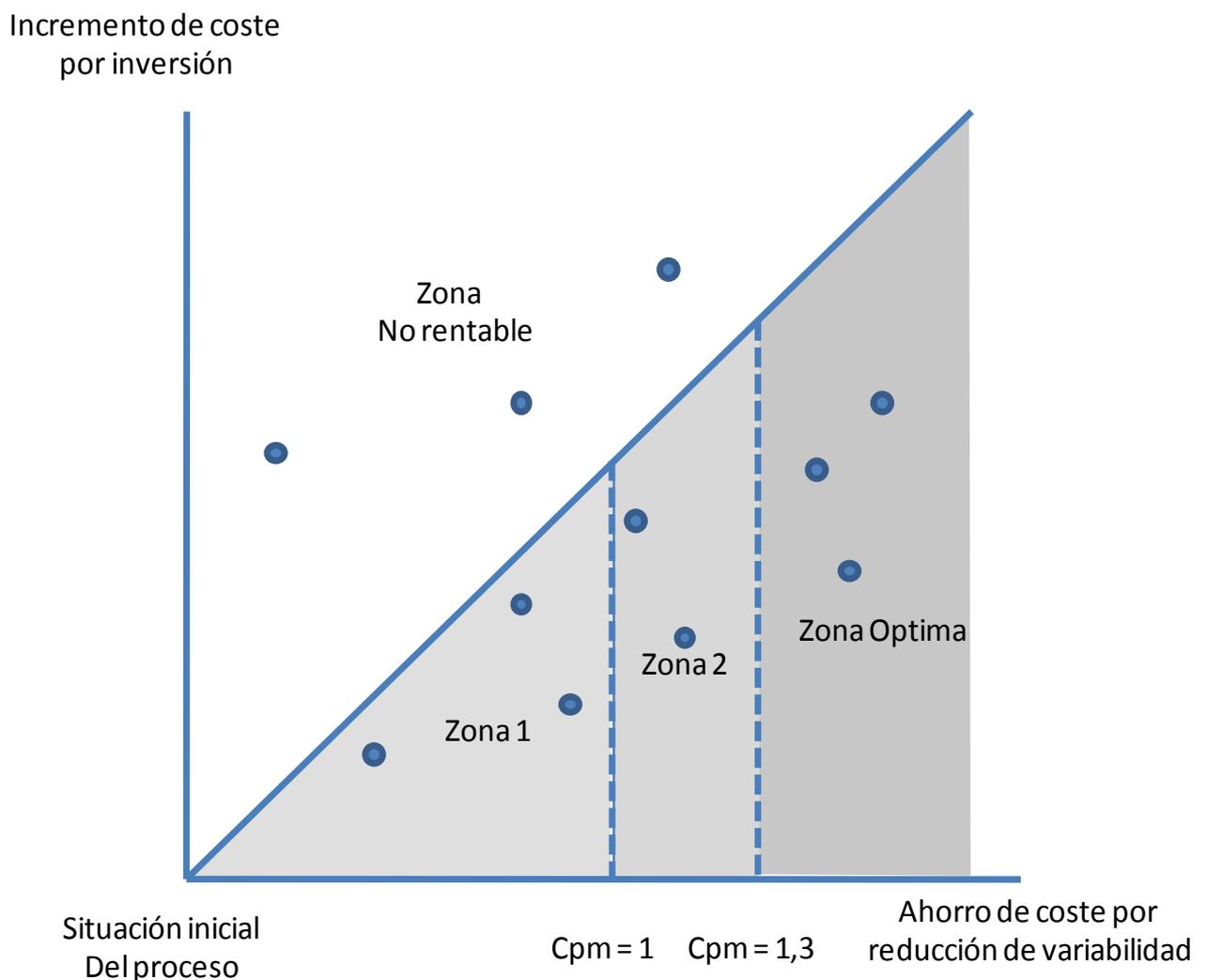


Figura 5.13: Resultados de las diferentes combinaciones

En esta gráfica se representa el ahorro de coste por la reducción de variabilidad frente al incremento de coste por la inversión; las dos líneas a trazos corresponden al valor de ahorro de coste asociado a resultados de varianzas finales que ofrezcan índices de capacidad 1 y 1,3 y los puntos del gráfico son las distintas combinaciones de actuación identificadas por su valor de incremento de coste por la inversión y el ahorro de coste por reducción de variabilidad. En esta representación aparecen cuatro áreas:

- Zona no rentable: Corresponde a soluciones en las que el incremento de coste consecuencia de la inversión, no puede amortizarse por el ahorro generado por la reducción de variabilidad. Las soluciones que aparecen en esta zona no son económicamente recomendables
- Zona 1: Las combinaciones ubicadas en esta representan una mejora del proceso económicamente rentable pero no alcanzan el resultado de variabilidad que supone un proceso con un índice de capacidad 1 por lo que seguirían correspondiendo a un proceso que genera mayor variabilidad de la esperada.
- Zona 2: Las combinaciones ubicadas en la zona 2, son interesantes, especialmente si su inversión baja; corresponden a un proceso con índice de capacidad mayor de 1 pero menor a 1,3 que es el objetivo.
- La zona óptima corresponde a las combinaciones que cumplen las expectativas de ahorro y mejora de proceso, de ellas la más adecuada será la que este posicionada en la zona de máximo ahorro y mínimo coste.

El último paso en el proceso de mejora sería la validación de los resultados, repitiendo todo el proceso de estimación de variabilidades monitorizando el proceso con las modificaciones y confirmando que el resultado es el esperado.

5.6.- CONCLUSIONES

Siempre que se cumplan las hipótesis de normalidad, de independencia de variables y los modelos lineales de relación entre las variables puedan ser suficientemente explicativos, la utilización de un modelo de composición de varianzas y la estimación

de sus componentes mediante el análisis de resultados del proceso con las herramientas estadísticas propuestas, permite disponer de un modelo matemático capaz de explicar y estimar los efectos de las mejoras del proceso. Las simplificaciones supuestas serán válidas si el error del modelo es suficientemente bajo.

La utilización de los conceptos de costes de calidad permite estimar a partir de la información de los costes de fabricación un modelo de costes de variabilidad que puede utilizarse para estimar el ahorro esperable en el proceso por la reducción de variabilidad.

El modelo de composición de varianzas junto al modelo de coste permite simular los resultados de las diferentes opciones de mejora y seleccionar la más efectiva; esta determinará las condiciones de operación del proceso para obtener los resultados esperados así como el beneficio económico final.

APLICACIÓN EXPERIMENTAL

Capítulo 6.

Descripción del proceso analizado

6.1.- DATOS GENERALES DEL PROCESO

6.2.- EQUIPOS, MATERIALES Y CONDICIONES DE OPERACIÓN

6.2.1.- Preparación de polvo atomizado

6.2.2.- Conformación del soporte

6.2.3.- Cocción

6.2.4.- Clasificación

6.1.- DATOS GENERALES DEL PROCESO

La aplicación se ha realizado sobre un proceso convencional de fabricación de baldosas cerámicas de baja absorción de agua y soporte de pasta roja (Grupo BII_a según la norma EN 14411 con absorción de agua del soporte entre 3% y 6%). Estas baldosas son las recomendables y habitualmente utilizadas para suelos de interiores de viviendas y utilidades exteriores en condiciones climáticas moderadas y representan actualmente el mayor porcentaje de producción de baldosas de pavimento.

El proceso dispone de las etapas convencionales de fabricación descritas en la figura 6.1 y es equivalente a cualquiera de los instalados en el sector cerámico, aunque tiene las siguientes particularidades:

- La instalación de preparación de polvo atomizado que incluye los subprocesos de tratamiento de materias primas, molienda y atomizado, es independiente del resto del proceso y está dimensionada para abastecer de polvo atomizado no solo a la instalación objeto del estudio sino que asimismo abastece de este producto semi-elaborado otras instalaciones externas que los subcontratan. Su capacidad productiva es de 300.000 Toneladas de polvo atomizado anuales de las que la propia empresa consume aproximadamente el 50 %
- Las instalaciones de prensado, decoración, cocción y clasificación incluyen cuatro líneas de producciones paralelas e independientes cada una de las cuales trabaja en continuo produciendo los diferentes productos (Formatos y diseño).
- La capacidad de producción anual de cada una de las líneas es de 1.500.000 m² anuales y la total de la empresa de 6.000.000 m² anuales.
- Los lotes de producción de un mismo formato y modelo suponen un promedio de 5.000 m², lo que equivale a 24 horas de producción.

La aplicación se ha realizado sobre una de las líneas de producción de la instalación, seleccionando un caso típico correspondiente a la producción de baldosas de dimensión nominal 331,0 mm.

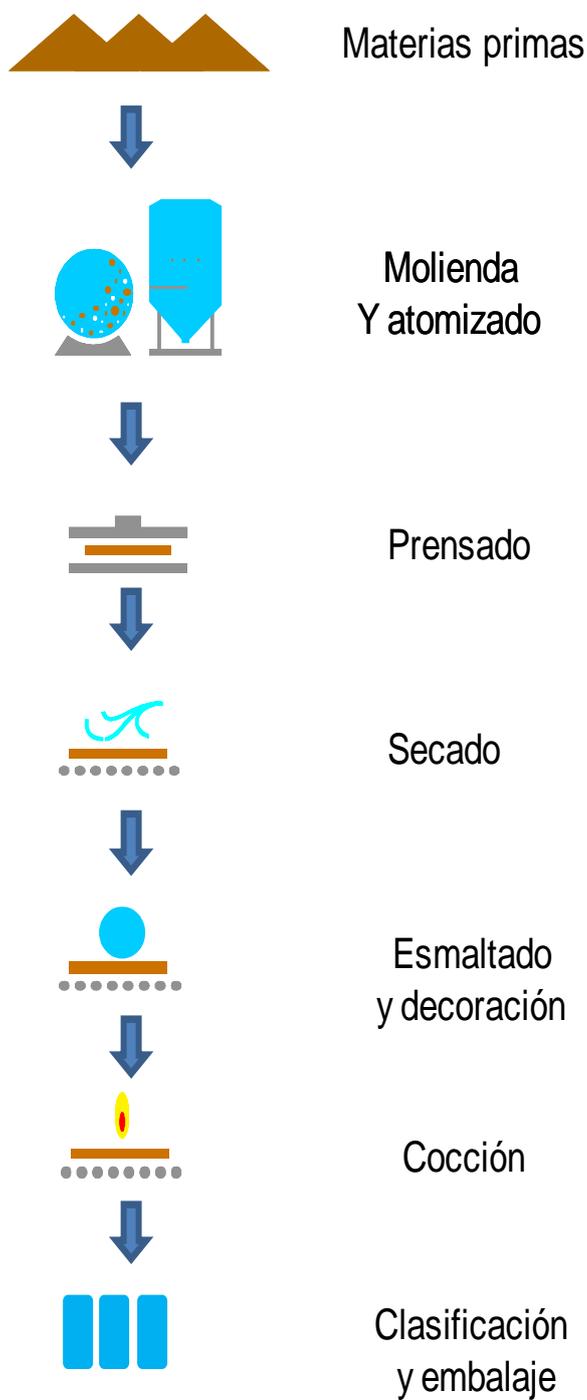


Figura 6.1: Esquema de proceso analizado

6.2.- EQUIPOS, MATERIALES Y CONDICIONES DE OPERACION

6.2.1.- PREPARACION DE POLVO ATOMIZADO

Materias primas

La formulación utilizada en la composición del soporte incluye los siguientes componentes:

Arcilla (Denominación)	Porcentaje
Moro	33,2 %
Morella	31,0 %
Villar	35.0 %
Desfloculantes	0,8 %

Tabla 6.1 Composición

Las arcillas proceden de yacimientos ubicados en la comunidad valenciana y son las comúnmente utilizadas por los fabricantes de pavimentos y revestimientos de pasta roja. Los materiales llegan al proceso de preparación de polvo atomizado tras un proceso de homogeneización previa realizado en las propias minas. La homogeneidad de su comportamiento se controla mediante el procedimiento descrito por el manual para el control de materias primas arcillosas (ITC1998) y la tolerancia establecida para la contracción lineal es de $\pm 0,15 \%$ lo que en una pieza de dimensión nominal de 331,0 mm equivale a un rango de 1,0 mm de dimensión final

Molienda

Las materias primas se almacenan en zonas específicas desde donde se abastecen al proceso. Los materiales se someten inicialmente a una trituración mediante un desmenuzador rotativo de capacidad 100 Ton/hora que reduce el tamaño de las materias primas a un máximo de 50 mm; tras este proceso, las diferentes materias

primas se almacenan en silos individuales desde los que se abastece el proceso de molienda. La instalación de pesaje y dosificación tiene el siguiente esquema y características:

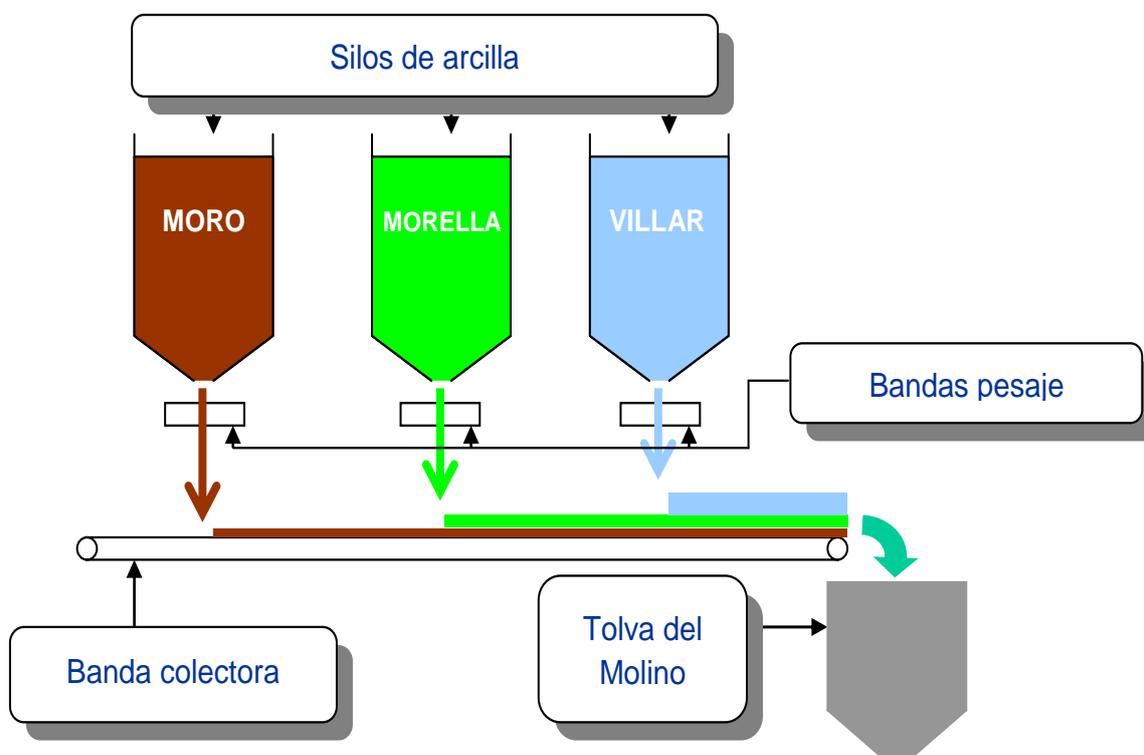


Figura 6.2: Esquema de la instalación de dosificación y pesaje de la fórmula

Características	
Capacidad silos de arcillas	100 Ton
Capacidad de la banda colectora	50 Ton/hora
Capacidad de las bandas pesadora	30 Ton/hora
Precisión de las bandas pesadoras	+/- 2%
Capacidad de la tolva del molino	50 Ton

Tabla 6.2 características del sistema de dosificación y pesaje

La mezcla de materias primas se alimenta a la instalación de molienda en continuo; junto a ella se dosifica el agua necesaria para la operación (34%) procedente de las instalaciones de reciclado de todas las aguas y lodos de los procesos de limpieza

previamente almacenadas y homogeneizadas en una balsa de 400 m³ y los productos desfloculantes consistentes en mezclas de polímeros acrílicos con Silicato sódico que se adicionan en un 0,8 % y que tienen como objetivo conseguir los valores de viscosidad requeridos.

<i>Características molino</i>	
Capacidad total del molino continuo	100 m ³
Motor	630 kW
Numero de revoluciones	12 rpm
Numero de cámaras interiores	2
Capacidad de cada cámara	40 m ³ – 60 m ³
Diámetro cuerpos molidores cámara 1	de 180 a 220 mm
Diámetro cuerpos molidores cámara 2	de 60 a 80 mm

Tabla 6.3 Características molino

<i>Parámetros de producción</i>	Valor
Producción de barbotina a 1720 gr/l de densidad	de 30 a 38 Ton/h
Caudal de arcillas	27 Ton/h
Caudal de agua	11,5 m ³ /h
Caudal de aditivos desfloculantes	510 l/h

Tabla 6.4 Condiciones de trabajo molienda

El producto obtenido en la molienda continua se almacena en una balsa subterránea con agitación continua desde donde se bombea a una unidad de tamizado que tiene como objetivo eliminar las partículas de mayor tamaño que pudieran generar defectos superficiales en la baldosa decorada. Finalmente la barbotina tamizada se almacena en balsas dotadas de sistemas de agitación continua para posteriormente pasar a la etapa de atomización. Las tolerancias establecidas para esta etapa son:

Variable	valor
Densidad	1,68 ± 0,02 gr/cc
Viscosidad	Menor 30 s
Rechazo 63 n	7 % ± 1 %

Tabla 6.5 variables y tolerancias etapa molienda

Atomización

El secado de la barbotina se realiza en una instalación de atomización convencional

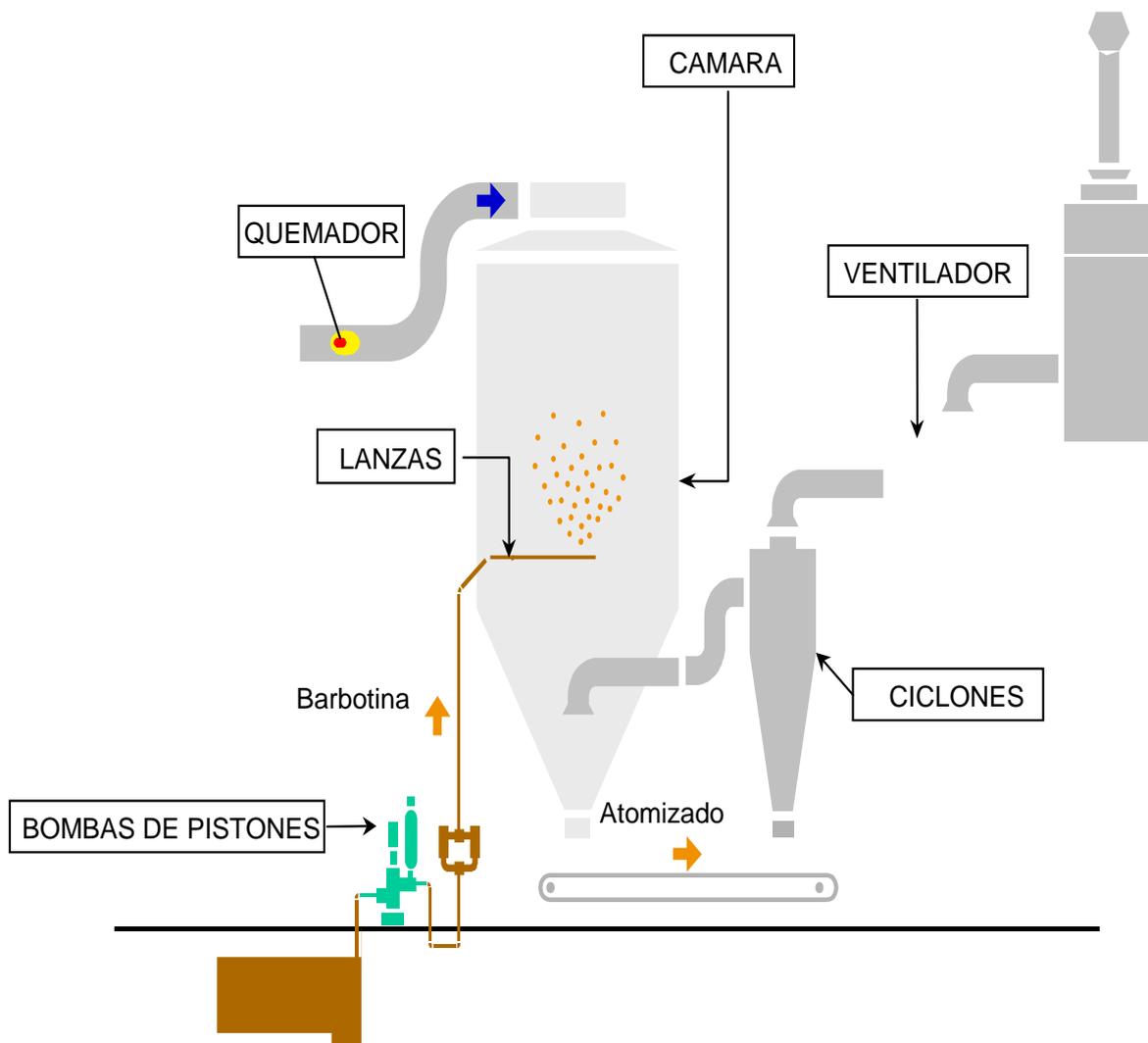


Figura 6.3: Instalación de atomización

El polvo atomizado se almacena en una batería de 8 silos de 180 toneladas de capacidad cada uno donde se somete a reposo durante un mínimo de 24 horas y posteriormente se alimenta a camiones que lo trasladan a la instalación de prensado, decoración y cocción.

<i>Detalle equipo atomización</i>	<i>Valor</i>
Capacidad de evaporación de agua	12.000 l / h
Producción de polvo atomizado	32 Ton/h
Número de bombas pistones	4
Potencia unitaria	22 Kw
Caudal por unidad	13.000 l / h
Presión	30 Kgs/ cm ²
Altura máxima de aspiración	3,5 m
Numero de lanzas	16
Numero de boquillas por lanza	2
Diámetro difusor de la boquilla	2,2 mm
Caudal de barbotina pro boquilla	950 lt/h
Combustible quemador	Gas natural
Potencia térmica quemador	13.000 kW
Máxima temperatura	600 °C
Caudal de aire caliente	22 Kg/s

Tabla 6.6 Características atomizador

Humedad del atomizado	6 %
Granulometría % (> 500 micras)	< 25%
Granulometría % (< 100 micras)	< 6 %
Contenido de carbonatos en atomizado	< 4 %
Humedad	6 % ± 0,3%

Tabla 6.6 Tolerancias polvo atomizado

6.2.2.- CONFORMACION DEL SOPORTE

El proceso de conformación de soporte se realiza por prensado en semiseco con una prensa industrial hidráulica de las siguientes características:

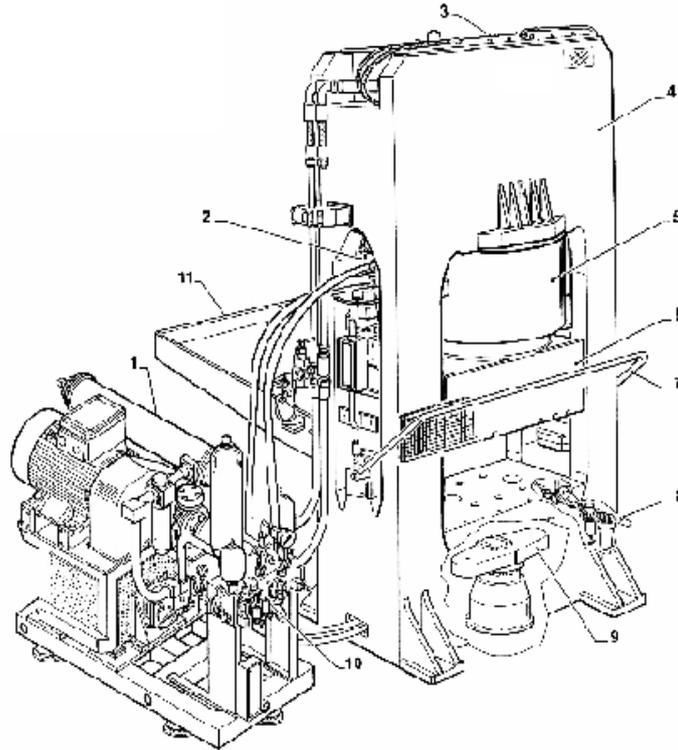


Figura 6.4: Prensa

<i>Características prensa</i>	
Fuerza máxima de prensado	2.500 Ton
Luz libre entre columnas	1.750 mm
Carrera de la traviesa móvil	160 mm
Carrera útil del extractor	74 mm
Fuerza máxima del extractor	15 Ton
Potencia eléctrica de motores	83 kW
Potencia eléctrica de calefactores	24 kW

Tabla 6.8 Condiciones de trabajo de la prensa

<i>Parámetros de operación</i>	
Ciclos / minuto	13
Des aireaciones	160 mm
Presión máxima	300 ±1 Kg/cm ²

Tabla 6.8 parámetros de la operación de prensado

El molde penetrante utilizado para producir el formato de dimensión nominal 33x33 cm tiene de tres alveolos (Fig 6.5) con una dimensión de 359,7x359,7 mm y dispone de sistemas de independientes de compensación de presión (punzones isostáticos con cámara de aceite) en cada una de las cavidades.

<i>Variables y tolerancias</i>	
Humedad pieza prensada	5,75 % ± 0,2 %
Densidad aparente (seco)	1,91 gr/cc ± 0,01gr/cc
Espesor	8,5 mm ± 0,2 mm

Tabla 6.9 Tolerancias soporte

Tras el proceso de prensado, las piezas se alimentan a un secadero vertical a fin de eliminar la humedad y preparar las piezas para el posterior proceso de decoración, con las siguientes condiciones de operación

<i>Parámetros de operación</i>	
Humedad residual tras ciclo de secado	0,2 %
Temperatura de la baldosa	de 100 – 110 °C
Ciclo de secado	1 hora

Tabla 6.10 Variables de secado

El producto seco se alimenta a las líneas de decoración que trabajan en continuo con el sistema prensa-secadero; la etapa de decoración no tiene ninguna influencia en la dimensión de la baldosa final tal y como se detalla en el Cap 5.

6.2.3.- COCCION

La cocción se realiza en un horno monoestrato que dispone de sensores de temperatura ubicados longitudinalmente en la zona central del horno y grupos de regulación de temperatura con tres quemadores cada uno ubicados en las zonas superior e inferior a la plataforma de rodillos:



Figura 6.5: Imagen del horno. (Keraben S.A.)



Figura 6.6: Detalle de sistema de quemadores. (Keraben S.A.)

<i>Características del horno</i>	
Anchura útil	2160 mm
Longitud	90,3 m
Temperatura máxima de operación	1250 °C
Combustible	Gas natural

Tabla 6.12 características del horno

<i>Parámetros de producción</i>	
Ciclo	45 min.
Temperatura máxima	1180 °C
Piezas por fila	5
Producción teórica diaria	5.150 m ² /dia
Consumo específico	450 kcal/kg

Tabla 6.12 Parámetros de producción

El horno se alimenta en continuo con filas de cinco piezas que discurren sobre la plataforma de rodillos formando un “tapete” continuo; el material es sometido desde la entrada al horno a un proceso de calentamiento progresivo, en primer lugar mediante el flujo de aire procedente de las zonas de máxima temperatura que circula en contracorriente al producto y posteriormente mediante la acción de grupos de quemadores regulados por zonas mediante controladores PID que reciben la señal de temperatura de zona de sensores pirométricos instalado en el canal central del horno. Tras someter al producto a la temperatura máxima de cocción, el horno dispone de sistemas de enfriamiento con aire forzado.

La curva de cocción tiene el perfil detallado en la figura.6.7, en la que pueden observarse las curvas asignadas para la zona inferior y superior del paquete.

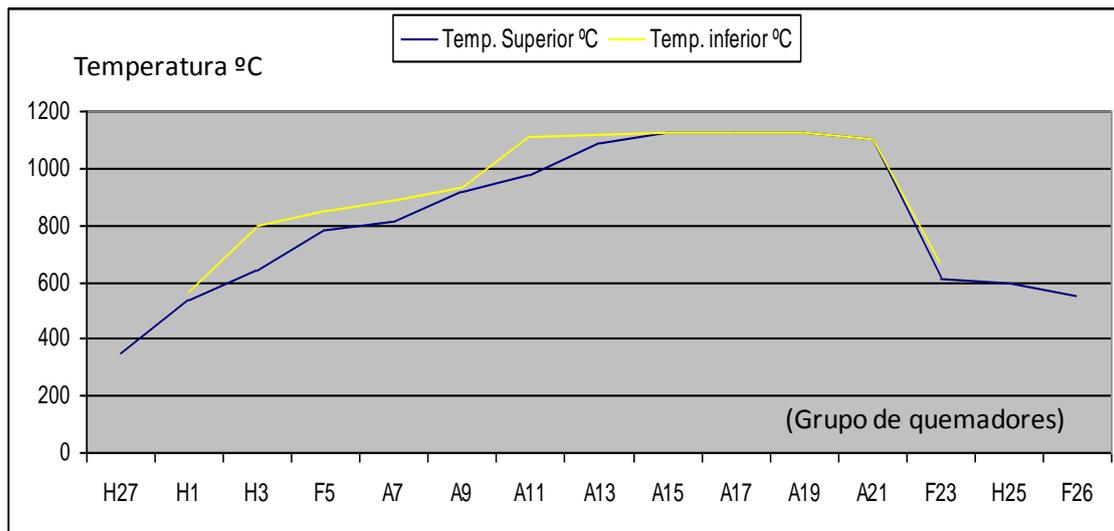


Figura 6.7: Curva de cocción

La tolerancia establecida para el proceso de cocción es de $\pm 0,5$ mm para la dimensión media de la baldosa; la diferencia de dimensiones entre laterales de horno se controla con una tolerancia de $\pm 0,2$ mm y la tolerancia para la temperatura $\pm 2,5$ °C

6.2.4.- CLASIFICACION

La clasificación y embalaje del producto cocido se realiza en automático en líneas de selección, donde se dispone de sistemas on – line para determinar las características de calidad del producto y separarlo en sus diferentes grupos:

- *Sistemas de inspección de defectos y tono:* Estos identifican las imperfecciones de la superficie de la baldosa (fallos de decoración, sucios, rotos...) y que separan al producto en las tres calidades diferentes con las que se comercializa. Simultáneamente determinan también la tonalidad de la baldosa separando al producto en diferentes grupos de tono que se comercializan también por separado.
- *Sistemas de medición de la planaridad y deformación de la baldosa:* Las piezas con curvaturas o deformaciones superiores a las tolerancias establecidas se separan en las diferentes calidades.
- *Sistemas de medición de calibre y ortogonalidad:* Estos sistemas miden on-line la dimensión de la baldosa en todos sus lados y centros, estimando a partir de

estos valores su dimensión media; valor que se utilizará para identificar el grupo de calibre al que pertenecen, así como la ortogonalidad de sus lados degradando las baldosas a calidades inferiores en el caso que se superen las tolerancias de ortogonalidad establecidas.



Figura 6.8: Línea de clasificación. (Keraben S.A.)



Figura 6.9: Sistema automático de calibrado. (Keraben S.A.)

Tras esta inspección automática las baldosas se separan en subgrupos que se embalan y etiquetan por separado. Las cajas individuales se apilan automáticamente en pallets que se llevan al almacén. El número de subgrupos finales es consecuencia de:

- Diferentes calidades (3)
- Diferentes tonos (de 1 a 3 habitualmente en un lote de producción)
- Diferentes calibres (2 a 4 según el formato)

Capítulo 7.

Estimación del modelo de transmisión de variabilidad del proceso cerámico

7.1.- MODELO GENERAL

7.1.1.- Identificación de las variables de proceso

7.1.2.- Modelo de transmisión de variabilidad del proceso cerámico

7.2.- ESTIMACION DE COMPONENTES DEL MODELO

7.2.1.- Toma de muestra y medición

7.2.2.- Modelos de relación entre variables

7.2.3.- Análisis de resultados de la característica de calidad

7.2.4.- Estimación de la variabilidad de los componentes

7.3.- CÁLCULO Y VALIDACION DE LOS MODELOS

7.3.1.- Composición de varianzas etapa de prensado

7.3.2.- Composición de varianzas del proceso completo

7.3.3.- Contribución de las etapas

7.4.- TOLERANCIAS E INTERVALOS DE VARIACION

7.5.- CONCLUSIONES

7.1.- MODELO GENERAL

El proceso propuesto en el capítulo 5 para estimar y validar el modelo de trasmisión de variabilidad incluye la identificación de las variables críticas; la preparación del modelo de trasmisión de variabilidad, la estimación de los componentes del mismo a partir de la información disponible en el proceso y la validación, comparando la variabilidad predicha con la medida.

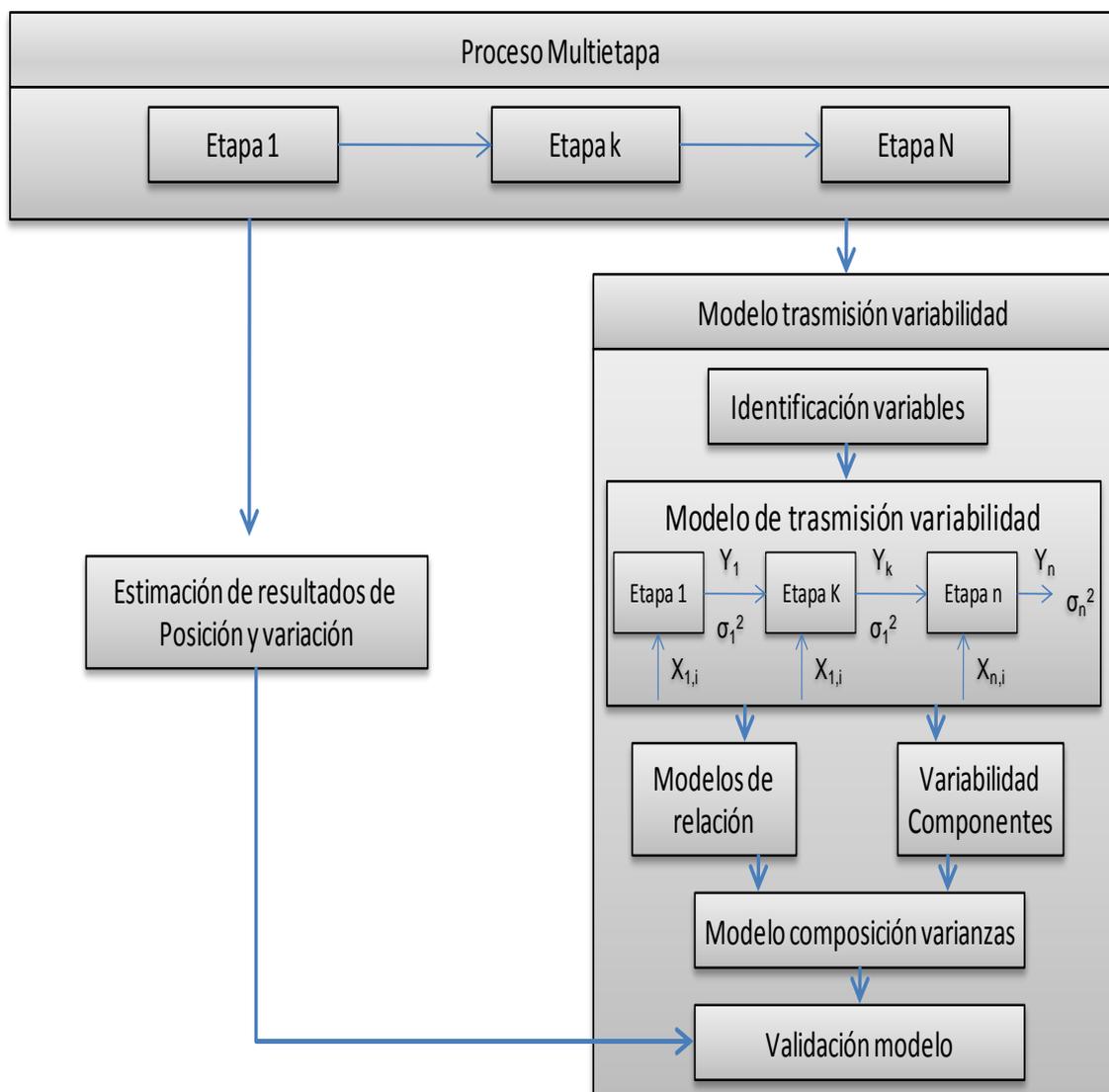


Figura 7.1: Propuesta

7.1.1.- IDENTIFICACION DE LAS VARIABLES DEL PROCESO

Tal y como se describe en detalle en el capítulo 5, las variaciones dimensionales observadas en las baldosas cerámicas de baja absorción de agua son consecuencia de cambios en la contracción lineal experimentada por el soporte durante la etapa de cocción, donde el tratamiento a altas temperaturas empieza a producir una vitrificación de la composición y este fenómeno genera cambios en la porosidad y contracción de la mezcla de materias primas que se describe mediante su “diagrama de gresificación” (Escardino A, et al 1981).

Las variables de proceso que pueden provocar modificaciones en este diagrama cambiando el valor de contracción de la baldosa son (Amorós JL, et al 1984) , (Escardino A, et al 1981) (Bagan V 1991): los cambios de características de la mezcla de materias primas, las variaciones del polvo atomizado ,la presión de prensado, la densidad aparente de la pieza conformada y la temperatura y ciclo de cocción.

Además de estas variables, durante el proceso de prensado se conforman varias piezas simultáneamente en distintas cavidades del mismo molde; esta situación corresponde a un proceso “multi-flujo” en el que diferencias de presión o de carga de polvo en las distintas cavidades provoca resultados distintos para cada una generando una variabilidad adicional, como demuestran Sánchez J et al (1994) en su proyecto de sensorización de una prensa industrial

La situación de proceso “multi-flujo” se observa también en el proceso de cocción ya que el horno es alimentado por filas de piezas que pueden ser sometidas a temperaturas diferentes por la presencia de gradientes trasversales de temperatura (Mallol G et al 1994). Estos factores pueden tener un impacto relevante en la variabilidad final.

El diagrama de Isikawa propuesto en el capítulo 4 (figura 7.2) describe todas las variables de proceso relacionadas con el problema de variación dimensional; sobre este diagrama se pueden realizar las siguientes consideraciones para identificar finalmente las variables críticas de proceso que se incorporarán en el modelo.:

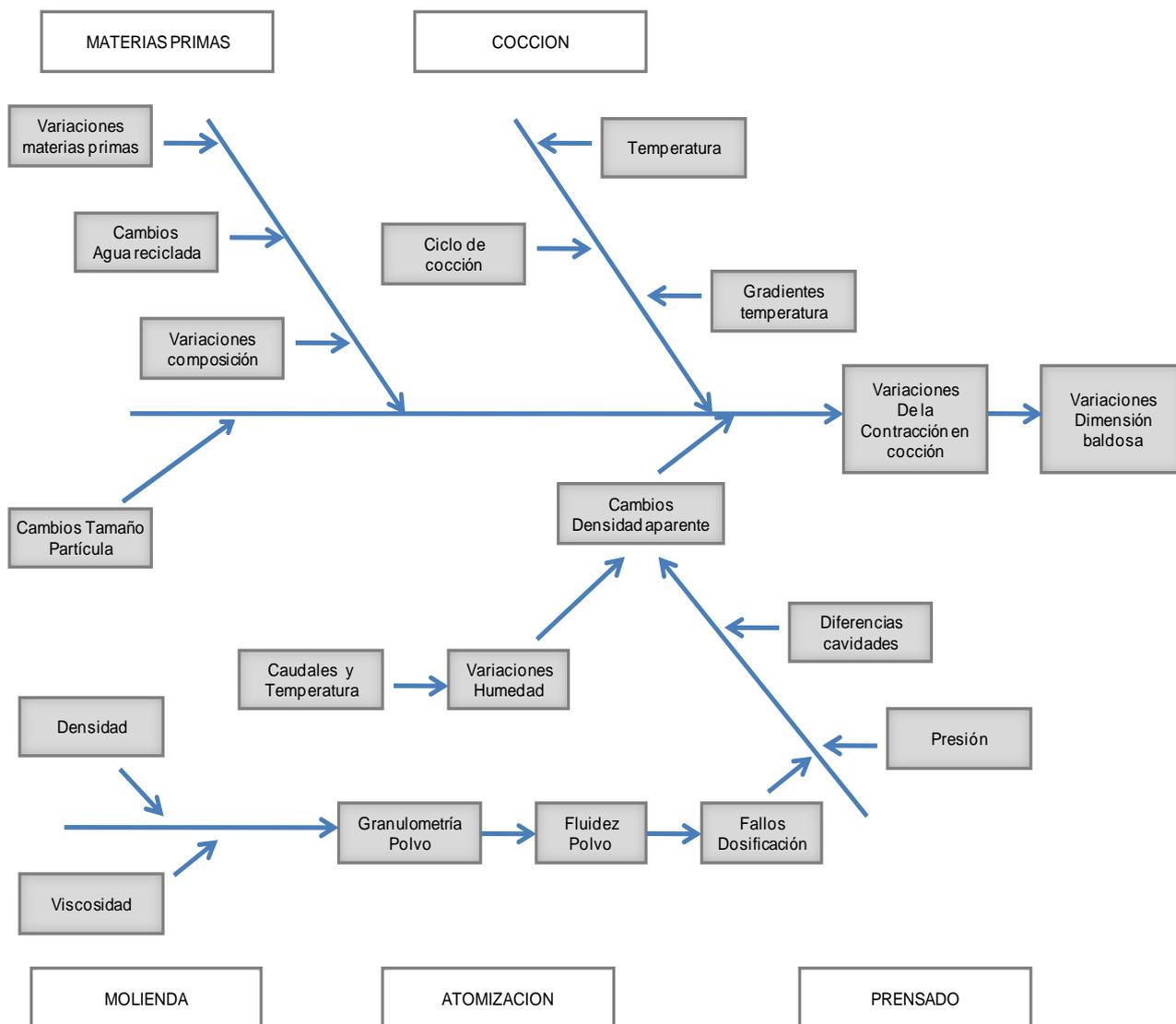


Figura 7.2: Variables de proceso que afectan a la variación dimensional

Materias primas y proceso de molienda :

El comportamiento en el proceso de una composición determinada puede cambiar por variaciones de las materias primas individuales que la forman o por variaciones en el porcentaje de cada una de ellas; adicionalmente a los cambios de las materias primas, la utilización de agua reciclada en el proceso de molienda puede generar cambios en el comportamiento de la composición ya que los residuos (lodos) que incorpora el agua procedente de la limpieza de las instalaciones de decoración y preparación de esmaltes incluye principalmente componentes de los esmaltes que son mucho más fundentes que la composición de soporte y cuya heterogeneidad puede representar modificaciones en el diagrama de gresificación.

Cambios en los parámetros de trabajo de la etapa de molienda pueden también provocar distribuciones de tamaño de partícula diferentes que impliquen cambios en el comportamiento del producto en los procesos de prensado y cocción (Amorós JL, et al 1984) y (Amorós JL 1987).

Todos estos factores provocan cambios en el comportamiento en prensado y cocción del “polvo atomizado”. Este producto intermedio es el que se considerará como materia prima del proceso en el modelo de transmisión de variabilidad, el cual genera variabilidad por:

- Cambios que afectan al comportamiento del soporte en prensado (medidos como variaciones de densidad aparente)
- Cambios que afectan al comportamiento del soporte en cocción (medidos como variaciones de la contracción lineal en cocción)

Obviamente cualquier cambio que afecte al comportamiento del soporte en prensado también afectará su comportamiento en cocción, pero es posible discriminar el efecto de cada uno de ellos y tratarlos por separado. Es evidente que con este planteamiento, no será posible discriminar si las variaciones de comportamiento del polvo atomizado son consecuencia de cambios en las materias primas individuales, errores del sistema de pesaje o variaciones en el tamaño de partícula durante el proceso de molienda pero en una primera aproximación, lo que desea evaluarse es si el polvo atomizado genera variabilidad por cambios en sus características de composición con independencia de donde se hayan producido.

Atomización:

Durante el proceso de secado por atomización, las variables que determinan la calidad del polvo atomizado son fundamentalmente su distribución granulométrica, la densidad del polvo y su humedad, (Amorós JL 1987). La granulometría del polvo es consecuencia del comportamiento reológico de la barbotina preparada en el proceso de molienda y de los parámetros de trabajo de la instalación de atomización; fundamentalmente el diámetro de las boquillas de pulverización y la presión de bombeo y aunque la granulometría del polvo afecta a su fluidez y a todos los procesos de transporte su variación no tiene efecto sobre la contracción lineal en la etapa de

cocción ya que a las presiones de trabajo industriales superiores a 300 Kg/cm^2 la contracción lineal de la baldosa es independiente del estado del aglomerado utilizado (Amorós JL 1987).

La densidad del polvo junto a la granulometría y la humedad determinan su fluidez y esta condicional el comportamiento del polvo durante los procesos de transporte y el llenado de los alveolos del molde lo que podría modificar la densidad aparente del producto obtenido en prensado. El efecto de esta variación se considerará también como parte de los cambios de comportamiento de polvo atomizado que pueden alterar el comportamiento en prensado y su contribución a la variabilidad se estimará asimismo como efecto sobre la respuesta de la variable densidad aparente.

La humedad del polvo es sin embargo una variable crítica en la etapa de prensado ya que el agua actúa como lubricante durante este proceso facilitando el empaquetamiento (Amorós JL et al 1982). Las variaciones de humedad de polvo atomizado tienen un efecto muy importante sobre el resultado de la densidad aparente de la pieza prensada, que a su vez modifica la contracción lineal del producto en el proceso de cocción (Amorós JL, et al 1984) y (Escardino A et al 1981).

Se concluye pues que las características de calidad del polvo atomizado que determinan su influencia en el resto del proceso respecto al problema de la variación dimensional son las variaciones de características fisicoquímicas de la mezcla de materias primas que puedan afectar a la densidad aparente obtenida en el proceso de prensado y las que afectan a la contracción lineal en el proceso de cocción así como la humedad del polvo.

Proceso de prensado:

La microestructura de la pieza prensada determina su comportamiento durante la cocción y esta se mide indirectamente a partir de su densidad aparente cuyo valor depende de la humedad del polvo atomizado y de la presión de prensado. Las variaciones de presión de prensado se generan tanto por oscilaciones de la presión media aplicada como por diferencias entre diferentes cavidades de un mismo molde consecuencia de defectos de carga de los alveolos o por problemas mecánicos del conjunto prensa-molde (Sánchez E et al 1994); son estos los factores de variación que se considerarán en el modelo

Cocción:

Las variables de esta etapa que determinan la contracción de la pieza son la temperatura y el tiempo de permanencia (Escardino A et al 1981); aumentos de tiempo de permanencia tienen efectos similares a aumentos de temperatura pero en un horno continuo y durante la producción de un lote este tiempo no varía ya que el horno se alimenta con un flujo continuo de entrada de material y en el caso de producirse cambios de ciclo habría acumulación de producto que haría inviable la operación. Las variaciones de la temperatura de cocción se generan por los sistemas de regulación (Termopares-Controladores-Sistemas de quemadores) y por pequeños huecos en el flujo del material alimentado al horno; además de estas variaciones y al igual que en el caso de la prensa es posible observar en algunas situaciones la aparición de gradientes transversales de temperatura que hacen que las piezas procesadas en los laterales del horno estén sometidas a temperaturas diferentes (Mallol G et al 1994).

Se concluye pues que la variación dimensional durante la producción de un lote debiera ser suficientemente explicada a partir del efecto sobre la densidad aparente y la contracción en cocción de los cambios de características fisicoquímicas del polvo atomizado, de la humedad del polvo atomizado, la presión de prensado, la diferencia de densidad aparente entre piezas de distintas cavidades del molde, la temperatura de cocción y los gradientes de temperatura en el horno, siendo estos los factores que se han considerado como críticos y que determinan la variabilidad final del el proceso.

<i>Sub proceso</i>	<i>Factor de variación</i>
Atomización	Variaciones de comportamiento en prensado de la composición Variaciones de comportamiento en cocción de la composición. Humedad del polvo
Prensado	Presión Diferencias de densidad aparente entre cavidades
Cocción	Temperatura Gradientes térmicos entre canales del horno

Tabla 7.1 causas de variación dimensional críticas incorporadas al modelo

Clasificación de producto:

Aunque la etapa de clasificación y embalaje de producto no es una etapa de transformación ya que no altera las condiciones o dimensión obtenida tras el proceso de cocción, si tiene sin embargo una influencia en la variabilidad dimensional final ya que la separación del producto en grupos de diferentes dimensiones se realiza a partir de los datos de medición de los sistemas instalados en la máquinas automáticas. El error de medición de estas maquinas genera una variabilidad adicional que hace que el resultado de variación medido sea superior a la real del proceso, pero, dado que la separación del producto en distintos subgrupos de “calibres” se realiza a partir de los valores medidos, debe incorporarse la variabilidad del sistema de medición como un componente más del modelo

El diagrama causa-efecto de Ishikawa que resumiría el tratamiento de la variación dimensional una vez agrupadas las variables y desestimados los efectos de alguna de ellas es:

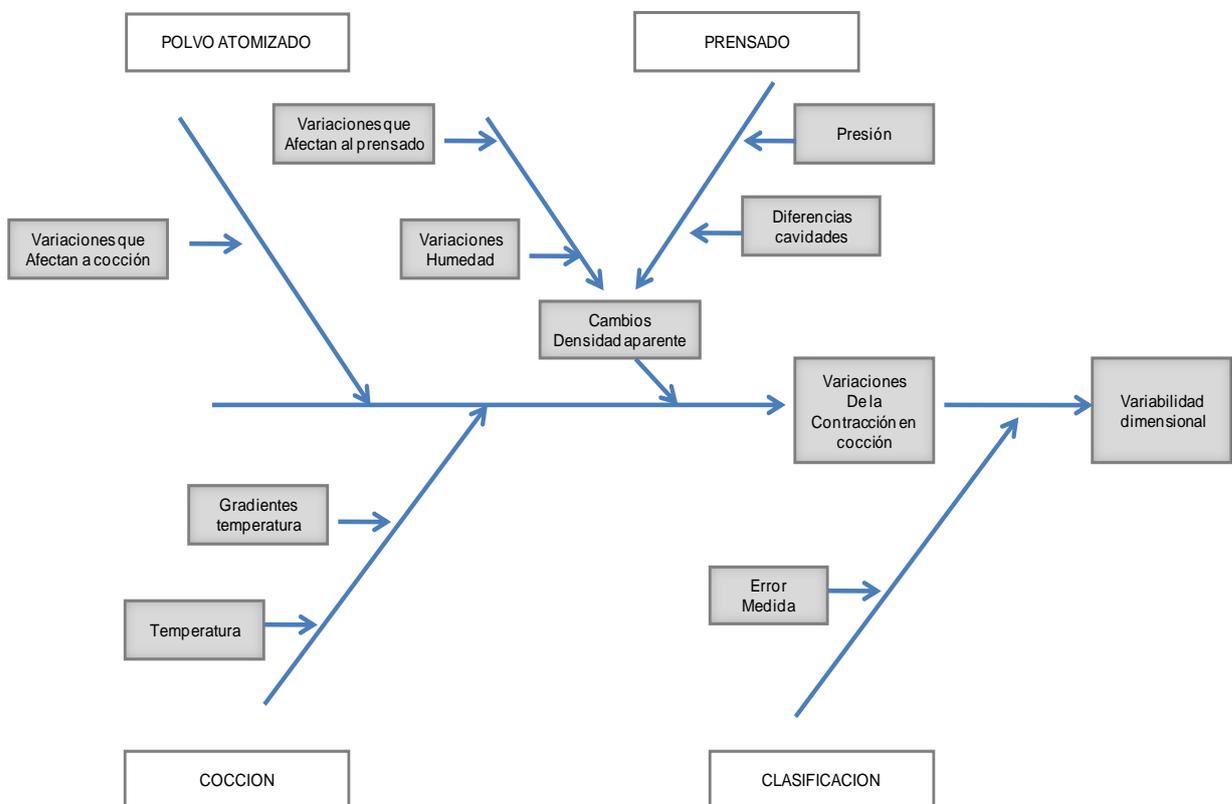


Figura 7.3: Diagrama causa efecto de los componentes del modelo de trasmisión de variabilidad

7.1.2.- MODELO DE TRASMISION DE VARIABILIDAD

La transmisión de variabilidad en el proceso corresponde al siguiente esquema:

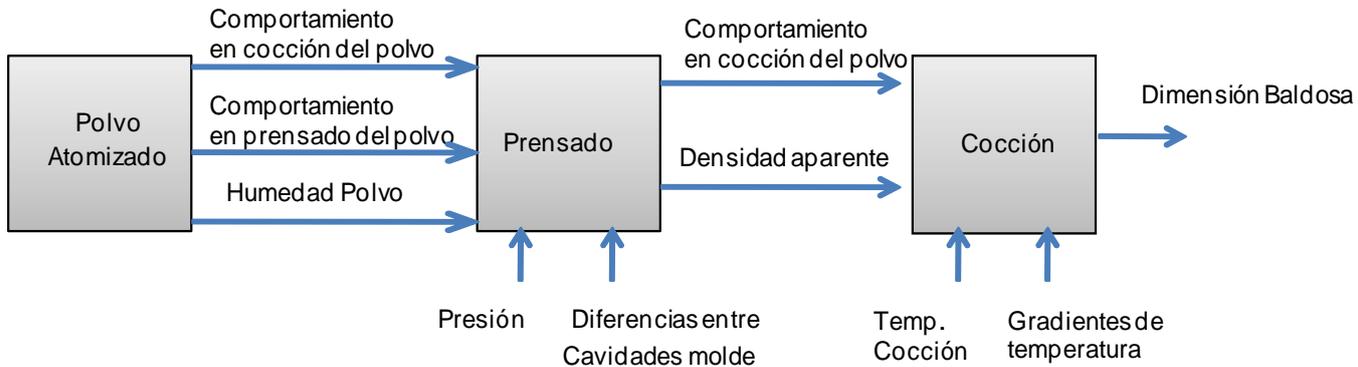


Figura 7.4: Esquema de la transmisión de variabilidad en el proceso

Este esquema, con la nomenclatura establecida en el capítulo 5 correspondería al siguiente:

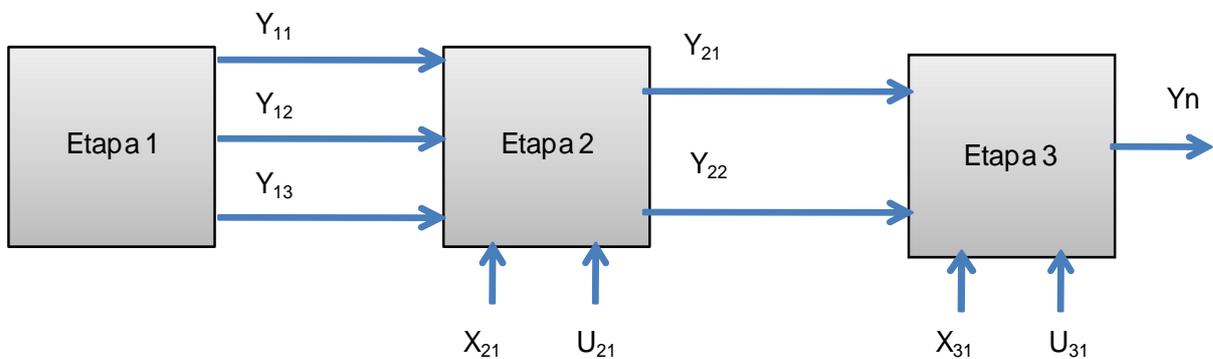


Figura 7.5: Esquema de la transmisión de variabilidad en el proceso

Donde Y son las variables de salida de las etapas que determinan las características de calidad y transmiten la variabilidad a la siguiente. X , son las variables propias de proceso y U , factores de variación que no afectando al valor medio de la característica de calidad, si tienen un efecto sobre su variabilidad y cuyo resultado no puede determinarse directamente y solo es cuantificable a partir de su medida en la respuesta.

-
- La etapa de preparación de polvo atomizado es la primera del proceso; sus características de calidad de salida son el comportamiento en prensado (densidad aparente) de la composición, el comportamiento en cocción (contracción lineal) de la composición y la humedad. Las variaciones de las dos primeras se cuantifican a partir del análisis de su efecto en la respuesta y el de la humedad a partir de los resultados de control de la variable
 - En la etapa de prensado, además de las variaciones procedentes de la etapa anterior, se generan variaciones por cambios en la presión de prensado que pueden medirse a partir de los datos de control de la variable, y la diferencia de comportamiento de las diferentes cavidades del molde, cuyo efecto se mide en la respuesta; el comportamiento en cocción de la composición no se altera y se transmite a la siguiente etapa junto a las variaciones generadas en el propio proceso de prensado que se identifican en la variable de salida “densidad aparente” que es la característica de calidad de este proceso y la que transmite la variabilidad a la siguiente etapa.
 - La etapa de cocción recibe las variaciones de densidad aparente y de comportamiento en cocción de la composición y genera variaciones por oscilaciones de la temperatura de cocción que pueden medirse a partir de los datos de control de la variable y por la aparición de gradientes de temperatura entre los diferentes canales de horno, cuyo efecto se determina a partir del análisis de la respuesta
 - A estos factores de variación, hay que añadir el error de medición de la dimensión que genera variabilidad adicional durante la etapa de clasificación y embalaje del producto acabado.

Las variaciones dimensionales de la baldosas según este modelo son consecuencia de las descritas anteriormente. La diferencia entre la variación predicha por el modelo y la observada a la salida del proceso incluye la variabilidad generada por factores no incluidos en el mismo y la del propio modelo que debe ser suficientemente baja y la tabla que describiría este modelo de transmisión de variabilidad es:

Variables		Polvo Atomizado			Prensado				Cocción	
		H	ClComp	DaComp	D. Ap		Cl Co		Di	
Ref.	σ^2	Comp. Varianza	Comp. Varianza	Comp. varianza	Coef	Comp. varianza	Coef	Comp. varianza	Coef	Comp. varianza
H	σ^2_H	σ^2_H			$\beta^2_{Da,H}$	$\beta^2_{Da,H} \sigma^2_H$			$\beta^2_{Di,H}$	$\beta^2_{Di,H} \sigma^2_H$
P	σ^2_P				$\beta^2_{Da,P}$	$\beta^2_{Da,P} \sigma^2_P$			$\beta^2_{Di,P}$	$\beta^2_{Di,P} \sigma^2_P$
T	σ^2_T								$\beta^2_{Di,T}$	$\beta^2_{Di,T} \sigma^2_T$
Da.Comp	σ^2_{DaComp}			σ^2_{DaComp}	1	$\sigma^2_{Da,Comp}$			$\gamma^2_{Di,Da}$	$\gamma^2_{Di,Da} \sigma^2_{DaComp}$
Cl.Comp	σ^2_{ClComp}		σ^2_{ClComp}				1	σ^2_{ClCo}	1	σ^2_{ClCo}
cav	σ^2_{Cav}				1	σ^2_{Cav}			$\gamma^2_{Di,Da}$	$\gamma^2_{Di,Da} \sigma^2_{Cav}$
Grad	σ^2_{Grad}								1	σ^2_{Gra}
Err Da	$\sigma^2_{\epsilon Da}$				1	$\sigma^2_{\epsilon Da}$				
Err Di	$\sigma^2_{\epsilon Di}$								1	$\sigma^2_{\epsilon Di}$

Tabla 7.2 Modelo de transmisión de variabilidad

Nomenclatura y detalle:

La columna “variables” incluye todos los factores de variación que se han incluido en el modelo así como sus varianzas medidas directamente o mediante su efecto en la respuesta además de la varianza de los errores de medición.

La columna “Polvo Atomizado” se subdivide en tres columnas que definen las tres características de calidad de salida: variaciones de densidad aparente de la composición “*Da.Comp*”, variaciones de la contracción lineal de la composición “*Cl.Comp*” y variaciones de humedad “*H*”; en este caso los coeficientes que relacionan la variación estas características de calidad con la de las variables valen 1 ya que la característica de calidad la determina el valor propio de la variable.

La columna “Prensado” se subdivide en dos columnas que definen las dos características de calidad de salida de esta etapa: “*Cl.Comp*” que corresponde a las variaciones de comportamiento en cocción de la composición y que no cambia en esta etapa ya que el proceso de prensado no altera el comportamiento de la composición y la columna “*D.Ap*” que corresponde a la variable de salida de la etapa de prensado densidad aparente. Los coeficientes correspondientes en esta columna son los que relacionan la densidad aparente con las variables de prensado.

En la última etapa, la variable es la dimensión “ D_i ”, que es la característica de calidad cuya variabilidad se desea modelar y optimizar, los coeficientes incluidos en la tabla son los que relacionan la dimensión con cada uno de los factores de variación:

<i>Factor de variación</i>	<i>Detalle</i>
D_i	Dimensión de la baldosa
H	Humedad del polvo atomizado
P	Presión de prensado
T	Temperatura de cocción
$Da.Comp$	Variaciones de comportamiento (Densidad aparente) de la composición
$Cl.Comp$	Variaciones de Contracción lineal de la composición.
Cav	Diferencia densidad ap. de diferentes cavidades de prensa
$Grad$	“Gradientes”: diferencia dimensional entre canales de horno.
$Err Da$	Error de medida de la densidad aparente
$Err Di$	Error de medida de la dimensión
<i>Varianza</i>	<i>Detalle</i>
σ^2_H	Varianza de la humedad
σ^2_P	Varianza de la presión
σ^2_T	Varianza de Temperatura de cocción
$\sigma^2_{Da.Comp}$	Varianza de las variaciones de d. aparente de la composición
$\sigma^2_{Cl.Comp}$	Varianza correspondiente a las variaciones dimensionales de la composición.
σ^2_{Cav}	Varianza correspondiente a la diferencia entre densidad aparente de diferentes cavidades de la prensa
σ^2_{Grad}	Varianza correspondiente a la diferencia dimensional entre distintos canales de horno.
$\sigma^2_{\varepsilon Da}$	Varianza del error de medida de la densidad aparente
$\sigma^2_{\varepsilon Di}$	Varianza del error de medida de la dimensión

Tabla 7.3 Nomenclatura

Los coeficientes que relacionan la densidad aparente con la diferencia de densidad aparente entre cavidades “Cav” y las variaciones de comportamiento en prensado de la composición “DaCo” valen 1 ya que en ambos casos la variabilidad se mide sobre su efecto en la respuesta. Los coeficientes que relacionan la humedad y presión con la densidad aparente son:

<i>Coeficiente</i>	<i>Detalle</i>
$\beta_{Da,H}$	Coeficiente que relaciona la densidad aparente con la humedad
$\beta_{Da,P}$	Coeficiente que relaciona la densidad aparente con la presión

Los componentes de varianza de esta columna deben explicar el resultado de varianza de la densidad aparente σ_{Dap}^2 medida en el proceso y establecen el modelo de composición de varianzas de la etapa de prensado:

$$\sigma_{Dap}^2 = \beta_{Da,H}^2 \sigma_H^2 + \beta_{Da,P}^2 \sigma_P^2 + \sigma_{DaComp}^2 + \sigma_{Cav}^2 + \sigma_{\varepsilon Da}^2 + \sigma_{\varepsilon}^2 \quad \text{Ec 7.1}$$

Donde $\sigma_{\varepsilon Da}^2$ y σ_{ε}^2 son las varianzas del sistema de medida de densidad aparente y el error del propio modelo

La columna Cocción detalla todos los coeficientes que relacionan la dimensión de la pieza con los factores identificados y todos los componentes de varianza de la etapa de cocción.

<i>Coeficiente</i>	<i>Detalle</i>
$\beta_{Di, Da}$	Coeficiente que relaciona Dimensión con la densidad aparente
$\beta_{Di, H}$	Coeficiente que relaciona la Dimensión con la Humedad
$\beta_{Di, P}$	Coeficiente que relaciona la Dimensión con la Presión
$\beta_{Di, T}$	Coeficiente que relaciona la Dimensión con la temperatura

Al igual que en el caso anterior, los coeficientes que relacionan los la variación dimensional por gradientes en el horno “Grad” y la generada por variaciones de la composición “CIComp” valen 1 ya que la su variabilidad se mide directamente sobre el resultado de dimensión.

El modelo de composición de varianzas de la totalidad del proceso que debe predecir y explicar la varianza dimensional σ_{Di}^2 a partir de la de las diferentes variables del proceso es:

$$\sigma_{Di}^2 = \beta_{DiH}^2 \sigma_H^2 + \beta_{DiP}^2 \sigma_P^2 + \beta_{DiT}^2 \sigma_T^2 + \beta_{Di, Da}^2 \sigma_{DaComp}^2 + \beta_{Di, Da}^2 \sigma_{Cav}^2 + \sigma_{DiComp}^2 + \sigma_{Grad}^2 + \sigma_{\varepsilon Di}^2 + \sigma_{\varepsilon}^2 \quad \text{Ec 7.2}$$

7.2.- ESTIMACION DE LOS COMPONENTES DEL MODELO

7.2.1.- TOMA DE MUESTRA Y MEDICION

El proceso se ha monitorizado durante la fabricación de un lote representativo de la producción habitual del proceso (24 h) simultaneando la toma de muestras y datos de las diferentes variables de proceso para asegurar la trazabilidad del estudio. La medición de las diferentes variables de proceso se ha realizado según los siguientes métodos:

Características de la composición

Se han tomado muestras de polvo atomizado alimentado al proceso de prensado cada 1,5 horas, sobre las mismas se caracteriza el comportamiento de la composición en los procesos de prensado y cocción:

- Comportamiento en prensado: Las muestras se han preparado para el prensado siguiendo el procedimiento P-4 de conformado de probetas para prensado descrito en el manual para el control de la calidad de materias primas arcillosas (ITC 1998), determinando previamente su humedad inicial determinada por secado en estufa según el procedimiento E-5 del citado manual e igualando posteriormente sus humedades hasta un valor de 5,5 % bien mediante el secado en estufa de las muestras con valores de humedad superior o mediante humectación manual para las muestras con valores de humedad inferiores. Las muestras se han prensado posteriormente a presión constante de 300 Kg/cm² y sobre las mismas, tras secado en estufa hasta peso constante se ha determinado la densidad aparente por inmersión en mercurio siguiendo el procedimiento E-9B descrito en el mismo manual.

- Comportamiento en cocción: Las muestras obtenidas en el proceso anterior se han cocido en condiciones equivalentes a las del proceso industrial siguiendo el procedimiento descrito para la determinación de la contracción de cocción E-9 del mismo manual.

Humedad del polvo atomizado:

Para el seguimiento de la humedad del polvo atomizado se han tomado cada hora dos muestras de tierra en la tolva de alimentación a la prensa que se han guardado en recipientes herméticos para su posterior medida de Humedad. La humedad del polvo atomizado se determina por diferencia de peso tras secado en estufa a 110 ° C hasta peso constante tal y como describe el procedimiento E-5 del manual citado.

Presión:

Se ha tomado lectura en el momento de la toma de muestra de polvo del valor real de presión específica registrada por el sistema de control de la máquina.

Densidad aparente de las piezas industriales.:

Las piezas prensadas se secan en estufa hasta peso constante y posteriormente se determina la densidad aparente de cada pieza en un equipo industrial de medida por inmersión en mercurio que, para el cálculo del valor promedio de densidad aparente de cada pieza separa la misma en 9 trozos y sobre cada uno de los cuales se realiza la determinación de la densidad aparente siguiendo el procedimiento E-8B del manual.

Temperatura:

El valor de temperatura registrado en el horno corresponde al determinado por el sensor piro métrica de lectura de temperatura máxima ubicada en la zona central del mismo.

Dimensión de la pieza cocida:

La dimensión de cada pieza se determina midiendo para cada baldosa la dimensión de sus cuatro lados y tomando el promedio.

Todos los equipos de medida utilizados están sujetos al plan de calibración interno de la empresa con verificaciones periódicas y con referencia a patrones con trazabilidad.

7.2.2 - MODELOS DE RELACION ENTRE VARIABLES

Para la determinación de los diferentes coeficientes que relacionan las variables de proceso se ha recurrido a la experimentación industrial; se considera a priori que en los rangos muy próximos a las condiciones de operación los modelos de relación lineales son suficientemente explicativos, hipótesis que se aceptará si el ajuste del modelo estimado mediante un ANOVA es suficientemente bueno y el error final del modelo es bajo.

Estimación del modelo de relación entre las variables de prensado

En el caso de la operación de prensado, el modelo se ha obtenido a partir de un experimento combinado con variaciones de presión de $\pm 10\text{Kg/cm}^2$ y variaciones de humedad de $\pm 0,2\%$. El resultado obtenido ofrece la relación

$$D.ap = 1,63 + 28,14 \times 10^{-3}H + 0,43 \times 10^{-3}P + \varepsilon \quad \text{Ec 7.3}$$

El modelo se ajusta muy bien, tal y como puede comprobarse en la tabla de ANOVA

	Grados de libertad	Suma de cuadrados	Promedio de los cuadrados	F	nivel de significación p
Regresión	2	0,0104188	0,00520941	1754	0,0000
Error	27	0,00008014	0,00000296		
Total	29	0,010499			

Tabla 7.4 Análisis de varianza del modelo

Este ANOVA nos permite además estimar la varianza del error del modelo a partir del cuadrado medio del error, que en este caso vale:

$$\sigma_{\varepsilon}^2 = 2,96 \times 10^{-6}$$

Estimación del modelo de relación entre las variables de cocción

En el caso de la operación de cocción, el modelo se ha obtenido utilizando las piezas procesadas en el ajuste anterior tras medir las densidades aparentes de las mismas y provocando variaciones en cocción de ± 5 °C sobre la temperatura máxima; el modelo obtenido es

$$D_i = 288,27 + 47,23 D.ap - 4,02 \times 10^{-2} T + \varepsilon \quad \text{Ec 7.4}$$

El modelo se ajusta muy bien en la zona de operación como se puede comprobar en la tabla ANOVA del modelo

	Grados de libertad	Suma de cuadrados	Promedio de los cuadrados	F	nivel de significación p
Regresión	2	12,5072	6,25358	619,28	4.02 6E-15
Error	15	0,151472	0,010098		
Total	17	12,6586			

Tabla 7.5 Análisis de varianza del modelo

El ANOVA nos permite además estimar la varianza del error del modelo a partir del cuadrado medio del error, que en este caso vale:

$$\sigma_{\varepsilon}^2 = 1,00 \times 10^{-2}$$

El modelo completo que relaciona la dimensión con todas las variables es:

$$D_i = 288,27 + (47,23 * (1,63 + 28,14 \times 10^{-3} H + 0,43 \times 10^{-3} P)) - 4,02 \times 10^{-2} T + \varepsilon \quad \text{Ec. 7.5}$$

Trasladados estos valores a la nomenclatura descrita en la tabla general del modelo de trasmisión de varianzas resulta:

<i>Coficiente</i>	<i>Detalle</i>	<i>valor</i>
$\gamma_{Di, Da}$	Coeficiente que relaciona la Dimensión con la densidad aparente	47,23
$\beta_{Di, H}$	Coeficiente que relaciona la Dimensión con la Humedad	1,33
$\beta_{Di, P}$	Coeficiente que relaciona la Dimensión con la Presión	$2,03 \times 10^{-2}$
$\beta_{Di, T}$	Coeficiente que relaciona la Dimensión con la temperatura	$4,02 \times 10^{-2}$
$\beta_{Da, H}$	Coeficiente que relaciona la densidad aparente con la humedad	$28,14 \times 10^{-3}$
$\beta_{Da, P}$	Coeficiente que relaciona la densidad aparente con la presión	$0,43 \times 10^{-3}$

Tabla 7.6 Coeficientes del modelo de trasmisión de variabilidad

7.2.3.- ANALISIS DE LOS RESULTADOS DE LA CARACTERISTICA DE CALIDAD

Para conocer el resultado del proceso durante el periodo analizado y poder estimar su variabilidad en “estado de control”, confirmando la hipótesis de normalidad y evaluando su capacidad real y % de defectuosas, se ha recurrido a un análisis estadístico de los datos obtenidos durante el periodo en estudio (24h) que corresponden a un lote de producción típico; periodo en el que no ha habido cambios de producto o diseño que pudieran ofrecer datos sesgado.

El muestreo de material se ha realizado a la salida del horno tomando cada hora y al azar cinco piezas identificando el canal del horno correspondiente a cada una de ellas, las piezas se midieron según el procedimiento descrito. El análisis estadístico se ha realizado utilizando el software “*statgraphics*”

7.2.3.1 Análisis de los datos mediante gráficos de control.

Los siguientes gráficos de representan los valores de dimensión media y rango obtenidos durante el seguimiento de la dimensión de las baldosas. Los límites de control estadísticos para los gráficos se han determinado con el criterio convencional $\pm 3\sigma/\sqrt{n}$

La nomenclatura utilizada en estos gráficos corresponde:

UCL = límite superior de control estadístico

CTR = Promedio del proceso

LCL = Límite inferior de control estadístico.

Gráfico X-bar

Estudio Inicial

Número de subgrupos = 24

Tamaño del Subgrupo = 5,0

0 subgrupos excluidos

UCL +3,0 sigma = 331,91 mm

Línea central = 331,60 mm

LCL: -3,0 sigma = 331,28

Se han detectado 2 valores fuera de los límites estadísticos calculados para la dimensión media..

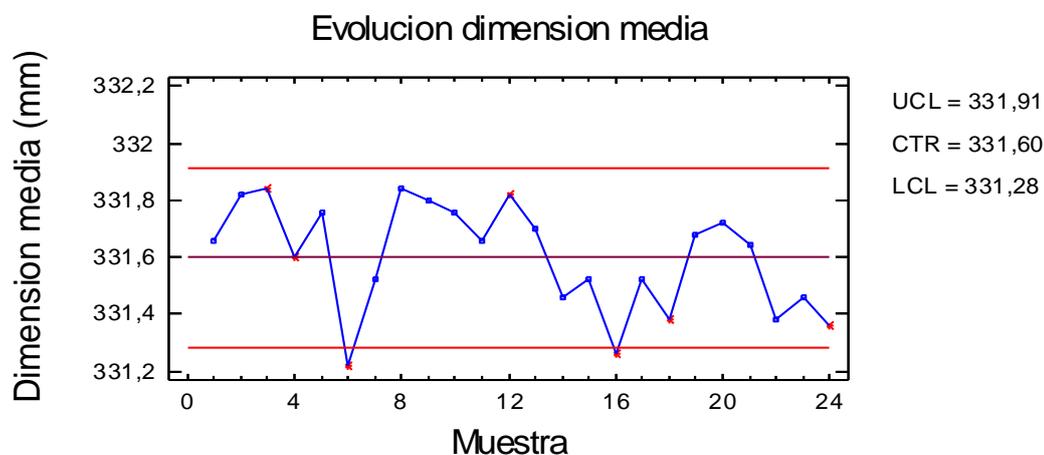


Figura 7.6: Grafico de control de medias de la variable “dimensión de la baldosa”

Gráfico de Rango

UCL: $+3,0 \text{ sigma} = 1,15 \text{ mm}$

Línea central = $0,55 \text{ mm}$

LCL: $-3,0 \text{ sigma} = 0,0 \text{ mm}$

Se ha detectado un valor fuera del límite estadístico superior calculado para el rango.



Figura 7.7: Gráfico de control de rangos de la variable “dimensión de la baldosa”

Tanto el gráfico de medias como el de rango, presentan valores fuera de los límites estadísticos; analizando los registros de alimentación del horno se ha comprobado que corresponden a causas especiales determinadas (interrupciones en el flujo de entrada del material) ; estos deben excluirse del estudio para estimar la variabilidad real en “estado de control” y una vez eliminados recalcular de nuevo los límites:

Gráfico X-bar

Estudio con datos excluidos

Número de subgrupos finales = 21

3 subgrupos excluidos

UCL: $+3,0 \text{ sigma} = 331,91 \text{ mm}$

Línea central = $331,62 \text{ mm}$

LCL: $-3,0 \text{ sigma} = 331,34 \text{ mm}$

0 fuera de límites

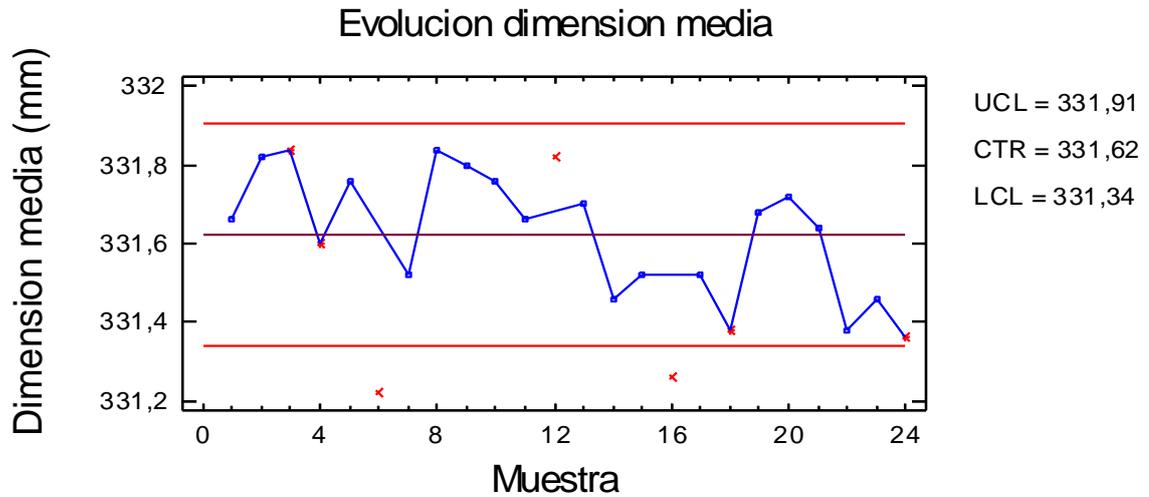


Figura 7.8: Grafico de control de medias de la variable “dimensión de la baldosa” con los valores excluidos

Gráfico de Rango

UCL: $+3,0 \text{ sigma} = 1,05 \text{ mm}$

Línea central = $0,50 \text{ mm}$

LCL: $-3,0 \text{ sigma} = 0,0 \text{ mm}$

0 fuera de límites

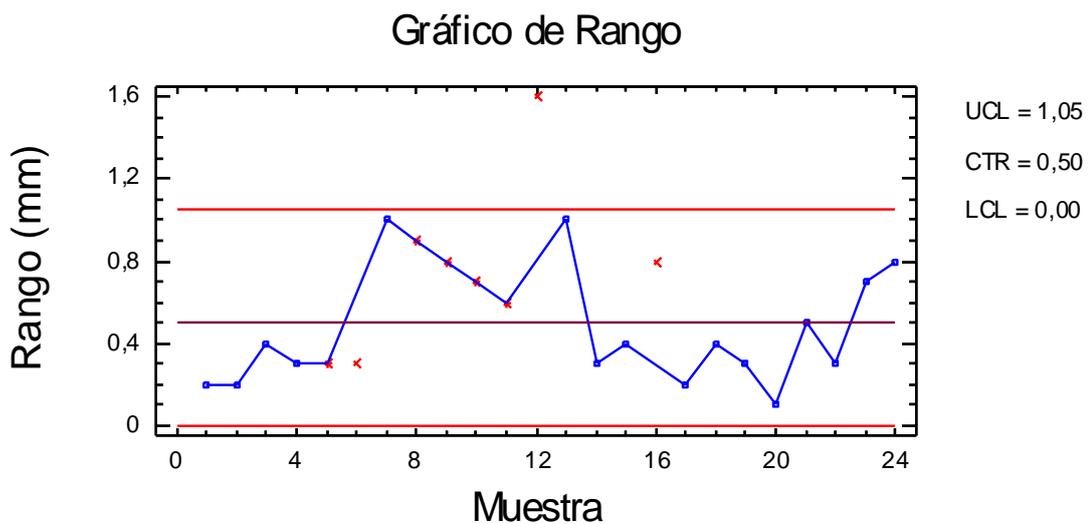


Figura 7.9: Grafico de control de rangos de la variable “dimensión de la baldosa” con valores excluidos.

No aparece ningun punto fuera de los límites estadísticos por lo que podemos considerar los valores resultantes como representativos del proceso “en estado de control. Los valores estimados son:

$$\hat{\sigma}_{D_i} = 0,276 \text{ mm}$$

$$\hat{\sigma}_{D_i}^2 = 6,62 \times 10^{-2} \text{ mm}^2$$

$$\text{Variabilidad (Intervalo } \pm 3\hat{\sigma}_{D_i}) = 1,66 \text{ mm}$$

Esta variabilidad es la medida, e incorpora la generada por el sistema de medición pero es la que determina la separación del producto en subgrupos de de diferentes calibres. El intervalo (1,66 mm) resulta muy superior a las especificaciones de 1 mm establecidas para 1 “calibre”, lo que determina un proceso que produce sistemáticamente piezas fuera de las especificaciones. Estas estimaciones se utilizarán como base para estimar los porcentajes de defectuosas obtenidos en el proceso y para validar la predicción del modelo de transmisión de variabilidad.

7.2.3.2 Verificación de la hipótesis de normalidad de los datos

Sobre los valores resultantes una vez excluidos los detectados por los gráficos de control se verifica la hipótesis de normalidad de distribución de valores dimensionales de la población de piezas obtenida. Se representan a continuación los histogramas y gráficos de distribución de la totalidad de los datos

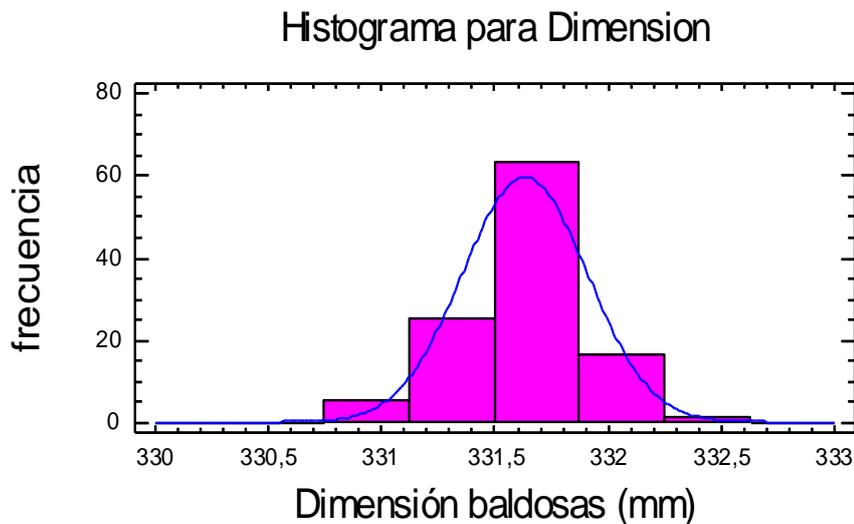


Figura 7.10: Histograma de la distribución de datos

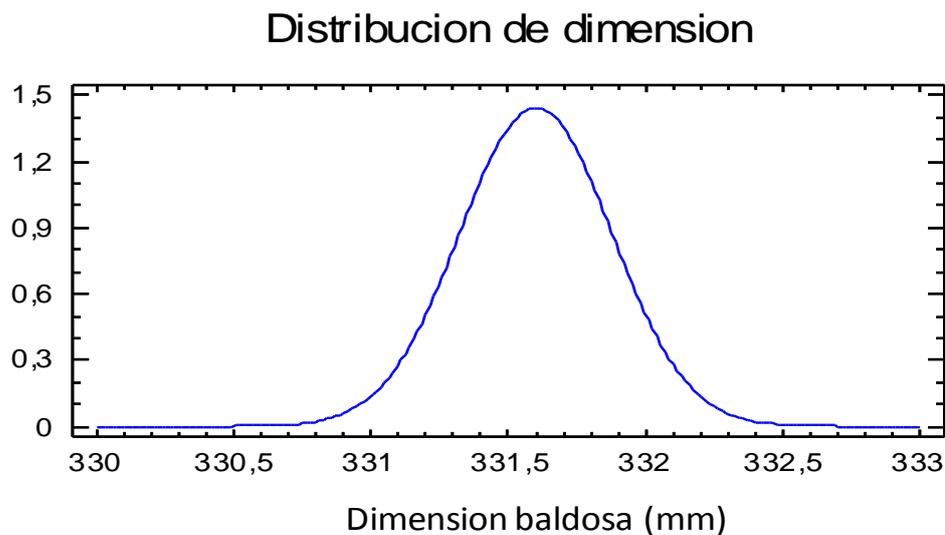


Figura 7.11: Modelización de la distribución de dimensión de baldosas según una distribución normal.

Resumen Estadístico

Frecuencia = 110

Media = 331,63 mm

Desviación típica = 0,276 mm

Mínimo = 330,94 mm

Máximo = 332,56 mm

Rango = 1,62 mm

Asimetría tipi. = -0,318019

Curtosis tipificada = 1,48063

El resumen estadístico para Dimensión incluye las medidas de tendencia central, medidas de variabilidad, y medidas de forma; de particular interés están los coeficientes de asimetría y curtosis estandarizados que pueden utilizarse para determinar si la muestra procede de una distribución normal. Los valores de estos estadísticos fuera del rango de -2 a +2 indican alejamiento significativo de normalidad que tendería a invalidar cualquier test estadístico con respecto a la desviación normal. En este caso, el valor del coeficiente de asimetría estandarizado está dentro del rango esperado para los datos de una distribución normal y el valor del coeficiente de curtosis estandarizado está también dentro del rango esperado para los datos de una distribución normal.

Contraste de hipótesis de normalidad

La realización del test del test de bondad de ajuste según el procedimiento descrito en el capítulo 3 permite confirmar la hipótesis de normalidad de la distribución de datos:

Contraste Chi-cuadrado

Límite Inferior	Límite Superior	Frecuencia Observada	Frecuencia Esperada	Chi-cuadrado
menor o igual 331,31	331,31	15	13,75	0,11
331,31	331,44	11	13,75	0,55
331,44	331,54	11	13,75	0,55
331,54	331,63	14	13,75	0,00
331,63	331,72	15	13,75	0,11
331,72	331,81	16	13,75	0,37
331,81	331,94	17	13,75	0,77
mayor 331,94	331,94	11	13,75	0,55

Chi-cuadrado = 3,02 con 5 g.l. P-Valor = 0,697193

$$\chi_0^2 = \sum \frac{(Frec. observada - Frec Esperada)^2}{Frec. esperada} = 3,02$$

El test chi-cuadrado divide el rango de dimensión en intervalos no solapados y compara el numero de observaciones en cada clase con el número esperado basado en la distribución ajustada. Dado que el valor de χ_0^2 obtenido es menor que el valor correspondiente a la distribución $\chi_{0,05,5}^2 = 11,07$, no podemos rechazar que el resultado proceda de una distribución normal con un nivel de confianza de al menos un 95%.

7.2.3.3. Calculo de índices de capacidad

El índice de capacidad del proceso en su conjunto incluyendo la variabilidad generada por el sistema de medición se cuantifica a partir de la desviación típica dimensional estimada de $\hat{\sigma}_D = 0,276$ mm El cálculo de los índices de capacidad descritos en el Cap 3 ofrece los siguientes resultados:

$$C_p = \frac{USL - LSL}{6\sigma}$$

$$\hat{C}_{pm} = \frac{\hat{C}_p}{\sqrt{1+V^2}} \quad V = \frac{\bar{x}-T}{s}$$

En este caso el intervalo establecido por las especificaciones es el correspondiente a "1 calibre" = 1,00 mm que en este caso está definido por el intervalo [331,00 mm – 332,00 mm] . Los valores correspondientes a los índices son:

$$C_p = 0,60$$

$$C_{pm} = 0,56$$

Un valor del índice Cpm inferior a Cp identifica un proceso descentrado, en este caso, la dimensión media obtenida debería corresponder con el valor central del "calibre" que corresponde a 331,5 mm pero el proceso ha estado trabajando ligeramente descentrado con un promedio de 331,60 mm. Ambos índices de capacidad dan valores inferiores a 1, lo que identifica a un proceso que está constantemente generando producto fuera de las especificaciones establecidas para 1 calibre. Los valores están muy lejos de las recomendaciones habituales que exigen valores superiores a 1,33.

7.2.3.4 Estimación del % de piezas fuera de especificaciones

La estimación de los % de unidades fuera de calibre durante el lote se obtiene utilizando el modelo de distribución de datos normal estimando los valores acumulados a cada uno de los intervalos dimensionales:

<i>Dimensión</i>	<i>Porcentaje de material</i>
Menor 330 mm	1,75x10 ⁻⁷ %
Menor 331 mm	1,12 %
Menor 332 mm	90,99 %
Menor 333 mm	99,999 %

<i>Dimensión</i>	<i>Porcentaje de material</i>
Nominal (331 – 332 mm)	89,87 %
Calibre superior e inferior (330 –331) y (332 –333mm)	10,13 %
Fuera de calibre	3,47x10 ⁻⁵ %

Tabla 7.5 porcentaje de material en los diferentes rangos dimensionales

7.2.4.- ESTIMACION DE LA VARIANZA DE LOS COMPONENTES DEL MODELO

Los componentes del modelo son los detallados en la tabla 7.2, la varianza de cada uno de ellos se estima:

7.2.4.1 $\sigma^2_{Da,Comp}$: variaciones de comportamiento en prensado (Densidad aparente) de la composición

El efecto de los cambios de las características fisicoquímicas que puedan haberse producido en la composición y que afecten el proceso de prensado durante el periodo analizado se estima mediante un análisis de su efecto en la respuesta; en este caso, la densidad aparente de la pieza prensada. Para ello, se han tomado 3 muestras de polvo atomizado cada 1,5 horas durante el periodo en estudio, estas muestras se han llevado a las mismas condiciones de humedad y se han sometido a la misma presión de prensado determinando la densidad aparente obtenida de modo que las diferencias en el valor de densidad aparente obtenido solo puedan deberse a diferencias en el comportamiento de la composición. De cada muestra se han realizado tres ensayos para determinar el error; los datos obtenidos se estudian mediante un análisis de

varianza (ANOVA) que permite estimar la significación de las diferencias de resultados entre muestras:

Fuente variación	Grados libertad	Suma de cuadrados	Promedio de los cuadrados	F	nivel de significación p
Composición	14	$2,07 \times 10^{-5}$	$1,48 \times 10^{-6}$	18,17	0,00
Error	30	$2,45 \times 10^{-6}$	$8,16 \times 10^{-8}$		
Total	44	$2,32 \times 10^{-5}$			

Tabla 7.6: Análisis de varianza de las diferencias de comportamiento de la composición en prensado

El nivel de significación confirma que hay diferencias significativas entre los resultados de densidad aparente obtenidos para las diferentes muestras, dado que las muestras se han procesado en idénticas condiciones el único factor que puede generar estos cambios es la alteración de las características fisicoquímicas de la composición. La varianza $\hat{\sigma}_{DaComp}^2$ puede calcularse a partir de los valores obtenidos utilizando la formula de componentes de varianza:

$$\hat{\sigma}_{DaComp}^2 = (CM_{composición} - CM_{error})/n = (1,48 \times 10^{-6} - 8,16 \times 10^{-8})/3 = 4,67 \times 10^{-7} \text{ (gr/cc)}^2$$

En este caso el error de medición forma parte del error del ANOVA por lo que la varianza estimada para este factor de variación es la real.

7.2.4.2 “Estimación de $\sigma_{Cl.Comp}^2$: variaciones de comportamiento en cocción de la composición

Al igual que en el caso anterior, las diferencias de comportamiento de la composición en el proceso de cocción se estiman midiendo su efecto en la respuesta; para ello, las mismas muestras obtenidas en el punto anterior para estimar las influencia de la composición en las variaciones de densidad aparente se han cocido en idénticas condiciones determinando la dimensión. El valor de dimensión obtenido se ha corregido al equivalente a valores de densidad aparente constante utilizando los coeficientes del modelo de regresión de la ecuación 7.4 a fin de aislar el efecto de la

composición sobre la densidad aparente del efecto de la composición sobre el comportamiento en cocción; de cada muestra se han realizado tres repeticiones del ensayo para estimar el error. Los datos obtenidos se estudian mediante un análisis de varianza.

<i>Fuente variación</i>	<i>Grados libertad</i>	<i>Suma de cuadrados</i>	<i>Promedio de los cuadrados</i>	<i>F</i>	<i>nivel de significación p</i>
Composición	14	0,65802	0,04700	3,14	0,00
Error	30	0,44947	0,01498		
Total	44	1,10749			

Tabla 7.7: Análisis de varianza de las diferencias de comportamiento de la composición en cocción

El nivel de significación confirma que hay diferencias significativas entre los resultados de dimensión obtenidos para las diferentes muestras. Dado que las muestras se han procesado en idénticas condiciones, el único factor que puede generar estos cambios es la alteración de las características fisicoquímicas de la composición. La varianza de este factor $\hat{\sigma}_{CIComp}^2$ puede calcularse a partir de los valores obtenidos utilizando la fórmula de componentes de varianza

$$\hat{\sigma}_{CIComp}^2 = (CM_{composición} - CM_{error})/n = (0,04700 - 0,01498)/3 = 1,068 \times 10^{-2} \text{ mm}^2$$

Al igual que en el caso anterior, la varianza del error de medición forma parte del error del ANOVA.

7.2.4.3 σ^2_H : variabilidad generada por las variaciones de humedad de polvo atomizado

La estimación de la variabilidad observable en la humedad del polvo atomizado se realizó mediante el seguimiento de esta característica de calidad en el polvo que alimentaba a la prensa. Para la medida de los valores de humedad se tomaron dos muestras de material con frecuencia horaria determinando el valor mediante proceso de secado en estufa; los siguientes gráficos de representan los valores de humedad

media y rango obtenidos durante el seguimiento de la variable. Los límites de control estadísticos se han determinado con el criterio convencional $\pm 3\sigma/\sqrt{n}$

Gráfico X-bar

Estudio inicial

Número de subgrupos = 24

Tamaño del Subgrupo = 2,0

0 subgrupos excluidos

UCL: +3,0 sigma = 6,08 %

Línea central = 5,75 %

LCL: -3,0 sigma = 5,43 %

1 punto fuera de los límites estadísticos calculados

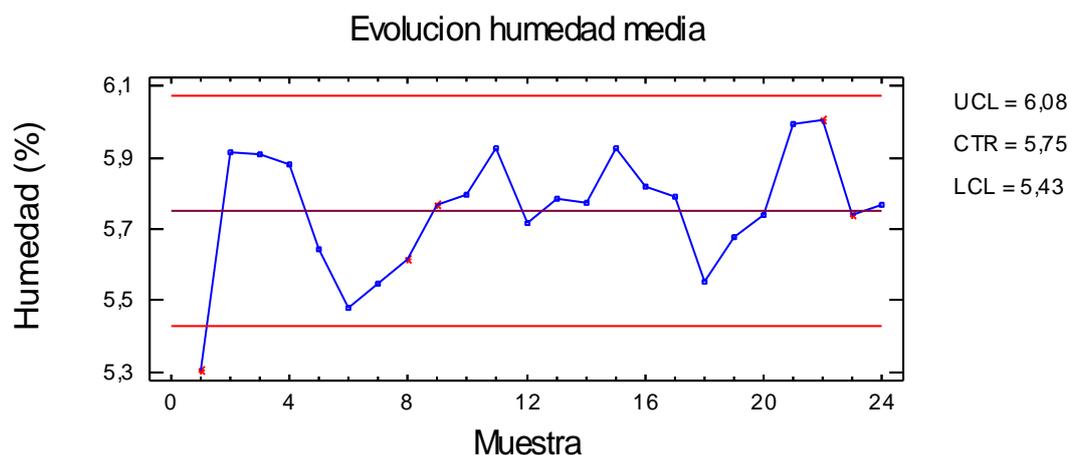


Figura 7.12: Grafico de control de la humedad media

El grafico de medias presenta un punto fuera de límites, corresponde al primer valor de humedad y es consecuencia probable del inicio de la operación, cuando la tierra alimentada a la prensa está más seca de lo habitual.

Gráfico de Rango

UCL: +3,0 sigma = 0,56 %

Línea central = 0,17 %

LCL: -3,0 sigma = 0,0

0 puntos fuera de límites

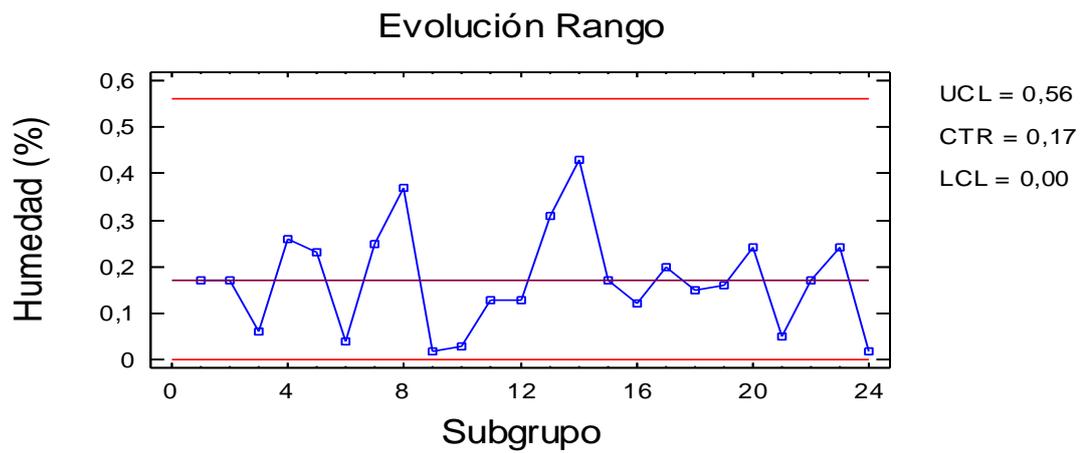


Figura 7.13: Gráfico de control de rangos de humedad

Tras excluir el primer punto del análisis se recalculan los límites estadísticos

Gráfico X-bar

Análisis con valores excluidos

Número de subgrupos = 23

Tamaño del Subgrupo = 2,0

1 subgrupos excluidos

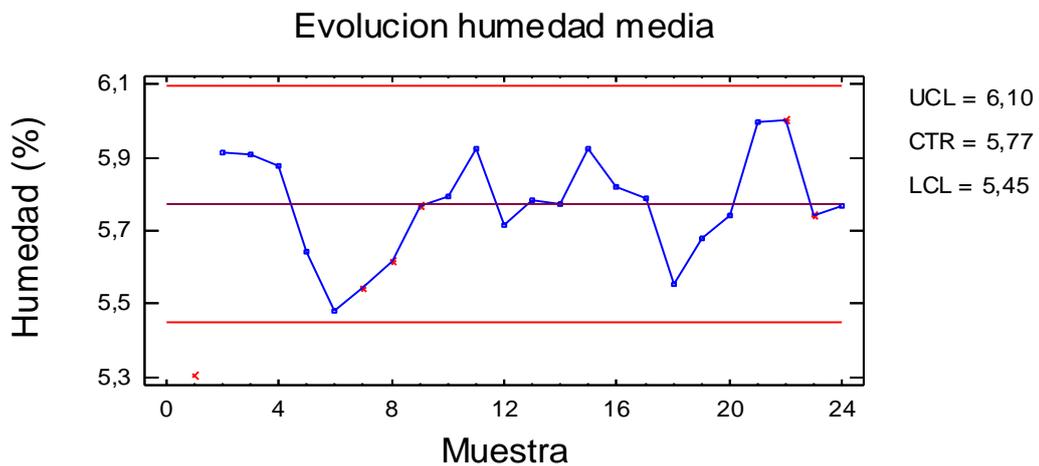


Figura 7.14: Gráfico de control de humedad media con valores excluidos

UCL: +3,0 sigma = 6,10 %

Línea central = 5,77 %

LCL: -3,0 sigma = 5,45 %

Estimaciones

Media del Proceso = 5,77 %

Desviación típica = 0,15 %

Rango Medio = 0,17 %

Intervalo de variabilidad medida $\pm 3 \hat{\sigma}_{Hm} = 0,9 \%$

Todos los puntos aparecen en este caso dentro de los límites estadísticos y se estima la desviación típica de la humedad medida $\hat{\sigma}_{Hm} = 0,15 \%$ lo que establece una varianza $\hat{\sigma}_{Hm}^2 = 2,25 \times 10^{-2}$. A este valor de varianza hay que descontarle la del error de medida de humedad; esta se ha estimado realizando repetidas mediciones de una misma muestra y estimando la varianza del resultado que resulta con un valor de $\hat{\sigma}_{\text{Error Medida H}}^2 = 4,44 \times 10^{-3}$. El intervalo real de variación de humedad una vez descontado el error de medición resulta de $\pm 3 \hat{\sigma}_H = 0,81 \%$ y La varianza final de la humedad que se incorporará al modelo de composición resulta de

$$\hat{\sigma}_H^2 = 1,806 \times 10^{-2}$$

7.2.4.4. σ_p : variabilidad generada por las variaciones de presión

El valor de presión programada en la prensa analizada ha sido constante durante todo el proceso, con un valor específico de 300 Kg/cm². Las pequeñas variaciones de presión real aplicada que generan variabilidad se han evaluado tomando lectura del valor real aplicado registrado en el manómetro de la prensa. Los valores obtenidos se han tratado con gráficos de control de valores individuales con estimación de la variabilidad y los límites estadísticos a partir del recorrido medio (MR).

Gráfico X

UCL: +3,0 sigma = 303,44 Kg/cm²

Línea central = 301,0 Kg/cm²

LCL: -3,0 sigma = 298,56 Kg/cm²

0 fuera de límites

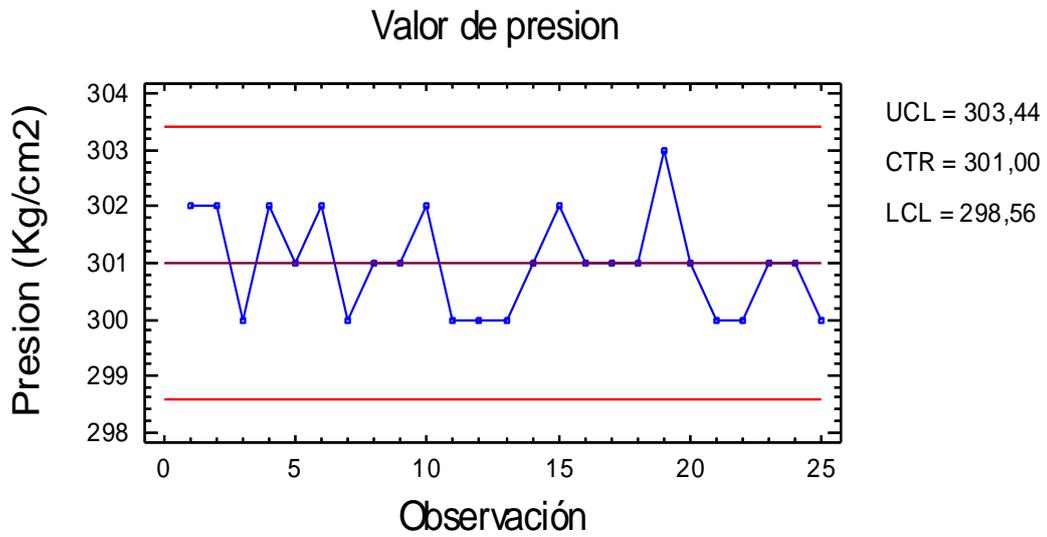


Figura 7.15: Gráfico de control de variaciones de presión

Gráfico MR

UCL: $+3,0 \text{ sigma} = 2,99 \text{ Kg/cm}^2$

Línea central = $0,92 \text{ Kg/cm}^2$

LCL: $-3,0 \text{ sigma} = 0,0$

0 fuera de límites

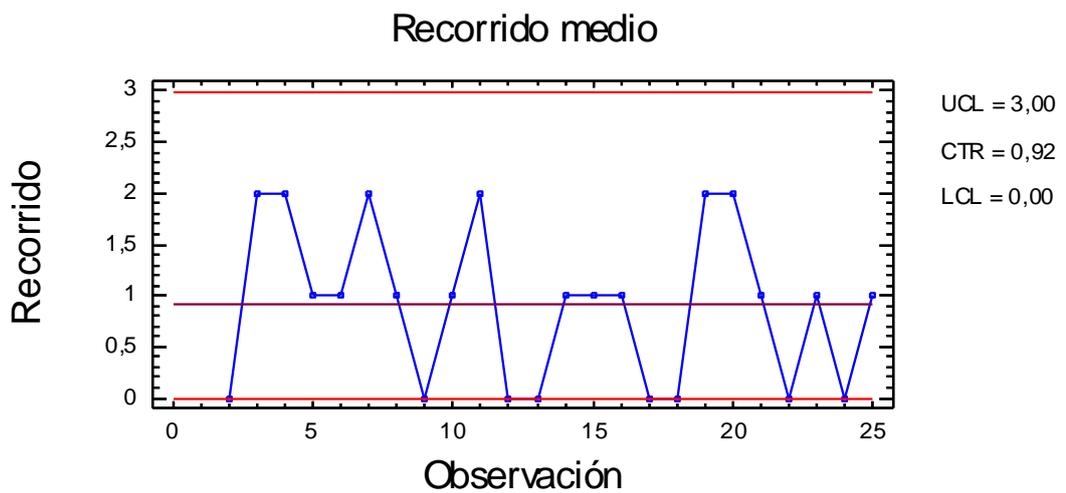


Figura 7.16: Gráfico de rango medio de presión

Estimaciones

Media del Proceso = 301,0 Kg/cm²

Desviación típica $\hat{\sigma}_{Pm} = 0,814 \text{ Kg/cm}^2$

MR (2) Medio = 0,91 Kg/cm²

Intervalo de variabilidad medida $\pm 3 \hat{\sigma}_{Pm} = 4,86 \text{ Kg/cm}^2$

En este caso no se ha detectado ningún valor de presión aplicada fuera de los límites estadísticos calculados, la estimación de desviación típica generada por la presión es de 0,814 Kg/cm² lo que establece una varianza: $\hat{\sigma}_{Pm}^2 = 0,663 \text{ (Kg/cm}^2)^2$

La variabilidad del equipo de medición supone una varianza de $2,78 \times 10^{-2} \text{ (Kg/cm}^2)^2$ que hay que descontar del valor estimado, lo que supone un intervalo de variación real $\pm 3 \hat{\sigma}_P = 4,78 \text{ Kg/cm}^2$ y una varianza de:

$$\hat{\sigma}_P^2 = 0,635 \text{ (Kg/cm}^2)^2$$

7.2.4.5 Variabilidad de densidad aparente $\sigma^2_{d.ap}$

Para la estimación de los valores de densidad aparente, se tomaron muestras de tres piezas procedentes de las tres cavidades del molde con una frecuencia horaria, determinándose el valor de la densidad aparente en seco mediante el método de inmersión en mercurio. Los siguientes gráficos representan los valores de densidad aparente media y rango obtenidos durante el seguimiento de la variable. Los límites de control estadísticos se han determinado con el criterio convencional $\pm 3\sigma/\sqrt{n}$

Gráfico X-bar

Número de subgrupos = 22

Tamaño del Subgrupo = 3,0

0 subgrupos excluidos

UCL: +3,0 sigma = 1,918 gr/cc

Línea central = 1,910 gr/cc

LCL: -3,0 sigma = 1,903 gr/cc

2 fuera de límites

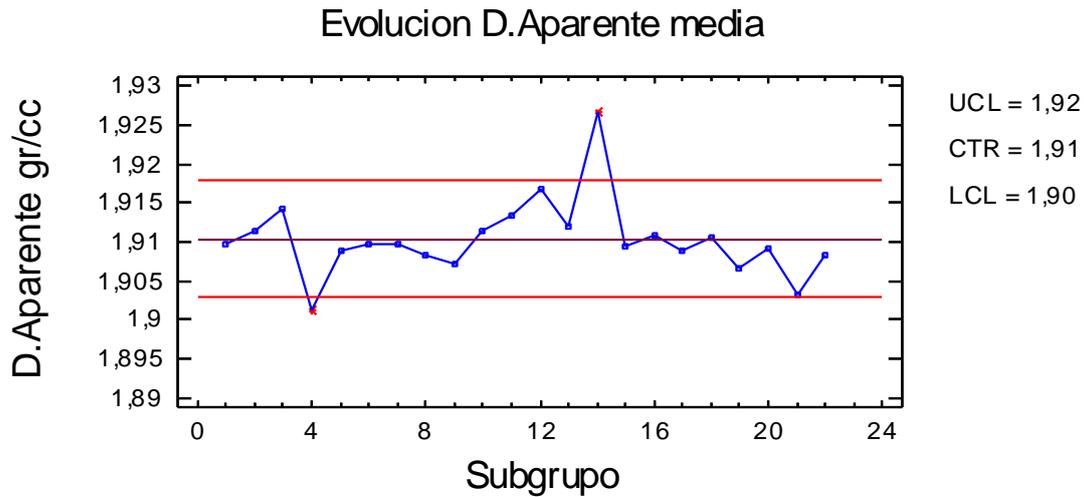


Figura 7.17: Gráfico de control de la densidad aparente media

Gráfico de Rango

UCL: $+3,0 \text{ sigma} = 0,0189 \text{ gr/cc}$

Línea central = $0,0073 \text{ gr/cc}$

LCL: $-3,0 \text{ sigma} = 0,0$

0 fuera de límites

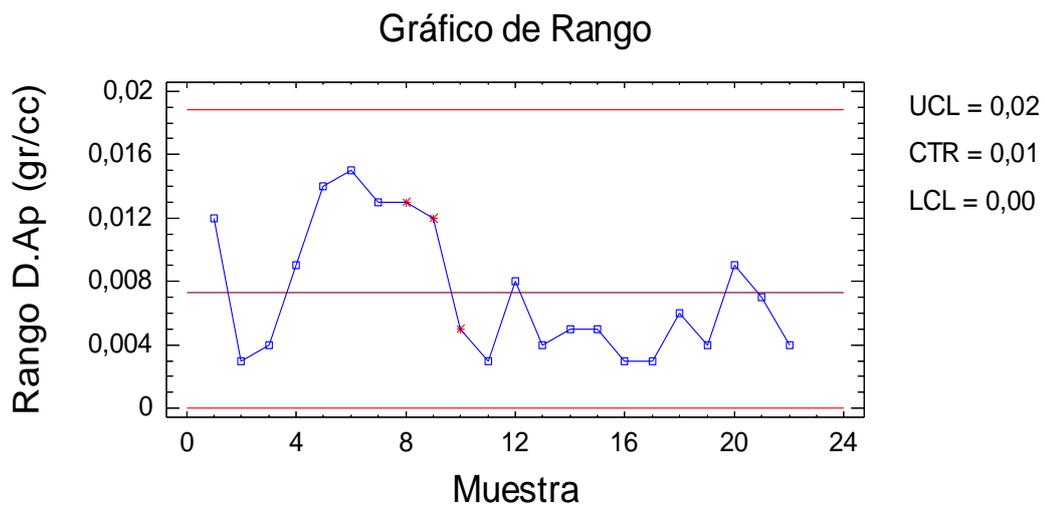


Figura 7.18: Gráfico de control del rango de densidad aparente

El gráfico de medias presenta un patrón de comportamiento aleatorio pero aparecen dos puntos fuera de los límites estadísticos. Estos valores pueden corresponder a momentos de paro del proceso y a muestras que han coincidido en un momento de reinicio de operación; debieran excluirse para una mejor estimación de la variabilidad del proceso en “estado de control”. Una vez eliminados se representan de nuevo los gráficos y calculan los nuevos límites realizando las estimaciones:

Estimaciones

Media del Proceso = 1,909 gr/cc

Desviación típica $\hat{\sigma}_{D_{apm}} = 0,0044$ gr/cc

Rango Medio = 0,0075 gr/cc

Intervalo de variabilidad medida $\pm 3 \hat{\sigma}_{D_{apm}} = 0,026$ gr/cc

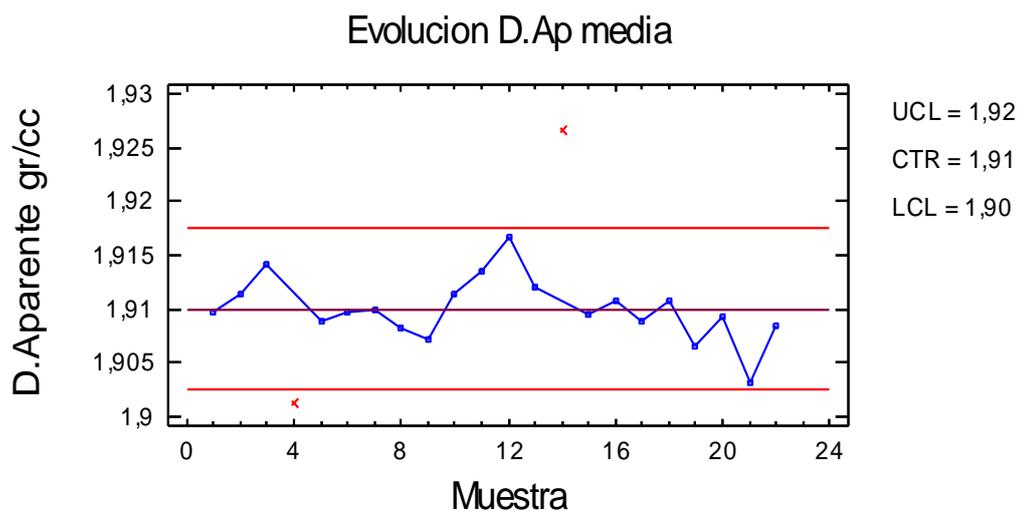


Figura 7.19: Gráfico de control de densidad aparente media con valores excluidos

La varianza estimada finalmente en la variable de salida es de $\hat{\sigma}_{D_a}^2 = 1,94 \times 10^{-5}$ (gr/cm³)²

El error de medición de la densidad aparente se ha estimado realizando repetidas medidas de la misma pieza y estimando la varianza del resultado obtenido con un valor de $\sigma_{medicion}^2 = 4,0 \times 10^{-7}$ (gr/cm³)²

7.2.4.6 σ^2_{cav} : diferencias de densidad aparente entre piezas prensadas en diferentes cavidades del molde.

La estimación de diferencias de presión aplicada a las diferentes cavidades del molde no puede estimarse directamente pero si cuantificar la significación de su efecto determinando con un ANOVA la existencia o no de diferencias significativas entre la densidad aparente de las piezas producidas en las distintas cavidades del molde. Para ello se han tomado con periodicidad horaria muestras de piezas de las tres cavidades del molde, determinando para cada una de ellas el valor de la densidad aparente tras secado de la muestra; el ANOVA de este análisis ofrece los siguientes resultados:

Cavidad 1: 20 valores 1,899 gr/cc hasta 1,916 gr/cc

Cavidad 2: 20 valores 1,900 gr/cc hasta 1,920 gr/cc

Cavidad 3: 20 valores 1,900 gr/cc hasta 1,917 gr/cc

ANÁLISIS DE VARIANZA

Fuente	Grados de libertad	Suma de cuadrados	Promedio de los cuadrados	F	nivel de significación p
Entre cavidad	2	0,0001668	0,0000834	4,28	0,0186
Dentro cavidad	57	0,0011112	0,00001947		
Total	59	0,001278			

Tabla 7.8 Análisis de varianza de las diferencias de densidad aparente entre distintas cavidades del molde.

Como el p-valor del test F es inferior a 0,05, hay diferencia estadísticamente significativa entre las medias de las tres cavidades a un nivel de confianza del 95 % y por tanto se puede afirmar que el factor “cavidad del molde” está generando una variabilidad constante y no aleatoria. El gráfico de la figura 7.20 muestra el resultado promedio de cada cavidad de la prensa y los intervalos de confianza para cada valor; dos cavidades cuyos intervalos no coincidan pueden considerarse estadísticamente diferentes.

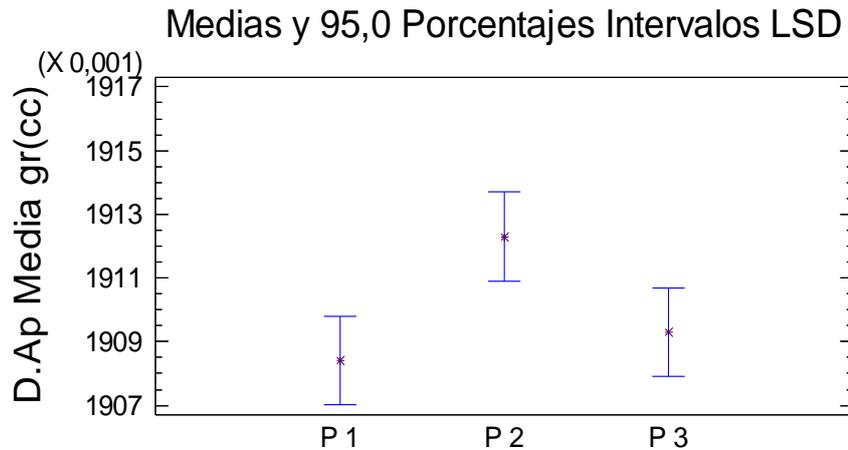


Figura 7.20: Intervalos de confianza para los valores de densidad aparente de cada cavidad.

Puede además apreciarse el efecto de la diferencia de presión real aplicada a cada cavidad del molde, observándose un valor superior de densidad aparente en el alveolo central (P-2) y menor en los laterales (P-1 y P-3); este fenómeno podría explicarse por las deformaciones mecánicas de la estructura de la prensa y molde en los momentos de aplicación de máxima presión, deformaciones que generan una aplicación de presión real menor en los laterales. La estimación de la varianza debida a las diferencias entre las diferentes cavidades la podemos calcular a partir de la tabla ANOVA aplicando la conocida fórmula para los componentes de la varianza:

$$\hat{\sigma}^2_{Cav} = (CM \text{ entre} - CM \text{ error})/n = 3,19 \times 10^{-6} \text{ (gr/cm}^3\text{)}^2$$

En este caso el error de medición de la densidad aparente está incluido en el error del ANOVA.

7.2.4.7. σ^2_T Variación de la temperatura de cocción

La variabilidad generada por la temperatura se ha obtenido monitorizando los valores de temperatura máxima registrados durante el periodo en estudio; el siguiente gráfico presenta los valores de temperatura registradas en la zona de máxima temperatura; los límites estadísticos se han calculado a partir del recorrido medio.

Gráfico X

Número de observaciones = 22

0 observaciones excluidas

UCL: +3,0 sigma = 1192,11

Línea central = 1186,79

LCL: -3,0 sigma = 1181,47

0 fuera de límites

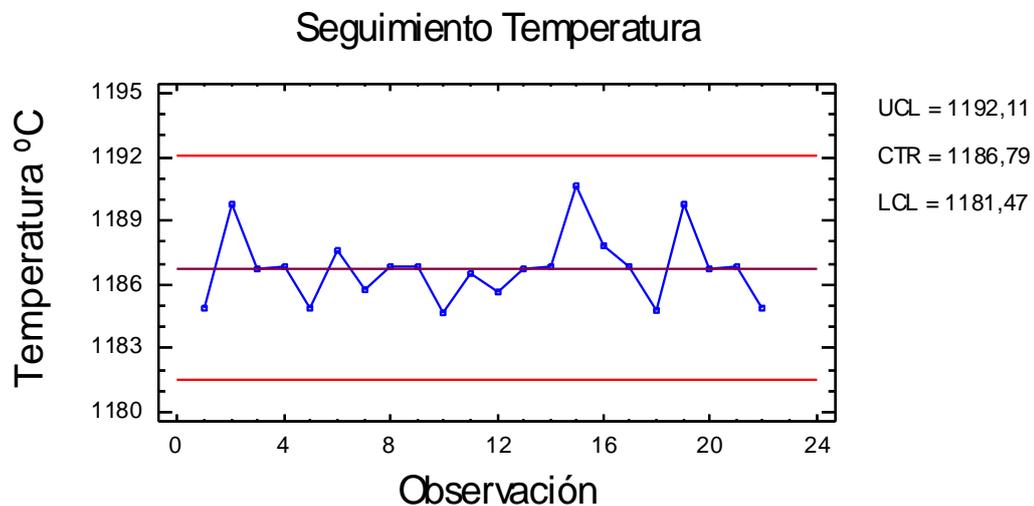


Figura 7.21: Grafico de control de variación de la temperatura máxima

No se ha detectado ningún punto fuera de los límites estadísticos calculados, es evidente que la temperatura tiene una estabilidad importante, pero en el gráfico pueden observarse tres puntos que suponen un incremento puntual; esta situación es probablemente debida a alteraciones del flujo de material alimentado al horno; fallos del sistema de entrada por obstrucciones, roturas de piezas o cualquier otra causa provocan momentáneamente pequeños huecos de material y disminuyen la masa a cocer modificando el equilibrio térmico del horno y provocando incrementos de temperatura ya que los sistemas de regulación son incapaces de mantener el valor programado en esas situaciones.

Gráfico MR(2)

UCL: +3,0 sigma = 6,53723

Línea central = 2,0

LCL: -3,0 sigma = 0,0

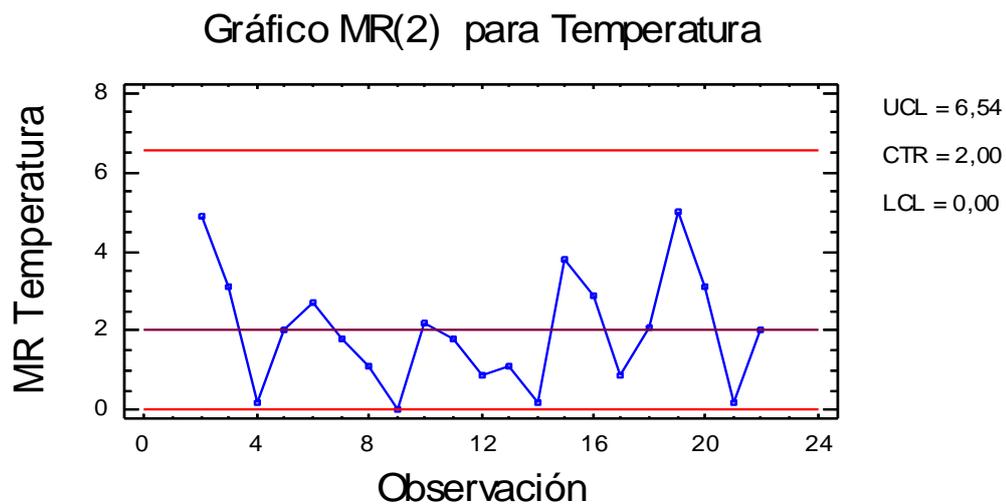


Figura 7.22: Grafico de recorrido medio de la temperatura.

Estimaciones*Media del Proceso = 1186,79 °C**Desviación típica medida $\hat{\sigma}_{Tm} = 1,77$ °C**MR (2) Medio = 2,0**Intervalo variabilidad medida ($\pm 3\hat{\sigma}_{Tm}$) = 10,60 °C*

La varianza del equipo de medida es de $2,77 \times 10^{-2}$ (°C)², valor que hay que descontar al valor de varianza estimado, obteniendo la varianza final de temperatura que se incorporará al modelo:

$$\hat{\sigma}_T^2 = 3,12 \text{ °C}^2$$

7.2.4.8. Presencia de gradientes de temperatura σ^2_{Grad}

Como se ha indicado anteriormente, la estimación de diferencias de temperatura transversalmente (Gradientes) no puede estimarse directamente pero si cuantificar la significación de su efecto con un análisis de varianza..

Para ello, se comparan las medias obtenidas a partir de los valores de dimensión de las muestras tomadas en los diferentes canales del horno durante el estudio mediante una ANOVA cuyos resultados corresponden:

<i>Fuente de variación</i>	<i>Suma de cuadrados</i>	<i>Grados de libertad</i>	<i>Cuadrado medio</i>	F_0	<i>Nivel significación p</i>
Entre canales	1,30182	4	0,325455	4,90	0,0012
Dentro del canal	6,97682	105	0,0664459		
Total	8,27864	109			

Tabla 7.9. Tabla ANOVA comparando la variabilidad entre los canales del horno

Puesto que el nivel de significación es inferior a 0,05, hay diferencia estadísticamente significativa entre las medias de los cinco canales a un nivel de confianza del 95 % y por tanto se puede afirmar que el factor “gradientes de temperatura” está generando una variabilidad constante y no aleatoria.

El gráfico de la figura 7.23 muestra el resultado promedio de cada canal del horno y los intervalos de confianza para cada valor. Dos canales cuyos intervalos no coincidan pueden considerarse estadísticamente diferentes; en este gráfico puede observarse el efecto del factor “canal” y se aprecia que los canales laterales del horno muestran una dimensión mayor que los centrales, esto evidencia una mayor temperatura real en las paredes del horno y un componente de la varianza final exclusivamente generado por este problema.

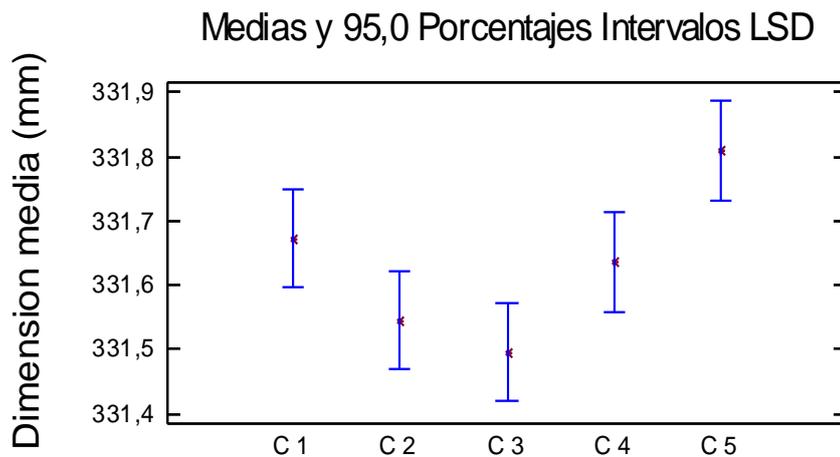


Figura 7.23: Intervalos de confianza para los valores de dimensión de cada canal de horno.

La estimación de la varianza debida a las diferencias dimensionales entre los diferentes canales (subgrupos) la podemos calcular a partir de la tabla ANOVA aplicando la fórmula para los componentes de la varianza:

$$\sigma_{Grad}^2 = (CM \text{ entre} - CM \text{ error})/n = 1,18 \times 10^{-2} \text{ mm}^2$$

En este caso, la varianza del error de medición está incluida en el error del ANOVA

7.2.4.9. Varianza generada por el sistema de medición $\sigma_{\epsilon Di}^2$

Como se ha comentado anteriormente, la varianza generada por el sistema de medición debe incorporarse también como un factor de variación más en el modelo ya que la separación del producto en diferentes calibres se realiza a partir de los valores medidos y por tanto, la variabilidad del sistema de medición es una causa más que contribuye al resultado de variación final; la estimación de esta se ha obtenido realizando repeticiones de medida de una misma unidad y obteniendo un valor final de:

$$\sigma_{\epsilon Di}^2 = 2,78 \times 10^{-4} \text{ mm}^2$$

7.3 CÁLCULO Y VALIDACION DE LOS MODELOS

La tabla completa del modelo de trasmisión de variabilidad con los datos obtenidos resulta:

Variables		Polvo Atomizado			Prensado				Cocción	
		H	ClComp	DaComp	D. Ap		Cl Comp		Di	
Ref.	σ^2	Comp. Varianza	Comp. Varianza	Comp. varianza	Coef	Comp. varianza	Coef	Comp. varianza	Coef	Comp. varianza
H	1,81E-02	1,81E-02			7,92E-04	1,43E-05			1,77E+00	3,20E-02
P	6,35E-01				1,85E-07	1,17E-07			4,12E-04	2,62E-04
T	3,12E+00								1,60E-03	4,98E-03
Da.Comp	4,67E-07			4,67E-07	1	4,67E-07			2,23E+03	1,04E-03
Cl.Comp	1,07E-02		1,07E-02				1	1,07E-02	1	1,07E-02
Cav	3,20E-06				1	3,20E-06			2,23E+03	7,14E-03
Grad	1,18E-02								1,00E+00	1,18E-02
Errores Medida										
Err Da	4,00E-07				1	4,00E-07				
Err Di	2,78E-04								1	2,78E-04

Tabla 7.10 Modelo de trasmisión de variabilidad del proceso

Las columnas correspondientes al proceso de prensado y cocción detallan los componentes del modelo de composición de varianzas; si el modelo es válido, la varianza resultante de la suma de estos componentes debe aproximarse suficientemente al valor medido en el proceso

7.3.1.-COMPOSICION DE VARIANZAS DEL PROCESO DE PRENSADO

En el modelo de composición de varianzas del proceso de prensado, el resultado es la varianza de densidad aparente y los componentes son las variaciones de comportamiento en prensado de la composición, la humedad, la presión de prensado, la varianza generada por diferencias entre cavidades y la del error de medida de densidad aparente.

$$\sigma_{Dap}^2 = \beta_{Da..H}^2 \sigma_H^2 + \beta_{Da..P}^2 \sigma_P^2 + \sigma_{DaComp}^2 + \sigma_{Cav}^2 + \sigma_{\varepsilon Da}^2 + \sigma_{\varepsilon}^2 \quad \text{Ec 7.6}$$

Todos los términos de esta ecuación han sido estimados a partir de los datos experimentales salvo el término de error que representa la variabilidad no explicada por el modelo; reemplazando los coeficientes obtenemos la ecuación que predice los resultados de varianza de densidad aparente:

$$\sigma_{Dap}^2 = 7,92 \times 10^{-4} \sigma_H^2 + 1,85 \times 10^{-7} \sigma_P^2 + \sigma_{DaComp}^2 + \sigma_{Cav}^2 + 4,00 \times 10^{-7} \quad \text{Ec 7.7}$$

La varianza medida en proceso para la densidad aparente es de $\hat{\sigma}_{Dapm}^2 = 1,94 \times 10^{-5} \text{ (gr/cc)}^2$; la contribución de cada variable y la estimación del error del modelo aparece en la siguiente tabla:

Factor	Detalle	Contribución a la Varianza (gr/cc) ²	Porcentaje
<i>Da.Comp</i>	Variaciones D.Aparente composición	4,67 x10 ⁻⁷	2,41
<i>H</i>	Humedad polvo atomizado	1,43 x10 ⁻⁵	73,70
<i>P</i>	Presión de prensado	1,17 x10 ⁻⁷	0,60
<i>Cav</i>	Diferencias entre cavidades molde	3,19 x10 ⁻⁶	16,40
εDa	Error medida densidad aparente	4,00 x10 ⁻⁷	2,66
ε	Error modelo (varianza no explicada)	9,16 x10 ⁻⁷	4,72
<i>Dap</i>	Valor medido de densidad aparente	1,94 x10 ⁻⁵	

Tabla 7.11 Composición de varianzas y contribución de cada variable al modelo

Como se puede observar en la Tabla 7.11, el modelo de composición de varianzas explica el 96 % de la varianza medida en la densidad aparente definiendo un modelo muy exacto.

La variable humedad es la crítica en este proceso y explica casi el 75% de la variación final siendo la siguiente causa de variación las diferencias de densidad aparente entre diferentes cavidades del molde; las variaciones de composición, aunque significativas no son relevantes y la variabilidad generada por la presión de prensado es irrelevante.

La figura 7.24 representa la contribución de cada factor. Esta situación confirma el desequilibrio de este proceso de prensado, donde habiendo dos variables (humedad y presión) que se ha confirmado determinan completamente el resultado descrito por el modelo de la Ec 7.3, tienen sin embargo comportamiento muy diferentes: la presión se mantiene completamente estable y confirma la que los sistemas de regulación de presión del equipo utilizado trabajan muy eficientemente y con mínima variabilidad; aunque los desajustes del molde si generan una variabilidad que sería evitable homogeneizando el comportamiento de las distintas cavidades de la prensa, es sin embargo la humedad la que presenta variaciones anormalmente altas si se comparan con las otras. La variabilidad de esta etapa sería muy mejorable si se redujera la de la humedad; esta situación es conocida por los fabricantes pero en este caso, con el modelo validado se ha cuantificado exactamente su contribución.

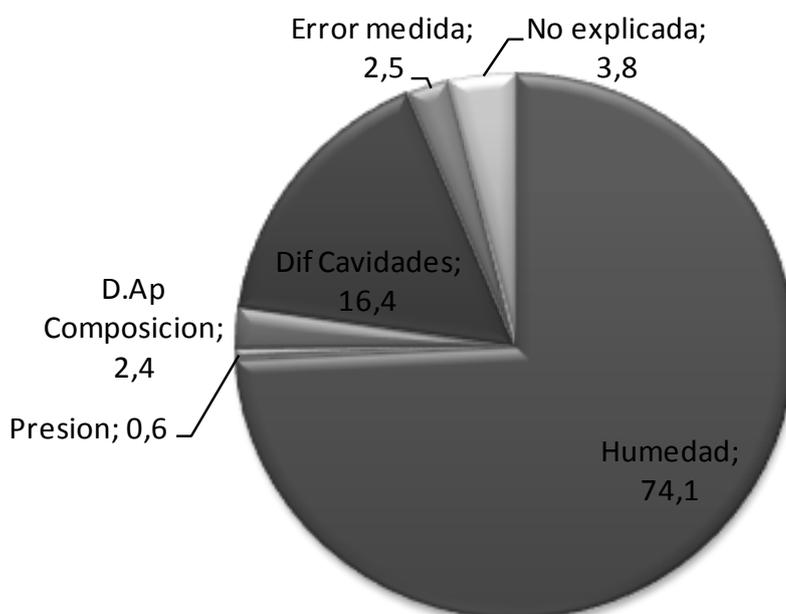


Figura 7.24: Distribución de la contribución de las variables a la variabilidad total observada

7.3.2.- COMPOSICION DE VARIANZAS DEL PROCESO COMPLETO

En el modelo de composición de varianzas de todo el proceso, el resultado de varianza es la de la dimensión de las baldosas; los componentes del modelo son la contribución de todos los factores de variación estudiados:

$$\sigma_{Di}^2 = \beta_{DiH}^2 \sigma_H^2 + \beta_{DiP}^2 \sigma_P^2 + \beta_{DiT}^2 \sigma_T^2 + V_{Di, Da}^2 \sigma_{DaComp}^2 + V_{Di, Da}^2 \sigma_{Cav}^2 + \sigma_{ClComp}^2 + \sigma_{Grad}^2 + \sigma_{\epsilon Di}^2 + \sigma_{\epsilon}^2$$

Ec. 7.6

Todos los términos de esta ecuación han sido estimados a partir de los datos experimentales salvo el término de error que representa la variabilidad no explicada por el modelo, reemplazando los coeficientes correspondientes obtenemos el modelo que permite predecir la varianza dimensional:

$$\sigma_{Di}^2 = 1,77\sigma_H^2 + 4,12 \times 10^{-4} \sigma_P^2 + 1,60 \times 10^{-3} \sigma_T^2 + 2,23 \times 10^{-3} (\sigma_{DaComp}^2 + \sigma_{Cav}^2) + \sigma_{ClComp}^2 + \sigma_{Grad}^2 + 2,78 \times 10^{-4}$$

Ec. 7.7

Reemplazando los términos correspondientes por los valores estimados, se obtiene una predicción de varianza de $\hat{\sigma}_{Di}^2 = 6,79 \times 10^{-2} \text{ (mm)}^2$

La varianza medida en el proceso para la dimensión es de $\hat{\sigma}_{Di}^2 = 7,62 \times 10^{-2} \text{ (mm)}^2$; el valor es superior al predicho y la diferencia (error del modelo) es $8,00 \times 10^{-3} \text{ mm}^2$ que representa un 10 % de la varianza final. La contribución de cada factor y el error del modelo aparecen detallados en la tabla 7.12:

El modelo explica el 90 % de la variabilidad medida; el error es suficientemente bajo como para considerarlo representativo de la situación e incorpora además de los errores de los modelos de relación, el efecto de factores que no se han incluido en el estudio o simplificaciones realizadas como utilizar el valor de temperatura correspondiente a la lectura del sensor, que no deja de ser una aproximación ya que no se está midiendo la temperatura real de las piezas; además, la temperatura de las zonas previas y posteriores a la cocción aunque en menor magnitud también afectan al valor de contracción así como los pequeños cambios de flujo de entrada de material en el horno que provocan irregularidades en el “tapete” de piezas y alteran el equilibrio térmico del horno.

No obstante a estas simplificaciones, se considera que la aproximación del modelo es suficiente para utilizarlo en el proceso de mejora ya que describe perfectamente la contribución de las causas de variación principales que son las que deben optimizarse.

La siguiente tabla 7.12, detalla la contribución a la varianza final de cada factor (términos de la Ec 7.6) y el % que supone

<i>Factor de variación</i>	<i>Detalle</i>	<i>Contribución a la varianza final (mm)²</i>	<i>Porcentaje</i>
<i>H</i>	Humedad polvo atomizado	$3,20 \times 10^{-02}$	41,97
<i>P</i>	Presión de prensado	$2,62 \times 10^{-04}$	0,34
<i>T</i>	Temperatura cocción	$4,98 \times 10^{-03}$	6,54
<i>Da.Comp</i>	Variaciones Densidad aparente de la composición	$1,04 \times 10^{-03}$	1,37
<i>Cl.Comp</i>	Variaciones de contracción de la composición	$1,07 \times 10^{-02}$	14,02
<i>Cav</i>	Diferencias entre cavidades molde	$7,14 \times 10^{-03}$	9,34
<i>Gra</i>	Gradientes de temperatura horno	$1,18 \times 10^{-02}$	15,49
<i>Err Di</i>	Error de medida de la dimensión	$2,78 \times 10^{-04}$	0,36
<i>Error</i>	Error modelo (varianza no explicada)	$8,00 \times 10^{-3}$	10,50
<i>Di</i>	Valor medido de dimensión	$7,62 \times 10^{-2}$	

Tabla 7.12 Composición de varianzas del proceso de cocción y porcentaje de contribución de cada variable

El gráfico (figura 7.25) representa la influencia de cada uno de estos factores.

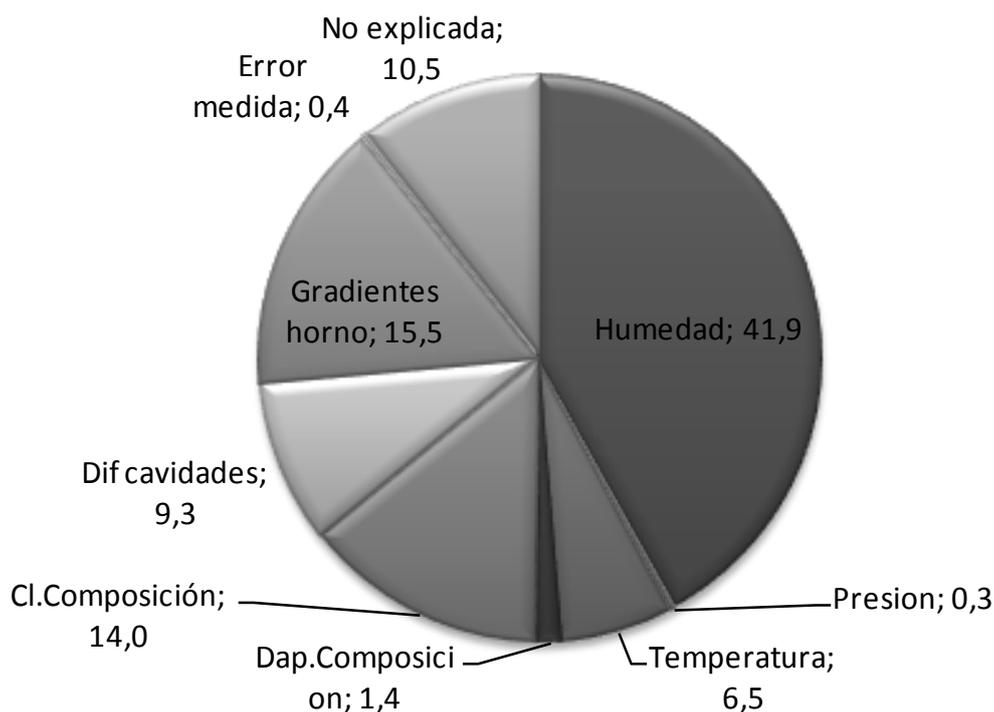


Figura 7.25: Distribución de la contribución de las variables a la variabilidad total observada

La humedad es de nuevo la variable crítica y explica más del 40 % de la variación final; los gradientes de temperatura en el horno aparecen como la segunda causa de variación con una contribución superior al 15 %, así como las variaciones de composición, incluyendo tanto las que afectan a la contracción lineal como a la densidad aparente obtenida en el proceso de prensado que suponen una contribución también superior al 15 %; las diferencias entre cavidades de molde tiene también un efecto relevante y justifican todos ellos conjuntamente el 40 % de la variabilidad final. Hay que señalar que estos factores no están controlados y que además no solo no pueden medirse directamente sino que su identificación sin la aplicación de análisis como el planteado (ANOVA sobre la respuesta) es muy difícil al resultar casi imposible discriminar su variación de la del conjunto.

La variabilidad aportada por la presión y la temperatura de cocción es prácticamente irrelevante y de nuevo confirma el desequilibrio del proceso en el que los equipos de prensado y cocción han llegado a un nivel de automatización que garantiza su

estabilidad pero el proceso de preparación de polvo atomizado dista mucho de trabajar con la variabilidad requerida para determinar un proceso “capaz”.

La figura 7.26, compara el intervalo de variación de dimensión medido en el proceso $\pm 3\hat{\sigma}_{D_i} = 1,66$ mm con el intervalo establecido por las tolerancias para 1 “calibre”, incluyendo la contribución de cada uno de los factores de variación y en esta se observa claramente que el intervalo de variabilidad final supera ampliamente al establecido por las especificaciones; asimismo se puede concluir que cuatro factores de variación (Humedad, diferencias de la composición, diferencias de cavidades de prensa y diferencia entre canales de horno) suponen el 80 % del problema.

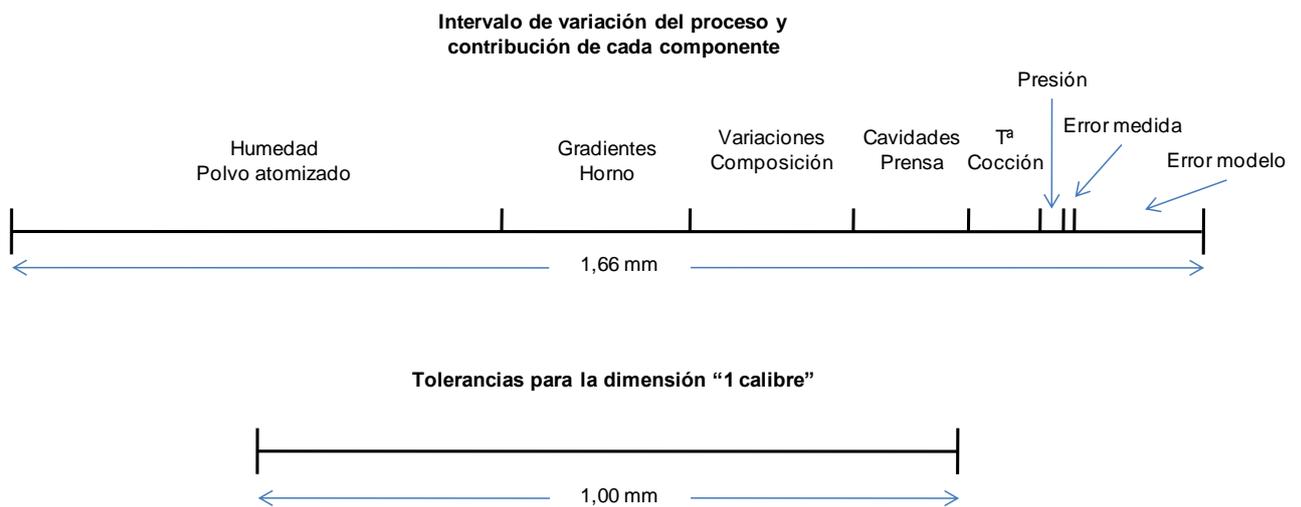


Figura 7.26: Comparación entre el intervalo de variación medido en el proceso, las especificaciones y las tolerancias.

7.3.3.- CONTRIBUCION DE LAS ETAPAS

Utilizando los datos obtenidos en la tabla 7.10 podemos discriminar la contribución a la varianza de cada una de las etapas del proceso que aparecen detalladas en la Tabla 7.13 y figura 7.27.

<i>Etapa</i>	<i>VARIABLES</i>	<i>Contribución total a varianza (mm²)</i>	<i>Porcentaje</i>
“Polvo atomizado”	Humedad y variaciones de composición	$4,37 \times 10^{-2}$	64,4
Prensado	Variaciones de presión y diferencia entre cavidades de molde	$7,40 \times 10^{-3}$	10,9
Cocción	Temperatura de cocción y gradientes de horno	$1,68 \times 10^{-2}$	24,7

Tabla 7.13 Contribución de las etapas

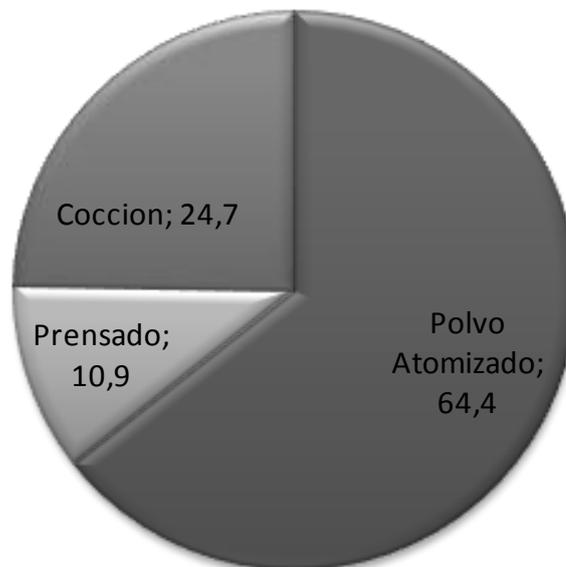


Figura 7.27 Contribución a la variabilidad final de las etapas del proceso

Es evidente que la materia prima “polvo atomizado” preparada en la etapa inicial del proceso es la que más variabilidad genera y que la vía para mejorar el proceso debe estar centrada en la mejora de la misma.

7.4 TOLERANCIAS E INTERVALOS DE VARIACION

Estimada la varianza de cada uno de los factores de variación del proceso que forman parte del modelo de composición de varianzas, puede realizarse una comparación entre el intervalo de variación $\pm 3\sigma$ de cada uno y las tolerancias establecidas en el plan de control, para verificar la adecuación de las mismas a los objetivos y conocer la capacidad de cada etapa de proceso respecto a cada variable.

En la tabla 7.14 se detallan los resultados, incluyendo los valores de varianza (σ^2) estimados, el intervalo de variación calculado con el criterio habitual $\pm 3\sigma$, las tolerancias definidas en el plan de control del proceso y detalladas en el capítulo 6 y el índice de capacidad C_p de cada etapa de proceso respecto a esa variable.

Factor	Varianza estimada (σ^2)	Intervalo $\pm 6 \sigma$	Intervalo Tolerancia	Capacidad C_p
Variaciones densidad aparente composición	$1,04 \times 10^{-3} \text{ mm}^2$	0,13 mm	No	
Variaciones contracción lineal composición (*)	$1,07 \times 10^{-2} \text{ mm}^2$	0,62 mm	1,0 mm	1,61
Humedad polvo	$1,81 \times 10^{-2}$	0,81 %	0,4 %	0,49
Presión	$6,31 \times 10^{-1} \text{ Kg/cm}^2$	4,77 Kg/cm^2	2 Kg/cm^2	0,42
Diferencia entre cavidades	$3,20 \times 10^{-6} \text{ (gr/cc)}^2$	0,0107 gr/cc	0,02 gr/cc	1,86
Temperatura	$3,12 \text{ (}^\circ\text{C)}^2$	7,07 $^\circ\text{C}$	5 $^\circ\text{C}$	0,71
Gradientes temperatura	$1,18 \times 10^{-2} \text{ (mm)}^2$	0,64 mm	0,4 mm	0,62
Medida dimensión	$2,78 \times 10^{-4} \text{ (mm)}^2$	0,1 mm	0,1 mm	1

Tabla 7.14. Comparación entre tolerancias e intervalos de variación

(*) La tolerancia está establecida para la contracción lineal, pero se ha transformado en el valor equivalente de dimensión final para el formato estudiado.

En esta tabla se observa una incoherencia entre la variabilidad observada en el proceso y las tolerancias establecidas, en muchos casos se observan valores de C_p muy inferiores a 1 lo que identifica etapas de proceso en las que la tolerancia se ha establecido sin un conocimiento real del comportamiento del proceso.

- Las tolerancias establecidas para las variaciones de composición no son lógicas y el intervalo es excesivamente amplio, por un lado, no hay tolerancia establecida para las variaciones de densidad aparente de la composición y las establecidas para la variación de contracción lineal son excesivas (1 mm); este valor coincide con la especificación final del producto y la variación observada en el proceso es mucho menor.
- En el proceso de prensado las tolerancias son bastante incoherentes con el resultado del proceso; la tolerancia establecida para las variaciones de humedad y presión son mucho más estrictas que la variación observada y sin embargo la tolerancia establecida para las diferencias de densidad aparente entre cavidades es muy superior a las posibilidades del proceso.
- En el proceso de cocción, las tolerancias establecidas para las variaciones de temperatura y diferencia entre canales del horno son también más exigentes que el resultado.

Es obvio que la asignación de tolerancias a este proceso se ha realizado sin tener en cuenta ni el comportamiento real de cada variable en cada etapa ni su contribución al resultado final.

7.5.- CONCLUSIONES

El método propuesto ha permitido cuantificar la aportación de cada variable y cada etapa del proceso al resultado total de variación estimando y validando un modelo matemático explicativo del problema. La utilización combinada de los gráficos de control y el análisis de varianza para estimar la contribución de todos los factores de variación permite conocer el comportamiento de todo el proceso a partir de los datos obtenidos del mismo. Las hipótesis de normalidad de la distribución de datos y la aproximación mediante modelos de relación lineal han resultado suficientes y el error

del modelo no supera el 10 %; este incluye el efecto de las variables de proceso no consideradas así como el de las aproximaciones de los modelos de relación, pero es suficientemente bajo como para considerarlo válido.

El modelo puede utilizarse para mejorar la situación orientando los esfuerzos a reducir el efecto de las variables identificadas y para predecir el resultado de cualquier actuación de mejora, de modo que conociendo el efecto que pueda tener sobre la reducción de la variación de una variable, pueda estimarse su impacto sobre el resultado final.

Se ha comprobado que la asignación de tolerancias del proceso no está de acuerdo ni con las variaciones observadas ni con el resultado final exigido. La mejora del proceso requiere la aplicación de soluciones en cada una de las causas de variación y un rediseño de los sistemas de control y asignación de tolerancias.

Capítulo 8.

Estimación del modelo de costes De la variabilidad

8.1.- MODELO GENERAL

8.1.1- Costes de producción

8.1.2- Relación entre los costes de calidad y producción

8.2.- ESTIMACION DEL MODELO DE COSTES

8.2.1.- Estimación de los componentes del coste de calidad

8.2.2.- Cálculo del modelo

8.3.- CONCLUSIONES

8.1.- MODELO GENERAL

La función de “costes de variabilidad” representa el impacto económico asociado a los resultados de variación del proceso; diferentes resultados suponen más o menos cantidad de producto agrupado en diferentes calibres lo que implica una pérdida económica; el mejor indicador de la pérdida es su valor por unidad producida (€/m^2), considerando como unidad no la pieza cerámica singular sino la unidad de comercialización (1m^2).

Según las propuestas de Taguchi (1980) y Heredia (2001) y tal y como se ha comentado en el capítulo 5, a medida que aumenta la variabilidad los costes no aumentan de forma lineal sino según un modelo de segundo grado. La estimación del modelo puede realizarse si se conocen los valores de pérdida correspondientes a diferentes resultados; para ello y tal y como se describe en la propuesta (Cap.5), se utilizará el modelo general de costes de calidad para estimar a partir de los costes de producción del lote analizado aquellos valores que estén asociados específicamente a los conceptos de prevención, inspección, fallos internos y externos derivados del problema.

El coste consecuencia de la variación dimensional para el resultado del proceso medido determina un punto del modelo; un segundo punto se calculará considerando que en el caso de que la variabilidad fuera tal el índice de capacidad del proceso fuera 1, prácticamente el 100 % del producto estaría dentro de las especificaciones (99,75% en el caso de una distribución normal de los datos) y por tanto los costes de fallos internos o externos podrían considerarse nulos y el coste sería solo el correspondiente a la prevención e inspección de calidad.

8.1.1- COSTES DE PRODUCCION

El proceso analizado dispone de un sistema de información capaz de realizar una estimación del coste de producción de cada lote fabricado teniendo en cuenta para ello los consumos de materiales correspondientes así como los criterios para la asignación de los costes fijos.

Los valores obtenidos para los costes de producción del lote sobre el que se ha realizado la estimación del modelo de composición de varianzas aparecen detallados

en la Tabla 8.1, donde los criterios de agrupación son los habituales (Energía, materiales, mano de obra, mantenimiento.....).

Componente de coste	Detalle	Coste €/m2
Materias primas	Arcillas para el soporte, esmaltes para la decoración y otros productos químicos de proceso.	1,20
Embalajes	Coste de las cajas, Pallets, Fundas para protección del producto en almacén	0,22
Energía	Consumo específico de Gas natural y de electricidad	0,68
Personal	Personal directo de producción, incluyendo inspección, servicios y mantenimiento	0,78
Mantenimiento	Coste de consumibles y subcontratación de servicios (Repuestos y reparaciones)	0,16
Diseño e I+D	Personal de diseño e I+D, coste de prototipos, pruebas	0,08
Almacén	Personal de almacén y expedición de materiales, consumo de embalajes, coste de espacios y transporte de mercancías, preparación de pedidos	0,25
Reclamaciones	Indemnizaciones a los clientes por defectos de calidad	0,02
Generales	Servicios generales de producción	0,10
TOTAL		3,49

Tabla 8.1. Detalle de costes de producción

8.1.2.- RELACION ENTRE LOS COSTES DE CALIDAD Y PRODUCCION

Como se detalla en el capítulo 5, utilizando la clasificación general de costes de calidad y los componentes particulares del mismo podemos estimar los valores de los mismos asociados específicamente a la variabilidad dimensional; cada uno de los

componentes del coste de calidad está relacionado con uno o varios componentes del coste de fabricación tal y como se describe en la tabla 8..2

Costos de calidad		Costos de fabricacion									
		Materiales	Energia	Mantenimiento	Personal	Diseño	Logisticos	Perdidas internas	Reclamaciones	Amortizaciones	Perdida valor producto defectuoso
Prevenccion	Diseño y rediseño producto	■	■		■	■					
	Ingenieria de procesos				■	■					
	Equipos de inspeccion								■		
	Planificacion de calidad				■						
	Formacion				■						
Inspeccion	Personal de inspeccion				■						
	Costos de inspeccion	■	■								
	Mantenimiento equipos Inspeccion			■	■						
Fallos internos	Perdidas internas							■			
	Reprocesados	■	■		■						
	Paros proceso			■	■	■				■	
	Logisticos						■				
	Perdida valor material										■
Fall. externos	Reprocesados	■	■		■						
	Solucion reclamaciones								■		
	Indemnizaciones								■		

Tabla 8.2. Relación entre los costes de calidad y producción de las baldosas

Las relaciones identificadas en la tabla significan que una parte del coste de producción de cada uno de los conceptos señalados en la misma es consecuencia de la prevención, inspección o fallos debidos al problema dimensional.

8.2.- ESTIMACION DEL MODELO DE COSTES

8.2.1- ESTIMACION DE LOS COMPONENTES DEL COSTE DE CALIDAD

La información utilizada procede del mismo sistema de información del proceso, se han tenido en cuenta las siguientes bases:

- Los costes de prevención e inspección incluyen el gasto del personal, equipos y operaciones con las siguientes bases de cálculo:
 - Coste de un operario = 25.000 € anuales
 - Coste de un técnico = 30.000 € Anuales

- El rango aceptable de variación para 1 calibre es de 1 mm; el material fuera de estas especificaciones pero con variación inferior a 3 mm se considera primera calidad y no supone más gasto que el generado por su gestión logística.

- El material producido fuera del rango indicado (3 mm) se considera de una calidad inferior y tiene una pérdida de valor de 2 €/m².

- La producción anual de la empresa es de 6.000.000 m²; este es el valor utilizado para estimar los diferentes componentes de los costes de producción fijos.

8.2.1.1 Costes de prevención de la variabilidad

Son los esfuerzos realizados para la prevención del problema e incluye:

- Personal de I+D : En este caso el valor considerado es el coste salarial de un técnico que se dedica exclusivamente al análisis de alternativas de composición de soporte y al desarrollo de nuevas composiciones:

Coste 1 técnico I+D: 30.000 €/anuales

- Pruebas I+D: coste de las pruebas piloto de composiciones de soporte, estimados a partir de la cantidad de polvo producido anualmente en pruebas :

Coste de pruebas: 5 pruebas/año x 20000Kg/prueba x 0,297€/Kg = 2976 €/anuales

- Inversión en sistema de control: Amortización de todos los equipos de control instalados en el proceso para controlar el problema dimensional incluyendo el equipamiento de laboratorio correspondiente, los sistemas de control de humedad, densidad aparente y dimensión de baldosa. La amortización se considera en 10 años

Coste equipos: 54.000 €/anuales

- Planificación de la calidad: se ha considerado que el 10 % del tiempo del personal de del departamento de planificación de la calidad (4 personas) está relacionado con la gestión de este problema :

Coste personal departamento gestión calidad: 12.000 €/anuales

Componente	Coste €	€/m2
Diseño e I+D	32.976	$5,50 \times 10^{-03}$
Inversión en sistemas de control	54.000	$4,50 \times 10^{-03}$
Planificación de calidad	12.000	$2,00 \times 10^{-03}$
TOTAL	98.976	$1,20 \times 10^{-02}$

Tabla 8.3 Costes de prevención de la variabilidad

8.2.1.2 Costes de inspección de la variabilidad

Incluye todos los asociados a la inspección de materiales, procesos y producto acabado para controlar la variabilidad:

- Recursos humanos: Tiempo de dedicación al control de las variables de proceso relacionadas con la dimensión del personal correspondiente a los puntos de operación y control del proceso

Area	Personal de control y operación	% del tiempo total dedicado
Preparación soporte	4	20 %
Prensado	8	12,5 %
Cocción	8	20 %
selección	8	5 %
Control de calidad final	2	33 %
Laboratorio	4	25 %

El tiempo equivalente resultante corresponde a 3,08 operarios = 77.010 €/año

- Operaciones de inspección: Consumibles utilizados en los procesos de inspección = 12.000 €/año
- Mantenimiento: Incluye los costes de mantenimiento de los equipos y los de su calibración interna y subcontratada. = +6000 +3500 = 9500 €/año

Componente	Coste €	€/m ²
Recursos humanos inspección	77.010	1,28x10 ⁻⁰²
Operaciones de inspección	12.000	2,00x10 ⁻⁰³
Mantenimiento equipos	9.500	1,58x10 ⁻⁰³
TOTAL	110.510	1,64x10 ⁻⁰²

Tabla 8.4 Costes de inspección

8.2.1.3 Costes de fallos internos

Incluye tanto los costes de los productos degradados de calidad o rechazados por estar fuera de calibre (Variación mayor de 3 mm) como los costes derivados de la manipulación del porcentaje de material que aún comercializándose como primera calidad pertenece a grupos de calibre diferentes. El porcentaje de producto en cada uno de los rangos determinados se ha calculado en el capítulo 7 con los siguientes resultados:

Dimensión	Porcentaje de material
Nominal (331 – 332 mm)	89,92 %
Calibre superior e inferior (330 –331) y (332 –333mm)	10,07 %
Fuera de calibre	$3,31 \times 10^{-5}$ %

- Perdidas por producto “fuera de calibre”: Representan el $3,31 \times 10^{-5}$ %, este material no se comercializa como primera calidad teniendo una pérdida de valor de 2 €/m². El impacto económico de este material supone $6,62 \times 10^{-5}$ €/m².
- “Restos”: Supone el coste anual derivado de la liquidación de restos en el almacén menores de un pallet resultantes de la escasa rotación de los materiales que aún siendo primera calidad, el volumen producido del calibre considerado no es operativo y debe saldarse. Supone anualmente un promedio de 64. 212 € = $1,07 \times 10^{-2}$ €/m²
- Logísticos: Sobrecoste logístico consecuencia de la manipulación de un almacén que incluye producto en varios calibres; la variabilidad actual dimensional supone un incremento del tamaño del almacén del 10,02 %, se estima la misma repercusión en el coste logístico: $2,55 \times 10^{-2}$ €/m²

La Tabla 8.5 resume los valores de los diferentes componentes de los costes de fallos internos.

Componente	Coste
Producto fuera de calibre	$6,62 \times 10^{-5}$
Restos	$1,07 \times 10^{-2}$
Logísticos	$2,55 \times 10^{-2}$
TOTAL	$3,63 \times 10^{-2}$

Tabla 8.5 Costes de fallos internos

8.2.1.4 Costes de fallos externos

Son el coste generado por los problemas causados por la variabilidad del producto cuando este está en manos del cliente:

- Reclamaciones: Indemnizaciones a clientes por reclamaciones dimensionales; estas suponen el 34 % de las reclamaciones y un coste de $6,60 \times 10^{-3} \text{€}/\text{m}^2$
- Reprocesados: Coste de la reclasificación y re embalaje de productos devueltos por el cliente con problemas dimensionales. Suponen anualmente un promedio de 8400 m2 con un coste de reprocesado que incluye la mano de obra requerida y el costo del embalaje ($0,28 \text{€}/\text{m}^2$) y suponen en total $3,92 \times 10^{-4} \text{€}/\text{m}^2$

La Tabla 8.6 resume los diferentes componentes de costes de fallos externos.

Componente	Coste (€/m ²)
Reprocesados	$3,92 \times 10^{-4}$
Reclamaciones e indemnizaciones	$6,60 \times 10^{-3}$
TOTAL	$6,99 \times 10^{-3}$

Tabla 8.6 Costes de fallos externos

8.2.1.5 Distribución de los costes

Coste	€/m ²
Prevención	1,20x10 ⁻⁰²
Inspección	1,64x10 ⁻⁰²
Fallos internos	3,63x10 ⁻²
Fallos externos	6,99x10 ⁻³
TOTAL	7,17x10 ⁻²

Tabla 8.7 Distribución de costes

Los datos aparecen reflejados en la figura 8.2; el impacto del problema en el coste de operación supone $7,17 \times 10^{-2}$ €/m² en la situación de trabajo analizada, lo que representa un 2% del coste total de producción y anualmente equivale a un sobrecoste de 430.000 €. No se han considerado no obstante en los costes valores intangibles como la pérdida de imagen ante los clientes por el suministro de diferentes calibres de un mismo producto así como el impacto económico del sobredimensionamiento de los lotes de producción.



Figura 8.2: Distribución de los costes de calidad derivados del problema dimensional

8.2.2- CALCULO DEL MODELO

El valor de coste si la variabilidad dimensional no existiera sería 0, en la situación analizada el coste es de $7,17 \times 10^{-2} \text{ €/m}^2$ y la desviación típica estimada de 0,276 mm; la aproximación que se realiza para obtener un tercer punto que defina la función de costes, es tal y como se describe en el capítulo 5, suponer que en una situación de variabilidad correspondiente a un valor de $C_{pm}=1$ ($\sigma = (USL-LSL) / 6$) prácticamente el 100 % de la producción se obtendría en un único calibre por lo que el coste sería únicamente el resultante de los costes de inspección y prevención ya que no habrían fallos derivados del problema al no producirse piezas defectuosas. El valor de la desviación típica correspondiente a esta situación es de 0,167 mm y el coste sería en este caso $2,84 \times 10^{-2} \text{ €/m}^2$.

Situación	desviación	Coste €/m ²
Sin variabilidad	0	0
Índice de Capacidad 1	0,1666	$2,84 \times 10^{-2}$
Situación analizada	0,2755	$7,17 \times 10^{-2}$

Con estos valores se ajusta el modelo (figura 8.3)

Gráfico de Ajuste para el Modelo

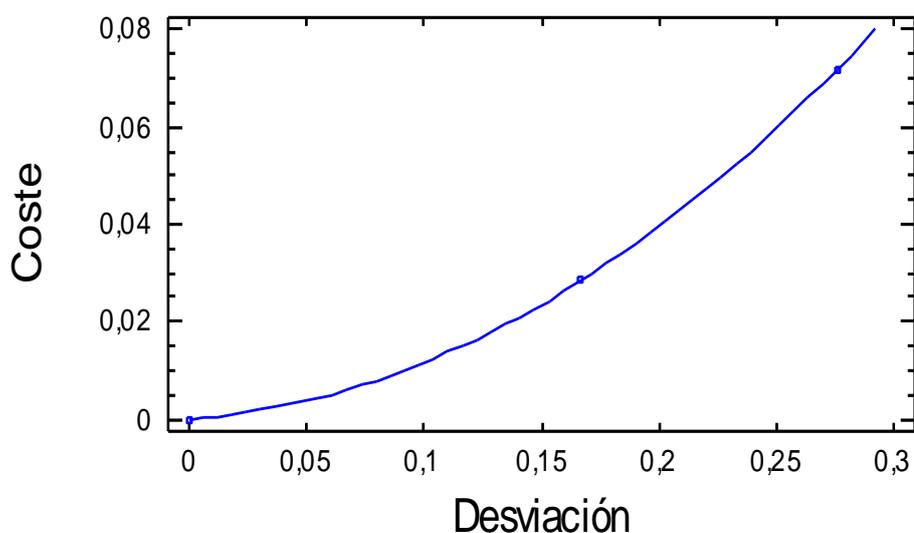


Figura 8.3: Función de costes de variabilidad

En el ajuste a un polinomio de segundo orden, se obtiene un valor de R-cuadrado = 100, y una ecuación del modelo de ajuste:

$$\text{Coste} = 0,0328 * \sigma_{\text{Dimensión}} + 0,8255 * \sigma_{\text{Dimensión}}^2 \quad \text{Ec. 8.1}$$

El coeficiente de segundo grado es claramente superior en el ajuste, siendo el modelo bastante aproximado a la predicción realizada por el modelo de Taguchi.

8.3.- CONCLUSIONES

La utilización del concepto de costes de calidad ha permitido estimar empíricamente una función de costes que permitirá estimar el ahorro correspondiente a cada acción para reducir la variación. Aunque el modelo estimado es solo una aproximación, es sin embargo muy similar a la predicción realizada por Taguchi y es válido para comparar ahorros de diferentes soluciones

Capítulo 9.

Selección de la alternativa óptima para la mejora del proceso

9.1.- SITUACION Y OBJETIVOS

9.1.1.- Situación del proceso

9.1.2.- Objetivos

9.2.- ANALISIS DE SOLUCIONES DE MEJORA

9.2.1.- Materias primas

9.2.2.- Atomización

9.2.3.- Prensado

9.2.4.- Cocción

9.2.5.- Variabilidad del equipo de medida

9.2.6.- Modificación del modelo de relación

9.3.- SELECCIÓN DE ALTERNATIVAS

9.3.1.- Resultados de las diferentes opciones de mejora

9.3.2.- Selección de la alternativa que maximiza la capacidad y el ahorro

9.4- LIMITACIONES

9.1.- SITUACION Y OBJETIVOS

9.1.1.- SITUACION DEL PROCESO

La distribución de resultados de dimensión de las baldosas a la salida del proceso se distribuye según se ha estimado en el punto 7.2.3 (figura 9.1) con:

$$\text{Desviación típica } (\sigma_{Dim}) = 0,276 \text{ mm}$$

$$\text{Varianza } (\sigma^2_{Dim}) = 7,62 \times 10^{-2} \text{ mm}^2$$

Distribucion de dimension

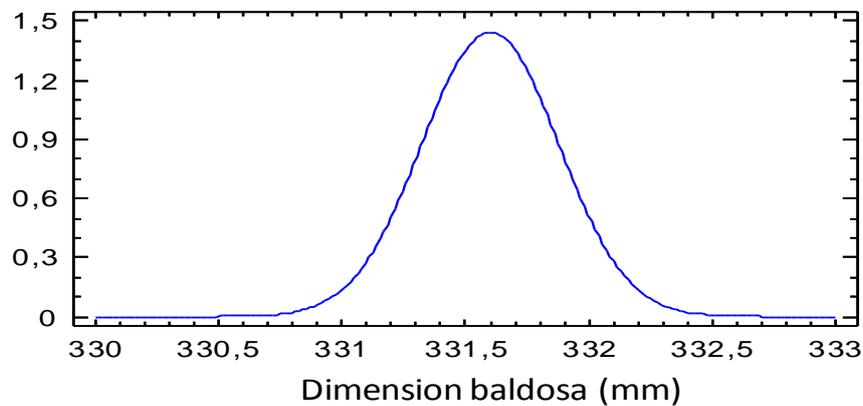


Figura 9.1: Distribución de la dimensión de las baldosas

Considerando que el calibre central está definido por el rango 331,0-332,0 la tabla 9.1 detalla los porcentajes de unidades aceptables (dimensión nominal) y de unidades fuera de especificaciones (calibres superior e inferior) y producto fuera de calibre:

Dimensión	Porcentaje de material
Nominal (331 – 332 mm)	89,92 %
Calibre superior e inferior (330 –331) y (332 –333mm)	10,07 %
Fuera de calibre	$3,31 \times 10^{-5}$ %

Tabla 9.1 Porcentajes de unidades estimados en los distintos rangos dimensionales

La comparación de la variabilidad del proceso con las especificaciones establecidas para el calibre central estima un coeficiente de capacidad $C_{pm} = 0,560$, lo que identifica un proceso claramente incapaz de cumplir con las especificaciones establecidas y que genera sistemáticamente producto fuera de la dimensión nominal.

Modelo de composición de varianzas

En el punto 7.3.2 se ha estimado y validado el modelo de composición de varianzas del proceso completo capaz de predecir la varianza final de la dimensión de las baldosas a partir de la de cada uno de los factores identificados Ec 7.7 y estimar la contribución de cada factor al resultado final con los resultados descritos en la tabla 9.2:

$$\sigma_{Di}^2 = 1,76 \sigma_H^2 + 4,12 \times 10^{-4} \sigma_P^2 + 1,58 \times 10^{-3} \sigma_T^2 + 2,23 \times 10^{-3} (\sigma_{DaComp}^2 + \sigma_{Cav}^2) + \sigma_{ClComp}^2 + \sigma_{Grad}^2 + 2,78 \times 10^{-4}$$

Ec 7.7

Factor	Detalle	Contribución a la Varianza final (mm) ²	%
H	Humedad polvo atomizado	$3,19 \times 10^{-02}$	41,97
P	Presión de prensado	$2,61 \times 10^{-04}$	0,34
T	Temperatura cocción	$4,98 \times 10^{-03}$	6,54
Da.Comp	Variaciones D.Aparente composición	$1,04 \times 10^{-03}$	1,37
Cl.Comp	Variaciones de contracción composición	$1,07 \times 10^{-02}$	14,02
Cav	Diferencias entre cavidades molde	$7,10 \times 10^{-03}$	9,33
Gra	Gradientes de temperatura horno	$1,18 \times 10^{-02}$	15,49
Err Di	Error de medida de la dimensión	$2,78 \times 10^{-04}$	3,02
Error	Error modelo (varianza no explicada)	$7,90 \times 10^{-3}$	10,40
Di	Valor medido de dimensión	$7,62 \times 10^{-2}$	

Tabla 9.2. Contribución de cada variable de proceso al resultado final de variación

Función de coste de variabilidad

En el cap.8 (Punto 8.2.2) se ha estimado la función que permite conocer el impacto económico (incremento de coste de producción unitario) para cada situación de variación:

$$\text{Coste} = 0,0328 * \sigma_{\text{Dimensión}} + 0,8255 * \sigma_{\text{Dimensión}}^2 \quad \text{Ec. 8.1}$$

Gráfico de Ajuste para el Modelo

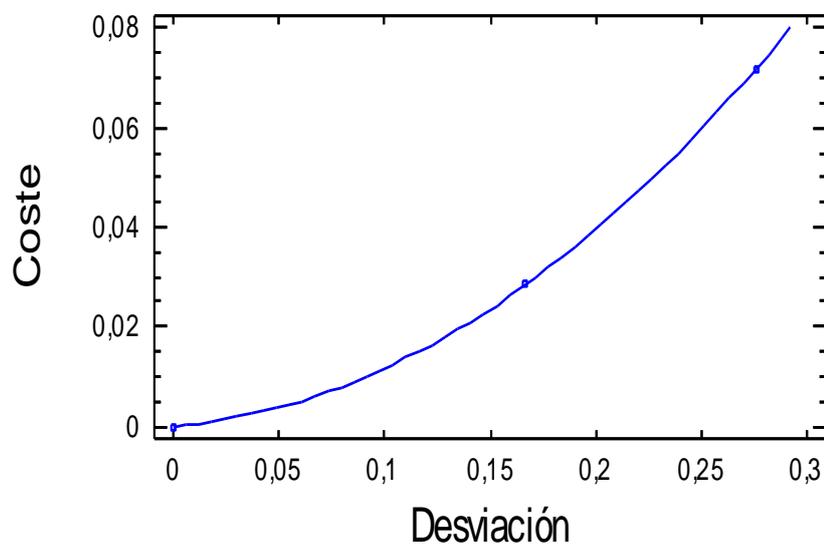


Figura 9.2: Representación gráfica de la función de costes de variabilidad

9.1.2.- OBJETIVOS

El objetivo es mejorar los resultados de variabilidad finales hasta llegar a una situación de proceso “Capaz”, es decir, con un índice de capacidad C_{pm} superior a 1; no obstante, resultados que ofrecieran índices de capacidad muy cercanos a 1 supondrían un proceso que conseguiría obtener los resultados deseables en situaciones que no tendrían ningún margen de seguridad. Montgomery (2005) recomienda índices de capacidad superiores a 1,30 lo que supone conseguir un proceso con:

$$\text{Desviación típica } (\sigma_{Dim}) \leq 0,125 \text{ mm}$$

$$\text{Varianza } (\sigma_{Dim}^2) \leq 1,57 \times 10^{-2} \text{ mm}^2$$

Para llegar a este objetivo deben realizarse inversiones en mejora para reducir la variabilidad de cada una de las etapas; las opciones pueden ser varias y muchas de ellas pueden no ser económicamente interesantes ya que la mejora obtenida al aplicarlas puede no compensar el esfuerzo económico para su implantación. Se requiere pues un proceso de análisis de soluciones y de selección de la óptima tanto en términos de reducción de variabilidad como en ahorro de coste; el esquema de este proceso de mejora es el descrito en el capítulo 5 (Punto 5.5.2) y detallado en la figura 9.3

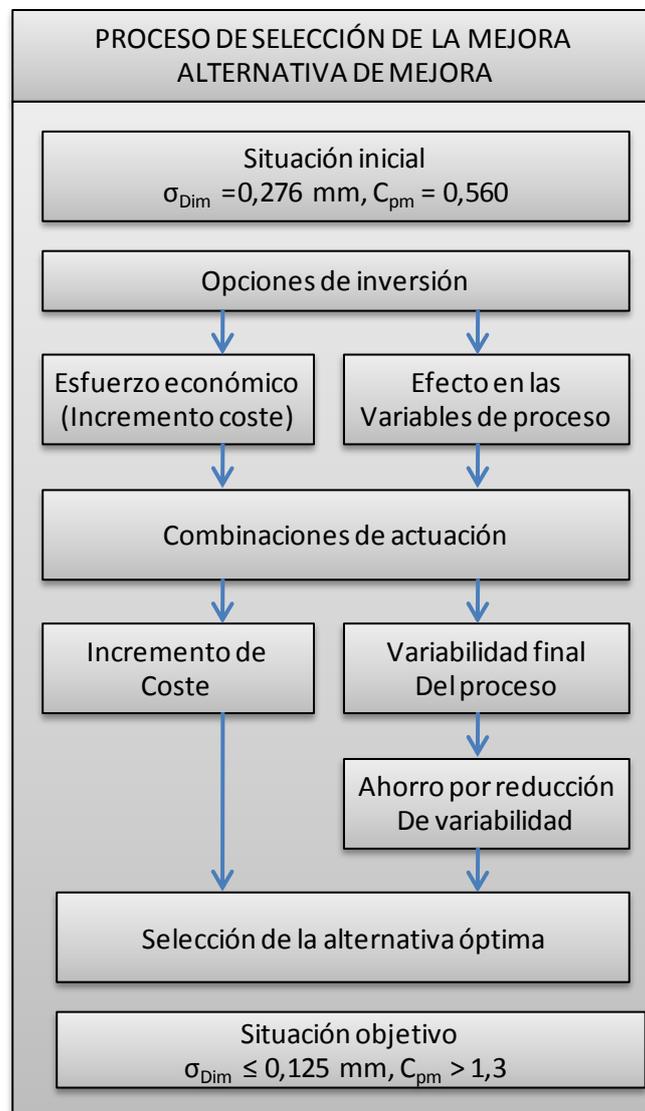


Figura 9.3: Proceso de mejora del proceso (Selección de la alternativa óptima de mejora)

Para realizar este proceso se identificarán las diferentes opciones de inversión existentes en el mercado que puedan reducir la variabilidad de cada una de las etapas y se estimará, utilizando el modelo de composición de varianzas y la función de coste para cada una el efecto, coste de la inversión y ahorro esperado, seleccionando la más económica que cumpla el objetivo final.

9.2.- ANALISIS DE SOLUCIONES DE MEJORA

9.2.1.- MATERIAS PRIMAS

La variabilidad provocada por la mezcla de materias primas como consecuencia de cambios en sus características fisicoquímicas se refleja en modificaciones del comportamiento en prensado (variaciones de densidad aparente de la composición) y en modificaciones del comportamiento en cocción (variaciones de la contracción); ambas causas de variación han resultado significativas y su contribución a la variabilidad final estimada en:

<i>Variable</i>	<i>Detalle</i>	<i>Contribución a la varianza (mm)²</i>	<i>Porcentaje</i>
Da.Comp	Variaciones D.Aparente composición	$1,04 \times 10^{-03}$	1,37
Cl.Comp	Variaciones de contracción composición	$1,07 \times 10^{-02}$	14,02

Los cambios de comportamiento son consecuencia de variaciones en las características de la composición del polvo atomizado y esas pueden originarse por:

1.- *Falta de homogeneidad de las arcillas:* La elevada heterogeneidad observable en los yacimientos, donde las capas que separan arcillas de diferentes características son difíciles de explotar sin incurrir en mezclado de productos diferentes genera variaciones; la única solución para minimizar la variación es mejorar los procesos de homogeneización que se realizan en los propios yacimientos pero que a la vista de los resultados pueden resultar insuficientes.

Los procesos de homogeneización habituales consisten en la deposición del producto extraído de la mina en capas de arcillas hasta formar acopios de los que posteriormente se sirve el producto a los fabricantes de baldosas mezclando cortes verticales; este proceso es eficaz siempre que los depósitos sean suficientemente grandes, las capas se hayan repartido homogéneamente y la extracción en la mina evite la mezcla de arcillas con características diferentes.

2.- *Variaciones de composición generadas por el reciclado de aguas y lodos.* El agua aportada al proceso de molienda incluye todos los lodos reciclados de la planta fundamentalmente procedentes de los procesos de preparación de esmaltes y de limpieza de maquinaria en el proceso de decoración; estos lodos están formados por residuos de esmaltes que pueden modificar el comportamiento de la composición en cocción al tratarse de materiales más fundentes que las arcillas. Aunque los lodos se intentan homogeneizar en balsas, su capacidad actual total es de 400 m³ lo que supone el consumo de agua de tres días; este volumen es insuficiente ya que la aportación de residuos es heterogénea durante la semana ya que las instalaciones de esmaltado y preparación de esmaltes no funcionan en continuo y es habitual que paren durante la noche o fines de semana, periodos en los que no se generan residuos de limpieza y por tanto el aporte de agua al proceso de molienda no incluye el mismo porcentaje de estos materiales

3.- *Cambios en el tamaño de partícula obtenido en la etapa de molienda.* Como se ha detallado en el capítulo 4 (4.4), la distribución de tamaños de partícula afecta a los procesos de prensado y cocción; cambios en las condiciones de funcionamiento del molino continuo pueden implicar cambios en la distribución granulométrica de la barbotina y por tanto del polvo atomizado. En este proceso, se identifican las siguientes causas que pueden provocar esta variación:

- Modificaciones en la carga molturante (Volumen y distribución)
- Velocidad de giro del molino
- Tiempo de permanencia de la barbotina en el molino
- Condiciones reológicas de la barbotina

En un proceso de molienda en continuo, la velocidad de giro está fijada y no es modificable y la carga de elemento molturante y su distribución no varía en periodos

de tiempo del orden de magnitud de la producción de un lote; Solo el tiempo de permanencia de la barbotina, que depende del caudal de alimentación al molino de las materias primas y las condiciones reológicas pueden presentar cambios, que pese a todo y tratándose de procesos muy automatizados no deben presentar variaciones excesivas.

Alternativas de mejora.

Es evidente, que resulta imposible discriminar cuál de las causas citadas anteriormente es la que provoca los cambios de comportamiento de composición medidos, pero la experiencia industrial identifica como más probables aquellas debidas a la heterogeneidad de las materias primas y aguas recicladas ya que los resultados de control de las variables del proceso de molienda en continuo muestran una gran estabilidad en esta operación. La propuesta para la reducción de variabilidad debida a los cambios de características de las materias primas se centra por tanto a la mejora de los procesos de homogeneización tanto de arcillas como de aguas residuales, descartando actuaciones en el propio proceso de molienda y considerando que este es suficientemente estable. Está hipótesis resultará aceptable si el resultado final confirma el resultado.

La homogeneización de las arcillas puede mejorarse bien realizando acopios controlados en la propia planta de producción de baldosas o mejorando la gestión de los acopios en origen (Minas); en cualquier caso supone una dedicación de recursos importante que puede asumirse en el proceso como coste del mismo o puede asumirlo el proveedor incrementando el costo de las arcillas en la misma magnitud. La estimación económica de los recursos requeridos incluye:

- Operario (1 Turno) = 25.000 €/año = $4,16 \times 10^{-3}$ €/m²
- Pala excavadora = 72.000€ = $2,4 \times 10^{-3}$ €/m²
- Consumo Gas oil Pala = 12.000 €/año = $2,00 \times 10^{-3}$ €/m²
- Mantenimiento pala = 14.000 €/año = $2,3 \times 10^{-3}$ €/m²
- Control de arcillas = 12,500 €/año = $2,08 \times 10^{-3}$ €/m²

La homogeneización de las aguas residuales exige la preparación de balsas con mayor capacidad, en este caso se dispone de espacio para preparar dos balsas con

agitación de 400 m³ cada una; instalación que es capaz de almacenar y homogeneizar todos los residuos que se generan durante una semana en las instalaciones. Los recursos necesarios para esta instalación incluyen:

Balsas de 400 m³ con instalación de agitación y bombeo = 146.000 € = 3,33x10⁻³€/m²

El impacto económico de las propuestas para la mejora de la homogeneidad de las materias primas y aguas recicladas supone

<i>Concepto</i>	<i>Detalle</i>	<i>€/m²</i>
Pala Excavadora	Pala + consumo combustible + mantenimiento unidad	6,70x10 ⁻³
Operario	1 operador en 1 turno	4,16x10 ⁻³
Operario	0,5 operarios dedicado a control de las arcillas en los depósitos	2,08x10 ⁻³
Balsas	Amortización de balsas de almacenamiento de aguas residuales con sistema de agitación y bombeo	3,33x10 ⁻³
Total		1,63x10 ⁻²

La anulación completa de la variabilidad debida a los cambios en las materias primas es imposible pero pueden tomarse como referencia los resultados que se obtienen en la misma empresa en procesos paralelos con instalaciones independientes para la producción de pavimentos cerámicos de gres porcelánico en los que tanto las materias primas como el reciclados de lodos se homogeneizan con sistemas como los propuestos llegando a un nivel de homogeneidad en el que no es posible detectar diferencias significativas. Puede por tanto considerarse que la variabilidad puede reducirse hasta niveles en los que sea del mismo orden de magnitud que la varianza del error del sistema con el que se controla esta variación, situación en la que no sería posible discriminar si hay o no variación.

Para estimar este valor máximo hay que considerar los errores de los métodos de control utilizados; en este caso el control del comportamiento de las materias primas se efectúa en laboratorio con la metodología de caracterización de comportamiento del material en prensado y cocción descrita en el manual de control de materias primas (ITC 1998).

La varianza de los errores correspondientes a esta metodología para la densidad aparente y la contracción lineal son

- Varianza error medida densidad aparente: $4,0 \times 10^{-7} \text{ (gr/cc)}^2$
- Varianza error medida contracción lineal: La variabilidad (6σ) del equipo de medida de contracción lineal es de $4,0 \times 10^{-3} \%$, este valor supone una variabilidad de $1,24 \times 10^{-1} \text{ mm}$ para una baldosa de $331,5 \text{ mm}$ y una varianza del error de medida de $4,25 \times 10^{-4} \text{ mm}^2$

Estos valores determinan la varianza máxima esperable para cada factor y utilizándose los coeficientes del modelo de composición de varianzas, permiten calcular la contribución máxima esperable a la varianza final:

<i>Factor</i>	<i>Detalle</i>	<i>Contribución a la varianza Máxima esperada (mm)²</i>
Da. Comp	Variaciones D. Aparente composición	$8,92 \times 10^{-4}$
Cl. Comp	Variaciones de contracción composición	$4,25 \times 10^{-4}$

9.2.2.- ATOMIZACION

Las variaciones de humedad del polvo atomizado provocan cambios en la densidad aparente de la pieza prensada y posteriormente cambios en el comportamiento del soporte durante el proceso de cocción; la contribución a la varianza dimensional de esta variable de proceso es de $3,19 \times 10^{-02} \text{ mm}^2$ siendo la mayor de todas las analizadas y suponiendo un 41,82 % de la variación final.

Alternativas de mejora

1.- *Automatización del atomizador* : El control de la humedad en el proceso analizado se realiza mediante tomas de muestras horarias sobre las que se determina el valor de humedad mediante secado y, en caso de obtener valores fuera del rango establecido para la variable se actúa sobre los parámetros de funcionamiento del atomizador para corregir la variación; es evidente que este sistema es insuficiente ya que la variación final de humedad se ha confirmado como la primera causa de variabilidad dimensional.

Se han llevado a cabo numerosos trabajos que han supuesto un avance notable en el control automático de la humedad recurriendo a medidores de infrarrojos junto a un muestreador de polvo atomizado como desarrollan Negre, F et al (1994) y Jarque JC et al (2000). El coste de estos equipos y su sistema de automatización supone una inversión de

- 12.000 € Instalación, calibración y puesta en marcha de muestreador y sistema de control
- 26.600 € Equipo de medida de humedad

El impacto en el coste de esta inversión es de:

Concepto	Detalle	€/m ²
Sistema de control automático	Sistema de medida en continuo de humedad y control automático del atomizador (Amortización tres años)	2,14x10 ⁻⁰³

La variabilidad final que se obtiene con estos sistemas según los trabajos publicados por los citados autores es un 25 % inferior a la obtenida con el sistema de control tradicional lo que supone reducir la variabilidad de la humedad hasta un intervalo $\pm 3\sigma_H = \pm 0,15\%$, que equivale a una varianza $\sigma_H^2 = 2,50 \times 10^{-3}$, valor que trasladado a contribución a la varianza final es de $4,43 \times 10^{-3} \text{ mm}^2$

2.- *Compensación de las diferencias de humedad en la prensa* Adicionalmente al control automático del proceso de atomización las variaciones de humedad pueden compensarse en la prensa modificando los valores de presión para conseguir un valor

de densidad aparente constante. El desarrollo de esta solución y su aplicación práctica puede consultarse en el artículo publicado por Mallol G et al (2004). Su aplicación requiere la siguiente inversión:

- Calibración , caracterización de la composición, instalación e implementación del ciclo de control 15000 €
- Sensor de humedad e instalación 28.800 €

El coste de esta actuación supone

Concepto	Detalle	€/m ²
Control prensa	Sistema de control automático de la humedad de prensado y modificación de la presión	$1,46 \times 10^{-02}$

Este sistema es complementario al control automático de humedad en el atomizador y requiere la instalación del anterior para poder trabajar con variaciones de humedad moderadas ya que en caso contrario el sistema de control de presión podría requerir trabajar con valores de presión superiores al rango de trabajo de la maquina. El coste final de la aplicación de las dos soluciones para minimizar la variación de humedad y su efecto en prensado es de $1,67 \times 10^{-2}$ €/m²

Con este sistema se puede reducir la variabilidad total de la densidad aparente hasta el límite equivalente al error de medición de la misma, que es de $4,0 \times 10^{-7}$ (gr/cc)². Este valor supone como máximo una contribución a la varianza final de $9,72 \times 10^{-4}$ mm².

Variable	Detalle	Contribución a la varianza final Máxima esperada (mm) ²
Humedad	Control automático de humedad en atomizador	$\leq 4,43 \times 10^{-3}$ mm ²
Humedad	Control automático de humedad en atomizador y control automático de la prensa	$\leq 9,72 \times 10^{-4}$ mm ² .

9.2.3.- PRENSADO

La variabilidad generada en esta etapa es consecuencia de las oscilaciones de presión de prensado y de variaciones entre la densidad aparente obtenida en las diferentes cavidades del molde, causadas bien por deformaciones del conjunto prensa-molde, por defectos de carga de polvo en los alveolos o por defectos del molde; los valores estimados de contribución a la varianza dimensional final son:

<i>Variable</i>	<i>Detalle</i>	<i>Contribución a la Varianza (mm)²</i>	<i>Porcentaje</i>
P	Presión de prensado	$2,61 \times 10^{-04}$	0,34
Cav	Diferencias entre cavidades molde	$7,10 \times 10^{-03}$	9,33

Alternativas de mejora

La variabilidad generada por la presión de prensado es muy baja, no hay además disponibles en el mercado sistemas que permitan reducir su variación salvo cambio de la unidad de prensado cuyo cambio es inviable ya que supone cambiar completamente la instalación por lo que no se considera su mejora. La reducción de la variabilidad generada por diferencias entre cavidades del molde puede resolverse con dos opciones:

1.- *Control manual de la densidad aparente de las diferentes cavidades:* Del mismo modo que se ha realizado en la estimación de la variabilidad generada por este factor mediante la toma de muestras de piezas, medida de densidad aparente y posterior identificación de diferencias recurriendo a un ANOVA, puede implantarse un control específico en proceso con este procedimiento que permitiría detectar las diferencias y corregirlas modificando la altura de los punzones que presenten diferencias ; ello requeriría la dedicación parcial de un operario de control dedicando 1,5 horas / turno para realizarlo.

2.- *Instalación de sistemas de compensación entre cavidades.* Hay disponible en el mercado un sistema patentado (Trebax) diseñado ex profeso para resolver este problema en origen: la placa magnética isostática, compuesta por una placa superior

hidráulica dentro de la cual se han realizado los alojamientos de los zócalos magnéticos; estos conectados entre ellos para el paso del aceite entre las cavidades.

Con esta solución el aceite del punzón isostático trabaja en su interior para obtener igual longitud de los lados de cada pieza (cuadratura) y el aceite de la placa magnética isostática trabaja en su interior para obtener la misma longitud entre las distintas cavidades. Esta opción supone una inversión de 10.000 € por unidad de prensado y se considera una amortización de tres años.

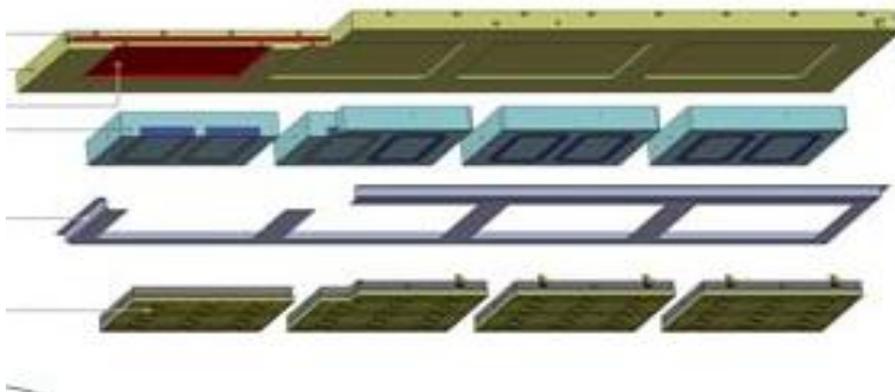


Figura 9.3: Esquema de trabajo de la solución de placa isostática. Fuente (Trebax)

La utilización de este sistema supone una homogeneización casi completa de la presión aplicada a las diferentes cavidades. Este sistema se ha aplicado en prensas de fabricación de pavimentos de gres porcelánico donde las diferencias de densidad aparente generan variaciones en la dimensión final de las baldosas mayores que en el caso en estudio y los análisis de varianza realizados para comparar los resultados de densidad aparente de diferentes cavidades del molde han confirmado que las diferencias no son significativas.

3.- *Molde con bloquitos móviles.* Solución consistente en la utilización de boquitos móviles que permiten modificar la altura de cada una de las cavidades del molde para compensar las diferencias de densidad aparente; esta solución no está todavía disponible en el mercado pero tendrá un resultado equivalente a la planteada con la placa de compensación y su inversión será equivalente

El coste de estas actuaciones supone

<i>Concepto</i>	<i>Detalle</i>	<i>€/m2</i>
Placa Isostática	Amortización del sistema de compensación isostática y su instalación en el molde	$3,33 \times 10^{-03}$
Operario	1,5horas/turno dedicación a control de diferencias de densidad aparente	$9,38 \times 10^{-03}$

La aplicación de la solución de la placa isostática o los sistemas de bloquitos móviles resultan más económicos que la utilización del control manual. Estos sistemas deberían reducir las variaciones hasta niveles que no resultaran significativos; es decir, del mismo orden de magnitud de la del sistema de medida de densidad aparente. La variabilidad esperable debe ser pues como máximo la del sistema de medición de densidad aparente, cuya varianza se ha determinado con un valor de $4 \times 10^{-7} \text{ (gr/cc)}^2$ que equivale a una contribución a la varianza dimensional final de $8,92 \times 10^{-04} \text{ mm}$.

La contribución a la varianza final de la operación de prensado resultaría:

<i>Variable</i>	<i>Detalle</i>	<i>Contribución a la varianza dimensional Esperada (mm)²</i>
Presión	No se modifica	$2,61 \times 10^{-04} \text{ mm}^2$
Cav (Diferencia entre cavidades)	Sistema de compensación entre punzones	$\leq 8,92 \times 10^{-04} \text{ mm}^2$.

9.2.4.- COCCION

La variabilidad generada es consecuencia de las oscilaciones de temperatura de cocción y de la presencia de gradientes trasversales de temperatura en el horno. Los valores de contribución a la varianza final que se han obtenido en el capítulo 5 son:

<i>Variable</i>	<i>Detalle</i>	<i>Contribución a la Varianza(mm)²</i>	<i>Porcentaje</i>
T	Temperatura cocción	$3,24 \times 10^{-03}$	4,25
Gra	Gradientes de temperatura horno	$1,18 \times 10^{-02}$	15,49

Alternativas de mejora

La variación de la temperatura de cocción es consecuencia de las oscilaciones generadas por el sistema de control y regulación (quemador/termopar/controlador) y de los cambios de flujo de material en el horno generados por el sistema de alimentación de baldosas (mesa de entrada).

La mejora de los sistemas de regulación de combustión no es planteable ya que el horno analizado dispone de la tecnología más desarrollada y por tanto no se dispone en el mercado de opciones para mejorarla pero el sistema de alimentación si es mejorable utilizando mesas de entrada que minimizan los huecos e irregularidades durante la alimentación de producto. Se dispone en la misma planta de una mesa de última generación trabajando en un horno similar y se ha podido comprobar la variación de temperatura en este horno resultando una variabilidad $\pm 3\sigma_T = \pm 3,69 \text{ }^\circ\text{C}$; este valor corresponde a una varianza $\sigma^2_T = 1,52 \text{ }^\circ\text{C}^2$. La inversión correspondiente a esta modificación supone 58.000 € y se considera su amortización en 5 años.

<i>Concepto</i>	<i>Detalle</i>	<i>€/m2</i>
Mesa de entrada	Amortización de mesa entrada horno	$5,80 \times 10^{-03}$

La varianza esperada para la temperatura es de $1,52 \text{ }^\circ\text{C}^2$, valor que utilizando el término correspondiente del modelo de composición de varianzas supone una contribución a la varianza dimensional final de $2,43 \times 10^{-03} \text{ mm}^2$

La reducción de la varianza generada por los gradientes de temperatura interna del horno puede resolverse con dos enfoques diferentes:

1.- *Control manual de la diferencia de calibre entre los diversos canales del horno:* Del mismo modo que se ha realizado en la estimación de la variabilidad generada por este factor mediante la toma de muestras de piezas, medida de dimensión y posterior identificación de diferencias recurriendo a un ANOVA puede implantarse un control específico en proceso con este procedimiento que permitiría detectar las diferencias y corregirlas; para ellos simplemente se requiere la dedicación periódica de un operario de control estimada en 0,5 horas/turno y la utilización de un equipo informático capaz de tratar estadísticamente los datos.

2.- *Instalación de sistemas de medición de diferencias de temperatura en el horno:* Mallol G et al (1994) plantean un sistema de control de gradientes de temperatura en el horno mediante la utilización de rodillos sensorizados que permiten la lectura de las temperaturas transversales en cualquier zona del horno. La disposición de dos rodillos sensorizados instalados a inicio y final de la zona de cocción junto al sistema de comunicación que permite disponer en cada momento del perfil transversal de temperaturas en los dos puntos de control permitiría detectar los gradientes de temperatura y resolverlos. El coste de los rodillos es de 8000 € y del sistema de comunicación 8000 €; se considera su amortización en dos años.

El coste de estas actuaciones supone:

Concepto	Detalle	€/m ²
Control manual	0,5horas/turno dedicación a control de diferencias de calibre entre canales y sistema informático	$1,50 \times 10^{-03}$
Sistema de rodillos sensorizados	Amortización del sistema de control mediante rodillos sensorizados	$4,00 \times 10^{-03}$

La utilización de rodillos sensorizados tiene la limitación de medir solo en algunos puntos del horno por lo que no puede garantizar que el gradiente de temperaturas sea nulo en todo el equipo; este sistema exigiría igualmente por tanto el control final de los gradientes midiendo la respuesta. En ambos casos se considera que la variabilidad puede reducirse hasta un nivel máximo en el que no resulte significativa; este nivel lo determina la variabilidad del sistema de medición que en este caso corresponde a una varianza de $2,78 \times 10^{-04} \text{ mm}^2$.

De las dos opciones, el control manual parece la más recomendable por su ahorro. La contribución a la varianza dimensional final del proceso de cocción resultaría para cada actuación:

<i>Variable</i>	<i>Detalle</i>	<i>Contribución a la Varianza Esperada (mm)²</i>
T	Modificación mesa entrada	$2,43 \times 10^{-03} \text{mm}^2$
Grad(Diferencia entre canales)	Control manual de diferencias entre canales	$\leq 2,78 \times 10^{-04} \text{mm}^2$.

9.2.5.- VARIABILIDAD DEL EQUIPO DE MEDIDA

El error del equipo automático de medida de la dimensión en la sección de clasificación y embalaje del producto acabado también contribuye a la variabilidad final con una varianza correspondiente a su error

<i>Variable</i>	<i>Detalle</i>	<i>Varianza (mm)²</i>	<i>%</i>
Err Di	Error de medida de la dimensión	$2,78 \times 10^{-04}$	3,02

No se han encontrado en el mercado alternativas de inversión para mejorar la precisión del sistema de medida compatibles con las líneas de clasificación y embalaje de producto, por lo que se desestima la mejora en este aspecto.

9.2.6.- MODIFICACION DEL MODELO DE RELACION

Como se ha comentado en el capítulo 5, además de las soluciones planteadas, enfocadas a reducir la variación de cada componente, otra alternativa es “robustecer” el proceso, es decir, hacerlo más sensible a las variaciones; en este caso y considerando el modelo de relación entre las variables de proceso estimado en el capítulo 7

$$D_i = 288,27 + (47,23 \cdot (1,63 + 28,14 \times 10^{-3} H + 0,43 \times 10^{-3} P)) - 4,02 \times 10^{-2} T + \epsilon \quad \text{Ec 7.5}$$

Es evidente que la modificación de los coeficientes que relacionan la dimensión final con la temperatura, presión y especialmente humedad supone modificar los valores de los coeficientes del modelo de composición de varianzas y por tanto, una reducción de variabilidad final sin modificar la de cada componente; utilizar composiciones con menor sensibilidad a los cambios de las variables supone un proceso más “robusto” y con menos variabilidad. Por ejemplo, para minimizar el efecto de los cambios de temperatura que generan variabilidad tanto por cambios en la temperatura máxima de cocción o por gradientes de temperatura, pueden diseñarse composiciones con menor pendiente en el diagrama de gresificación (figura 9.4)

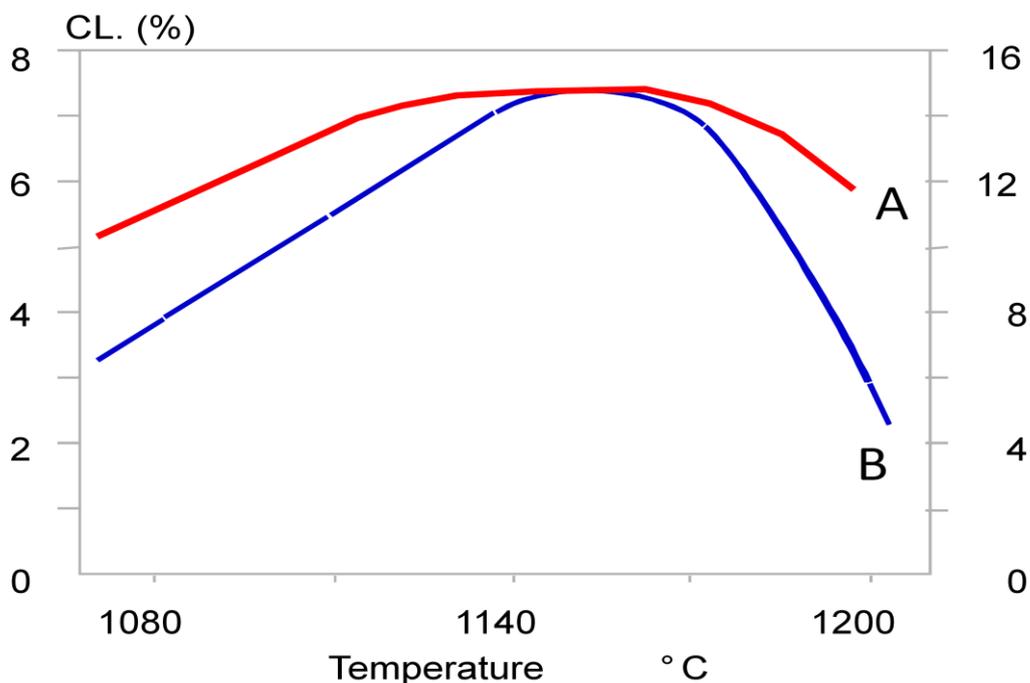


Figura 9.4: Diagrama de gresificación de diferentes composiciones con diferente sensibilidad a los cambios de temperatura

En este caso, la contracción lineal de la composición A y por tanto la dimensión final de la baldosa tiene una relación mucho más robusta frente a las variaciones de temperatura; este efecto puede observarse gráficamente en la figura 9.5 donde se observa que para una misma variación de temperatura el efecto final es mucho menor.

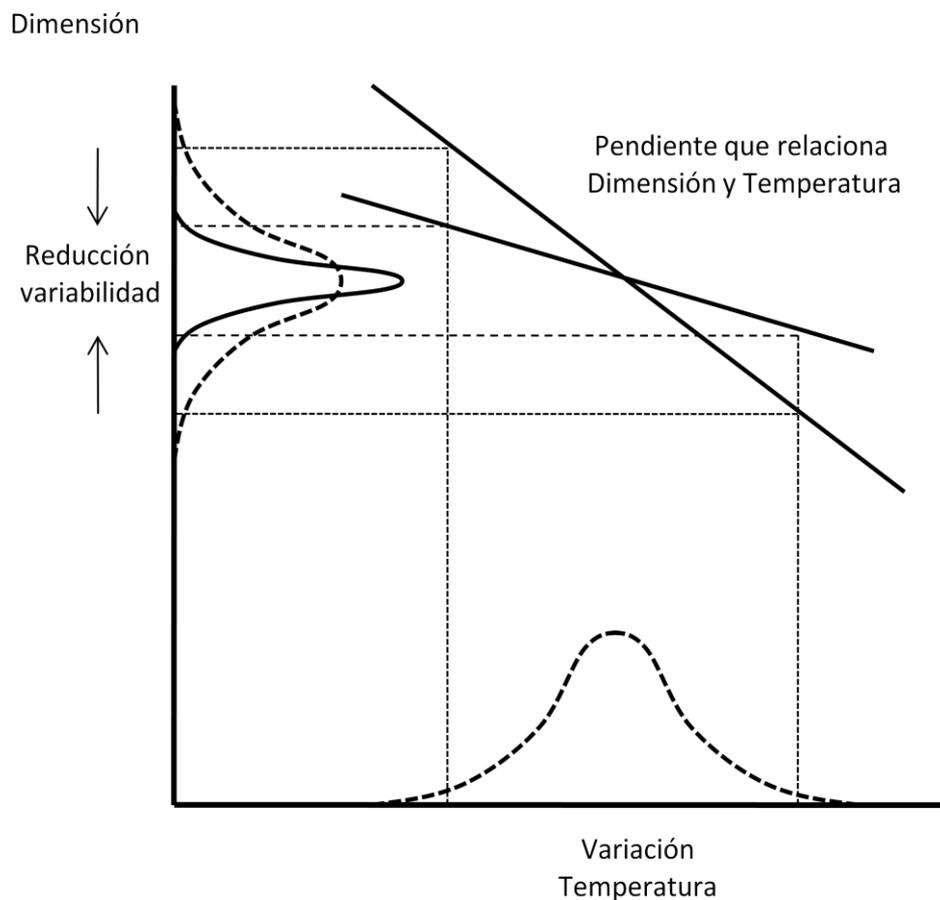


Figura 9.5: Modificación del efecto de la temperatura

La aplicación de estas soluciones exige un rediseño de las composiciones de materias primas intentando obtener alternativas que ofreciendo las mismas características funcionales del producto acabado, permitan un proceso con trabajo más estable. El coste de esta solución dependerá del esfuerzo de investigación y el sobrecoste que pueda suponer una composición diferente.

Aunque esta opción de reducción de variación debe tratarse de igual modo que las anteriores, estimando su inversión, coste y reducción de variabilidad esperada, su desarrollo excede el planteamiento inicial de este proyecto y las únicas opciones de aplicación inmediata que se consideran son pues las descritas en los puntos anteriores.

9.3.- SELECCIÓN DE ALTERNATIVAS

9.3.1.- RESULTADOS DE LAS DIFERENTES OPCIONES DE MEJORA

La siguiente Tabla 9.3 muestra para las soluciones sugeridas en el punto anterior para todas las causas de variación identificadas, la comparación entre la varianza inicial de cada factor (σ^2) y la máxima esperable con cada solución.

<i>Factor</i>	<i>Solución</i>	<i>Varianza inicial</i>	<i>Varianza esperada con la solución</i>
<i>H</i>	Control automático del atomizador	$1,81 \times 10^{-02}$	$2,50 \times 10^{-3}$
	Control automático atomizador y prensa		$5,50 \times 10^{-4}$
<i>P</i>	No se considera	$6,34 \times 10^{-01} (\text{Kg/cm}^2)^2$	$6,34 \times 10^{-01} (\text{Kg/cm}^2)^2$
<i>T</i>	Inversión en mesa de entrada horno	$3,12 (\text{°C})^2$	$1,52 (\text{°C})^2$
<i>Da.Comp</i>	Homogeneización arcillas y aguas residuales	$4,67 \times 10^{-07} (\text{gr/cc})^2$	$\leq 4,00 \times 10^{-07} (\text{gr/cc})^2$
<i>Cl.Comp</i>		$1,07 \times 10^{-02} \text{mm}^2$	$\leq 4,26 \times 10^{-04} \text{mm}^2$
<i>Cav</i>	Placas de compensación	$3,19 \times 10^{-06} (\text{gr/cc})^2$	$\leq 4,00 \times 10^{-07} \text{gr/cc})^2$
<i>Gra</i>	Control manual del gradientes	$1,18 \times 10^{-02} \text{mm}^2$	$\leq 2,78 \times 10^{-04} \text{mm}^2$
<i>Err Di</i>	No se considera	$2,78 \times 10^{-04} \text{mm}^2$	$2,78 \times 10^{-04} \text{mm}^2$

Tabla 9.3 Efecto sobre las variables de cada opción de mejora

La varianza de cada uno de los factores en la tabla anterior puede trasladarse a resultados de varianza final dimensional utilizando los coeficientes del modelo de composición de varianzas (Tabla 9.4).

<i>Variable</i>	<i>Solución</i>	<i>Contribución a la varianza dimensional inicial (mm²)</i>	<i>Contribución a la varianza dimensional final (mm²)</i>
<i>H</i>	Control automático del atomizador	3,19x10 ⁻⁰²	4,43x10 ⁻³
	Control automático atomizador y prensa		9,72x10 ⁻⁴
<i>P</i>	No se considera	2,61x10 ⁻⁰⁴	2,61x10 ⁻⁰⁴
<i>T</i>	Inversión en mesa de entrada horno	3,24x10 ⁻⁰³	2,43x10 ⁻⁰³
<i>Da.Comp</i>	Homogeneización arcillas y aguas residuales	1,04x10 ⁻⁰³	≤ 8,92x10 ⁻⁰⁴
<i>Cl.Comp</i>		1,07x10 ⁻⁰²	≤ 4,25x10 ⁻⁰⁴
<i>Cav</i>	Placas de compensación	7,10x10 ⁻⁰³	≤ 8,92x10 ⁻⁰⁴
<i>Gra</i>	Control manual del gradientes	1,18x10 ⁻⁰²	≤ 2,78x10 ⁻⁰⁴
<i>Err Di</i>	No se considera	2,78x10 ⁻⁰⁴	2,78x10 ⁻⁰⁴

Tabla 9.4 reducción de la contribución a la varianza final dimensional de cada solución

9.3.2- SELECCIÓN DE LA ALTERNATIVA QUE MAXIMIZA LA CAPACIDAD Y EL AHORRO

Utilizando la ecuación de composición de varianzas (Ec. 7.7), la contribución a la varianza de cada variable en cada solución detallada en la tabla 9.4, el modelo de

costes de variabilidad (Ec. 8.1) y el valor de inversión, se puede estimar la varianza esperada en cada combinación, y el ahorro correspondiente.

$$\sigma_{Dj}^2 = 1,76 \sigma_H^2 + 4,12 \times 10^{-4} \sigma_P^2 + 1,58 \times 10^{-3} \sigma_T^2 + 2,23 \times 10^{-3} (\sigma_{DaComp}^2 + \sigma_{Cav}^2) + \sigma_{CIComp}^2 + \sigma_{Grad}^2 + 2,78 \times 10^{-4}$$

Ec 7.7

$$\text{Coste} = 0,0328 * \sigma_{Dimensión} + 0,8255 * \sigma_{Dimensión}^2 \quad \text{Ec 8.1}$$

En las predicciones de variabilidad se ha considerado que la provocada por las materias primas, la diferencia entre cavidades de prensa y gradientes de horno es la máxima en cada una lo que supone la hipótesis más conservadora. Los valores esperables de varianza serán probablemente siempre menores que los estimados.

En la comparación de alternativas que se detallan en la tabla 9.5 se ha considerado solo aquellas que llevan a índices de capacidad superiores a 1; aunque el valor recomendable es superar índices de 1,3. La Tabla 9.14 muestra las únicas alternativas que llevan a situaciones de procesos capaces:

Actuación	A	B	C	D	E	F	G
Control Humedad							
Temperatura							
Homog. Mat. Primas							
Compensación Cavid. Prensa							
Reducción Grad. Horno							
Varianza esperada mm ²	1,36E-02	1,61E-02	2,65E-02	2,33E-02	2,40E-02	2,07E-02	2,51E-02

Capacidad proceso	1,43	1,31	1,02	1,09	1,08	1,16	1,05
Coste inversión €/m ²	4,36E-02	3,78E-02	2,15E-02	3,45E-02	2,73E-02	4,03E-02	4,21E-02
Reducción coste €/m ²	5,67E-02	5,42E-02	4,44E-02	4,75E-02	4,68E-02	4,99E-02	4,58E-02
Ahorro total €/m ²	1,31E-02	1,64E-02	2,29E-02	1,30E-02	1,95E-02	9,60E-03	3,70E-03

Tabla 9.5 Alternativas que ofrecen índices de capacidad mayores de 1

Para cada actuación, aparecen:

- Las combinaciones de solución aplicadas (celdas sombreadas)
- El resultado de varianza dimensional esperado (varianza mm²)

-
- La capacidad del proceso esperada C_{pm} considerando que el proceso está centrado en el valor nominal, que la desviación σ es la correspondiente a la varianza dimensional esperada y el intervalo de especificaciones es el de 1 calibre (1 mm)
 - El coste de la inversión: repercusión en €/m² del gasto asociado a cada solución.
 - La reducción de coste esperada por la reducción de variabilidad (diferencia entre el coste de variabilidad para la situación inicial y el esperado) estimado con la función de costes
 - El ahorro total: diferencia entre el ahorro de coste por reducción de variabilidad y el coste de la inversión.

De la comparación de estas alternativas se pueden obtener las siguientes conclusiones:

- Las alternativas D F y G se descartan, ya que aun suponiendo una mejora respecto a la situación inicial, los índices de capacidad son muy próximos a 1 y el ahorro neto es el menor.
- Las alternativa C y E también se descartan ya que aunque son las que supone el mayor ahorro, su índice de capacidad no es muy superior a 1, lo que supondría un proceso que con cualquier desplazamiento supondría la producción de material fuera de especificaciones.
- La alternativa A es la que ofrece la mínima varianza y el índice de capacidad más elevado, este resultado es lógico ya que es la que incorpora todas las soluciones, pero no es la más recomendable ya que su inversión es la más elevada y su ahorro neto no es el mejor.
- La alternativa más recomendable es la B, ya que ofrece un índice de capacidad suficientemente alto (1,31) y es económicamente más interesante que la A, que pese a ofrecer una menor varianza, su mejora no se compensa con la inversión.

Tal y como se describe en el capítulo 5, pueden representarse estas propuestas en un gráfico coste de la inversión / ahorro por reducción de variabilidad.

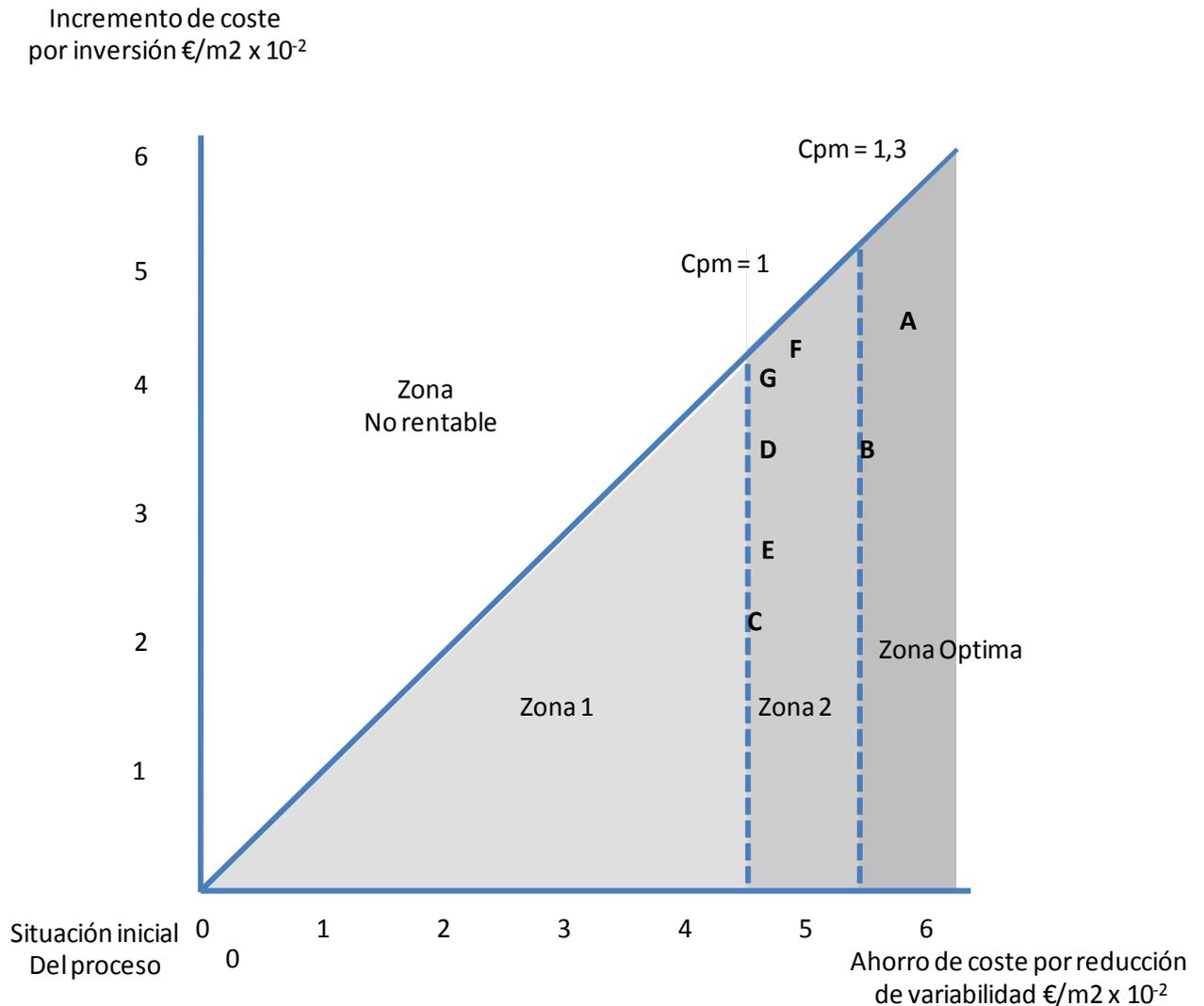


Figura 9.4: representación gráfica del coste y ahorro de las propuestas con índices de capacidad mayores a 1

Resultados esperados con la alternativa seleccionada.

El modelo de composición de varianzas predice una varianza final para la alternativa seleccionada B de $1,61 \times 10^{-2} \text{ mm}^2$; valor que corresponde a una desviación típica de 0,127 mm y que establece un intervalo de variación $\pm 6\sigma = 0,76 \text{ mm}$, inferior a las

especificaciones para 1 calibre; el índice de capacidad resultante sería en este caso: $C_{pm} = 1,31$ Valor muy superior al inicial $C_{pm} = 0,56$.

El incremento de coste correspondiente se ha estimado en $3,78 \times 10^{-2} \text{ €/m}^2$ y el ahorro por reducción de variabilidad en $5,42 \times 10^{-2} \text{ €/m}^2$, lo que supone un ahorro neto de $1,64 \times 10^{-2} \text{ €/m}^2$.

El efecto gráfico de la reducción de variación puede apreciarse comparando la distribución de datos inicial (figura 9.5) y la esperada, observando que distribución de datos final (figura 9.6) incluye a la totalidad de la población en el intervalo correspondiente a las especificaciones para 1 "calibre" : (331,0 -332,0 mm).

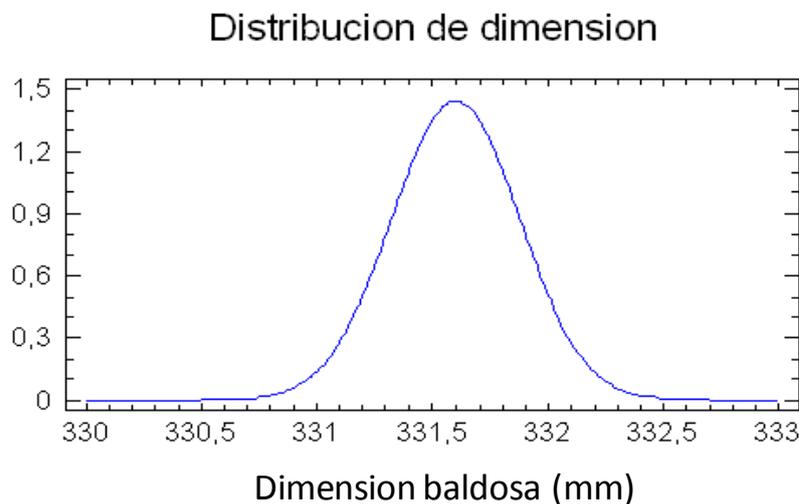


Figura 9.5: Distribución inicial de valores de dimensión de baldosa

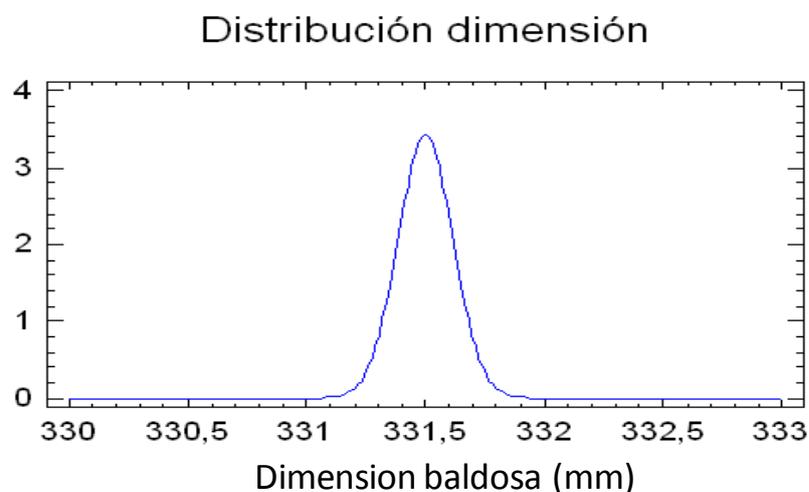


Figura 9.6: Distribución final de valores de dimensión de baldosa

9.4.- LIMITACIONES

Los resultados de variabilidad obtenidos y los componentes de los modelos de transmisión de variabilidad y costes corresponden a este proceso concreto y no son cuantitativamente trasladables a otros casos similares ya que dependiendo del tipo de composición empleada, maquinaria y nivel de automatización, así como del coste de producción de diferentes instalaciones los modelos de relación y los resultados pueden ser diferentes; no obstante, el modelo y sus componentes no cambia ya que los factores de variación son los mismos en todos los procesos cerámicos similares.

Pese a los resultados obtenidos en el proceso utilizado como demostración en el que se han identificado opciones de mejora que pueden llevar a un resultado acorde con las especificaciones establecidas para 1 “calibre”, es evidente que una reducción de las especificaciones puede invalidar la propuesta; la alternativa seleccionada ofrece un índice de capacidad de 1,31, pero un cambio en las especificaciones finales reduciendo el intervalo de las mismas puede llevar de nuevo a una situación de incapacidad del proceso.

La aplicación se ha desarrollado para modelar un proceso produciendo un formato de 331x331 mm; la evolución de los productos cerámicos a formatos de mayor tamaño supone un hándicap importante ya que el aumento de tamaño del producto, que conlleva un aumento equivalente del rango de variación del proceso no lleva asociado un aumento equivalente de las especificaciones dimensionales para 1 “calibre” ya que estas están normalmente determinadas por el proceso de colocación.

Esta situación se detalla en la tabla 9.6 en la que se compara el intervalo de variación dimensional esperado para el proceso en distintos formatos con la aplicación de las soluciones planteadas en la opción seleccionada (B) y el intervalo definido por las tolerancias (Especificaciones para 1 “calibre”). El intervalo de variación (6σ) se ha calculado a partir de la varianza esperada para la solución B y suponiendo que el cambio de formato en las mismas condiciones de operación no supone ningún cambio en la variabilidad de la contracción lineal de la baldosa y por tanto el intervalo de variación aumenta proporcionalmente. El intervalo de tolerancias es el establecido por la empresa para el calibrado de los diferentes formatos

<i>.Formato (cm)</i>	<i>Variabilidad proceso esperada (Intervalo 6σ)</i>	<i>Tolerancia 1 "Calibre" mm</i>	<i>Capacidad proceso</i>
33x33	0,76 mm	1 mm	1,31
41x41	0,95 mm	1 mm	1,05
50x50	1,15 mm	1,2 mm	1,04
60x60	1,38 mm	1,2 mm	0,87

Tabla 9.6 Comparación de capacidades para distintos formatos

En esta tabla se observa claramente que la solución planteada solo proporciona índices de capacidad superiores a 1 hasta el formato de 50x50; dado que las opciones de mejora de maquinaria y automatización disponibles son las descritas en esta aplicación, la única alternativa válida para mejorar el proceso en formatos grandes sería reducir la variabilidad modificando los coeficientes del modelo de relación entre variables; es decir, "robusteciendo" el comportamiento de la formulación de soporte y haciéndola menos insensible a las variaciones del proceso. La utilización de los modelos desarrollados permitiría en este caso estimar a priori, conociendo los resultados empíricos de cualquier propuesta de modificación de composición cuáles serían los resultados finales esperados.

Capítulo 10.

Validación industrial

10.1.- CONDICIONES DE OPERACION

10.2.- RESULTADOS DEL PROCESO

10.3- CONCLUSIONES

10.1.- CONDICIONES DE OPERACION

Seleccionada la alternativa “B” como la más recomendable para obtener la reducción de variabilidad con el máximo ahorro, la última operación es su aplicación industrial para confirmar la validez de los resultados predichos.

Por limitaciones ajenas a este trabajo no sido posible implantar la solución “B” completa, ya que la implantación del sistema automático de control de presión de prensado para compensar diferencias de humedad requiere modificaciones en el sistema de control de la máquina y estas deben cumplir unos protocolos de seguridad que implican procedimientos administrativos con plazos superiores a la ejecución de este trabajo; no obstante si se ha podido experimentar el resultado del proceso con la aplicación de todas las demás soluciones planteadas en esta alternativa:

- Mejora de la homogeneización de materias primas y reciclado de aguas.
- Sistema de control automático de humedad en el atomizador
- Homogeneización de la diferencia entre cavidades del molde
- Homogeneización de la diferencia de gradientes de temperatura en el horno

El plan del control del proceso se ha modificado, las tolerancias asignadas a las variables del proceso se han modificado respecto a la situación inicial estableciendo valores equivalentes al intervalo de variación $\pm 3\sigma$ y tomando como valor de desviación la esperada para la variable en las condiciones de operación estables.

Para los factores de variación cuyo efecto se mide a partir del análisis de la respuesta (Diferencias de composición, diferencias entre cavidades de prensa y gradientes de temperatura en el horno), se ha considerado la situación correspondiente al “peor caso”, es decir, una variación máxima correspondiente al efecto que ya no puede medirse por resultar no significativo en el análisis de la varianza.

10.2.- RESULTADOS DEL PROCESO

Materias primas y sistema de reciclado de aguas:

Se han optado por la opción de homogeneización de arcillas en los propios yacimientos, pagando al proveedor el sobrecoste correspondiente a esta operación y

se han instalado las balsas de homogeneización de aguas residuales descritas en el capítulo 9 para poder garantizar la homogeneidad.

El control de la variación generada por la composición tanto en el resultado de densidad aparente en prensado como de la contracción lineal se ha realizado tomando muestras periódicas de polvo atomizado y caracterizando el comportamiento del material en prensado y cocción según el procedimiento descrito en el manual de control de materias primas (ITC 1998). Se ha establecido como especificación llegar a un nivel de homogeneización tal que las diferencias de comportamiento del polvo atomizado por estos factores no resulte significativa en el análisis de varianza.

Siguiendo un procedimiento equivalente al descrito en el punto 7.2.4.2 se han tomado muestras de polvo atomizado en la prensa durante el periodo analizado, procesándolas en las mismas condiciones de humedad, presión y temperatura de cocción y verificando que las diferencias no resultan significativas como puede observarse en el ANOVA.

<i>Fuente variación</i>	<i>Grados libertad</i>	<i>Suma de cuadrados</i>	<i>Promedio de los cuadrados</i>	<i>F</i>	<i>nivel de significación p</i>
Composición	14	0,97942	0,06999	1,28	0,276
Error	30	1,63987	0,05466		
Total	44	2,61929			

Tabla 10.1 ANOVA de los efectos de la composición

Se considera pues que la contribución a la varianza final de estos factores es siempre inferior al valor máximo determinado por la varianza del sistema de medición lo que supone unos valores máximos de contribución a la varianza dimensional final de:

- Contribución a la varianza dimensional final por las diferencias de densidad aparente en prensado de la composición: $\leq 8,92 \times 10^{-4} \text{ mm}^2$
- Contribución a la varianza dimensional final por las diferencias de contracción lineal de la composición: $\leq 4,26 \times 10^{-4} \text{ mm}^2$

Humedad del polvo atomizado:

El polvo atomizado procede de una instalación de atomización con control automático de humedad en el atomizador, la tolerancia se ha determinado a partir del intervalo de variación $\pm 3\sigma_H$ esperado para la solución que resulta $\pm 0,15\%$. La varianza esperada con esta solución para la humedad es de $\hat{\sigma}_H^2 = 2,5 \times 10^{-3}$.

La variación de humedad en la prensa se ha estimado con el mismo método utilizado en la aplicación experimental observándose la variación que se refleja en el gráfico de la figura 10.1

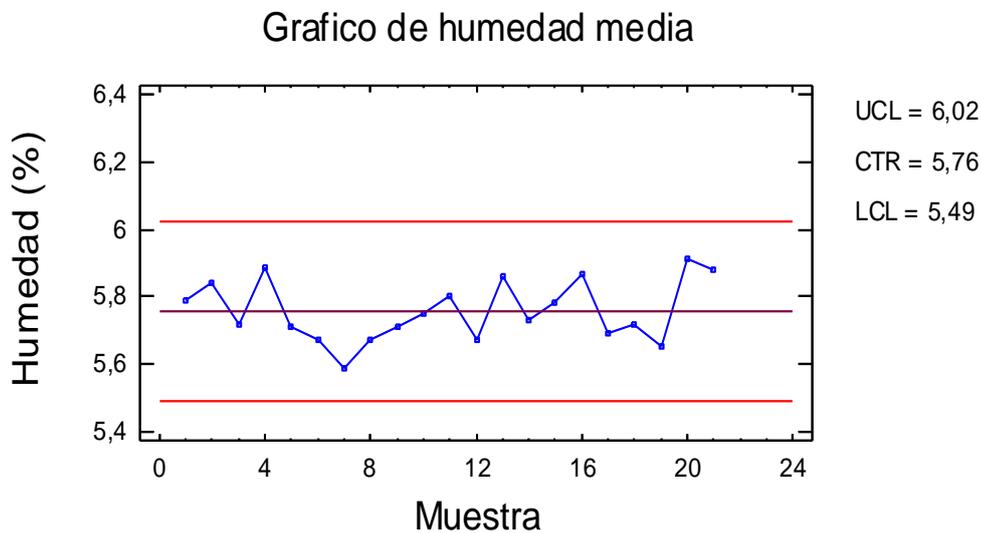


Figura 10.1: Variación de humedad en prensa tras la aplicación del control automático

en el que se ha medido una desviación de de 0,08 % que supone un intervalo de variación $6\sigma_H = 0,48$ % que corresponde a una varianza $\hat{\sigma}_H^2 = 6,70 \times 10^{-3}$, valor al que hay que descontar el error de medida de la humedad $\hat{\sigma}_{Error\ Medida\ H}^2 = 4,44 \times 10^{-3}$, obteniéndose una varianza final de la humedad

$$\hat{\sigma}_H^2 = 2,3 \times 10^{-3}$$

Esta varianza resulta ligeramente inferior a la esperada de $2,5 \times 10^{-3}$ y, según el modelo de composición de varianzas supone una contribución a la varianza dimensional final de $4,05 \times 10^{-3} \text{ mm}^2$

Presión de prensado

No se ha realizado ningún cambio en el sistema.

Se han registrado de nuevo los valores de presión específica medidos por el manómetro de la prensa y estos se han tratado con un gráfico de control obteniendo $\hat{\sigma}_p^2 = 0,712 \text{ (Kg/cm}^2\text{)}^2$; valor ligeramente superior al obtenido en el capítulo 7 de $0,634 \text{ (Kg/cm}^2\text{)}^2$ y que supone una contribución a la varianza dimensional final de $2,94 \times 10^{-4} \text{ mm}^2$

Diferencia entre cavidades de la prensas

Las prensa se ha equipado con un sistema de compensación de diferencias entre cavidades; el criterio exigido ha sido no detectar diferencias significativas de densidad aparente entre cavidades en el ANOVA lo que supone en el peor caso una varianza máxima esperable inferior al orden de magnitud de medida de la densidad aparente que resulta de $4 \times 10^{-7} \text{ (gr/cc)}^2$ y que equivale a una varianza dimensional final de $8,92 \times 10^{-4} \text{ mm}^2$.

Se ha verificado mediante ANOVA que la diferencia de resultados de densidad aparente obtenidos en las diferentes cavidades no resulta significativa.

Densidad aparente de prensa

Se ha monitorizado el resultado de densidad aparente de prensa, analizando los datos con gráficos de control y obteniendo los resultados de variación observados en la figura 10.2

La desviación estimada es de $1,86 \times 10^{-3} \text{ cm}^3$ lo que corresponde a una varianza de $\hat{\sigma}_{D_a}^2 = 2,46 \times 10^{-6} \text{ (gr/ cm}^3\text{)}^2$

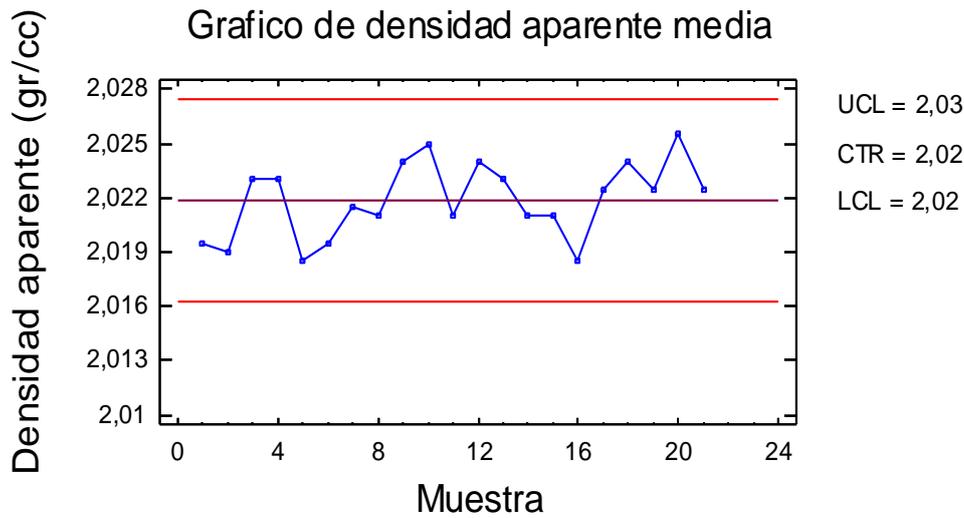


Figura 10.2: Variación de la densidad aparente en la prensa tras la aplicación del control automático de humedad en el atomizador

Podemos comparar este valor con el predicho por el modelo de composición de varianzas para la densidad aparente

$$\sigma_{Dap}^2 = 7,92 \times 10^{-4} \sigma_H^2 + 1,84 \times 10^{-7} \sigma_P^2 + \sigma_{DaComp}^2 + \sigma_{Cav}^2 + 4,0 \times 10^{-7} \quad \text{Ec 7.7}$$

en el que los términos σ_H^2 y σ_P^2 corresponderán a los valores de varianza estimados para estas variables, el término σ_{DaComp}^2 así como el término σ_{Cav}^2 tienen un valor máximo de $4,00 \times 10^{-07} (\text{gr/cc})^2$, que corresponde al nivel en el que ya no se pueden detectar diferencias significativas y la varianza del sistema de medida de la densidad aparente supone una contribución de $4,00 \times 10^{-07} (\text{gr/cc})^2$

El valor predicho por el modelo es de $3,15 \times 10^{-6} (\text{gr/ cm}^3)^2$, superior al valor medido de $2,46 \times 10^{-6} (\text{gr/ cm}^3)^2$, la diferencia corresponde a los valores de σ_{DaComp}^2 y σ_{Cav}^2 cuyos valores se han considerado al nivel máximo y probablemente son mucho menores.

Temperatura y gradientes de temperatura

No se han modificado las condiciones de control de temperatura. La variabilidad de la temperatura máxima se ha estimado al igual que en el capítulo 5 tomando lectura de los valores correspondientes a la temperatura registrada por los sensores; la varianza

correspondiente a la temperatura $\hat{\sigma}^2_T$ obtenida tras tratar la información registrada en los sensores con un gráfico de control y descontar el error correspondiente ha sido $\hat{\sigma}^2_T = 4,21 \text{ }^\circ\text{C}^2$, valor ligeramente superior al obtenido en la estimación realizada en el capítulo 7 y que supone una contribución a la varianza dimensional final de $6,74 \times 10^{-3} \text{ mm}^2$

Para las diferencias dimensionales entre distintos canales del horno se ha establecido como especificación la misma condición que para las variaciones de composición y gradientes de prensa, es decir, sus diferencias no deben resultar significativas en el análisis de varianza, lo que establece una contribución a la varianza dimensional máxima de $\leq 2,78 \times 10^{-4} \text{ mm}^2$

Para conseguir esta reducción se han compensando las diferencias instalando “deflectores” en los quemadores del horno y regulando las presiones internas del equipo hasta verificar que el ANOVA resultante del control de los diferentes canales no ofrece diferencias significativas.

Fuente de variación	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Cuadrado medio	F_0	Nivel de significación p
Entre canales	0,278545	4	0,0696364	0,77	0,546
Dentro del canal	9,48364	105	0,0903203		
Total	9,76218	109			

Tabla 10.2 ANOVA del efecto de los gradientes de horno

Medida de la variabilidad dimensional final

Al igual que se realizó en el capítulo 7, se han tomado muestras de las baldosas sobre las que se ha medido la dimensión; el resultado se ha analizado con un gráfico de control con el siguiente resultado:

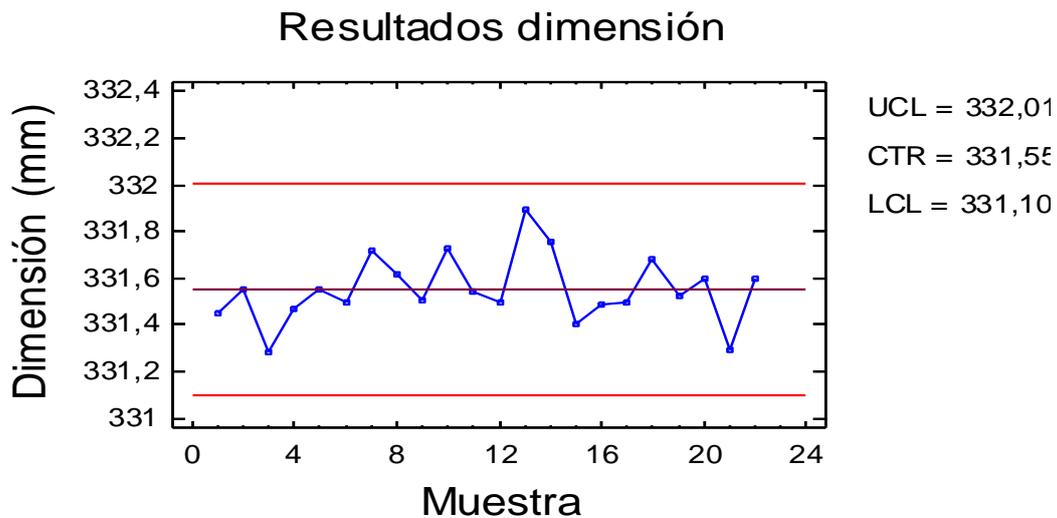


Figura 10.3: Gráfico de control de la dimensión media de las baldosas

No aparece ningún punto fuera de los límites de control y el proceso está prácticamente centrado en el valor nominal. La desviación estimada es $\hat{\sigma}_{Dimensión} = 0,152$ mm, valor que determina una variabilidad ($\pm 3\hat{\sigma}_{Dimensión} = \pm 0,46$ mm) y una varianza:

$$\hat{\sigma}_{Dimensión}^2 = 2,31 \times 10^{-2} \text{ mm}^2$$

La varianza final real del proceso es menor ya que a este valor habría que descontar la del sistema de medición $\hat{\sigma}_{DrrorDi}^2 = 2,78 \times 10^{-4} \text{ mm}^2$ lo que ofrece un resultado final de $\hat{\sigma}_{Dimensión}^2 = 2,28 \times 10^{-2} \text{ mm}^2$ y determina una variabilidad dimensional real ($\pm 3\hat{\sigma}_{Dimensión} = \pm 0,45$ mm), no obstante, la clasificación del producto en subgrupos de diferentes calibres se realiza a partir del valor medido por lo que la variabilidad final que se utilizará para estimar la capacidad del proceso es la correspondiente al valor medido.

Este valor determina un índice de capacidad $Cpm = 1,09$; lo que supone un proceso “capaz de cumplir con las especificaciones establecidas para el rango de 1 “calibre” y cuya distribución de resultados corresponde al objetivo. En la figura 10.4 puede observarse la distribución de dimensiones y comprobarse que el 100 % de la población está dentro del intervalo definido para el “calibre central” (331.00 – 332,00 mm)

Distribución de resultados

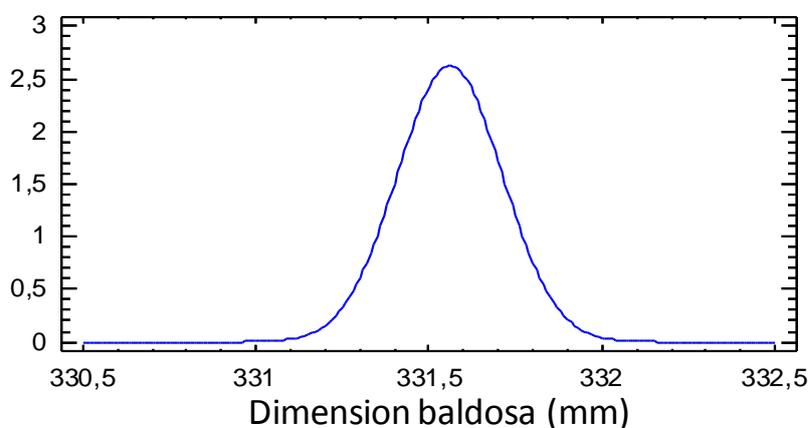


Figura 10.4: Distribución de los valores de dimensión con la solución aplicada

Comparación entre variaciones previstas y obtenidas

La siguiente tabla detalla la varianza esperada para cada factor de variación y su contribución a la varianza final esperada y los valores obtenidos

Factor	Varianza esperada	Contribución a la varianza final esperada (mm ²)	Varianza medida	Contribución a la Varianza medida (mm ²)
<i>H</i>	$2,50 \times 10^{-3}$	$4,43 \times 10^{-3}$	$2,30 \times 10^{-3}$	$4,05 \times 10^{-3}$
<i>P</i>	$6,35 \times 10^{-1} \text{ (Kg/cm}^2\text{)}^2$	$2,61 \times 10^{-04}$	$7,12 \times 10^{-1} \text{ (Kg/cm}^2\text{)}^2$	$2,94 \times 10^{-4}$
<i>T</i>	$3,12 \text{ }^\circ\text{C}^2$	$4,98 \times 10^{-03}$	$3,21 \text{ }^\circ\text{C}^2$	$6,74 \times 10^{-3}$
<i>Da.Comp</i>	$\leq 8,92 \times 10^{-04} \text{ (gr/cc)}^2$	$\leq 8,92 \times 10^{-04}$	No significativa	$\leq 8,92 \times 10^{-04}$
<i>Cl.Comp</i>	$\leq 4,26 \times 10^{-04} \text{ mm}^2$	$\leq 4,26 \times 10^{-04}$	No significativa	$\leq 4,26 \times 10^{-04}$
<i>Cav</i>	$\leq 4,00 \times 10^{-07} \text{ (gr/cc)}^2$	$\leq 8,92 \times 10^{-04}$	No significativa	$\leq 8,92 \times 10^{-04}$
<i>Gra</i>	$\leq 2,78 \times 10^{-04} \text{ mm}^2$	$\leq 2,78 \times 10^{-04}$	No significativa	$\leq 2,78 \times 10^{-04}$
<i>Err Di</i>	$2,78 \times 10^{-04} \text{ mm}^2$	$2,78 \times 10^{-04}$	$2,78 \times 10^{-04}$	$2,78 \times 10^{-04}$

Tabla 10.3 Comparación entre las variabilidades esperadas y las obtenidas

10.3.- COMPOSICION DE VARIANZAS

El modelo de composición de varianzas del proceso completo incluyendo la contribución a la varianza final medida en las variables, los valores máximos esperados para aquellas que han resultados no significativas y el error del modelo determinado en el capítulo 7 predice una varianza de $2,19 \times 10^{-2} \text{ mm}^2$

$$\sigma_{Df}^2 = 1,77\sigma_H^2 + 4,12 \times 10^{-4} \sigma_P^2 + 1,60 \times 10^{-3} \sigma_T^2 + 2,23 \times 10^{-3} (\sigma_{DaComp}^2 + \sigma_{Cav}^2) + \sigma_{ClComp}^2 + \sigma_{Grad}^2 + 2,78 \times 10^{-4} + \varepsilon \quad \text{Ec. 7.7}$$

El valor obtenido $2,31 \times 10^{-2} \text{ mm}^2$ es ligeramente mayor que el predicho pero sigue resultando de un orden equivalente lo que de nuevo confirma la validez de la propuesta y define un proceso con resultados de variación muy diferentes a los obtenidos previamente en el proceso sin la aplicación de las soluciones:

- La variabilidad final se ha reducido hasta tener un proceso capaz con un valor de $C_{pm} = 1,09$ lo que aún no alcanzando el valor recomendable de 1,30, permite obtener si el proceso está centrado y estable toda la población de baldosas en el intervalo especificada para 1 calibre.
- El coste de la inversión en las soluciones estimado en $2,32 \times 10^{-2} \text{ €/m}^2$ se compensa sobradamente con el ahorro por variabilidad que puede estimarse a partir de la función de costes como la diferencia entre el coste en la situación inicial $7,17 \times 10^{-2} \text{ €/m}^2$ y el de la situación de variabilidad $1,70 \times 10^{-2} \text{ mm}^2$

$$\text{Coste} = 0,0328 * \sigma_{\text{Dimensión}} + 0,8255 * \sigma_{\text{Dimensión}}^2 \quad \text{Ec 8.1}$$

Resultando un valor de es de $5,33 \times 10^{-2} \text{ €/m}^2$, muy superior al de la inversión citada.

La solución analizada no es la óptima ya que faltaría mejorarla con la inversión para el control automático de humedad en la prensa, que reduciría todavía más la variabilidad final; no obstante ha permitido validar de nuevo el modelo de transmisión de variabilidad y obtener unos resultados similares a los esperados.

CONCLUSIONES Y BIBLIOGRAFIA

Capítulo 11.

Conclusiones y futuros desarrollos

La metodología planteada se ha confirmado eficaz para poder modelar tanto la transmisión como el coste de la variabilidad en un proceso multi-etapa y a partir de esta información realizar un proceso de selección de alternativas de mejora que lleven al proceso al resultado requerido del modo más económico. Las previsiones realizadas para las acciones de mejora, con los modelos estimados de composición de varianzas se han verificado industrialmente.

La utilización de los gráficos de control ha permitido estimar la variación generada por cada variable a partir de los datos del propio proceso asegurando que estos son representativos del mismo y que este se ha encontrado en estado de control estadístico; el análisis de varianza ha permitido estimar la contribución de factores que no pueden medirse directamente y cuyo efecto en la variabilidad solo puede medirse a partir de su efecto en la respuesta; esta información junto al modelo de transmisión de variabilidad ha permitido estimar la contribución de cada uno de los diferentes factores de variación al resultado final. No obstante a las limitaciones impuestas por la aproximación de modelos lineales de relación entre variables y la exclusión de algunas que a priori se han considerado con efectos no significativos el resultado final del modelo aproxima suficientemente bien el obtenido en el proceso.

La utilización de los conceptos de costes de calidad ha permitido estimar un indicador de coste de variabilidad a partir de la información general de costes del proceso y evaluar el impacto económico de diferentes situaciones de variación, lo que ha permitido modelar una función de costes que ha confirmado los modelos teóricos propuestos por diversos autores. Aunque el modelo obtenido no sea exacto es una aproximación suficiente para poder conocer cuál es el impacto del problema y por otro, poder estimar el resultado de cualquier acción de mejora.

La aplicación para el caso concreto de la variabilidad dimensional de las baldosas cerámicas ha permitido demostrar su utilidad práctica; en el caso concreto estudiado se ha identificado la mejor opción de trabajo y se ha podido validar industrialmente una alternativa que aún no siendo la optima, ha permitido pasar de un proceso incapaz de cumplir con los requisitos de calidad a un proceso capaz de hacerlo detallando y validando el efecto de cada una de las actuaciones. Pese a las limitaciones de la aplicación en la mejora de la variación dimensional descritas en el capítulo 9, el proceso se ha mejorado hasta el nivel requerido y se han determinado las bases para poder orientar futuras acciones de mejora.

El problema de la variación dimensional no es el único problema de variabilidad en la producción de baldosas cerámicas, las características de tonalidad o las deformaciones geométricas de las baldosas son características de calidad que presentan problemas equivalentes con situaciones en las que los procesos suelen ser incapaces de trabajar cumpliendo con las especificaciones del mercado; las próximas aplicaciones en esta línea de investigación se desarrollarán en el estudio y mejora de estos problemas.

El método planteado es utilizable para modelar y mejorar el problema de transmisión de variabilidad en cualquier proceso multi-etapa con características similares al descrito, siempre que el conocimiento previo del mismo sea suficiente como para identificar con suficiente aproximación las variables críticas que definirán el modelo de transmisión de variabilidad y sea viable determinar mediante experimentación los modelos de relación entre las mismas que determinen los coeficientes de los modelos.

El método planteado trata situaciones en las que la calidad del producto se determina mediante una característica de calidad independiente (la dimensión de la baldosa en el caso planteado); en muchas situaciones esta simplificación puede ser válida e incluso si las características de calidad son varias pero independientes, pero en muchas situaciones las variables que definen la calidad del producto no son independientes de modo que cualquier solución para la mejora de una puede tener efectos diferentes en otras; la diferencia esencial entre estas situaciones y el modelo planteado es la complejidad de los modelos de relación, que no obstante siempre pueden modelarse a partir del conocimiento previo del proceso y la experimentación en el mismo.

Próximos desarrollos de esta línea de investigación tratarán modelos de transmisión de variabilidad más complejos utilizando una metodología equivalente para, a partir del conocimiento empírico del proceso y la experimentación industrial definir los modelos de relación y, utilizando las herramientas estadísticas recomendadas establecer los modelos de transmisión de variabilidad que junto al modelo de costes permitan procesos de mejora como el desarrollado.

Capítulo 12.

Bibliografía

1. Agramunt JV. Almela V. Cantavella V. Enrique JE. Feliu C. *Eliminación del mercurio en el procedimiento experimental de medida de densidad aparente de piezas cerámicas.* Técnica cerámica 235 461-469 (1995)
2. Agravall R. y Lawless J.F. 1999 “*Analysis of variation transmission in manufacturing process*” . Journal of Quality Technology Vol. 31 N 2 April (1999)
3. AICE *Procedimiento y equipo para determinar la distribución de temperaturas en maquinas térmicas con sistemas de rodillos para transporte de producto.* Pat 94/00934 (1994)
4. Amorós J.L. Blasco A. Beltrán V. Negre F. *Pastas de gres de monococción. Influencia de las variables del proceso en la calidad del producto acabado* Técnica Cerámica, 120, 1368-1384, (1984.)
5. 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, 792-812, (1982).
6. Amorós JL. Blasco A. Enrique JE. *Estudio de la compactación de soportes cerámicos de pavimento y revestimiento. Influencia del tamaño de granulo de atomizado.* Boletín de la sociedad española de cerámica y Vidrio 21 (4-5) 245-250 (1982)

7. Amorós JL. Beltrán V. Negre F. Escardino A. *Estudio de la compactación de soportes cerámicos de pavimento y revestimiento Influencia de la humedad y presión de prensado*. Boletín de la sociedad española de cerámica y vidrio 22 (1) 8-18 (1983)
8. Amorós J.L. Blasco A. Enrique J.E. “*Características de polvos cerámicos para prensado*” Boletín de la Sociedad española de cerámica y vidrio 26 1. 31-37 (1987)
9. Amorós JL. *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* Tesis doctoral Universidad de Valencia (1987)
10. Amorós JL. *Operación de prensado. Consideraciones técnicas de su aplicación industrial* Cerámica industrial 5 (5) 23-28 (2000)
11. Amorós JL. Negre F. Bagan V. Feliu C. *Métodos de la determinación de características tecnológicas de aglomerados. Métodos de determinación de la fluidez y densidad aparente* Técnica cerámica 146 380-386 (1986)
12. Amorós JL. Sánchez E. García J. Cantavella V. Monzo M. *Propiedades mecánicas de los soportes cerámicos crudos* en Qualicer 2000 Congreso mundial de la calidad del azulejo y del pavimento cerámico. Castellón PGI 59-75 (2000)
13. Amorós JL. Bagan V. Orts MJ. Escardino A. *La operación de prensado en la fabricación de pavimentos por monococción Influencia de la naturaleza del polvo sobre las propiedades de la pieza en crudo* Bol sociedad española de cerámica y vidrio 273 – 282 (1988)
14. *Apuntes de tecnología cerámica*. Universidad de Valencia (1982)
15. Appley D. and Shi J. 1998 *Diagnosis of multiple fixture faults in panel assembly* ASME transactions Journal of manufacturing science and Engineering for Industry 120 793-801 (1998)

16. Appley D. and Shi J 2001 *A factor analysis method for diagnosing variability in multivariate manufacturing processes* Technometrics 43.84 (2001)
17. ASQ *The quality Engineer Primer*. Billl Wortman Quality conuncil of Indiana Fourth edition (1995)
18. Bagan V. *Efecto de las condiciones de operación en las distintas etapas del proceso sobre las propiedades y características del pavimento de muy baja porosidad*. Tesis doctoral Universidad de valencia (1991)
19. Barba A. Beltrán V. Feliu C. García J. Gines F. Sánchez E. Sanz V. "*materias primas para la fabricación de soportes de baldosas cerámicas*" ITC-AICE (2002)
20. Berrin L. Johnson DW. Nitti DJ. American Ceramic Bulletin 840-844, 51 (11) (1972)
21. Box G. and Hunter 1993 *estadística para investigadores* Ed reverté Pp 571-599 (1993)
22. Box, G. and Fung, C.A. 1986. *Studies in Quality Improvement: minimizing transmitted variation by parameter design*. Technical report nº 8. Center for Quality and Productivity Improvement. Madison. WI. (1986)
23. Boyles R.A. *The Taguchi capability index* Journal of quality Technology Vol 32 pp 395 – 409
24. Brewer J.A. Mooer R.H. Reeds J.S. A American ceramic society bulletin 212-16 62(2) (1981)
25. Cantavella M. "*apuntes del modulo desarrollo de composiciones*" desarrollo y fabricación de productos cerámicos (2004)
26. Cantavella V. Moreno A. Mezquita *Distribución de temperaturas en el interior de una pieza durante la cocción industrial* Cer inf 331 61-68 (2006)
27. Ceglarek D. Shi J. *A knowledge based diagnostic approach for the launch of the automotive assembly process* ASME Transactions, Journal of Engineering fo Industry 116 491-499 (1994)

-
28. Ceramic World Review N 83 August – October (2009)
 29. Chan L.K. Cheng S.W. 1988 *A new measure of process capability* Journal of quality technology Vol 20 pp 160-175 (1988)
 30. Contoli L. *Variables que influyen en el prensado de pavimentos y revestimientos cerámicos* Técnica cerámica 130 36-48 (1985)
 31. Dimilia R.A. Reed J.S. American ceramic society bulletin 484-88 62(4) 1983
 32. Djurdjanovic D. and Ni J. (2001) *Linear space modeling of dimensional machining errors* Transactions of Mammisme XXIX 541-548 (2001)
 33. Enrique J.E. Monfort E. Musani G. Mallo G. *Reciclado de aguas residuales en la fabricación de baldosas cerámicas* Boletín de la sociedad española de cerámica y vidrio 39 (1) 149-154,(2000)
 34. Enrique J.E. Monfort E. Celades I. Mallo G. *Water saving techniques in the spanish tile industry* Tile Brik Int. 16 (1) 12-17,(2000)
 35. Enrique JE .García J. Amorós JL. Beltrán V. *Alternativas al método de inmersión en mercurio para la determinación de la densidad aparente de las baldosas cerámicas.* Técnica cerámica 250 ,18-27 (1997)
 36. Escardino A.; Amorós J.L.; Enrique J.E *El diagrama de gresificación en la fabricación de pavimentos de gres.* Cerám. inf., 84, 211-220, (1981).
 37. EN 14411. (Marzo 2007) “*Baldosas ceramicas, definiciones, clasificación , características y mercado*” (2007)
 38. Feigenbaum A.V. 1961 *Total Quality Control* First Edition Mc graw –Hill N.Y. (1961)
 39. Feliu C. Llorens D. Cantavella V. Mezquita A. *Medida no destructiva de la densidad aparente de piezas en crudo mediante absorción de rayos X* Qualicer 2006 IX congreso mundial de la calidad del azulejo y del pavimento cerámico Castellón P.BC. 69-82 (2006)
 40. Fischer E Powder metal Interceram 174-80 18 (3) (1986)

-
41. Frish B; Backes E Suppl. Interceram 1-6, 35 (1986)
 42. Galindo R. *El molde en la fabricación de la baldosa cerámica* Ed Macer S.L. Castellón (2002)
 43. Galindo R. *Prensas Moldes y prensado en la fabricación de baldosas cerámicas* Ed Macer S.L.(2008)
 44. García J. Sánchez E. Amorós JL. *Composiciones para la fabricación de baldosas cerámicas. Influencia de los distintos componentes sobre su comportamiento en el proceso de fabricación.* Cerámica información 243 37-43 (1998)
 45. Gras M *Procedimiento para medir y controlar la densidad aparente y otras características de las piezas cerámicas.* Patente 9702478 (1999)
 46. Gras M. Barberá J. Llanes M. Lucas F. Soler C. *Clasificación funcional de pavimentos y revestimientos cerámicos.* Comisión técnica grupo C. Proyecto de colocación. Instituto Promoción Cerámica Asociación de Técnicos cerámicos A. Qualicer (1998)
 47. Haberko K. ; Ceramics Int 148 (5) (1979)
 48. Halloran J.W. *Advances in ceramics* Vol 9 Forming of ceramics 67-75 American ceramic society (1984)
 49. Harrington (1997) *Business process improvement* Mc Graw Hill (1997)
 50. Heredia J. Gras M. *Análisis y modelado de la transmisión de variabilidad dimensional en un proceso de producción de baldosas cerámicas.* "Boletín de la Sociedad española de Cerámica y Vidrio" Nov-Dic (2009)
 51. Heredia J. Gras M. *Empirical procedure for modelling the variation transmission in a manufacturing process.* "Quality Engineering – American Society for Quality" (2010)
 52. Heredia J. *Sistema de indicadores para la mejora y el control integrado de la calidad de los procesos* Universitat Jaume I (2001)

-
53. Hu, S.J. *Stream of variation theory for automotive body assembly. Annals of the CIRP*, 46(1),1-6. (1997)
 54. Instituto Valenciano de la Edificación *Guía de la baldosa cerámica* (2007)
 55. ITC *Manual para el control de la calidad de materias primas arcillosas Instituto de tecnología cerámica* (1998)
 56. James PJ, *Isostatic pressing technology*, applied science publishers London (1983)
 57. Juran J.M. Gryna F.M, *Quality planning and analysis* Ed Mc Graw Hill (1980)
 58. Juran J.M. *Quality Control Handbook* First edition Mc Graw Hill (1951)
 59. Kingery WD. *Ceramic fabrication processes*, Chapman and Hall Ltd ; London (1958)
 60. Kingery WD; Bowen HK : *Introduction to ceramics* Ed John Wiley & Sons (1976)
 61. Lawless J.F. y Mackay R.J. 1999. *Analysis of variation transmission in manufacturing process* Journal of Quality Technology Vol 31 N 2 April (1999)
 62. Lewis HD ; Goldman A; American ceramic society 323 – 327 19 (6) (1966)
 63. Mallol G. *Experimental study of the determination of dry compaction of ware shaped by unidirectional pressing in continuous operation and in true time* Tile brixk international 8(6) 424-438 1992
 64. Mallol G. Mezquita A. Llorens D. Castro L. Cerisuelo JA. Vargas M. *Mejora de la estabilidad de piezas de gres porcelánico a través de la medida en continuo de la humedad de los soportes prensados* Ceram. Inf 311, 117-126, (2004)
 65. Mallol G .el al. *Optimización de las condiciones de funcionamiento de un horno monoestrato, medida de gradientes trasversales de temperatura* Técnica cerámica 227. 653-662 1994

-
66. Mallol G . *Control de la operación de molienda en continuo* Qualicer 2002 Congreso mundial de la calidad del azulejo y del pavimento cerámico. Castellón VII I pp GI219-GI236 (2002)
67. Mallol G. *Control y automatización en la industria cerámica. Evolución y perspectivas* Qualicer 2006 Congreso mundial de la calidad del azulejo y del pavimento cerámico. Castellón (2006)
68. Mallol G. *Control and automation in the ceramic evolution. Automatic control of the pressing operation* Cfi Ber DKG 84(12) (2007)
69. Mallol G. Llorens D. Feliu C. *On line measurement of pressed tile body moisture content* C+CA 33(5-6) 195-205 (2003)
70. Marchetti B. Revel G. *Medida en línea de la densidad en crudo de baldosas cerámicas* Qualicer 2002 VII congreso mundial de la calidad del azulejo y del pavimento cerámico Castellón PGI 11-23 (2002)
71. Mefford R.N. *The productivity nexus of new inventory and quality control techniques* Engineering costs and production economics Vol 17. (1989)
72. Montgomery DC. 1994 y Runger C. *Applied statistics and probability for engineers* Ed John Wiley and sons new York (1994)
73. Montgomery D. *Statistical Quality control* Ed John Wiley New York (2005)
74. Morrison, S.J. *The study of variability in Engineering design*, Appl.Statistics (Royal Statistical Society), 6(2), 133-138 (1957)
75. Morrison, S.J. *Variance Synthesis revisited*. Quality Engineering. 11(1), 149-155. (1998)
76. Moschini M .*Medida en continuo de la densidad y viscosidad de la barbotina* Qualicer 2004 Congreso mundial de la calidad del azulejo y del pavimento cerámico. Castellón Vol 1 pp GI67-GI80 (2004)
77. Negre F. Jarque J.C. Feliu C.; Enrique J.E. *Estudio de la operación de secado por atomización de polvos cerámicos a escala industrial, su control y automatización*. Técnica Cerámica, 228, 736-744, (1994)

-
78. Niess C.W. Messing G.L. *Journal of American ceramic society* 301-304 67 (4) 1984
79. Norma UNE EN ISO 13006
80. ISO 10545 Parte 2 *Baldosas ceramicas, Determinación de las dimensiones y aspecto superficial*. Aenor (1997)
81. ISO 10545 Parte 1 *Baldosas ceramicas, muestreo y criterios de aceptación* Aenor (1997)
82. Orts M.J. *Sinterización de piezas de pavimento gresificado* Tesis doctoral Universidad de Valencia (1991)
83. Poliakov A.A. *Stelko Keram* 19-20 4 (1982)
84. Prat A. Tort-Martorell X. Grima P. Pozueta L. *Métodos estadísticos para el control y mejora de la calidad* UPC (1994)
85. Reed JS. Dimilia RA. *Technical innovations in white wares* 203-2013 Alfred university press Alfred NY (1982)
86. Reed JS. *Principles of ceramic processing* John Wiley and Sons Revised (1988)
87. Reed J.S. *desde la carga a la baldosas prensada; mecánica y cambios microestructurales del sistema* Qualicer 2000 Congreso mundial de la calidad del azulejo y del pavimento cerámico. Castellón Con 23-41 (2000)
88. Romero F. Serrano J. *Tratamiento integrado de las tolerancias en diseño-fabricación-inspección* X congreso chileno de ingeniería mecánica
89. Ross *Total quality management* St Lucie Press (1988)
90. SACMI-ATC *Tecnología cerámica aplicada* Ed ATC 2004
91. Sánchez J. Portoles J. Negre F. Mallol G. Monzo M. Monfort E. *Estudios de la dinámica del ciclo de prensado y su influencia sobre la compactación de baldosas cerámicas mediante la sensorización de una prensa industrial* Técnica cerámica 226 532-548 (1994)

-
92. Sanchez E. Garcia J. Barba A. Beltran V. *Estimation of packing density of raw material mixtures used in tile manufacture* "British ceramic transactions 97.4. 149-154 (1998)
93. Sanchez J. Portoles J. Negre F. Mallof G. Monzo M. Monfort E. *Studio della dinamica del ciclo de pressatura e della sua influenza sulla compattazione di piastrelle di ceramica attraverso la sensorizzazione di una pressa industrial ceramica Informazione 348 145-154 (1995)*
94. Shi, J. *Stream of Variation Modeling and Analysis for multistage Manufacturing Processes*. CRC Press. (2007).
95. Shi, J. and Jin, J. 1997. *Modeling and diagnosis for automotive body assembly process using state space models*. Proceedings of International Intelligent Manufacturing Systems, 97. Seoul. Korea, pp.189-196 (1997)
96. Statgraphics Plus 5.1 1995 - 2000 *Startpoint technologies* Virginia U.S.A
97. Shewhart W.A. (1939) *Statistical method from the viewpoint of Quality control*. The graduate school of the department of agriculture Washington DC (1939)
98. Taguchi 1980 *On line quality control during production* Tokyo: Japanese standard association (1980)
99. Taguchi, G. and Wu Y. 1985. *Introduction to Off-line Quality Control*. Central Japan Quality Control Association, Nagoya. (1985)
100. Taguchi G. *Introduction to quality engineering* Asian productivity organisation (1986)
101. Trebax "Sistema de compensación isostática" S.r.l. CASTELLARANO ITALY
nfo@trebax.it
102. Xiang, Liming, Tsung, *Statistical monitoring of multi-stage processes based on engineering models*. IIE Transactions Oct (2008)
103. Zhou y Shi 2004 *Statistical estimation and testing for variation root cause identification of multistage manufacturing process* IEE Transactions on automation science and engineering Vol I July (2004)

104. Zhou S Huang Q and Shi J (2003) *State space for modeling of dimensional variation propagation in multistage machining process*, IEEE Transactions on robotics and automation 19 296-309 (2003)
105. Zhou, S., Ding, Y., Chen, Y. and Shi, J. (2003) *Diagnosability study of multistage manufacturing processes based on linear mixed-effects models*. Technometers, 45, (2003).

Anexos

Artículos

- Empirical procedure for modelling the variation transmission in a manufacturing process. J. Heredia; M. Gras *“Quality Engineering – American Society for Quality”* 2010

- Análisis y modelado de la transmisión de variabilidad dimensional en un proceso de producción de baldosas cerámicas. J. Heredia ; M. Gras *“Boletín de la Sociedad española de Cerámica y Vidrio”* 2009

- Statistical estimation of variation transmission model in a manufacturing process J. Heredia; M. Gras *International Journal of advanced manufacturing technology”* 2010