

SIMULACIÓN Y ANÁLISIS DE UNA ALTERNATIVA CINEMÁTICA PARA MEJORAR LA UNIFORMIDAD DEL PULIDO EN LA SUPERFICIE DE BALDOSAS PULIDAS

**^(1*) F. J. P. Sousa, ⁽¹⁾ D. Hosse, ⁽¹⁾ J. C. Aurich, ⁽²⁾ M. Engels,
⁽³⁾ W. L. Weingaertner, ⁽³⁾ O. E. Alarcon**

⁽¹⁾ Institute for Manufacturing Technology and Production Systems - FBK

Departamento de Ingeniería Mecánica y de Procesos

Universidad de Kaiserslautern

Alemania

⁽²⁾ Institute for Research on Inorganic Materials – FGK

Alemania

⁽³⁾ Departamento de Ingeniería Mecánica – Universidad Federal de Santa Catarina

Brasil

RESUMEN

El presente documento investiga la posibilidad de adoptar una nueva cinemática en las líneas de pulido industrial de baldosas de gres porcelánico. Se propone un movimiento alternativo para la oscilación transversal de los cabezales de pulido, para el cual no se requiere realizar cambios importantes en las instalaciones industriales. La idea básica consiste en sustituir el movimiento puramente sinusoidal de los cabezales de pulido por un movimiento de onda de tipo trapezoidal. En teoría, esto podría lograrse simplemente mediante la adopción de retrasos regulares a nivel del movimiento de oscilación transversal. Se han analizado las consecuencias de esta cinemática alternativa desde un punto de vista cuantitativo, considerando la homogeneidad espacial de pulido esperada para las baldosas. Dicha homogeneidad se ha representado mediante el coeficiente de variación de la distribución del tiempo de pulido sobre la superficie, lo que a su vez se determina mediante simulaciones informáticas, teniendo en cuenta el efecto de la utilización de múltiples cabezales de pulido.

1. INTRODUCCIÓN

La mayoría de las baldosas de gres porcelánico se pulen después del proceso de cocido, en cuyo caso el brillo final representa el criterio de calidad más importante [1,2,3]. El cliente valora positivamente altos niveles de brillo a pesar de los costes extraordinarios asociados al proceso de pulido. Dichos costes surgen principalmente de la elevada demanda de energía, agua y herramientas abrasivas [4,5], y también por los bajos niveles de eficiencia, que aún se consideran inherentes al proceso industrial [6,7].

A nivel de la industria el proceso de pulido se realiza mediante la utilización de una secuencia de varios cabezales de pulido tangenciales con dimensiones abrasivas decrecientes, lo que conlleva la necesidad de contar con largas líneas de pulido. Normalmente se utilizan más de 30 cabezales de pulido y hasta 18 dimensiones abrasivas diferentes para garantizar la producción de baldosas con el nivel de brillo exigido en el mercado [6,8].

La cinemática disponible en una línea de pulido determinada puede considerarse como una característica clave en el patrón de brillo final que puede esperarse para las superficies de las baldosas pulidas, ya que determina la uniformidad del número de contactos abrasivos obtenidos durante este proceso. Como resultado, el nivel máximo de homogeneidad ofrecida por las líneas de pulido, que está básicamente regido por algunos parámetros cinemáticos y geométricos predefinidos, acaba por limitar la eficiencia general del proceso.

Las líneas de pulido modernas poseen una cinemática que incorpora básicamente tres componentes diferentes: la rotación W [rad.s^{-1}] de los bloques abrasivos conocidos como "fickerts" muelas abrasivas en torno al centro de cada cabezal de pulido, el movimiento de avance V [mm.s^{-1}] de la cinta transportadora, que define la dirección del proceso de pulido, y finalmente la oscilación del cabezal de pulido, la cual es transversal a la dirección del pulido, y que tiene una amplitud A [mm] y una frecuencia f [s^{-1}].

El movimiento de avance y la oscilación transversal simultánea provocan que cada cabezal de pulido efectúe una trayectoria sinusoidal sobre la superficie de la baldosa. Como indican Sousa et al. [9], de acuerdo con la relación entre el movimiento de avance y frecuencia de oscilación transversal (V/f), un patrón de brillo en zigzag puede aparecer sobre la superficie pulida. Además, se ha determinado que las áreas más pulidas se encuentran considerablemente alejadas del centro de la baldosa. Esto podría explicarse considerando en primer lugar la falta de abrasivos en el centro de los cabezales de pulido, y en segundo lugar el solapamiento de las trayectorias de ondas.

Independientemente de la frecuencia de la oscilación transversal adoptada en una línea de pulido, el centro de los cabezales de pulido que no contienen abrasivos se encontrará cercano al centro de la baldosa la mayor parte del tiempo. Teniendo

este concepto en mente, la idea básica del presente trabajo se basa en considerar un incremento del tiempo durante el cual la región con menos contactos abrasivos se mantiene alejada del centro. Esta idea fue considerada factible mediante la generación de un retraso periódico en el movimiento de oscilación transversal, durante cada pico y valle de la curva sinusoidal.

La figura 1 muestra las trayectorias de dos cabezales de pulido adyacentes que se desplazan sobre la superficie de la baldosa. La figura 1a muestra la trayectoria sinusoidal original, mientras que las figuras 1b y 1c ejemplifican algunas trayectorias con el retraso propuesto. La distancia recorrida durante cada retraso corresponde a $D/2$ [mm].

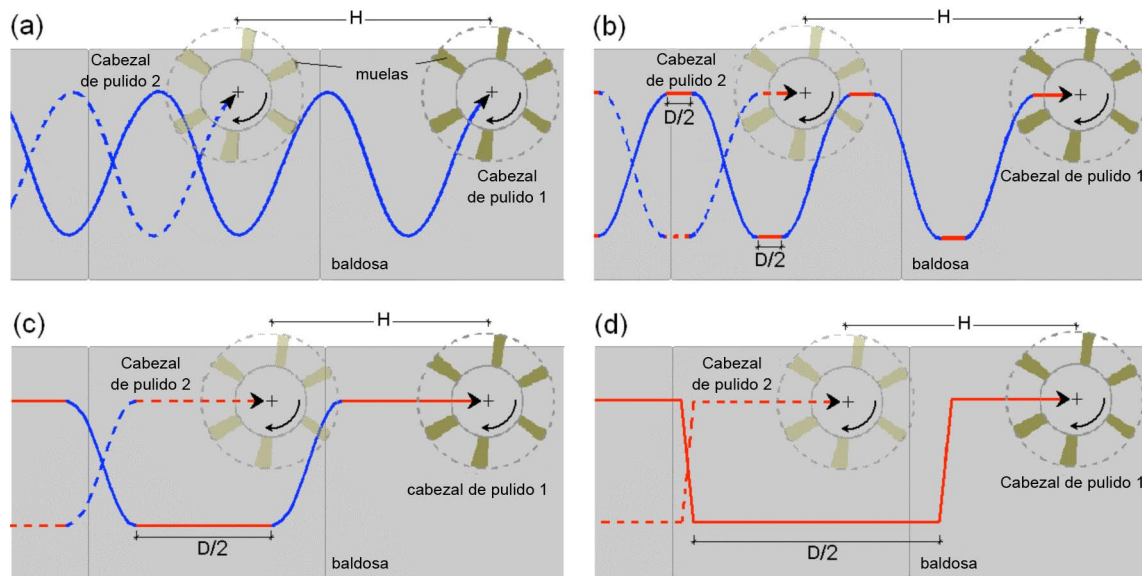


Figura 1. Área bajo el pulido y movimientos disponibles en la línea de pulido.

La figura 1 muestra el solapamiento de las trayectorias efectuadas por los cabezales de pulido adyacentes. Todos los cabezales están espaciados a una misma distancia H y realizan la oscilación transversal al mismo tiempo. Al igual que el coeficiente V/f , este solapamiento también juega un papel importante en el nivel de uniformidad del proceso de pulido sobre la superficie de la baldosa [2,10].

Análogamente a la suma de dos ondas congruentes, un solapamiento con una interferencia constructiva total mejoraría el patrón de brillo que actualmente proporciona un único cabezal de pulido. Por su parte, un solapamiento con interferencia destructiva llevaría a una mejor cobertura de pulido. Las ventajas de esta mejor cobertura han sido totalmente incorporadas en este trabajo, ya que las nuevas trayectorias a ser analizadas permanecen durante un mayor tiempo bajo condiciones de asimetría que las ondas sinusoidales originales. Un criterio útil a la hora de distinguir entre la interferencia destructiva viene dado por la ecuación 1, obtenida de la bibliografía [9]:

$$H = \lambda \cdot \left(n + \frac{1}{2}\right)$$

Ecuación 1.

Donde $n \in \mathbb{N}$ es el número de nodos de la onda, y λ [mm] representa la longitud de onda de la trayectoria de los cabezales de pulido, incluyendo la distancia alcanzada durante los retrasos. Después de la introducción de la distancia D en la onda sinusoidal los cabezales de pulido siguen una función de onda de tipo trapezoidal, cuyo período viene dado por la suma del tiempo transcurrido en el movimiento sinusoidal, T_s [s], más el tiempo transcurrido con los retrasos, T_D [s]. En consecuencia, la frecuencia de oscilación transversal corresponde a $f = 1/(T_s + T_D)$, y la longitud de onda λ de la función depende, por su parte, de la velocidad de avance V , de manera que $\lambda = V(T_s + T_D)$.

La naturaleza trapezoidal de la función resultante puede representarse mediante el coeficiente entre la distancia de retraso D y la longitud de onda λ . La figura 1d muestra un coeficiente D/λ del 100%, en el cual se supone que los cabezales de pulido se desplazan bruscamente de un lado a otro en la línea de pulido. Por otra parte, la figura 1a representa la onda sinusoidal original, con una relación de D/λ de 0 %.

Respecto al tiempo de pulido acumulado, los perfiles cualitativos habituales para uno y dos cabezales de pulido adyacentes se explican en las figuras 2a y 2b, respectivamente. Las ventajas de las trayectorias solapadas para una mejor cobertura de pulido también pueden observarse en la figura 2b. El radio interior r [mm] representa el centro del cabezal de pulido, el radio exterior R [mm] depende de la dimensión de las muelas (bloques abrasivos).

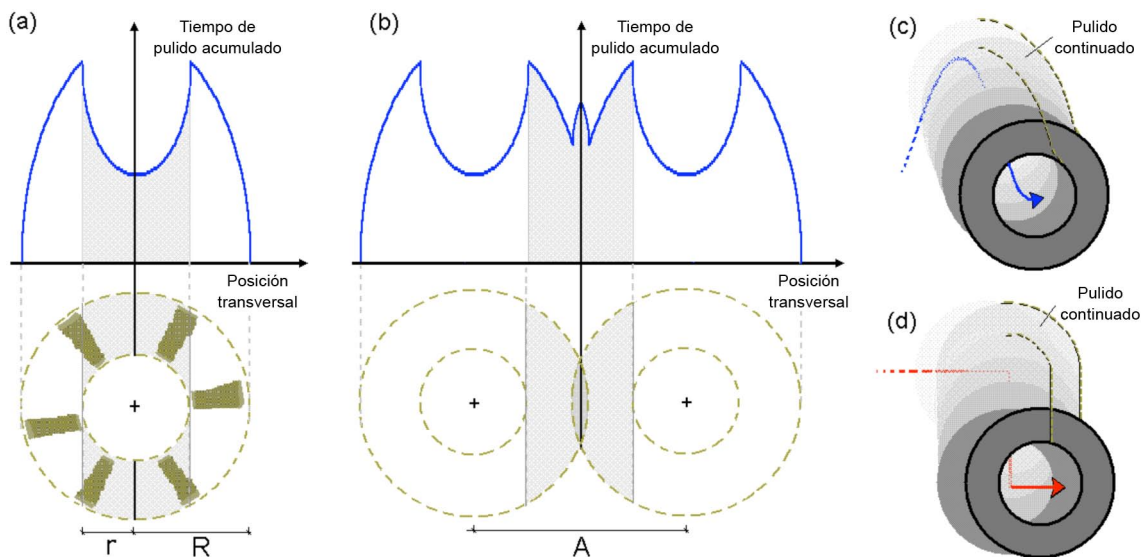


Figura 2. Perfiles de tiempo de pulido acumulado para uno (a) y dos cabezales de pulido solapados (b). Regiones sin interrupciones de pulido para trayectorias sinusoidales (c) y para (d) trapezoidales.

La figura 2a muestra la aparición de sesgos en la mayoría de las regiones pulidas, como consecuencia de la falta de abrasivos en el centro de los cabezales de pulido. No obstante, como se observa en la figura 2b, este problema podría minimizarse utilizando un solapamiento adecuado de dos cabezales de pulido adyacentes. Además, tal como sugieren las figuras 2c y 2d, esta mejora parece ser más

intensa al adoptar la onda retrasada en lugar de la trayectoria sinusoidal original. Estos supuestos se analizan cuantitativamente en las siguientes secciones.

2. CONSIDERACIONES TEÓRICAS

La trayectoria y geometría del cabezal de pulido se indican en la figura 3, incluyendo los movimientos disponibles. El círculo hueco representa la zona de funcionamiento efectivo de los cabezales de pulido, suponiendo que el movimiento de rotación es mucho más rápido que los otros dos.

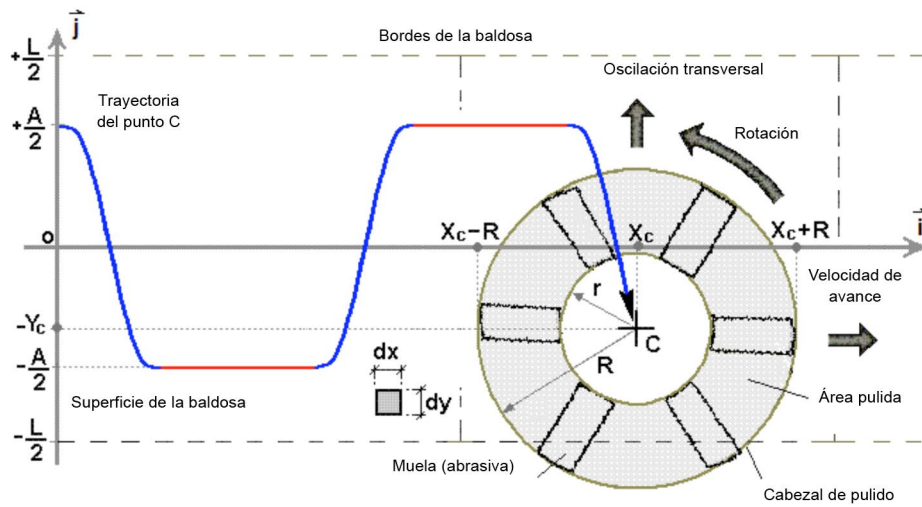


Figura 3. Área bajo el pulido y movimientos disponibles en la línea de pulido.

Según Sousa et al.[10], el tiempo de pulido efectivo para un punto determinado de la superficie con coordenadas (X, Y) , y dimensiones dx y dy , pueden determinarse analíticamente mediante la función espacial $S_T = f(X, Y)$, descrita en la ecuación 2. La función f_{TW} representa la función de onda de tipo trapezoidal que debe ser efectuada por el centro del cabezal de pulido, representado por el punto C $(X_C; Y_C)$.

$$S_T = \frac{d}{dY_C} \left[\int_{X_C-R}^{X_C+R} f_{TW} - f_{OCU} \left| \frac{dx}{2} \right| \right] - \frac{d}{dY_C} \left[\int_{X_C-r}^{X_C+r} f_{TW} - f_{ICU} \left| \frac{dx}{2} \right| \right] -;$$

$$\left\{ \frac{d}{dY_C} \left[\int_{X_C-R}^{X_C+R} f_{TW} - f_{OCU} \left| \frac{dx}{2} \right| \right] - \frac{d}{dY_C} \left[\int_{X_C-r}^{X_C+r} f_{TW} - f_{ICU} \left| \frac{dx}{2} \right| \right] \right\} + (R - r) \quad \text{si } Y_C \geq 0$$

Ecuación 2a.

o:

$$S_T = \frac{d}{dY_C} \left[\int_{X_C-R}^{X_C+R} f_{TW} - f_{OCN} \left| \frac{dx}{2} \right| \right] - \frac{d}{dY_C} \left[\int_{X_C-r}^{X_C+r} f_{TW} - f_{ICN} \left| \frac{dx}{2} \right| \right] -$$

$$\left\{ \frac{d}{dY_C} \left[\int_{X_C-R}^{X_C+R} f_{TW} - f_{OCU} \left| \frac{dx}{2} \right| \right] - \frac{d}{dY_C} \left[\int_{X_C-r}^{X_C+r} f_{TW} - f_{ICU} \left| \frac{dx}{2} \right| \right] \right\} - (R - r) ; \quad \text{si } Y_C < 0$$

Ecuación 2b.

La función f_{OCN} representa la mitad superior del círculo exterior (radio R), y define el alcance de las muelas. Análogamente, f_{ICU} es la función correspondiente a la mitad inferior del círculo interno (radio r), que delimita la ausencia de abrasivos en el centro del cabezal de pulido.

El diseño del cabezal de pulido evita que la amplitud de la oscilación transversal se aproxime al borde lateral de la baldosa. Esto evita una súbita reentrada del bloque abrasivo (muela) sobre la misma superficie de la baldosa, que a menudo lleva a que se produzcan rayados. Por la misma razón, no pueden admitirse espacios entre las baldosas de porcelana mientras que son llevadas al pulido por la cinta transportadora.

Se han adoptado los siguientes parámetros cinemáticos para la línea de pulido: $W = 47,12 \text{ rad.s}^{-1}$ (450 rpm), $V = 75 \text{ mm.s}^{-1}$, $R = 230 \text{ mm}$, $r = 110 \text{ mm}$, y $A = 120 \text{ mm}$. Se ha definido un tamaño nominal de $450 \times 450 \text{ mm}$ para cada baldosa. También se consideró un valor de amplitud de oscilación extraordinario de $A = 220 \text{ mm}$. Este valor, que corresponde a $2 \cdot r$, conduce a una completa desalineación de las regiones que no contienen partículas abrasivas, y ya que $A < R$, se encuentra aún dentro de los límites para una reentrada segura de las muelas sobre la superficie a ser pulida.

Una vez que se han determinado los valores de los parámetros cinemáticos, se procedió a la simulación de los correspondientes patrones de pulido considerando varias ondas trapezoidales distintas con un coeficiente D/λ que va desde 0 % hasta 100 %. En el caso de patrones solapados, se ha considerado que los cabezales de pulido adyacentes separados entre sí por una distancia $H = 550 \text{ mm}$ se solapan entre sí produciendo la mejor cobertura de pulido posible.

La decisión para todos los valores antes indicados fue adoptada teniendo en cuenta los resultados de un trabajo anterior sobre optimización cinemática [2, 9, 10, 11]. La uniformidad del pulido para cada condición fue posteriormente cuantificada mediante la desviación típica espacial de la correspondiente distribución del tiempo de pulido, descrito por la ecuación 2.

Se elaboró un algoritmo informático para efectuar todos los cálculos y simulaciones necesarias. Dicho algoritmo resuelve y presenta las soluciones analíticas

de la ecuación 2 para la totalidad de la superficie pulida, y considerando cada condición cinemática analizada. Los resultados de las simulaciones se indican en la siguiente sección mediante gráficas en 3D o de superficie en escala de grises, donde la posición de cada píxel está directa e inambiguamente asociado a una región en la superficie de la baldosa.

Con vistas a obtener la evolución del número acumulado de contactos abrasivos durante cualquier prolongación del proceso de pulido se ha elaborado un segundo algoritmo. Dicho algoritmo simplemente cuenta el número de contactos abrasivos experimentado por cada región sobre la superficie de la baldosa, originado por cualquiera de las muelas disponibles. Ambos algoritmos han sido escritos en lenguaje G, utilizando el software LabVIEW®, versión 8.5.

3. SIMULACIONES

En un principio, se analizó el efecto de un único cabezal de pulido. La figura 4 presenta un ejemplo del patrón de pulido simulado considerando cuatro condiciones cinemáticas diferentes con el mismo coeficiente $D/\lambda = 10\%$. Una buena percepción del efecto de adoptar una amplitud de oscilación $A = 2 \cdot r$ puede verse comparando la figura 4a con la 4c, o también comparando la figura 4b con la 4d. Las frecuencias de oscilación se fijaron con valores $f = 0,12 \text{ s}^{-1}$ y $f = 0,34 \text{ s}^{-1}$, respectivamente.

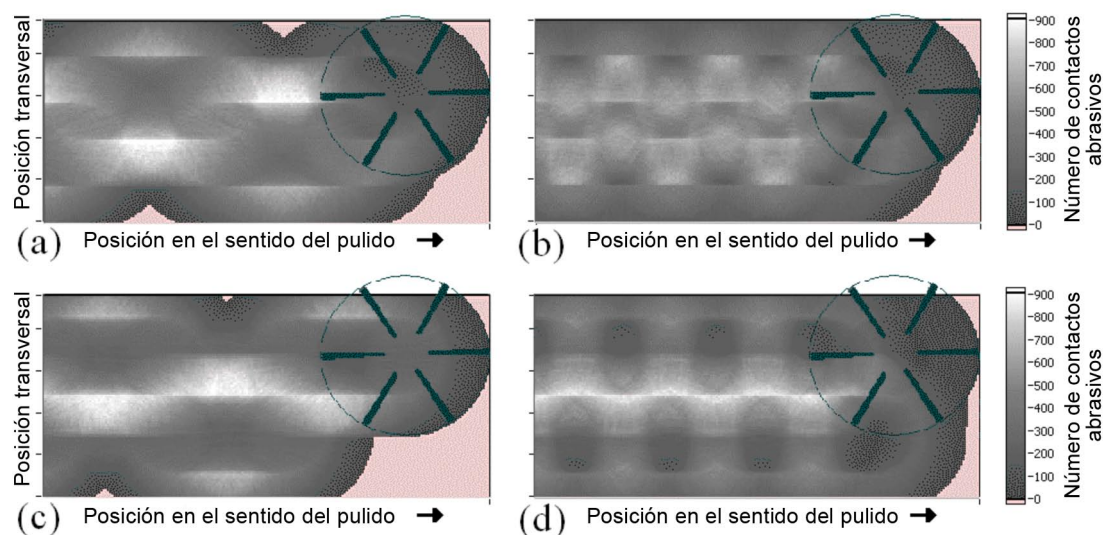


Figura 4. Distribución espacial de contactos abrasivos acumulados considerando $D/\lambda = 10\%$, una amplitud transversal $A = 120 \text{ mm}$ con frecuencia de oscilación (a) $f = 0,12 \text{ s}^{-1}$ y (b) $f = 0,34 \text{ s}^{-1}$, y $A = 220 \text{ mm}$ con (c) $f = 0,12 \text{ s}^{-1}$ y (d) $f = 0,34 \text{ s}^{-1}$.

Para ambas frecuencias de oscilación la utilización de $A = 2 \cdot r$ ha originado una acumulación ligeramente superior del tiempo de pulido en el centro de la baldosa. Sin embargo, también ha de incorporarse en el análisis el funcionamiento de las muelas cuando sobresalen de la superficie de la baldosa. Se ha reconocido que

estas salidas disminuyen la eficacia del proceso, debido a que no producen ningún efecto de pulido.

El efecto positivo de la frecuencia de oscilación sobre la distribución del tiempo de pulido puede verse claramente comparando las figuras 4a-4c con las 4b-d. Además de la mejora en la uniformidad del patrón de pulido, la mayor frecuencia ha conducido a diferentes patrones de pulido. La figura 5 muestra más detalles de la figura 4b en relación con el número de contactos abrasivos y de los límites del pulido.

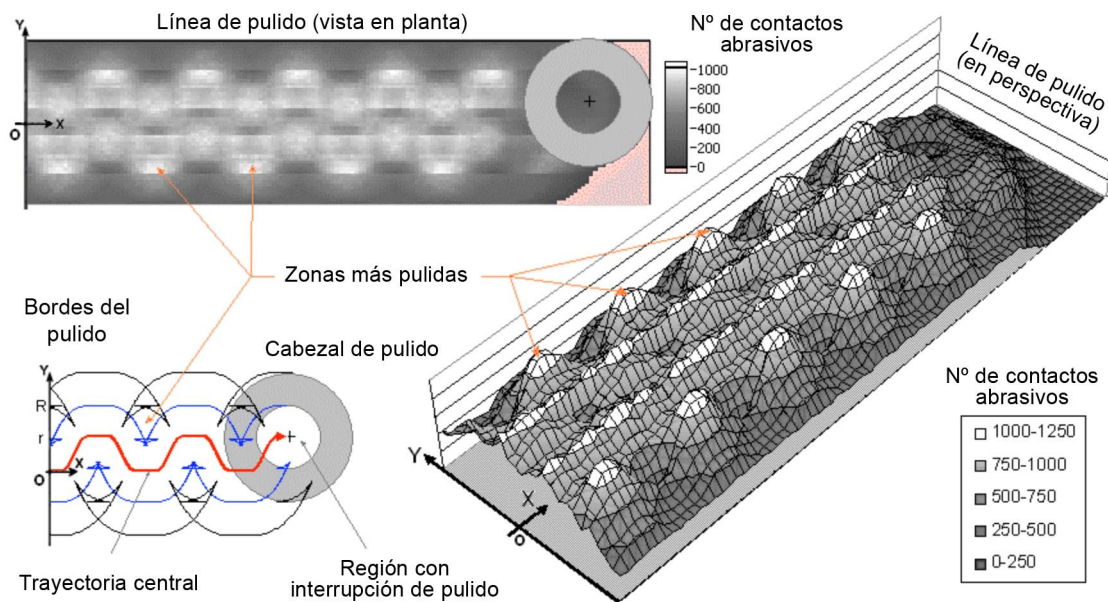


Figura 5. Distribución espacial del tiempo de pulido sobre la superficie de tres baldosas adyacentes.

Aún considerando la utilización de un único cabezal de pulido, los resultados simulados en relación con la distribución del tiempo de pulido efectivo fueron incorporados en el gráfico de respuesta mostrado en la figura 7. En esta figura se indican los valores medios del tiempo de pulido efectivo (figura 7a) y de los correspondientes coeficientes de variación (figura 7b) para diferentes combinaciones de frecuencias de oscilación transversal y coeficientes D/λ . El menor es el coeficiente de variación determinado para una combinación particular, el más uniforme es la correspondiente distribución del tiempo de pulido sobre toda la superficie de la baldosa.

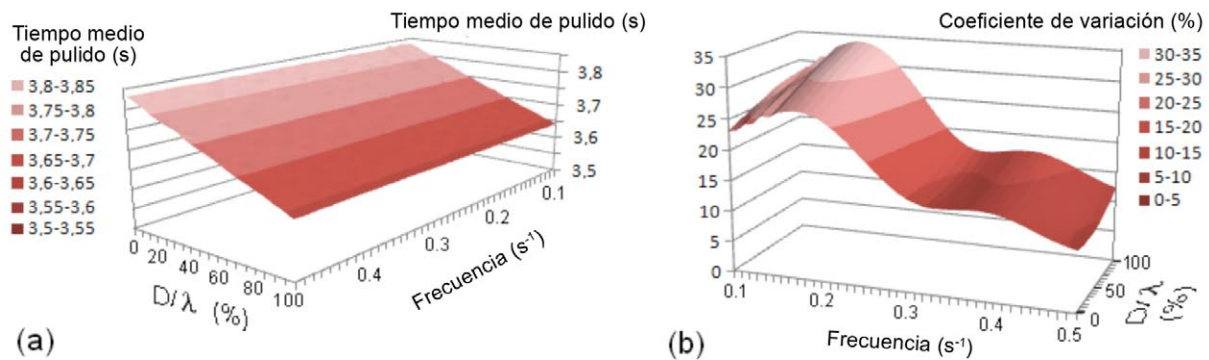


Figura 6. Gráfico de respuesta estimado en relación con (a) el valor medio del tiempo de pulido efectivo y (b) el correspondiente coeficiente de variación, para diferentes combinaciones cinemáticas.

Debido a la velocidad fija de la cinta transportadora, la frecuencia de oscilación no afecta los valores medios del tiempo de pulido efectivo (figura 7a). Sin embargo, los cambios en la frecuencia tienen un efecto perceptible sobre la homogeneidad de la distribución espacial del tiempo de pulido (figura 7b). Estos resultados son concordantes con los obtenidos en estudios anteriores [2, 10, 11].

Si por una parte la utilización de altas frecuencias conduce a un proceso de pulido más homogéneo, por otro lado los criterios de consumo energético y la vida útil de las máquinas de pulido podrían verse perjudicados [11]. En el caso de utilizar ondas trapezoidales, el planteamiento de dichos criterios cobra una mayor importancia, ya que se requeriría que los cabezales de pulido se movieran con una mayor rapidez que las ondas sinusoidales con la misma longitud de onda.

La figura 7 también destaca las desventajas de introducir el retraso D al utilizar un único cabezal de pulido. Respecto al tiempo medio de pulido (figura 7a), el efecto negativo del coeficiente D/λ resulta del mayor tiempo durante el cual los abrasivos ubicados en la región periférica del cabezal de pulido se mantienen fuera de la superficie de la baldosa. Además, durante el retraso mejora el patrón de pulido generado por la utilización de un único cabezal, y por lo tanto se produce un pulido más heterogéneo (figura 7b).

Finalmente, las ventajas de utilizar múltiples cabezales de pulido que oscilan de forma coherente podrían evaluarse mediante el gráfico de respuesta mostrado en la figura 8.

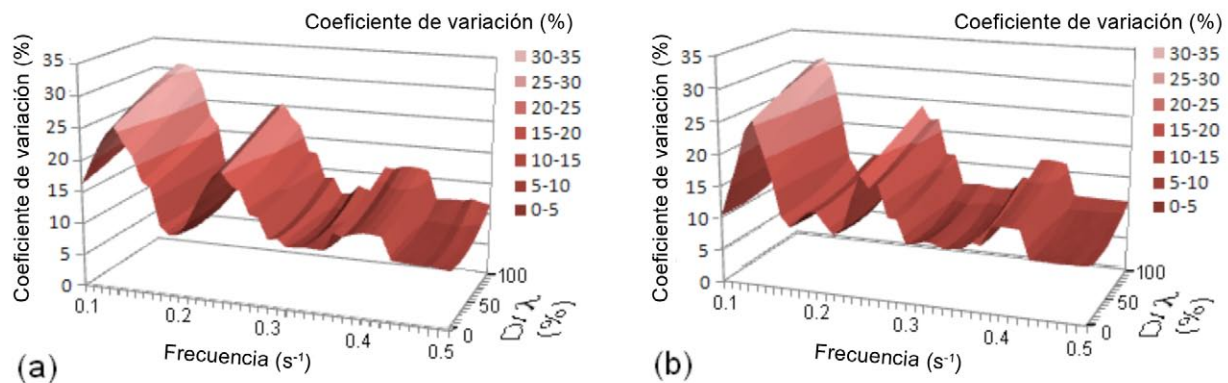


Figura 7. Coeficiente de variación simulado para distribuciones del tiempo de pulido efectivo considerando (a) dos y (b) tres cabezales de pulido adyacentes.

Volviendo a la ecuación 1, y eligiendo un número de nodos de onda $n = 0, 1$, y 2 , se obtiene una condición de interferencia oportuna para longitudes de onda $\lambda = 157, 220, 367$ mm. Considerando la velocidad de avance adoptada ($V = 75 \text{ mms}^{-1}$), dichos valores generan las siguientes frecuencias de oscilación $f = 0,48, 0,34$ y $0,20 \text{ s}^{-1}$ respectivamente. Esto, a su vez, explica la posición de los menores valores de coeficientes de variación observados en la figura.

Al contrario de la figura 7b, el mayor predominio de regiones con pequeños coeficientes de variación indicado en la figura 8 subraya la mejora en la uniformidad del pulido y que puede esperarse utilizando múltiples cabezales de pulido.

No obstante, para el rango completo de las frecuencias de oscilación investigadas en este trabajo, se ha determinado que el coeficiente de variación se incrementa con la relación D/λ . Esto indica que, en relación a la uniformidad del pulido, no puede esperarse ningún beneficio mediante la introducción de retrasos en la trayectoria de onda de los cabezales de pulido.

4. CONCLUSIONES

A partir de la evaluación de las varias condiciones de pulido simuladas cuantitativamente en este trabajo, se pueden extraer las siguientes conclusiones:

- La frecuencia de oscilación transversal f parece no incidir en el valor medio de la distribución espacial del tiempo de pulido sobre las superficies tratadas. Sin embargo, se ha encontrado que la homogeneidad de esta distribución varía de forma muy apreciable con cambios en la frecuencia de oscilación;
- En relación con la utilización de un único cabezal de pulido, se ha determinado que tanto el tiempo de pulido efectivo como la uniformidad del proceso de pulido disminuyen con el coeficiente D/λ , como resultado del mayor tiempo durante el cual los abrasivos se mantienen fuera de la superficie de la baldosa;

- Puede esperarse una mejora en la uniformidad del pulido utilizando múltiples cabezales de pulido, especialmente aplicando frecuencias de oscilación $f = 0,48, 0,34$ y $0,20 \text{ s}^{-1}$, y donde una interferencia conveniente se produce entre las trayectorias de los cabezales de pulido adyacentes;
- No se espera ninguna ventaja en relación con la uniformidad del proceso de pulido mediante la introducción de retrasos en la trayectoria de onda de los cabezales de pulido.

Finalmente, los gráficos de respuesta presentados en este trabajo podrían ser útiles como pautas, de cara a una selección cinemática concienciada. Sin embargo, se necesita de una mayor investigación acerca de la fenomenología involucrada en el proceso de pulido de manera que un proceso de pulido óptimo podría proponerse, para cualquier tipo de configuración cinemática.

AGRADECIMIENTOS

Este trabajo ha sido realizado con el apoyo de las siguientes entidades: Coordinación de Perfeccionamiento de Personal de Nivel Superior – CAPES y el Deutsche Forschungsgemeinschaft – DGF, en el marco de la Iniciativa de Cooperación Brasileña – Alemana para la Investigación sobre Tecnologías de Fabricación – BRA-GEGRIM, y la Fundación Carl-Zeiss, de Alemania.

BIBLIOGRAFÍA

- [1] C. Y. Wang, T. C. Kuang, Z. Qin, X. Wei, "How abrasive machining affects surface characteristics of vitreous ceramic tile", American Society Ceramic Bulletin, 9201-9208 (2003).
- [2] F. J. P. Sousa, N. V. Júnior, W. L. Weingärtner, O. E. Alarcon, "Glossiness distribution over the surface of stoneware floor tiles due to the polishing process", Journal of Material Science, 10124-10132 (2007).
- [3] A. Tucci, L. Espósito, "Polishing of porcelain stoneware tile: surface aspects", World Congress on Ceramic Tile Quality - QUALICER, Castellón – Spain (2000).
- [4] M. Hutchings, K. Adachi, Y. Xu, E. Sánchez, M. J. Ibáñez, M. F. Quereda, "Analysis and laboratory simulation of an industrial polishing process for porcelain ceramic tiles", Journal of the European Ceramic Society, 3151-3156 (2005).
- [5] M. Hutchings, K. Adachi, Y. Xu, E. Sánchez, M. J. Ibáñez, "Laboratory Simulation of the industrial ceramic tile polishing process", World Congress on Ceramic Tile Quality - QUALICER, Castellón – Spain, 19-30 (2004).
- [6] I. M. Hutchings, Y. Xu, E. Sánchez, M. J. Ibáñez, M. F. Quereda, "Optimización del proceso de pulido para piezas de gres porcelánico", World Congress on Ceramic Tile Quality - QUALICER, Castellón – Spain (2006).

- [7] L. Espósito, A. Tucci, D. Naldi, "The reliability of polished porcelain stoneware tiles", Journal of the European Ceramic Society, 785-793 (2005).
- [8] M.J. Ibáñez, E. Sánchez, J. García-Ten, M. J. Orts, V. Cantavella, J. Sánchez, C. Soler, J. Portolés, J. Sales, World Congress on Ceramic Tile Quality - QUALICER, Castellón – Spain (2002).
- [9] F. J. P. Sousa, J. C. Aurich, W. L. Weingaertner, O. E. Alarcon, "Kinematics of a single abrasive particle during the industrial polishing process of porcelain stoneware tiles", Journal of the European Ceramic Society, 3183-3190 (2007).
- [10] F. J. P. Sousa, J. C. Aurich, W. L. Weingaertner, O. E. Alarcon, "Analytical determination of the Distribution of Polishing Time over the Surface of Polished Tiles", Journal of the American Ceramic Society, 3468-3477 (2007).
- [11] F. J. P. Sousa, J. C. Aurich, W. L. Weingaertner, O. E. Alarcon, "Optimization of the Kinematics Available in the Polishing Process of Ceramic Tiles by Computational Simulations", V. 92, 41 – 48 (2009).