

23rd International Congress on Project Management and Engineering
Málaga, 10th – 12th July 2019

03-052

INFLUENCE OF SURFACE GEOMETRY ON THE QUALITY OF THE POLISHING PROCESS OF GLAZED POROUS CERAMIC TILESSerrano-Mira, Julio ⁽¹⁾; Guaita-Delgado, Luis ⁽²⁾; Abellan Nebot, Jose V. ⁽¹⁾; Bruscas-Bellido, Gracia M. ⁽¹⁾⁽¹⁾ Universitat Jaume I, ⁽²⁾ Keraben Grupo S.A.U.

Glazed porous ceramic tiles are used for wall tiling due to their high humidity absorption, which produces deformations in them. These tiles have a good surface appearance due to its glazed layer, and polishing is not required. However, some manufacturers proceed to its subsequent polishing, obtaining high-gloss tiles.

Nevertheless, the polishing process of these parts is complex because it is very difficult to obtain pieces with the flatness required for polishing, due to different contraction coefficients between the ceramic base and the glazed surface layer. In addition, during the polishing process the parts absorb water used in the process, which produces a change in its geometry, causing a decrease in productivity and a high number of defective parts.

In this work a study of the geometry evolution of these pieces according to humidity content and elapsed time is carried out, and a strategy of parts pretreatment prior to polishing is proposed, which allows increasing the productivity by improving the flatness.

Keywords: *glazed ceramic tile; polishing tile; porous ceramic tile; wall tiles*

INFLUENCIA DE LA GEOMETRÍA SUPERFICIAL EN LA CALIDAD DEL PROCESO DE PULIDO DE BALDOSAS CERÁMICA POROSA ESMALTADAS

Las baldosas cerámicas esmaltadas de gres poroso se emplean para el alicatado de paredes dada su elevada absorción de humedad, la cual produce deformaciones en las mismas. Estas baldosas presentan un buen aspecto superficial debido a la capa cristalina de esmalte, no siendo necesario su pulido. Sin embargo, algunos fabricantes proceden a su posterior pulido, obteniendo piezas de muy alto brillo.

Sin embargo, el proceso de pulido de estas de piezas es muy complejo debido a que es muy difícil obtener a la salida del horno piezas con la planicidad requerida para su pulido, debido a los muy diferentes coeficientes de contracción entre la base cerámica y capa superficial de esmalte vitrificado. Además, durante el proceso de pulido las piezas absorben parte del agua empleada en el proceso, lo cual origina un cambio de su geometría, provocan un descenso de la productividad y un elevado nivel de defectos.

En el trabajo propuesto se realiza un estudio de la evolución de la geometría de estas piezas en función del contenido de humedad y del tiempo transcurrido, y se propone una estrategia de tratamiento de las piezas previo al pulido que permite incrementar la productividad al mejorar la planicidad.

Palabras clave: *baldosa cerámica esmaltada; pulido; baldosa porosa; revestimiento cerámico*

Correspondencia: Julio Serrano Mira jserrano@uji.es

Acknowledgements/Agradecimientos: Los autores muestran su agradecimiento a Keraben Grupo S.A.U. por su contribución y el soporte recibido para la realización del presente trabajo.



©2019 by the authors. Licensee AEIPRO, Spain. This article is licensed under a Creative Commons Attribution-NonCommercial-NoDerivatives 4.0 International License (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/>).

1. Introducción

El sector de fabricación de baldosas cerámicas representa el principal proceso productivo de la provincia de Castellón, siendo asimismo uno de los principales de la Comunidad Valenciana, toda vez que representa un peso muy importante en las exportaciones de la misma. Se trata de un sector altamente competitivo, que se ha visto afectado por el creciente aumento de la producción en países emergentes con un producto bastante más económico. Esto ha provocado una reorientación de las estrategias de las empresas españolas hacia el desarrollo de productos diferenciados tanto por prestaciones, como por diseño y calidad, dada la imposibilidad de competir en costes, aunque buscando también que el producto resultante tuviese un coste competitivo ya que muchas de las innovaciones introducidas iban siendo adoptadas posteriormente por las industrias de estos terceros países. Una de estas características distintivas es ofrecer productos pulidos de alto brillo.

Las baldosas cerámicas, de acuerdo a la norma ISO 13006 (UNE-EN 14411) UNE-EN ISO 10545-3, se clasifican en grupo según el proceso de fabricación y el porcentaje de absorción de agua, entre otros criterios. Según el método de fabricación, las baldosas cerámicas se clasifican en A y B, según se fabriquen por extrusión de la pasta cerámica o mediante prensado en seco respectivamente, correspondiendo casi la totalidad de la producción a las prensadas en seco. En cuanto a la absorción de agua, para el caso de las prensadas en seco se clasifican en cinco grupos (Grupo Ia, Grupo Ib, Grupo IIa, Grupo IIb, Grupo III) según dicha absorción sea respectivamente inferior al 0,5%, entre el 0,5% y el 3%, entre el 3% y el 6%, entre el 6% y el 10%, y superior al 10%, considerándose baldosa porosa aquellas cuya absorción de agua es mayor del 6%.

Estas baldosas están conformadas por una pasta cerámica a base de arcillas y otros componentes inorgánicos que tras el prensado son sometidas a un proceso de cocción. Según el tipo y composición de las pastas cerámicas se obtiene un tipo de baldosa que se clasifica dentro de alguno de los grupos anteriores. Actualmente, desde el punto de vista industrial, las más habituales se agrupan en: porcelánico, pavimento de gres, y revestimiento o porosa de pasta blanca o roja. Las baldosas porosas se utilizan para revestimiento dado que su porosidad permite una mayor fuerza de agarre a las paredes, mientras que las de gres y las de porcelánico se emplean para pavimento, aunque cada vez más el porcelánico está desplazando al gres en este uso. Cuando se requiere un revestimiento pulido, se recurre a la porosa pulida o al porcelánico pulido.

La aplicación del pulido se comenzó a aplicar de forma generalizada durante la década de los 90 del siglo pasado, aplicándose al caso de las baldosas de porcelánico sin esmaltar (a las que se las suele denominar "porcelánico compacto"), obteniéndose un producto de unas excelentes propiedades resistentes (por el material) y estéticas (por el pulido). Sin embargo, al no estar esmaltado y dada las dificultades de su decoración, no podía competir en variedad de diseños estéticos con las baldosas esmaltadas, por lo que su producción comenzó a reducirse, y la necesidad de ofrecer novedades en diseños motivada por la crisis económica de finales de la década pasada provocó que se incrementase la producción de porcelánico esmaltado y posteriormente de porcelánico esmaltado pulido, en detrimento del porcelánico compacto. Este incremento de producción redujo costes, lo que penalizó la producción del pavimento de gres. Para revestimiento, la producción mayoritaria era de baldosa porosa, excepto cuando se requería altas cualidades de brillo en que se recurría al porcelánico esmaltado pulido.

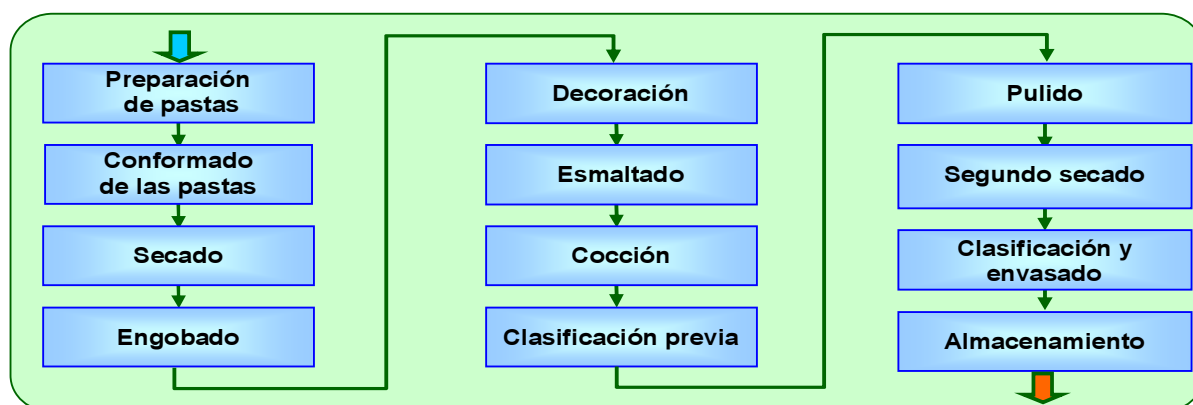
El proceso de pulido de la baldosa porosa esmaltada es raramente utilizado dado que este material sufre importantes deformaciones de su superficie debido a la absorción de humedad ambiental y del agua utilizada durante el proceso de pulido. Sin embargo, presenta grandes ventajas de aplicación (por su mayor facilidad agarre en paredes) y por un coste

menor. Por ello, la empresa Keraben decidió aventurarse en la implantación de dos líneas de pulido para porosa esmaltada, desarrollando una gama de productos a tal fin. Dadas las dificultades de este proceso de pulido y con el fin de mejorar la productividad del proceso, desarrolló un proyecto de investigación, cuyo desarrollo y resultados se exponen en el presente trabajo. Se comenzará exponiendo de forma resumida el proceso de fabricación de la baldosa cerámica esmaltada, posteriormente se expondrá el proceso de pulido de las mismas y su problemática, continuando por la descripción del trabajo llevado a cabo para analizar esa problemática y proponer soluciones de mejora, y se finalizará con la exposición del plan de mejoras propuesto y su valoración.

2. La baldosa cerámica porosa esmaltada y su proceso de fabricación.

El tipo de baldosa utilizada es un revestimiento fabricado en pasta porosa por monococción clasificado como perteneciente al Grupo BIII, esmaltado y pulido, y de dimensiones 32x32 cm y 32x59 cm. Está compuesto por un cuerpo fabricado por prensado a partir de la denominada “pasta blanca”, sobre la que se aplica una capa de engobe, posteriormente se aplica la decoración, y finalmente se deposita una capa de esmalte transparente de grosor elevado (ya que parte se eliminará durante el proceso de pulido final). El tratamiento con esmalte confiere a la pieza una serie de propiedades técnicas y estéticas como impermeabilidad y facilidad de limpieza, color, brillo, textura superficial y resistencia química y mecánica. Posteriormente se procede a la cocción, siendo ésta una de las etapas más importantes del proceso de fabricación, ya que durante la cocción tienen lugar una serie de reacciones que cambian la microestructura de la pieza, confiriéndole las propiedades finales deseadas: resistencia mecánica, estabilidad dimensional, resistencia a los agentes químicos, facilidad de limpieza, resistencia al fuego, etc. En la etapa de cocción se considera el ciclo térmico atendiendo a la temperatura y al tiempo, y la atmósfera del horno, en función de cada composición y dependiendo del producto cerámico que se desee obtener. La etapa de cocción puede ser mono o bicocción, utilizándose anteriormente este último en productos de cerámica porosa de grandes dimensiones pues la primera cocción endurece el bizcocho, evitando que rompa durante la aplicación del esmalte. En la Figura 1 se muestra un esquema del proceso de fabricación de una baldosa cerámica porosa esmaltada y pulida obtenida por un proceso de monococción.

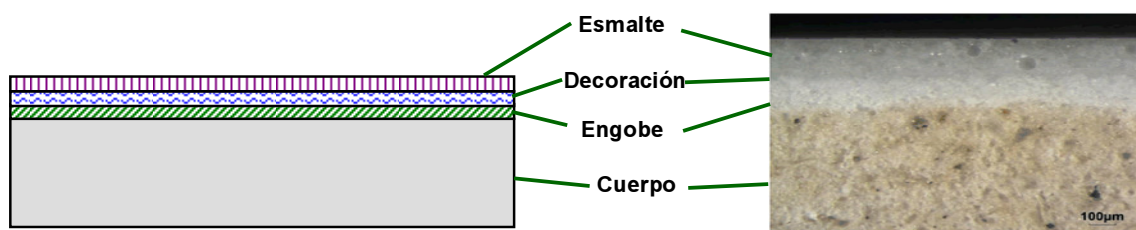
Figura 1: Secuencia de etapas del proceso de fabricación de una baldosa de pasta porosa esmaltada y pulida obtenida por un proceso de monococción.



Como se ha comentado anteriormente, estas baldosas están conformadas por cuatro componentes aplicadas de forma secuencial. La secuenciación de estos cuatro elementos varía en función de si la baldosa se va a pulir o no, colocando en el caso de las pulidas el esmalte tipo cristalina en último lugar, el cual es transparente para que pueda verse la decoración y es el que se mecaniza mediante los abrasivos. Cuando no se pule,

generalmente la decoración se sitúa sobre el esmalte. En la Figura 2 se muestra un esquema de dicha secuencia y una vista por microscopía de la sección de una pieza fabricada previa al pulido.

Figura 2: Secuencia de componentes que conforman una baldosa cerámica esmaltada para pulir, y vista por microscopía de una sección de de dicha pieza.



El cuerpo está compuesto por materias primas arcillosas (plásticas) y materias primas no arcillosas (no plásticas), que se encuentra directamente en el material de partida o bien que se añaden para conferir determinadas propiedades finales o para el proceso. El color del cuerpo viene dado por el contenido de hierro en las arcillas, oscilando entre el blanco y el rojo. De esta forma el cuerpo recibe el nombre de pasta blanca si el contenido de Fe_2O_3 es menor del 2% y de pasta roja si es mayor del 4%, sin que esto afecte a las propiedades técnicas del producto acabado. En este producto ha sido utilizada la pasta blanca. Para un mayor detalle de los tipos y composición de las pastas para conformar baldosas se pueden consultar los trabajos de Morales (2005), y de Sacmi & ASCER (2004).

Por su parte, los esmaltes cerámicos son suspensiones concentradas con un contenido en sólidos en torno al 70% en peso, estando este compuesto sólido mayoritariamente (80-95%) formado por un material vítreo (feldespatos, cuarzo, carbonatos, etc.) denominado tecnológicamente frita, y pequeñas adiciones de materiales arcillosos (generalmente caolines y arcillas blancas o bentonitas) y otros aditivos además de los pigmentos minerales (óxidos minerales principalmente). Estos esmaltes se depositan sobre la superficie de la baldosa en estado líquido, y vitrifican posteriormente durante el proceso de cocción. Para más información sobre los esmaltes, su composición y su reología, se puede consultar el trabajo de Vielhaber (2002).

El engobe es una barbotina, normalmente de color blanco y opaca, formada por materiales plásticos y no plásticos en suspensión. Se aplica sobre la superficie del cuerpo, sirviendo de interfaz entre cuerpo y esmalte. Dado que el engobe ha de poseer propiedades a medio camino entre el cuerpo y el esmalte, ha de ocurrir lo mismo con su composición, por lo que poseen materiales plásticos similares a los del cuerpo, así como también materiales no plásticos presentes en el esmalte.

Finalmente, la decoración consiste en la reproducción de un determinado dibujo sobre la superficie de la baldosa mediante la aplicación de una tinta especial. Hay diferentes técnicas para conseguirlo, siendo industrialmente en el pasado la serigrafía la más habitual, mientras que en la actualidad es mayoritario el uso de la de impresión por chorro de tinta o 'Inkjet'. Las tintas utilizadas están compuestas por fritas, pigmentos, y pequeñas cantidades de otras materias primas sólidas, además de un líquido en las que se mantienen en suspensión todos estos componentes y que sirve como vehículo para su aplicación.

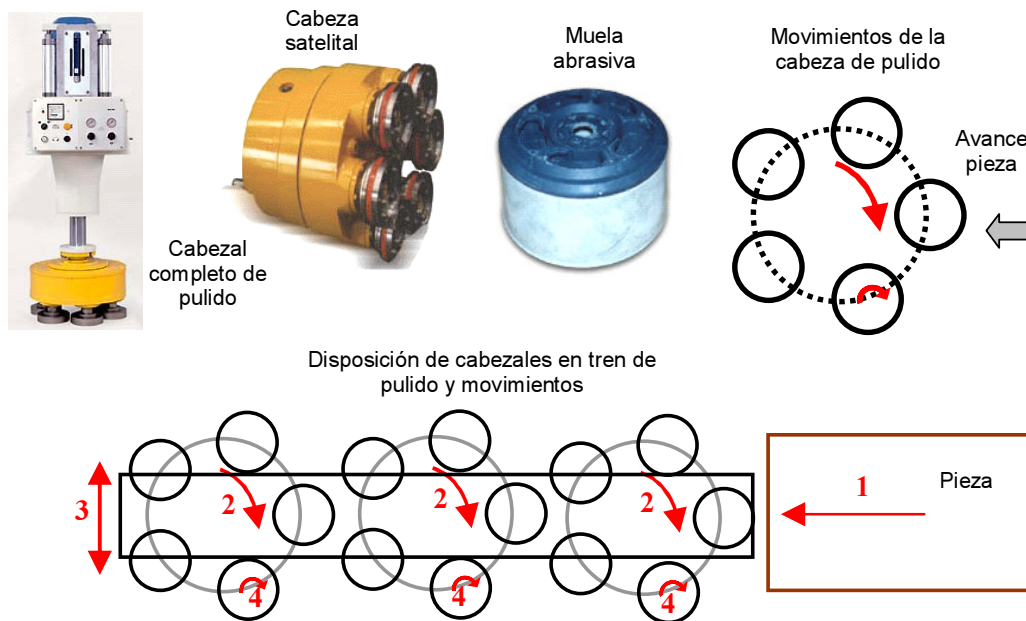
3. Proceso de pulido de una baldosa cerámica esmaltada.

Para las baldosas que son pulidas, este proceso es el último antes de la clasificación y el envasado, siendo su objetivo la mejora de las cualidades estéticas, obteniendo en las baldosas una superficie con un coeficiente de brillo elevado, sin imperfecciones y con una gran precisión geométrica. Este pulido se realiza mediante un proceso de arranque de viruta

mediante abrasivos en el que las piezas van pasando secuencialmente por diferentes etapas cada una de ellas con un tipo de abrasivo cuyo tamaño de grano va decreciendo.

Cada etapa de pulido está compuesta por un cabezal que ataca frontalmente la superficie de la pieza, constituido por una cabeza satelital de pulido accionada por un motor que lo hace girar. La cabeza satelital está compuesta por varias muelas cilíndricas que a su vez giran a mayor velocidad que el cabezal, estando colocadas perpendicularmente a la pieza. Estos cabezales están montados sobre un bastidor que conforma el tren de pulido. En la Figura 3 se pueden ver los componentes y configuración de un cabezal y de un tren de pulido.

Figura 3: Cabezal de pulido con sus componentes, y esquema de funcionamiento de un cabezal y de un tren de pulido, mostrando la disposición de componentes y sus movimientos.



Tras la etapa de pulido de la superficie, las piezas pasan a una etapa de escuadrado (a la que se denomina de rectificando), en la que se mecanizan los bordes para ajustar las dimensiones exteriores de la pieza y conseguir bordes rectos y perpendiculares, y una etapa final de biselado donde se les mecaniza un pequeño bisel en las aristas superiores. Sin embargo, estas dos últimas etapas no serán objeto de estudio.

El tren de pulido utilizado para el pulido de estas piezas estaba compuesto de 10 cabezales, con una separación entre ellos de 375 mm, siendo las cabezas de tipo satelital de 286 mm de diámetro, y dotadas con muelas cilíndricas de ataque frontal de 100 mm de diámetro. Todo el proceso se realiza en condiciones húmedas con suministro de una cortina de agua que se deposita sobre las piezas según su avance que permite refrigerar la superficie y, sobre todo, arrastrar el material arrancado y los abrasivos desprendidos de las muelas.

En cuanto a las condiciones de trabajo, la secuencia de abrasivos comenzaba con muelas de diamante de grana 180, y las siguientes eran de carburo de silicio comenzando en grana 100 y llegando a grana 2.000. Las condiciones de trabajo eran de una velocidad de giro de las muelas entorno a las 1.000 rpm, una presión en el cilindro neumático del cabezal de entre 0,5 y 2,5 bares según grana y posición del cabezal, y una velocidad de avance media de la línea de 0,8 m/min. La presión de trabajo y la velocidad de avance se establecen inicialmente para el pulido de un lote de piezas y depende del tipo de la geometría superficial predominante en el lote (plana, cóncava, convexa) y del error de planicidad.

3.2 Defectología en las piezas pulidas

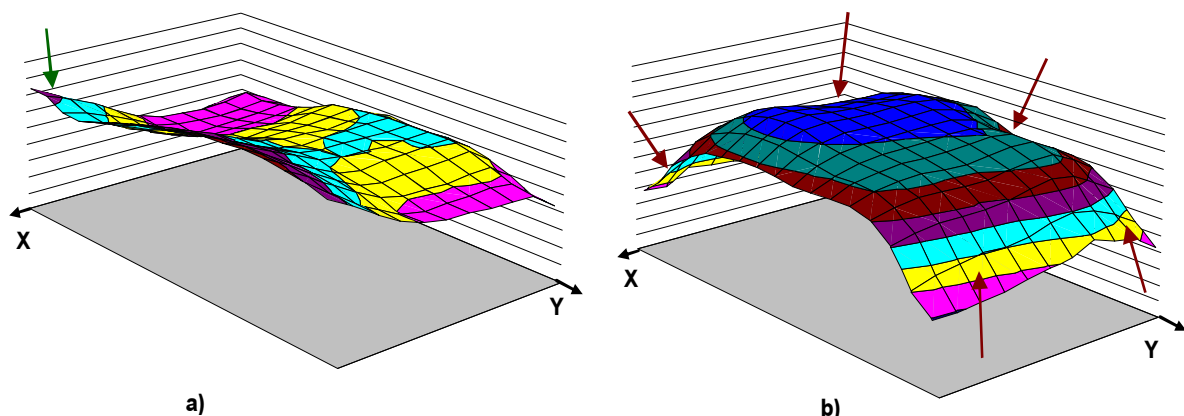
Los defectos más importantes detectados durante la etapa de pulido son de tres tipos: las calvas, las sombras y las rayas. La aparición de cualquiera de éstos hace que la pieza vaya a tiesto o a corte si el defecto se encuentra en una zona que permite la obtención del formato inferior, incrementándose el coste.

Las rayas son debidas a granos de abrasivo que se desprenden de la muela y quedan atrapados entre la superficie de contacto de la muela con la pieza antes de ser arrastrados por el agua de refrigeración, de modo que al ser una superficie plana, tarda cierto tiempo en salir, originando una abrasión más profunda. También se pueden deber a pequeños trozos de esmalte originados por pequeñas roturas de bordes de las piezas al entrar las muelas a cortar, y al igual que el abrasivo desprendido, provocan las rayas al quedarse entre la muela y la pieza. Las causas de este tipo de defectos son difíciles de eliminar, y representan entre la cuarta y la quinta parte de las piezas no válidas producidas durante el proceso.

Las calvas se producen cuando las muelas, debido a un exceso de presión localizado, eliminan todo el esmalte de una zona de la pieza, llegando a contactar con la decoración y puliéndola, con lo que dejan a la vista el engobe o incluso el cuerpo si la sobrepresión es muy acusada. Este defecto se produce al tener la pieza alguna zona mucho más elevada que el resto (Figura 4a), y se puede dar en piezas con las puntas levantadas y en aquellas con alguna zona muy cóncava.

Las sombras se producen cuando alguna zona de la pieza queda con mayor rugosidad superficial que el resto, apreciándose porque esa zona presenta menos brillo. Esto puede ser debido a diversos motivos. Por una parte puede ocurrir que las muelas no contacten en alguna zona de la pieza en varios o ningún cabezal y, por otro lado, que contacten pero con una presión inadecuada. En ambos casos esas zonas no quedan suficientemente pulidas. Esta insuficiencia de contacto puede deberse a un mal ajuste de la fuerza que realiza el cabezal sobre la pieza, o a que el número de pasadas por cabezal sea insuficiente, provocado por un mal ajuste de la velocidad de avance. Pero exceptuando estos casos relacionados con un inapropiado reglaje, la aparición de sombras tienen gran relación con la geometría (Figura 4b), al igual que en las calvas.

Figura 4: Geometría superficial de piezas en las que han aparecido defectos tras pulido: a) un defecto de calva por pulido excesivo, b) varias zonas con sombras por pulido insuficiente.



4. Desarrollo del proyecto de mejora del proceso de pulido.

A pesar de que se llevaba a cabo una clasificación de las piezas antes del pulido descartándose aquellas que se consideraban no aptas, continuaban apareciendo defectos.

Por ello se decidió iniciar un proyecto para averiguar porqué ocurría, y para proponer acciones de mejora una vez detectadas las causas.

Lo primero fue realizar una revisión del estado del arte en lo referente a los procesos de pulido de baldosas. Orts *et al.* (2001) estudiaron el comportamiento del gres porcelánico compacto durante el proceso de pulido en una línea industrial, analizando el desgaste de la muela en función del tamaño de grano, y la evolución de la topografía, rugosidad superficial y brillo durante el avance de la línea. Por su parte, Hutchings *et al.* (2005) también han estudiado el proceso de pulido de porcelánico compacto en términos similares al trabajo anterior, pero en este caso han llevado a cabo la construcción de un tribómetro que les ha permitido una mayor flexibilidad en la modificación de parámetros y estudios a realizar, los cuales han contrastado posteriormente a nivel industrial. Asimismo, la evolución de la rugosidad y el brillo durante la etapa de pulido según grana también es estudiado por Olenburg *et al.* (2014), quienes además analizan la influencia del radio de curvatura de las muelas abrasivas, las tasas de arranque, potencias consumidas y velocidad de desgaste de las muelas abrasivas.

Por otra parte, en varios de los trabajos anteriormente citados también se ha estudiado la influencia de la cinemática de los movimientos de las muelas sobre la baldosa durante el pulido, esto es, el tiempo durante el cual cada zona de la pieza está siendo sometida a mecanizado, tiempo que no es uniforme en toda la pieza, lo cual origina diferencias e rugosidad y, por tanto, de brillo. A este respecto, en el trabajo de Sousa *et al.* (2008) se propone un modelo de simulación que hace uso de ecuaciones isoparamétricas, de modo que se puede estimar el tiempo que cada muela está mecanizando cada zona de la pieza y, con ello, hacer una estimación del brillo final obtenible. A partir de estos estudios, los autores proponen en otro trabajo (Sousa *et al.*, 2010) una alternativa de la oscilación transversal de los cabezales pulidores para mejorar el proceso de pulido, sin modificaciones sustanciales de las líneas de pulido industriales.

La caracterización de las muelas abrasivas utilizadas en el pulido de baldosas cerámicas ha sido tratado por Gazulla *et al.* (2010), aspecto importante dado que no existe un estándar que establezca las especificaciones de estas muelas, a diferencia de lo que sucede en las muelas de rectificado para metales. Finalmente, otro campo tratado ha sido el estudio de las porosidades superficiales resultantes en baldosas esmaltadas y pulidas (Escardino *et al.*, 2002 y 2004), con el vidriado aplicado por vía húmeda y por vía seca respectivamente.

Sin embargo, todos estos trabajos se han centrado mayoritariamente en el pulido de porcelánico compacto y algunos en el de pulido de porcelánico esmaltado, no habiéndose encontrado trabajo alguno en el que se traten los procesos de pulido de baldosa porosa esmaltada, que era el objeto del trabajo a realizar, y que presenta unas particularidades muy diferentes por cuanto se produce una evolución de la geometría superficial de la baldosa previa y durante el pulido (cosa que no ocurre en el pulido del porcelánico esmaltado), y no se puede realizar un rectificado con rodillos previo para aplanar la pieza como sí se hace en el porcelánico compacto.

Por otra parte, en el caso de estudio, pulido de baldosas esmaltadas de cerámica porosa, el proceso de pulido no se inicia a la salida del horno, sino que las baldosas se clasifican según su geometría tras la cocción y posteriormente se pulen. Esto se realizaba así por dos motivos: en primer lugar porque la velocidad de producción del horno es muy superior a la de pulido (aproximadamente 200 m²/h del horno frente a los 16 m²/h de pulido), y en segundo lugar porque las baldosas pulibles se clasifican en tres diferentes grupos según su geometría superficial y valor de planicidad, y deben pulirse en lotes de geometría similar dado que cada grupo requerirá de unas condiciones específicas de pulido.

Durante la fabricación de las baldosas, se buscaba que éstas fuesen convexas a la salida del horno; por ello, durante la clasificación, se descartaban tanto aquellas cóncavas como

las casi planas, además de aquellas que eran excesivamente convexas. Esto era así dado que las piezas, una vez almacenadas se deforman ligeramente teniendo tendencia a perder convexidad, fenómeno que se acelera mucho al absorber humedad durante el pulido, por lo que piezas planas o cóncavas tendían a provocar defectos de calvas mayoritariamente.

Ante esta situación, se plantearon los siguientes objetivos:

- Encontrar la relación entre la macrogeometría superficial de una pieza a pulir y la calidad obtenible en la misma tras el proceso.
- Aplicado al pulido de piezas esmaltadas de gres poroso de gran formato, 590x320 mm.
- Obtener relaciones matemáticas entre la deformación en el tiempo de la pieza en función del contenido de humedad.
- Establecer estrategias de pulido de las piezas en función de la geometría superficial para mejorar la productividad y la calidad final.

Y para la consecución de estos objetivos se programaron las siguientes tareas:

- Caracterización de las “geometrías superficiales tipo” de las piezas a la entrada del proceso de pulido, mediante toma de muestras y medición en laboratorio.
- Obtención de la geometría superficial de piezas pulidas con defectos y sin defectos. Caracterización de los defectos.
- Búsqueda de vinculaciones entre la geometría superficial de una pieza y la posibilidad de que aparezcan defectos durante el proceso de pulido. Definición de indicadores de adaptabilidad al pulido que permitan la preselección de piezas.
- Estudiar la evolución de la geometría de las piezas en función del contenido de humedad y del tiempo, dados los cambios de geometrías en este tipo de piezas debido a la absorción de humedad.
- Obtención de modelos matemáticos que permitan predecir la geometría futura de una pieza en función del contenido de humedad y del tiempo.
- Definir una estrategia de pulido basada en la preselección de piezas y la adaptabilidad al pulido mediante el cambio geométrico debido al contenido de humedad.

Para llevar a cabo todas aquellas tareas que requerían la medición de la geometría superficial de las baldosas, se utilizó una Máquina de Medida por Coordenadas (MMC), elaborando un programa de medición que tomaba puntos uniformemente distribuidos en la superficie de la baldosa, y volcaba a un fichero de texto el valor de la medición de cada punto (x, y, z), de modo que posteriormente esos valores podían ser importados de forma fácil para su tratamiento en una hoja de cálculo. La estrategia de medición adoptada fue tomar puntos con una resolución de 40x40 mm, obteniéndose así 120 puntos por baldosa, considerado suficientemente representativo.

La búsqueda de vinculaciones entre geometría a la entrada de pulido y los defectos producidos en el pulido se llevó a cabo midiendo piezas pulidas con defectos, y posteriormente estableciendo aquellas geometrías que potencialmente se consideró que eran candidatas a resultar defectuosas. Con ello, se realizó una selección de piezas a la entrada de pulido y se comprobó si se producían defectos o no, de modo que se pudo detectar qué geometrías previas producían defectos. Esto hubo que ajustarlo además con los resultados de otras tareas relacionadas con la evolución de la geometría con la humedad pues al absorber agua durante el pulido la baldosa se deformaba y modificaba su geometría.

Para estudiar la evolución de la geometría según el contenido de humedad, se procedió a medir la pieza previamente a realizar una inmersión total en agua durante un tiempo variable, y tras un pequeño periodo de estabilización, volver a medir su geometría para evaluar cómo se había modificado ésta. Con los resultados obtenidos, se decidió tomar un

valor de referencia de inmersión hasta alcanzar un contenido de humedad, y se procedió a estudiar la evolución a largo del tiempo, realizando la medición previa, la inmersión y posteriormente la medición a intervalos de tiempo espaciados cada vez más, realizando la primera medición a los 5 minutos y la última transcurridos 3 meses.

Con los resultados obtenidos en cuanto a la clasificación de las geometrías potencialmente causa de defectos, y del estudio de la evolución de la geometría tras humedecer las piezas y almacenarlas cierto tiempo, se estableció una nueva estrategia de pulido a implantar.

5. Resultados obtenidos y propuestas de mejora.

En este apartado se presentan los principales resultados obtenidos, y en dos subapartados posteriores se exponen las propuestas de mejora y se hace una valoración de las mismas.

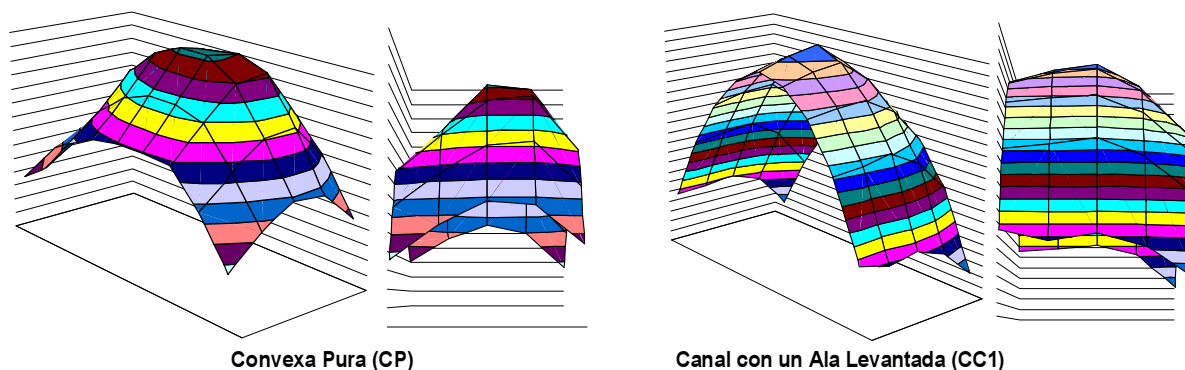
5.1 Resultados obtenidos

A continuación se detallan los principales resultados obtenidos, en unos casos derivados directamente de una de las tareas realizadas y en otros de una combinación de varias.

Clasificación de las geometrías.

Tras realizar la medición de las piezas previas a su pulido, se llevó a cabo una primera clasificación de las piezas. Posteriormente de la medición de las piezas con defectos y las que no presentaban, se realizó una segunda clasificación. Finalmente, a partir de ambas y de los resultados obtenidos de la medición de piezas antes de pulido que presentaron defectos tras el pulido, se elaboró una clasificación de las piezas antes de pulido en cuatro grupos (Convexa Pura, Canal Convexo, Canal con un Ala Levantada, y Canal con tres Alas Levantadas) ya que cada uno de estos tipos de geometrías presentaban un comportamiento diferente durante el pulido, pues la rigidez de la pieza es diferente y no se pueden procesar con los mismos parámetros de proceso. Además, se estableció para cada tipo cuál era el valor límite de planicidad admitida para poderse pulir, y se obtuvo una relación de los parámetros de trabajo de la línea (presión y velocidad de avance) con el tipo de geometría y el valor del error de planicidad. Este hecho permite establecer parámetros de proceso específicos para cada lote de producción, pues determinados tipos de geometría con un menor error de planicidad que otras requieren presiones de trabajo mayores y menores velocidades de avance. Dos de los tipos de geometrías se muestran en la Figura 5.

Figura 5: Dos tipos de geometrías de los cuatro en los que se ha realizado la clasificación.



Velocidad de deformación en función del contenido de humedad y del tiempo.

De los estudios de absorción de agua en función del tiempo se obtuvo la relación entre el contenido de humedad de la baldosa y el tiempo de inmersión. Por otra parte, de los

estudios de la deformación en función de la humedad y del tiempo, se concluyó que a partir de cierto contenido en humedad la velocidad de deformación no variaba apreciablemente, por lo que se decidió establecer como criterio que con una inmersión de 15 segundos se alcanzaba un contenido en humedad suficiente, mostrándose esta velocidad en la Figura 6.

Con ellos se realizaron estudios con dicho tiempo de inmersión para analizar la deformación a largo plazo, obteniéndose la evolución que se muestra en la Figura 7, donde se observa como una pieza globalmente convexa acaba con una geometría potencialmente no apta para pulido (con puntas levantadas) tras tan sólo 24 horas.

Figura 6: Velocidad de deformación a lo largo del tiempo para cinco puntos de una misma pieza tras una inmersión en agua de 15 segundos.

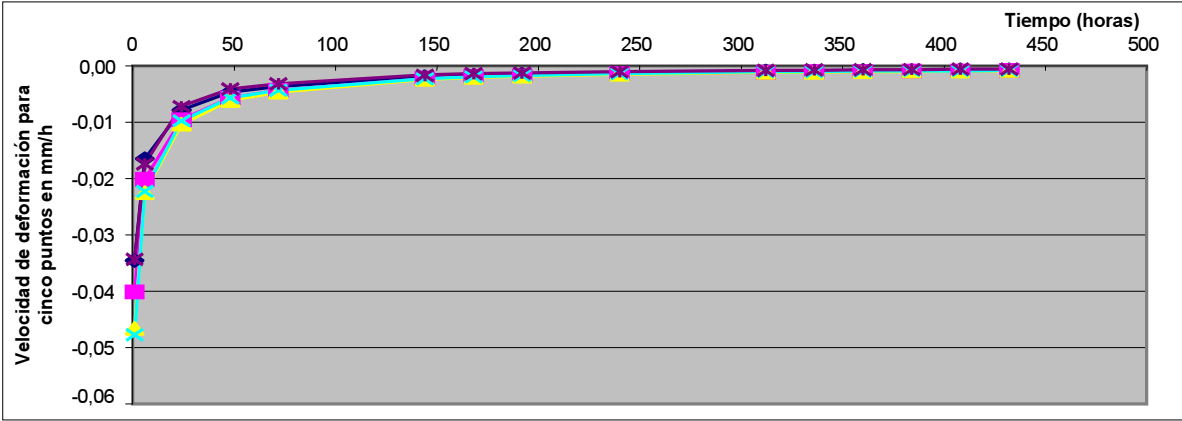
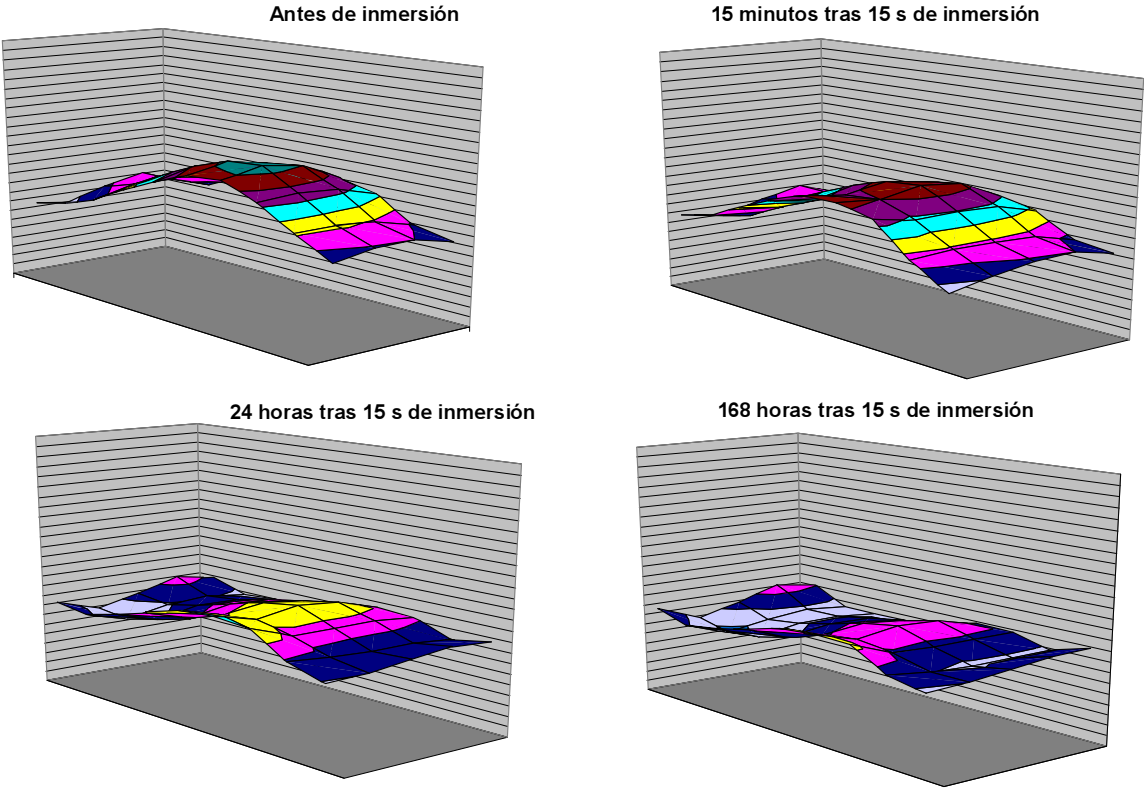


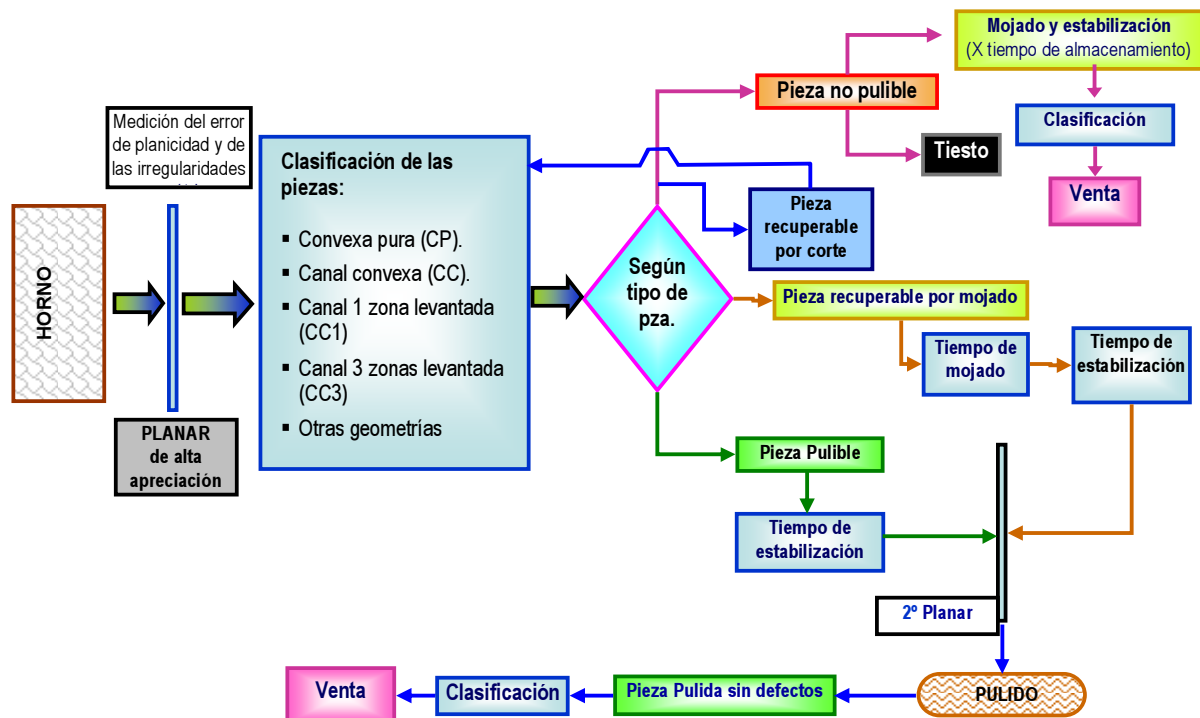
Figura 7: Evolución de la deformación a largo plazo para un tiempo de inmersión de 15 segundos para una pieza del tipo “Canal Convexo”.



5.2 Propuestas de mejora para el proceso

Con los resultados obtenidos y su análisis, se procedió a obtener una función que predijese la evolución de la geometría de la pieza con el tiempo. Ello permitió determinar qué piezas se podían pulir, cómo se debían de agrupar, cuáles debían ser los parámetros del proceso de pulido, y cuánto habría que esperar hasta que cada pieza adquiriese una geometría apropiada para pulir. Con todo esto, se procedió a definir como estrategia de pulido la mostrada en la Figura 8. Se aprecia que las no pulibles se evalúan para ver si se pueden recuperar por corte para pulirlas en otro formato, y en caso negativo se evalúa si pueden ser vendibles como otro producto sin pulir, y en caso contrario se desechan. El resto, se acondicionan mediante mojado, y se procede a su pulido cuando les corresponda.

Figura 8: Diagrama de flujo de la nueva estrategia de pulido propuesta.



5.3 Valoración de la estrategia de pulido propuesta

En la situación de partida, el porcentaje de pérdidas por sombras y por calvas tras el proceso de pulido representaba entorno al 45% y al 15% respectivamente del total de pérdidas, es decir, aproximadamente el 60% del total de piezas defectuosas resultantes. Con la estrategia de pulido propuesta, y suponiendo una efectividad del nuevo sistema del 80%, el total de pérdidas se reduciría en un 48%, es decir, las pérdidas se reducirían hasta prácticamente la mitad respecto a la situación de partida. Dado que el coste del pulido incrementa aproximadamente en un 15% el coste de la pieza, y el coste del pulido de las piezas defectuosas se repercute en las no defectuosas, esta reducción permitiría por una parte reducir el coste de producción por metro cuadrado pulido y, además, permitiría una mayor cantidad de piezas producidas cuya venta aportaría su correspondiente parte de beneficio.

Por otra parte, cuando se pule una pieza no apropiada, además de las pérdidas originadas por el coste de su pulido, se han de tener en cuenta los costes acumulados hasta ese

momento, esto es, los costes de producción de la pieza pre-pulido. Ante esta situación, y tal como se indica en la propuesta, para aquellas piezas potencialmente no pulibles la empresa podría optar bien por no pulirlas y retirarlas, o bien por la posibilidad de vender las piezas no aptas para pulido como azulejos normales sin pulir, como producto de una calidad inferior, eliminando de este modo el coste de pulido de una pieza que saldría finalmente defectuosa, y recuperando total o parcialmente el coste de fabricación de la pieza prepulido que de otro modo se habría perdido.

6. Conclusiones.

En el presente trabajo se han expuesto las tareas realizadas para abordar la mejora del proceso de pulido de baldosas porosas esmaltadas. Este proceso presenta una dificultad importante dada la evolución de la geometría de las piezas tanto previamente al pulido como durante el pulido, lo que conlleva un número de pérdidas comparativamente mayor que las del pulido de porcelánico esmaltado, además de que el ajuste del proceso es más complejo. No se han encontrado trabajos sobre este proceso previos al desarrollo del proyecto, lo que implica que existe poco conocimiento y que el riesgo de implantar este proceso es elevado, siendo por ello escasamente utilizado.

Sin embargo, el coste final de las piezas producidas mediante ese proceso son en torno a un 20% menores que el correspondiente a las de porcelánico esmaltado pulido, siendo la calidad percibida similar y, además, son más apropiadas para su utilización como revestimiento que las de porcelánico dada su mayor capacidad de adherencia a la pared.

Los resultados obtenidos han permitido conocer en profundidad el comportamiento de las piezas desde su salida del horno hasta el final del proceso de pulido, así como detectar con bastante precisión aquellas piezas que no deberían de entrar en la línea de pulido por no ser aptas. Además, se ha propuesto un procedimiento que permite modificar la geometría de cierta cantidad de piezas que no serían aptas para pulido para que sí lo sean. La implantación de la estrategia de trabajo propuesta permitirá aumentar la producción, al reducir el número de defectuosas, toda vez que el coste final de producción sea menor al reducir el coste de no calidad por piezas defectuosas. Con ello, la empresa estará en disposición de ofrecer un producto similar al porcelánico esmaltado y pulido, a un coste sustancialmente menor, siendo este producto más apropiado que el porcelánico para el uso al que va destinado, con lo que la empresa mejorará la competitividad en este tipo de productos.

Referencias

- Escardino, A., Amorós, J.L., Orts, M.J., Gozalbo, A., Mestre, S., Aparisi, J.F., Ferrando, F.J., & Sánchez, L.F. (2002). *Porosidad superficial de vidriados pulidos, influencia de algunas variables*. VIIth World Congress on Ceramic Tile Quality (QUALICER'02), Castellón (España), 313-327.
- Escardino, A., Orts, M.J., Gozalbo, A., Mestre, S., Aparisi, J.F., Ferrando, F.J., Ramos, A.J. & Sánchez, L.F. (2004). *Porosidad de vidriados pulidos obtenidos por aplicación vía seca*. VIIIth World Congress on Ceramic Tile Quality (QUALICER'04), Castellón (España), 419-463.
- Gazulla, M.F., Gómez, M.P., Orduña, M. & Rodrigo, M. (2010). *Characterisation of grinding tools used in the porcelain tile polishing stage*. XIth World Congress on Ceramic Tile Quality (QUALICER'10)

- Hutchings, I.M., Adachi, K., Xu, Y., Sánchez, E., Ibáñez, M.J. & Quereda, M.F. (2005). *Analysis and laboratory simulation of an industrial polishing*. Journal of the European Ceramic Society, 25, 3151–3156.
- Morales Güeto, J. (2005). *Tecnología de los materiales cerámicos*. Ediciones Díaz de Santos.
- Olenburg, A., Aurich, J. C. & Pinheiro Sousa, F. J. (2014). *Proceso de Pulido de Baldosas Cerámicas: Influencia del Desgaste de las Muelas sobre el Brillo*. XIIIth World Congress on Ceramic Tile Quality (QUALICER'14), Castellón (España)
- Orts, M.J., Sánchez, E., García-Ten, J., Ibáñez, M.J., Sánchez, J., Soler, C. & Portolés, J (2001). *Comportamiento del gres porcelánico durante la operación de pulido*. Boletín Sociedad Española Cerámica y Vidrio, 40(6), 445-453.
- Sacmi & ASCER Asociación Española de Técnicos Cerámicos (2004). *Tecnología cerámica aplicada*. Faenza Editrice Iberica, Castellón de la Plana (España)
- Sousa, F.J.P., Hosse, D.S., Aurich, J.C., Engels, M. Weingaertner, W.L. & Alarcon, O.E. (2010). *Simulation and analysis of an alternative kinematics for improving the polishing uniformity over the surface of polished tiles*. Boletín Sociedad Española Cerámica y Vidrio, 49(4) 247-252.
- Sousa, F.J.P., Weingaertner, W.L. & Alarcon, O.E. (2008). *Simulación computacional del proceso de pulido de gres porcelánico*. Xth World Congress on Ceramic Tile Quality (QUALICER'08), Castellón (España)
- UNE-EN 14411:2007 (2007). *Baldosas cerámicas. Definiciones, clasificación, características y marcado*. AENOR (Basada en ISO 13006)
- UNE-EN ISO 10545-3:1997 (1997). *Baldosas cerámicas. Determinación de la absorción de agua, de la porosidad abierta, de la densidad relativa aparente, y de la densidad aparente*. AENOR (Basada en ISO 13006)
- Vielhaber, L. (2002). *Tecnología de los esmaltes*. Barcelona, Editorial Reverté.