Comportamiento del gres porcelánico durante la operación de pulido

M.J. ORTS¹, E. SÁNCHEZ¹, J. GARCÍA-TEN¹, M.J. IBÁÑEZ¹, J. SÁNCHEZ², C. SOLER², J. PORTOLES²

⁽¹⁾Instituto de Tecnología Cerámica. Asociación de Investigación de las Industrias Cerámicas.
Universitat Jaume I. Castellón. España.

⁽²⁾TAULELL S.A.

En este trabajo se ha estudiado la evolución del gres porcelánico durante la operación de pulido en una línea industrial. Se ha estudiado la variación de la velocidad de desgaste con el tamaño del abrasivo utilizado, comprobándose que ésta se adapta a un modelo de desgaste de materiales frágiles propuesto en la bibliografía. En cuanto a las propiedades de superficie, se ha estudiado la evolución de la topografía, de la rugosidad y del brillo durante el avance en la línea y se ha relacionado las variaciones que sufren estas últimas propiedades con la microestructura.

Palabras clave: Gres porcelánico, pulido, topografía superficial, brillo, microestructura.

Porcelain tile behaviour during polishing

Changes in porcelain tile surfaces being polished in an industrial line have been studied. The variation of the wear rate with the size of the abrasive particles used was shown to follow an empirical model for brittle materials found in the literature. Surface characteristics such as topography, roughness and gloss changes along the polishing line were studied and related to the surface microstructure.

Key words: Porcelain tile, polishing, surface topography, gloss, microstructure.

1. INTRODUCCIÓN

El gres porcelánico técnico es un recubrimiento cerámico de muy baja porosidad (la porosidad abierta evaluada como capacidad de absorción de agua es inferior al 0.1%), que se caracteriza por su elevada resistencia mecánica, a las manchas y a la helada (1), (2). Un porcentaje importante de la producción se somete a un proceso de pulido, que resalta las características estéticas de la superficie del material, incrementando su valor añadido. El elevado brillo del producto pulido (3) junto con su dureza (muy superior a la del mármol) ha dado lugar a un creciente interés en el mercado por el consumo del gres porcelánico pulido (4).

Las operaciones de pulido, rectificado y biselado se realizan por fricción de muelas abrasivas sobre la superficie de la baldosa. Para llevar a cabo estas operaciones, se emplean largos trenes de pulido, en los que se reduce el espesor del material hasta en un 10%, con el fin de obtener un producto liso y de alto brillo. Aunque se denomina genéricamente como pulido, este proceso consta de varias operaciones englobadas todas ellas bajo la denominación anterior. Así, en una primera fase del proceso, se emplean rodillos con abrasivos de grano grueso con el fin de desbastar y alisar la superficie de la baldosa, eliminándose un gran volumen de material. En la figura 1 se presenta un esquema de esta etapa.

Esta primera fase, como se ha dicho, tiene por objeto fundamental aplanar la superficie de las piezas, eliminando así la curvatura que, a la salida del horno, presentan las piezas. Este paso, aunque es necesario para conseguir que las muelas de pulido actúen por igual sobre toda la superficie de las piezas, es muy traumático para ellas, porque produce surcos y grietas

bastante profundas en su superficie, que se deben eliminar totalmente durante las subsiguientes etapas del pulido.

Las herramientas utilizadas en las siguientes fases del pulido son muelas trapezoidales con abrasivos de tamaño de partícula progresivamente decreciente hasta alcanzar la textura y brillo final deseados. El principal abrasivo empleado es el carburo de silicio, embutido en una matriz de composición variable, aunque cada vez esta adquiriendo un mayor interés el polvo de diamante sintético, dada la elevada dureza del gres porcelánico (5).

Durante el pulido es muy importante que el tamaño de partícula del agente abrasivo ("grana") de las muelas siga una secuencia determinada, desde los tamaños mayores a los más pequeños (6). La razón es que cada muela abrasiva repara la erosión provocada por la muela utilizada anteriormente, cuyo agente abrasivo era de mayor tamaño. De esta manera, los defectos provocados son cada vez menos intensos, hasta llegar a los tamaños de abrasivo menores, que son los que, sin provocar daños apreciables, pulen realmente la superficie. También es importante que las piezas permanezcan sometidas a la acción de cada abrasivo el tiempo suficiente para que su función se complete dado que, como se ha comentado anteriormente, si la pieza accede al tamaño inferior antes de lo conveniente, los defectos que no se han eliminado permanecerán en su superficie y la operación de pulido habrá sido incorrecta.

En la actualidad la secuencia de los abrasivos, así como el tiempo que cada uno de ellos actúa sobre las piezas, está establecida en base a la experiencia, no conociéndose con la suficiente profundidad el efecto que ejerce cada uno de ellos

sobre la superficie de las baldosas.

Por todo ello se considera de interés estudiar los cambios que experimenta la superficie de las piezas de gres porcelánico durante la operación de pulido, a fin de conocer mejor la secuencia que han de seguir los agentes abrasivos utilizados durante la misma. Todo ello con vistas a obtener una buena productividad y efectividad en dicha operación, a la vez que mejorar la calidad del producto pulido reduciendo los defectos de fabricación atribuibles a esta etapa del proceso.

Para alcanzar este objetivo, se ha efectuado un muestreo exhaustivo de piezas procedentes de una línea de pulido de la planta de fabricación de gres porcelánico de la empresa Tau Cerámica, abarcando todo su recorrido y se ha estudiado, sobre ellas, la evolución de algunas de sus propiedades (brillo y rugosidad) en el transcurso de la operación, observando los cambios en su microestructura por microscopía electrónica de barrido (MEB).

2. EXPERIMENTAL

2.1. Toma de muestras en el tren de pulido industrial

En primer lugar, se recogieron varias piezas a la salida de la fase de calibrado-aplanado (ver figura 1), que es la etapa previa al pulido. A continuación, se extrajeron piezas a lo largo de una de las líneas de pulido, que abarcaba desde el final de la fase de calibrado-aplanado hasta el último cabezal de la línea, cuyo grano de abrasivo es el más pequeño. Para ello, se recorrieron todos los cabezales, extrayendo una pieza de cada uno de ellos, siendo en total 72. Debido al gran número de piezas así obtenidas, se seleccionó sólo parte de ellas, alternadas cada dos o cada cuatro, dependiendo de la zona de la que se habían extraído y de la variación del aspecto de su superficie, de manera que el conjunto escogido fuera representativo de todo el proceso y no hubiera cambios bruscos de aspecto entre una pieza y la siguiente.

En la tabla I se detallan, junto con las referencias de estas piezas, las granas del último abrasivo a cuya acción ha sido sometida cada una y el tamaño de dicho abrasivo, según las especificaciones de la norma: FEPA 42-GB-1984 R 1993 (7). Como se puede observar, en algunos casos varias piezas seguidas han sido sometidas a muelas cuyo abrasivo era del mismo tamaño. Esto es debido a que a veces es necesario que las piezas permanezcan sometidas a la acción de un tamaño de abrasivo determinado durante bastante tiempo, para asegurar la eliminación de los daños producidos por los tamaños superiores.

2.2. Caracterización de las piezas

2.2.1 DETERMINACIÓN DE LA MASA DE LAS PIEZAS

Se han pesado las piezas obtenidas en el muestreo, con la ayuda de una balanza electrónica de laboratorio (± 0.1 g.).

2.2.2 DETERMINACIÓN DEL BRILLO

Este ensayo se realizó con un reflectómetro de la marca RHOPOINT, modelo Statistical Novo-Gloss. Sobre cada una de las piezas estudiadas se realizaron diez medidas de brillo

Figura 1. Esquema de la fase de calibrado-aplanado, previa al proceso de pulido de las piezas.

TABLA I. SITUACIÓN DE LAS PIEZAS SELECCIONADAS EN LOS TRENES DE PULIDO Y DISTRIBUCIÓN DEL TAMAÑO DE PARTÍCULA DEL ABRASIVO DE LA ÚLTIMA MUELA QUE HA ACTUADO SOBRE ELLAS, SEGÚN LA NORMATIVA DE LA FEPA (7).

Nº de pieza	Grana	Intervalo de tamaños (µm)	Diámetro d ₅₀ (µm)
2	36	600-425	-
4	36	600-425	-
6	36-46	600-425 / 425-300	-
8	46	425-300	-
10	46-60	425-300 / 300-212	-
12	60-80	300-212 / 212-150	-
16	80-100	212-150 / 150-106	-
20	120	125-90	-
24	120	125-90	-
36	150-180	106-63 / 90-53	-
44	240-280	-	44,5-36,5
52	400	-	17,3
54	600	-	9,3
56	600	-	9,3
58	800	-	6,5
60	800	-	6,5
68	1500	-	-
72	LUX	-	-

con un ángulo de incidencia de 60°, situadas aleatoriamente sobre su superficie. A continuación se calculó la media aritmética y la desviación standard para cada uno de ellos.

2.2.3 RUGOSIDAD SUPERFICIAL

Esta determinación se ha realizado con un rugosímetro HOMMELWERKE modelo T4000, utilizando un sensor de punta de diamante de curvatura 90° y radio 5 µm. Sobre cada una de las superficies estudiadas se obtuvo una topografía compuesta por 101 perfiles de 25 mm de longitud y distanciados entre sí 0,25 mm, abarcando así una superficie de 25x25 mm (8).

Para cada uno de los perfiles que componían las topografías se obtuvo el parámetro de rugosidad Ra, calculándose a continuación la media aritmética de los mismos. El parámetro Ra se puede definir como la media aritmética de los valores absolutos de la distancia de los puntos que componen el perfil a una línea media. Su cálculo se realiza mediante la siguiente expresión matemática:

$$Ra = \frac{1}{l_m} \int_0^{l_m} |y(x)| \cdot dx$$

donde:

- l_m: distancia recorrida por el sensor
- x: eje horizontal
- y: eje vertical

2.2.4 OBSERVACIÓN CON MICROSCOPIO ELECTRÓNICO DE BARRIDO (MEB)

La superficie de las piezas se observó con un microscopio electrónico de barrido PHILIPS XL-30, en unas ocasiones se ha utilizado el detector de electrones retrodispersados, que resalta las diferencias de composición junto con las de topografía y en otras, mediante el detector de electrones secundarios, más adecuado a la hora de estudiar la topografía, por conseguir resolver con mayor profundidad de campo.

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

3.1. Análisis de algunos de los defectos de fabricación asociados a una inadecuada operación de pulido

Para ilustrar algunos de los efectos negativos asociados a una inadecuada secuencia de abrasivos en el pulido, se ha analizado la superficie de dos piezas pulidas con defectos. Éstos consistían respectivamente en la presencia de restos de surcos provocados durante la fase de calibrado-aplanado y de una raya producida por un grano abrasivo de gran tamaño. En ninguno de los dos casos ha sido posible, durante las etapas posteriores, eliminarlos.

En la figura 2 se puede ver el mapa topográfico de la zona defectuosa de la primera pieza. Este defecto es debido a un inapropiado funcionamiento de la fase de aplanado, de manera que la zona que presenta el defecto está más hundida que el resto de la pieza a la salida de esta etapa. En este caso, el posterior contacto de las muelas de pulido con esta zona de la pieza no sería efectivo y, en consecuencia, los surcos provocados por los rodillos diamantados no se han eliminado completamente al final de la etapa de pulido.

En la figura 3 se ha incluido el mapa topográfico de una zona de la segunda pieza. La raya fue provocada probablemente por un grano de abrasivo de elevado tamaño que se pudo desprender de una muela anterior y rayó la superficie en un punto del proceso en el que estaban actuando sobre la pieza muelas con abrasivo de un tamaño de grano más pequeño. Las muelas posteriores, con abrasivos de tamaños cada vez más pequeños, no fueron capaces de eliminar completamente esta raya.

3.2 Pérdida de masa de las piezas durante el pulido

En la figura 4 se ha representado la masa de las piezas extraídas de la línea de pulido frente a la grana del abrasivo de la muela correspondiente. La dispersión de los datos es debida a la diferencia existente en el peso original de las distintas piezas. A la vista de este gráfico se aprecia cómo, al principio de la etapa de pulido, donde los abrasivos son de mayor tamaño, la pérdida de masa es notable y muy rápida, mientras que en las últimas etapas, la cantidad de masa que se pierde es mucho menor.

Dado que el gres porcelánico se considera un material predominantemente frágil, se pensó que la variación de la masa con el tamaño del abrasivo podría seguir, teniendo en cuenta los datos de la figura 4, alguna de las ecuaciones empíricas existentes en la bibliografía que relacionan la velocidad de desgaste de materiales frágiles con el tamaño del agente abrasivo empleado. Para comprobarlo, se seleccionó la ecuación

Figura 2. Restos de surcos producidos durante la fase de calibrado-aplanado.

Figura 3. Raya producida por un grano grande de abrasivo.

Figura 4. Pérdida de masa de las piezas durante la operación de pulido.

propuesta por Hutchings (9):

$$E = \alpha \frac{W^{5/4} d^{1/2}}{A^{1/4} K_c^{3/4} H^{1/2}} \quad [1]$$

donde:

- E : velocidad de desgaste (en este caso expresada como velocidad de pérdida de masa: g/s)
- d : diámetro de las partículas abrasivas
- α : constante de proporcionalidad
- W : carga aplicada
- A : área de contacto
- K_c : tenacidad a la fractura del material desgastado
- H : dureza del material desgastado

Al objeto de confirmar si, efectivamente, se cumple esta relación en el proceso de pulido del gres porcelánico, se determinó la velocidad de desgaste por pulido de probetas procedentes de una misma pieza industrial, puliendo cada probeta con lijas de CSi de diferente tamaño de partícula, en una pulidora de laboratorio, aplicando una carga constante. Para comprobar si se cumple la relación $E = f(d^{1/2})$, y puesto que el resto de términos de la ecuación pueden considerarse, en este caso, prácticamente constantes, los valores obtenidos se han representado frente a la raíz cuadrada del diámetro del abrasivo de cada lija. Como se puede observar en la figura 5, los puntos obtenidos se ajustan bastante bien a una línea recta. Esto confirma la aplicabilidad de la expresión [1] para el desgaste por pulido del gres porcelánico, demostrándose así que la pérdida de masa de las piezas en la línea de pulido, corresponde a un proceso de desgaste por fractura frágil, tal como cabía esperar (10).

En la figura 6 se presenta la micrografía de una esquirla de gres porcelánico extraída de una porción de residuo recogido de la línea de pulido industrial. En ella se observa algún poro esférico del interior de la pieza (porosidad cerrada) así como cantos vivos producidos al desprenderse del resto de la pieza. El aspecto de esta partícula es idéntico a aquellas procedentes de materiales que presentan un comportamiento frágil (p.e. vidrios), no observándose ningún síntoma de deformación plástica. Ello confirma que el mecanismo de desgaste del gres porcelánico se produce predominantemente por fractura frágil. Así, cada partícula de abrasivo actúa como un pequeño indentador que genera grietas laterales que favorecen el desconchado y, en consecuencia, el desgaste del material.

3.3 Evolución de la superficie a lo largo del proceso de pulido

En primer lugar, y con fines comparativos, se obtuvo una micrografía de una pieza de gres porcelánico natural, sin pulir (figura 7). Si la comparamos con la de la figura 8, que corresponde a la superficie de una pieza cruda de gres porcelánico, observamos que las irregularidades que se aprecian en la superficie de la pieza cocida se deben, en parte, a que la pieza conserva todavía restos de la morfología de los gránulos de polvo atomizado con que se ha conformado (figura 8). Debido a su alta viscosidad, el líquido que se forma durante la cocción no fluye lo suficiente como para dar a la superficie una textura lisa ni para sellar completamente los poros intergranulares, como se puede apreciar en la figura 7. Además, la presencia de partículas de cuarzo parcialmente disueltas en el seno de la fase vítrea formada (11), contribuye también a dar al gres porcelánico natural su textura rugosa característica.

A fin de poder comparar la topografía de esta pieza con las de las restantes, se obtuvo el mapa topográfico de la superficie de la pieza "natural" (figura 9), que no había sido sometida a ningún tratamiento superficial. En esta figura los tonos oscuros corresponden a las zonas más profundas de la superficie y los claros, a las más sobresalientes.

3.3.1 RESULTADO DE LA FASE DE CALIBRADO-APLANADO

En la figura 10 se presenta el mapa topográfico de una de las piezas recogidas al final de la fase de calibrado-aplanado. En él se puede apreciar la existencia de surcos de gran profundidad en el sentido de avance de la pieza producidos por la acción del grupo de rodillos fijos. La existencia de granos de

Figura 5. Variación de la velocidad de desgaste con el tamaño del abrasivo

Figura 6. Micrografía de una esquirla de gres porcelánico procedente del residuo recogido, obtenida a través del detector de electrones retrodispersados (x1300 aumentos)

Figura 7. Micrografía de la superficie de la pieza "natural" sin pulir, cocida (x200 aumentos).

Figura 8. Micrografía de la superficie de la pieza cruda (x200 aumentos).

Figura 9. Mapa topográfico de la superficie del gres porcelánico natural.

Figura 10. Mapa topográfico de la superficie de una pieza a la salida de la fase de calibrado-aplanado.

diamante en los sectores diamantados (espiral) que sobresalen en exceso sobre el resto y su actuación reiterada sobre el mismo punto (el rodillo gira a gran velocidad) son las causas de la generación de estos surcos a medida que avanza la pieza.

Como se puede apreciar si se comparan las figuras 9 y 10, el deterioro a que se ha sometido la pieza es considerable: la topografía superficial ha pasado de tener una altura de 69 µm, en el caso de la pieza "natural" a duplicarse (145 µm). Además, en la pieza original parte de esta altura se debía a la curvatura natural de la pieza (apreciable a simple vista en la figura 9), mientras que en la pieza sometida a la fase de calibrado-aplanado la altura se debe exclusivamente a la profundidad de los surcos practicados en su superficie, puesto que el objeto de esta etapa es, precisamente, eliminar la curvatura. Esto supone, además del deterioro de la superficie, una notable pérdida de masa de material.

3.3.2 EVOLUCIÓN DURANTE EL TREN DE PULIDO.

3.3.2.1 Variación de la topografía superficial

En la figura 11 se presentan los mapas topográficos obtenidos de algunas de las piezas estudiadas. En ellos se puede observar cómo los surcos provocados en la fase de calibrado-aplanado permanecen hasta la pieza 10 (grana 46-60), habiendo desaparecido totalmente en la número 12 (grana 60-80). Por otra parte, las rayas de pulido oblicuas (debidas a las muelas) no comienzan a distinguirse hasta la pieza 6 (grana 36-44), posiblemente porque al llegar a esta fase del pulido las zonas más altas de la superficie ya están lo suficientemente aplanadas como para que se distingan las rayas provocadas por los granos de abrasivo. Estas rayas de pulido, que van siendo cada vez más finas debido a la disminución del diámetro del abrasivo utilizado, dejan de apreciarse, a la escala de los mapas topográficos obtenidos, en la pieza 24 (grana 120). A partir de este punto se observa una disminución progresiva del aspecto rugoso de las superficies hasta llegar a la pieza 72 (grana LUX), que presenta un aspecto totalmente liso (a la escala estudiada) a excepción de los poros abiertos por el proceso de pulido.

a) Pieza 2

b) Pieza 6

c) Pieza 7

d) Pieza 10

e) Pieza 12

f) Pieza 24

g) Pieza 72

Figura 11. Mapa topográfico de la superficie de algunas de las piezas extraídas del tren de pulido.

Figura 12. Micrografías de la superficie de algunas de las piezas extraídas del tren de pulido.

En la figura 12 se muestran las micrografías de algunas de las piezas, realizadas en el MEB. Se observa que la superficie de la pieza 2 (grana 36) presenta una superficie de fractura con crestas y valles bastante profundos. El aspecto de esta pieza es muy similar al de la esquirla arrancada durante al pulido (figura 6), lo que corrobora la enorme agresividad de la etapa de calibrado-aplanado en la superficie de la pieza.

En la pieza 10 (grana 46-60) ya se han eliminado prácticamente las crestas anteriormente descritas y comienzan a apreciarse zonas planas, cuya superficie va en aumento según avanza la pieza en el tren de pulido. En esta zona ya es posible detectar rayas producidas por el abrasivo. Cabe destacar un importante cambio de textura entre las piezas 52 y 54 (granadas 400 y 600 respectivamente). Así mientras que en la pieza 52 se observan muchas irregularidades en forma de rayas de pulido y desconchados, en la 54 éstas son bastante más finas. A partir de la pieza 54 las rayas de pulido siguen reduciéndose, hasta llegar prácticamente a eliminarse en la pieza 72 (grana LUX).

En la figura 13 se han representado los valores de brillo y rugosidad (expresada como Ra) obtenidos para las piezas estudiadas, frente al número de orden de las piezas en la línea de pulido. Se observa que, durante las primeras etapas, el brillo se mantiene en valores muy bajos para crecer bruscamente a partir de la pieza 52 (grana 400), zona de la pulidora donde, como se ha comentado anteriormente, se observaba un cambio de textura muy significativo. Para tamaños de abrasivo menores, el brillo sigue aumentando, aunque más suavemente. También se aprecia cómo los valores del parámetro Ra caen inicialmente de forma brusca para disminuir luego con más suavidad a partir de la pieza 12 (grana 60-80).

Figura 13. Evolución del brillo y la rugosidad con el pulido de las piezas.

Figura 14. Variación de la rugosidad con el diámetro de abrasivo.

El parámetro de rugosidad medido (Ra) se ha representado también frente al diámetro del grano de abrasivo utilizado en cada pieza. (figura 14). En primer lugar, se observa que a medida que aumenta el diámetro del abrasivo utilizado, la rugosidad de la superficie resultante también aumenta, al principio de forma moderada y después, con los tamaños más grandes, de forma considerable, lo que está de acuerdo con la relación entre la pérdida de masa y el tamaño de partícula de abrasivo descrita anteriormente (ecuación 1). En segundo lugar, puede apreciarse que piezas que han sido pulidas con abrasivo del mismo tamaño presentan diferentes valores de los parámetros de rugosidad, dependiendo del número de cabezales de ese abrasivo por el que han pasado. Esto significa que el tiempo que permanece una pieza sometida a la acción de un determinado abrasivo es un factor a tener en cuenta a la hora de diseñar el ciclo de pulido.

3.3.2.2 Acabado final de la superficie

Para averiguar la razón por la que, en la última etapa de pulido, el brillo aumenta considerablemente mientras que la rugosidad permanece prácticamente constante (tramo final del gráfico de la figura 13), se efectuó un segundo muestreo de piezas, más exhaustivo, en esta zona. Para ello, se extrajeron nueve piezas de este tramo final de la línea, sobre cuya superficie se midió el brillo y la rugosidad. Estas piezas fueron designadas, de mayor a menor grana, con las referencias F1 a F9. En la figura 15 se han representado los valores del brillo y del parámetro Ra de rugosidad obtenidos, frente al número de orden de las piezas. En esta gráfica se puede observar que el brillo, durante esta última etapa de pulido, sigue aumentando progresivamente, de forma prácticamente lineal, con la

Figura 15. Evolución del brillo de las piezas del último tramo de pulido.

longitud de la pulidora. En cambio, el parámetro Ra de rugosidad permanece constante en estas piezas, hecho que confirma los datos obtenidos en el muestreo anterior.

Las superficies de las piezas se observaron en el microscopio electrónico de barrido, utilizando el detector de electrones secundarios, que aporta información sobre la topografía de la muestra. Para apreciar mejor los posibles cambios de textura, la observación se efectuó inclinando la superficie de la muestra 30° con respecto al detector. El aspecto que presentaban las piezas se puede apreciar en la figura 16. Se observa un cambio progresivo en la textura de la pieza, desde la menos pulida (pieza F1) hasta la que ha completado el ciclo de pulido (pieza

a) Micrografía de la pieza F1.

b) Micrografía de la pieza F3.

c) Micrografía de la pieza F5.

d) Micrografía de la pieza F7.

e) Micrografía de la pieza F9.

Figura 16. Micrografías de la superficie de algunas de las piezas extraídas del último tramo del tren de pulido (x800 aumentos).

F9). Según van avanzando las piezas en estas últimas etapas del tren de pulido, se van eliminando las rayas y los pequeños desconchados producidos durante el pulido. La superficie de la pieza que ha completado el ciclo de pulido es mucho más lisa que la de las piezas de las etapas anteriores. La eliminación de estas irregularidades afecta al brillo de la pieza, por lo que éste se incrementa también de forma progresiva.

Sin embargo, debido a la presencia permanente sobre la superficie de poros abiertos, de dimensiones sensiblemente mayores que las rayas y desconchados propios del pulido, los parámetros de rugosidad calculados alcanzan un valor mínimo que corresponde a la profundidad de los poros. El valor del parámetro R_a para el material estudiado en este trabajo está próximo a $0.2\ \mu\text{m}$. A partir de este punto, por mucho que se avance en el acabado de la superficie, las irregularidades debidas a la porosidad propia del material contribuirán siempre a mantener la rugosidad cercana a estos valores. Por el contrario, si la pieza no tuviese ningún poro, la variación de su rugosidad durante estas últimas etapas del pulido sería, probablemente, paralela y de sentido opuesto a la del brillo.

3.3.2.3 Comparación con el pulido de laboratorio

En vista de que, al final del tren de pulido industrial, el brillo de las piezas sigue aumentando sin alcanzar un valor estacionario, se pulieron probetas confeccionadas a partir de piezas pulidas industrialmente en una pulidora de laboratorio. El objetivo era conocer el brillo máximo que es posible alcanzar en estas piezas.

Se prepararon probetas a partir de una pieza pulida industrialmente, sometiendo a un pulido de laboratorio en cinco etapas y utilizando para ello abrasivos de tamaño de grano progresivamente más pequeño:

Etapas	1	2	3	4	5
Tamaño de grano de abrasivo (μm)	65	20	9	6	3

A las probetas se les asignaron las siguientes referencias:

- Muestra STD: probeta de gres porcelánico pulido industrialmente.
- Muestra A: probeta pulida en laboratorio.

En la figura 17 se muestran micrografías de las probetas STD y A. Al compararlas, se observa que en la muestra STD la superficie de la pieza todavía tiene alguna raya de pulido y que los poros son irregulares, lo que indica la presencia de pequeños desconchados en sus bordes. En cambio, en la probeta pulida en laboratorio, los poros tienen bordes redondeados, las zonas que no contienen poros son lisas y su textura es homogénea, observándose incluso unas zonas/manchas más oscuras que son las partículas de cuarzo que no se han disuelto, en el proceso de cocción.

En la tabla II se presentan los valores obtenidos para el brillo y los parámetros de rugosidad R_a de estas piezas. En ella se puede apreciar que la probeta que ha sido sometida al proceso de pulido en el laboratorio ha alcanzado valores de brillo mayores que la pieza pulida industrialmente.

Respecto a los parámetros de rugosidad, no hay diferencias entre la pieza pulida industrialmente y la pulida en laboratorio, debido a la presencia de poros en ambas que, como se ha dicho, son los que definen la rugosidad de las piezas en las últimas fases del pulido.

a) Pulido industrial, probeta STD.

b) Pulido de laboratorio, probeta A.

Figura 17. Micrografías de la superficie de las probetas STD y A ($\times 1200$ aumentos).

TABLA II. COMPARACIÓN DE BRILLO Y LA RUGOSIDAD DE LAS PIEZAS PULIDAS INDUSTRIALMENTE Y EN EL LABORATORIO.

Probeta	Tipo de pulido	Brillo	R_a (μm)
STD	Industrial	80.6	0.18
A	Laboratorio (desde etapa 1)	90.7	0.16

4. CONCLUSIONES

Se ha comprobado que la pérdida de masa del gres porcelánico se adapta al modelo empírico de desgaste para materiales frágiles, propuesto por Hutchings, que relaciona la velocidad de pérdida de masa con la raíz cuadrada del diámetro de la partícula de abrasivo empleado. Este mecanismo se confirma también con la observación de las superficies de rotura de una esquirla de material desprendida durante el proceso.

La primera fase del pulido, correspondiente al aplanado de la pieza, se lleva a cabo a base de arrancar material de la superficie de las piezas, generando sobre ella numerosas grietas y surcos de dimensiones considerables.

Durante el primer tramo de la segunda fase de la operación de pulido, el brillo se mantiene prácticamente constante y la rugosidad se reduce considerablemente. Esto indica que gran parte de esta fase se invierte en reparar los daños causa-

dos por la fase anterior y que el pulido propiamente dicho se produce en el tramo final, una vez preparada la superficie de la pieza. En este tramo, el brillo de las piezas aumenta considerablemente.

El brillo de las superficies resultantes de la operación de pulido tiene un límite máximo, que viene determinado por la porosidad y los defectos microestructurales del material. Lo mismo ocurre con la rugosidad, cuyo parámetro Ra alcanza un valor mínimo a partir del cual permanece constante.

Aunque la superficie de las piezas pulidas industrialmente no ha alcanzado todavía el límite máximo de brillo posible, éste está muy cercano al que se puede alcanzar puliendo en laboratorio.

5. BIBLIOGRAFÍA

1. A. Brusa. "Características, prestaciones y tecnología de producción de pavimento gresificado, no esmaltado, con efecto granito (gres porcelánico)." *Téc. Cerám.*, **159**, 562-573 (1987).
2. A. Brusa, L.; Contoli y M. Dardi "Gres porcelánico fino." *Cerám. Inf.*, **204**, 17-26 (1994).
3. L. Esposito y A. Tucci. "Porcelain stone tile surfaces." *Am. Ceram. Soc. Bull.*, **79**[5], 59-63 (2000).
4. G. Biffi. "Il mercato del gres porcellanato in Europa: sviluppi e prospettive." *Cerám. Inf.*, **385**, 54-60 (1999).
5. M. Vallere, M. y Thiene Vincent-Tyrolit. "Diamond tools in the machining of porcelain tile." *Ceram World Rev.*, **32**, 78-82 (1988).
6. G. Elssner et al. "Ceramics and Ceramic Composites: Materialographic Preparation." Elsevier, Amsterdam (Holanda) 1999.
7. Norma: FEPA 44-GB-1984 (R 1993). "Standard for bonded abrasive grains of fused aluminum oxide and silicon carbide."
8. M.J. Ibáñez "Estudio de las propiedades mecánicas y superficiales de recubrimientos vidriados de piezas cerámicas. Puesta a punto de nuevas técnicas de medida." Tesis Doctoral. Departamento de Ingeniería Química. Universidad Jaume I de Castellón, 1998.
9. I.M. Hutchings. "Tribology: Friction and Wear of Engineering Materials." Edward Arnold, Londres (R.U.), 1992.
10. M.A. Moore y F.S. King. "Abrasive wear of brittle solids." *Wear*, **60**, 123-140 (1980).
11. E. Sánchez; M.J. Orts; J. García-Ten y R. de Lemus. "Effetto della composizione delle materie prime per gres porcellanato sulle fasi che sviluppano durante la cottura." *Ceram. Acta*, **4-5**, 205-207 (1998).

Recibido: 16.11.00

Aceptado: 13.11.01

QUALICER

VII

2002

Congreso Mundial de la Calidad del Azulejo y del Pavimento Cerámico
World Congress on Ceramic Tile Quality

CastellónSPAIN

www.qualicer.org