

PROCESO INNOVADOR DE CORTE LÁSER PARA PLACAS CERÁMICAS

Andrea Bresciani, Alessandro Cocquio, Claudio Ricci

SACMI Imola – Italia

RESUMEN

Hoy en día, en la producción cerámica se fabrican baldosas y placas cada vez más grandes para satisfacer la demanda de nuevos productos para la edificación y otras construcciones.

Es un hecho que la fabricación de baldosas de grandes dimensiones simplifica las líneas de producción pero, al mismo tiempo, requiere el desarrollo de tecnologías de corte eficientes, flexibles y económicas para la producción de una amplia gama de formatos más pequeños.

Los métodos empleados en la actualidad por la industria cerámica, como el corte con disco diamantado, entalladura y separación o el corte por chorro de agua presentan varios inconvenientes: pobre calidad de los bordes luego del corte, alto porcentaje de productos rechazados, generación de residuos y lodos, baja velocidad de producción, elevada necesidad de mano de obra y mantenimiento,...

Para superar los problemas mencionados anteriormente, el presente estudio investiga la aplicación de un láser de CO₂ de alta intensidad para realizar el corte de material cerámico cocido sin contacto directo, de forma precisa y libre de defectos.

En los últimos años se han probado muchas tecnologías láser para el corte de material cerámico, pero ninguna ha sido optimizada para el corte industrial de baldosas cerámicas. Los principales problemas respecto a la calidad final del corte, generalmente de pobre calidad, se presentan en forma de vitrificaciones superficiales y efectos de requemado. Otro problema es la lentitud excesiva del proceso, consecuencia de concentrar la potencia láser en aumentar la temperatura hasta fundir (o incluso sublimar) el material cerámico.

La presente tecnología se basa en un enfoque totalmente distinto; la fuente láser CO₂ se emplea como una “herramienta de calentamiento” capaz de controlar los gradientes de temperatura en el material. La combinación de calentamiento y enfriamiento (mediante un dispositivo de enfriamiento adecuado) induce una distribución precisa de tensiones mecánicas (tensión – compresión variable a lo largo del espesor) dentro del material. La distribución de tensiones genera la fractura del material y el proceso se puede controlar perfectamente logrando un corte recto y sin defectos a lo largo de toda la longitud de la placa.

Se realizó un intenso análisis computacional para encontrar los parámetros de trabajo adecuados. Se realizaron simulaciones mediante ANSYS MEF (Método de Elementos Finitos) para estudiar el comportamiento termoestructural del material cerámico bajo los efectos de la transferencia de calor generada por los impulsos láser.

Las simulaciones fueron validadas en un dispositivo a escala piloto específicamente montado en nuestros laboratorios.

Finalmente se realizaron varias sesiones para cortar diferentes tipos de baldosas y placas cerámicas, en su mayoría fabricadas de gres porcelánico. Los parámetros de control se optimizaron para aumentar la velocidad de corte manteniendo una calidad de corte aceptable.

Los resultados preliminares de nuestros experimentos a escala piloto demuestran claramente la viabilidad del proceso de corte láser y esta nueva técnica parece ser una verdadera solución para la automatización del proceso industrial en la fabricación de baldosas cerámicas, ya que proporciona un sistema de corte limpio, flexible y eficiente.

1. INTRODUCCIÓN

El corte de baldosas cerámicas representa un punto crítico en el proceso de producción industrial. El material cerámico, intrínsecamente frágil, no soporta fácilmente la acción de corte, que generalmente provoca fisuras incontroladas y el rechazo del producto. Además, la alta dureza del material cerámico (en particular en la superficie pero también en la masa en el caso de gres porcelánico) implica un desgaste considerable de las herramientas de corte y, consecuentemente, altos costes y baja productividad.

Durante las décadas pasadas se desarrollaron diversas tecnologías de corte industrial de baldosas cerámicas; a continuación se encuentran algunas descripciones breves de estas tecnologías.

1.1. Corte con disco diamantado.

Esta tecnología, derivada del corte de material de piedra, implica el uso de

discos metálicos cuya sección periférica está diamantada (dispersión de gránulos de diamante en una matriz metálica) – véase la figura 1a. El corte se realiza bajo alta refrigeración para disipar el calor generado y preservar la eficiencia de la herramienta. Las máquinas de corte (figura 1b) tienen que ser muy rígidas para evitar las vibraciones (que son perjudiciales para las herramientas) y para limitar las elevadas fuerzas de corte generadas.

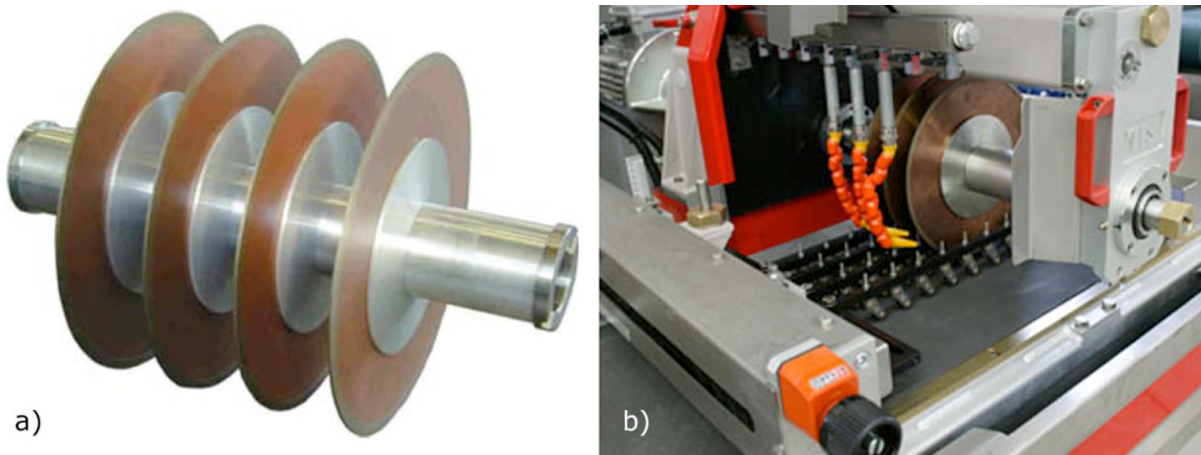


Figura 1. Corte con disco diamantado: a) serie de discos – b) máquina de corte.

Los cortes tienen que seguir necesariamente una línea recta. Para separar completamente las dos partes es necesario eliminar un volumen considerable de material cerámico, equivalente al espesor del disco (es decir, un par de milímetros).

Generalmente, la calidad de los bordes cortados es excelente (comparable al pulido), y luego de cortar únicamente es necesaria una ligera rectificación de los cantos del borde superior, que se realiza con herramientas diamantadas (biselado).

El corte con disco diamantado es sin duda el sistema más extendido en la industria cerámica, aunque presente algunas desventajas:

- baja flexibilidad en cuanto al cambio de formatos (se requiere un tiempo prolongado para los ajustes);
- elevados costes relacionados con las bajas velocidades de corte y el uso prolongado de herramientas diamantadas;
- problemas en la eliminación de lodos de trabajo, que deben ser tratados como residuos peligrosos dado que contienen metales pesados.

1.2. Corte por chorro de agua.

El corte por chorro de agua con material abrasivo se ha difundido recientemente en el campo de la cerámica (y de forma similar en el del material de piedra) gracias a su gran versatilidad, junto a la posibilidad del corte no rectilíneo (curvo, poligonal, líneas abiertas y cerradas, etc.). El proceso consiste en forzar el flujo de

agua a alta presión ($3000 \div 6000$ bares) a través de un orificio de aproximadamente $0,1 \div 0,2$ mm de diámetro hasta alcanzar velocidades supersónicas (hasta mach 3, aproximadamente 1000 m/s). Una vez fuera del orificio, el chorro se mezcla con un polvo abrasivo y es dirigido al material que se va a cortar. La elevada energía de flujo junto a las partículas abrasivas logra cortar cualquier tipo de material (incluyendo metales), incluso de espesores considerables.

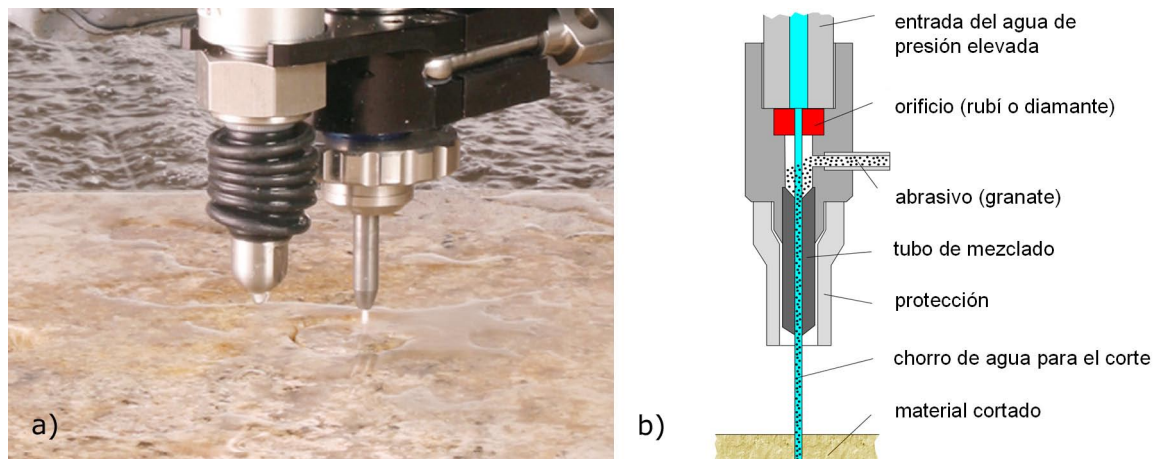


Figura 2. Corte por chorro de agua: a) corte de material cerámico – b) esquema funcional del cabezal del chorro de agua.

Con respecto al campo de la cerámica, el corte por chorro de agua se utiliza principalmente para realizar cortes curvos e inserciones de diversos materiales. Las máquinas son muy flexibles ya que trabajan sin contacto alguno. La precisión de corte, dependiendo de la máquina empleada, puede alcanzar décimas de mm.

Aunque se obtiene una buena calidad de los bordes cortados, el corte por chorro de agua presenta algunos inconvenientes que reducen su aplicabilidad en el campo de la cerámica:

- baja productividad debido a la baja velocidad de avance ($1 \div 2$ m/min para gres porcelánico);
- altos costes, vinculado a la baja velocidad y la necesidad de polvos abrasivos caros;
- problemas en la eliminación de lodos de trabajo, que contienen materiales residuales abrasivos.

1.3. Corte con entalladura y separación.

El corte con entalladura y separación fue introducido en el campo de la cerámica emulando el cercano campo de las máquinas de corte de vidrio. La planta se compone de dos estaciones de trabajo diferentes. En la primera estación (figura 3a), un disco diamantado (o compuesto por otro material duro) se presiona contra la superficie cerámica, realizando un surco de apenas unas centésimas de mm de profundidad a lo largo de la línea de separación deseada. Luego (figura 3b) la placa cerámica grabada pasa a una segunda estación de trabajo, en la cual unos rodillos

de presión generan una flexión causando la rotura debido a la propagación de la fisura (separación). Cuanto más homogéneo y más frágil sea el material, así como menor sea su espesor, más eficiente es la separación. A estos efectos, los materiales totalmente vitrificados son los más adecuados para el corte.

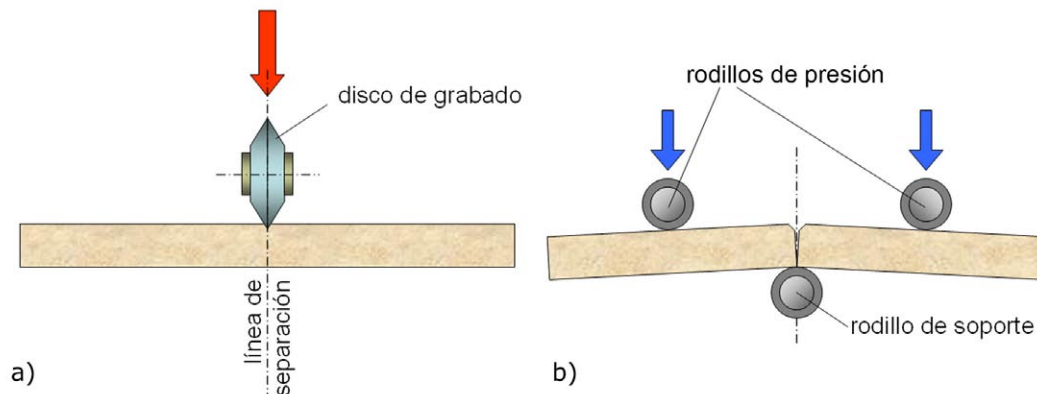


Figura 3. Corte con entalladura y separación: a) entalladura con disco diamantado – b) separación.

La productividad del método de entalladura y separación es indudablemente mayor que la de las tecnologías descritas anteriormente; además, los costes de las herramientas son despreciables.

De todas formas, esta tecnología presenta algunos inconvenientes:

- la tipología del material puede influir el proceso de corte hasta llegar a hacerlo incontrolable;
- la operación de entallado puede ser particularmente dificultosa sobre superficies estructuradas (no planas);
- requiere de operaciones de acabado posteriores en superficies de corte y bordes (rectificación de la ortogonalidad y biselado), lo que incrementa los costes del proceso e implica la eliminación de lodos.

1.4. Corte en crudo.

SACMI introdujo la técnica de corte en crudo en 2001 [1], la cual consiste en cortar las placas cerámicas antes de su cocción. El corte se realiza utilizando discos diamantados finos, obteniendo una alta productividad y sin emplear agua de enfriamiento.



Figura 4. Máquina de corte en crudo, modelo TPD175.

Las placas crudas prensadas se transportan a la máquina (figura 4), en la cual una serie de discos giratorios de alta velocidad realizan el corte. Primero, una estación móvil realiza cortes transversales, mientras que una estación fija realiza los cortes longitudinales. Los tamaños definitivos son fácilmente programables y se pueden cambiar mediante una interfaz de software adecuada.

A pesar de la alta flexibilidad y del bajo coste, el corte en crudo únicamente puede realizarse con baldosas crudas. Según las variables del proceso, la siguiente fase de cocción puede ocasionar a veces deformaciones no homogéneas que requieren de operaciones de acabado adicionales en los bordes (lo cual significa un incremento de los costes del proceso). Incluso la eliminación de polvo del área de trabajo requiere de herramientas de succión específicas.

Del resumen anterior se deduce que las técnicas de corte existentes muestran una serie de **aspectos limitantes**, enumerados a continuación:

- altos costes, debidos al desgaste de las herramientas de corte (discos diamantados, polvo abrasivo, etc.);
- baja productividad y/o baja flexibilidad para cambiar el tamaño;
- problemas ligados a la eliminación de residuos de corte (lodos o polvos);
- El corte en crudo representa una solución únicamente para un rango reducido de productos.

Por lo tanto, es conveniente la investigación de un nuevo sistema de corte para baldosas cocidas, capaz de superar los aspectos limitantes mencionados anteriormente. A estos efectos, el corte láser se puede considerar como una posibilidad interesante.

2. EL CORTE LÁSER

El corte láser de materiales es la aplicación más común y extendida del láser de alta potencia, capaz de derretir e incluso evaporar prácticamente todos los materiales. Durante el proceso de corte, la energía absorbida por el material en el área de foco se convierte en calor, ocasionando un repentino aumento de la temperatura en la pieza.

Los tipos de láser más comunes utilizados en el corte industrial de diferentes materiales son:

- láser CO₂ (donde el medio activo es un gas – dióxido de carbono).
- láser Nd:YAG (donde el medio activo es un sólido – granate de itrio y aluminio dopado con neodimio).

Se diferencian en el tipo de fuente y en las longitudes de onda de la luz monocromática emitida (10,6 μm para el CO₂ y 1,06 μm para el Nd:YAG), que están

fuera del espectro visible. Ambos tipos de láser realizan el corte enfocando un haz mediante lentes y espejos en una pequeña área (incluso menor de 0,5 mm de diámetro), alcanzando unos 10^5 W/mm² de potencia superficial. La diferencia entre las longitudes de onda de los dos tipos de láser es muy importante ya que en el caso del láser Nd:YAG la luz puede ser transmitida a través de una fibra óptica, mientras que la luz del láser CO₂ se transmite hasta la pieza mediante espejos y lentes ópticos y es, consecuentemente, más adecuado para superficies planas y para la entalladura. El láser Nd:YAG generalmente opera con luz pulsante, mientras que el láser CO₂ trabaja con luz continua.

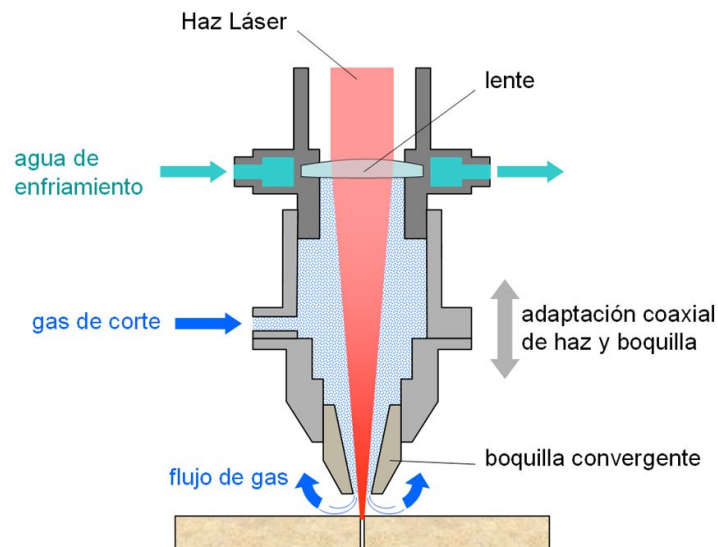


Figura 5. Diagrama del cabezal de corte por haz láser.

La figura 5 representa el cabezal de corte láser, generalmente utilizado para la elaboración de metales y otros materiales similares. El haz láser se concentra para lograr que el material se derrita en muy poco tiempo sin contacto ni transporte de energía.

Recientemente se realizaron algunos intentos de cortar baldosas cerámicas directamente con láser CO₂.

Una estimación del rendimiento del corte láser fue propuesta por Black en 1998 [2]. Ello permite determinar la mejor velocidad de corte V_{opt} por medio de consideraciones termodinámicas y de transferencia de calor.

La mejor velocidad V_{opt} se determinó como:

$$V_{opt} = \left(\frac{2}{\pi e} \right) \frac{P}{\rho C R^2 (T_p - T_0)}$$

Ecuación 1.

donde P es la potencia láser, C el calor específico del material, T_p la temperatura máxima (necesaria para la fundición/evaporación completa), T_0 la temperatura ambiente, ρ la densidad del material. El parámetro R se define como:

$$R = \sqrt{r^2 + s^2}$$

Ecuación 2.

donde r es el radio del punto láser y s el espesor de la baldosa.

El diagrama presentado en la figura 6^a muestra los valores V_{opt} en función del espesor de la placa a cortar, calculados según (1), considerando una potencia láser de 1500 W. Para valores de espesor de baldosas estándar ($8 \div 10$ mm), la velocidad de corte es de apenas $100 \div 200$ mm/min. Para espesores más pequeños (< 2 mm) el proceso es más eficiente pero inútil para la producción cerámica tradicional.

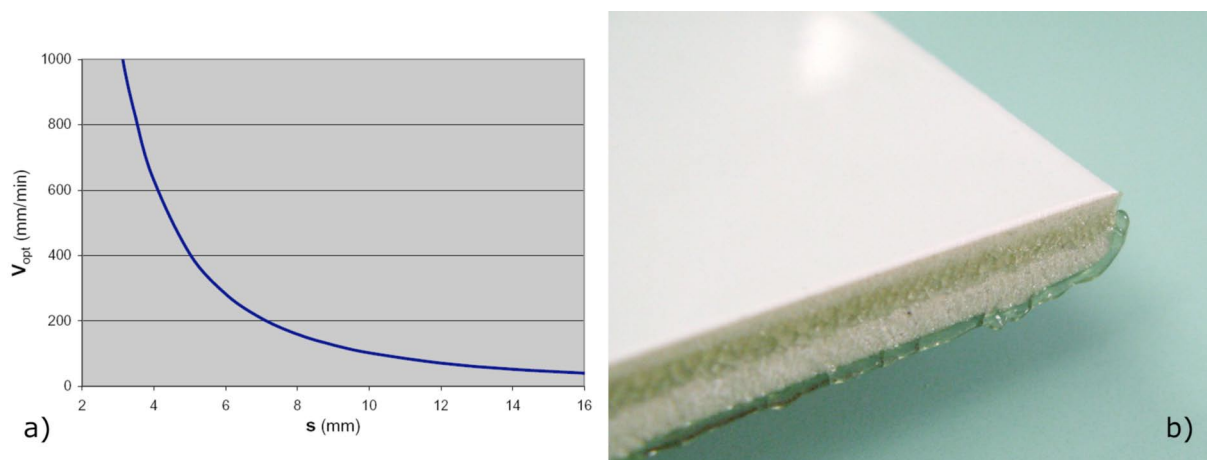


Figura 6. Corte láser: a) relación velocidad - espesor - b) aspecto del borde luego del corte.

Consecuentemente, este sistema no es adecuado para la industria cerámica debido a las bajas velocidades de corte en función de la energía requerida. Además, debido a la generación de alta densidad de energía, los bordes se alteran de forma negativa, presentando zonas derretidas y dañadas térmicamente (figura 6b), lo que requeriría de intensas operaciones de acabado.

Para aprovechar las ventajas del corte láser, como la ausencia de contacto entre las herramientas y la placa cerámica, hay que investigar una solución diferente.

3. ENTALLADURA INDUCIDA POR LÁSER POR TENSION

La presente solución se basa en la técnica conocida como Entalladura inducida por Láser por Tensión (LiST - Laser induced Scoring by Tension). Esta técnica utiliza una fuente de láser CO_2 para inducir tensiones en el material que provocan una fisura y permiten que ésta se propague a lo largo de la línea de separación de-

seada, sin derretir el material cerámico (como es el caso del corte por haz láser).

Esta técnica patentada [3] fue originalmente desarrollada para cortar láminas de vidrio plano, cuya versión convenientemente adaptada al campo de la cerámica se explica a continuación.

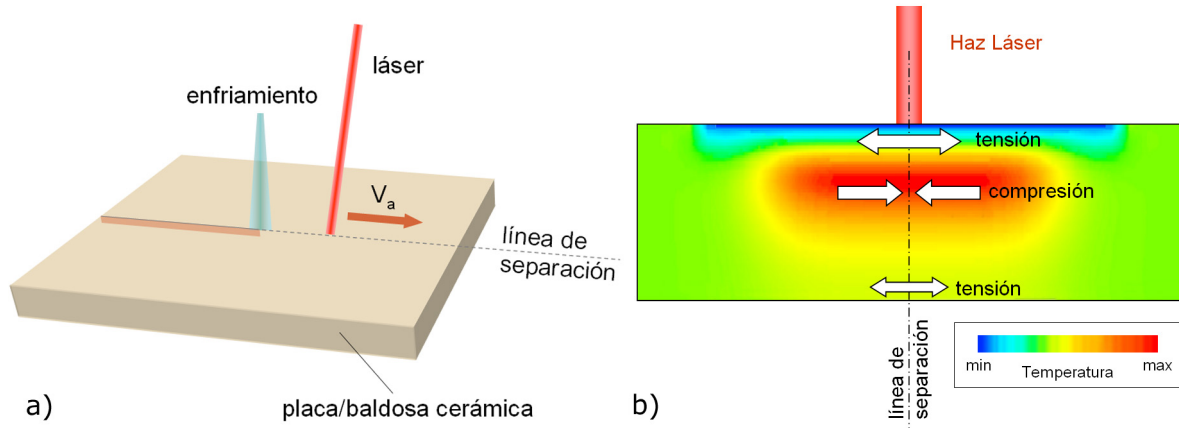


Figura 7. Método LiST: a) principio de funcionamiento – b) distribución de tensiones dentro del material luego del enfriamiento.

La figura 7a muestra el principio de funcionamiento: el haz láser calienta la superficie a lo largo de una línea de separación predefinida, seguido por un dispositivo de enfriamiento adecuado. Esta secuencia de gradientes térmicos genera un estado tensional de compresión dentro del material mientras que la superficie se encuentra bajo tensiones de tracción. La figura 7b muestra la distribución de temperaturas en un corte transversal del material. Debido a los gradientes de temperaturas alternados, la superficie superior se encuentra bajo tracción y, al superar un valor crítico (K_{Ic}), comienza la fisuración y se propaga de forma controlada a lo largo de una línea recta (siguiendo el mecanismo de fractura de “apertura” de modo I).

La figura 8 muestra al detalle los equipos necesarios. En estas representaciones no se incluyeron los sistemas de control automáticos.

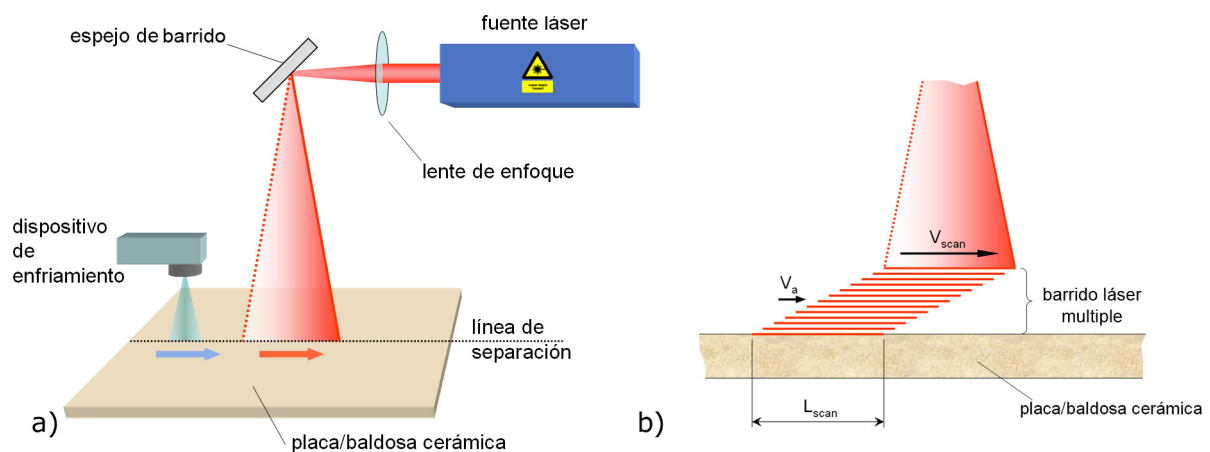


Figura 8. Método LiST: a) equipos de corte – b) detalle del barrido múltiple.

El haz emitido por la fuente láser es enfocado mediante un grupo de lentes y es dirigido a un espejo de barrido. El espejo de barrido, convenientemente controlado mediante un software, desvía el haz a lo largo de la línea de separación, según una serie de pasajes múltiples superpuestos (véase la figura 8b). La velocidad de barrido del láser V_{scan} es de aprox. $10 \div 20$ m/s y se mueve dentro de una cierta longitud L_{scan} . La longitud L_{scan} avanza según la velocidad V_a , que representa la velocidad total de corte. De esta forma es posible controlar por completo la distribución de temperatura dentro de la placa cerámica. A cierta distancia del haz láser, el sistema de enfriamiento se mueve en paralelo lanzando aire y pulverizando agua sobre la placa, haciendo que la superficie superior se enfríe rápidamente.

La energía aplicada E_{spec} a cada unidad de superficie por el haz láser se expresa de la siguiente manera:

$$E_{spec} = \frac{P}{d V_{scan}}$$

Ecuación 3.

donde P es la potencia láser, d el diámetro punto láser, V_{scan} la velocidad de barrido del haz a lo largo de la línea de separación.

El valor E_{spec} debe mantenerse dentro de un rango de valores limitados; en caso contrario podrían aparecer efectos no deseados, como fisuras transversales u otro tipo de roturas. Este valor está relacionado tanto con las características termodinámicas (conductividad térmica, calor específico, emisividad y difusividad) como con las propiedades mecánicas (densidad, resistencia a la flexión, dilatación térmica, etc.) del material.

Los valores utilizados en el equipo de prueba (véase §4) para cortar placas cerámicas son los siguientes:

$$P = 800 \text{ W}$$

$$d = 4,2 \div 11,5 \text{ mm}$$

$$V_{scan} = 5 \div 25 \text{ m/s}$$

de lo que resulta:

$$E_{spec} = 0,003 \div 0,038 \text{ J/mm}^2$$

Cabe señalar que la tecnología LiST utiliza la energía láser para calentar la zona de corte, sin derretir el material. De hecho, es necesario ajustar una distribución de temperatura adecuada en el área próxima al corte mediante un control preciso del barrido láser múltiple.

4. EQUIPO DE PRUEBA

Con el fin de verificar las posibilidades de la tecnología LiST a escala de laboratorio y verificar su aplicabilidad en el campo industrial se fabricó un equipo de prueba. El sistema incluye una fuente de láser CO₂ capaz de trabajar de forma discontinua sobre una placa cerámica individual (de hasta 120 x 120 cm). La fuente de láser CO₂, con 1000 W de potencia nominal, se ubica en la parte superior del equipo para conseguir una distancia de aproximadamente 2 m entre el espejo de barrido y la superficie de la baldosa.

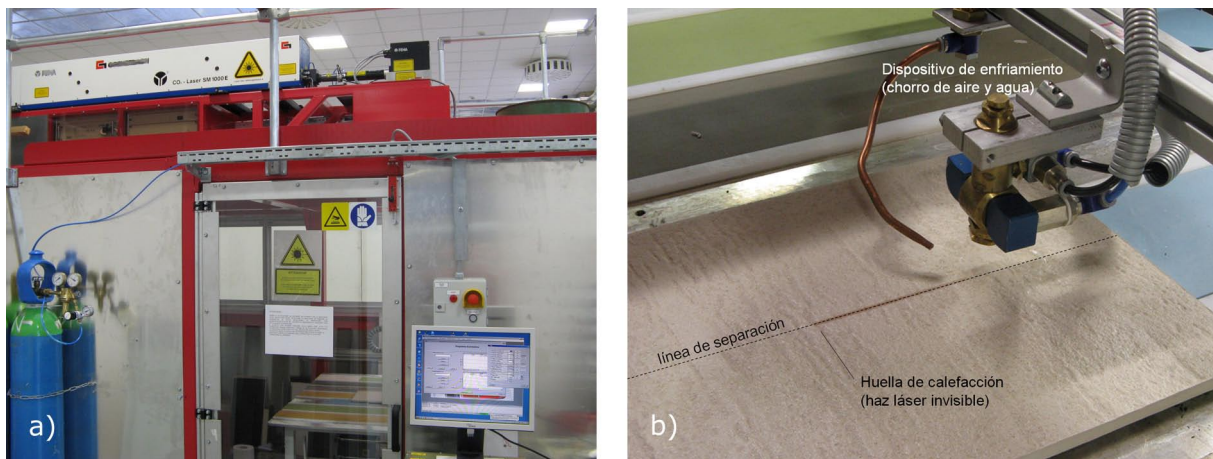


Figura 9. Equipo láser de prueba: a) vista general – b) detalle de la zona de corte.

La figura 9 muestra el equipo láser de prueba operando en los laboratorios de SACMI. El completo blindaje de la máquina (figura 9a) se realiza con paredes de vidrio y metal, bloqueando por completo la radiación láser para seguridad de los operarios. Además, se tomaron precauciones especiales para prevenir reflejos del haz fuera del área de trabajo. La figura 9b muestra la zona de corte durante la operación de la máquina; el haz láser invisible calienta la línea de separación unos mm antes del dispositivo de enfriamiento. Únicamente un rastro parduzco temporal revela la acción de láser.

El software de control fue desarrollado para investigar los principales parámetros, que podrían afectar la calidad final del corte. En particular:

- Potencia del haz láser P
- Velocidad de barrido V_{scan}
- Velocidad de corte V_a
- Diámetro del haz láser d
- Longitud de barrido L_{scan}

A fin de simplificar el estudio y reducir el número de ensayos, paralelamente se realizó un análisis con elementos finitos termo-estructurales mediante el programa de simulación Ansys.

Primero se estudiaron modelos bidimensionales para una estimación preliminar de la influencia de diferentes parámetros termo-mecánicos; luego se realizaron análisis tridimensionales más complejos, los cuales requirieron de grandes esfuerzos, incluso desde el punto de vista de los recursos computacionales.

La figura 10 muestra el resultado de uno de los análisis mencionados anteriormente, realizado para simular la temperatura y la distribución de tensiones en relación con la línea de separación.

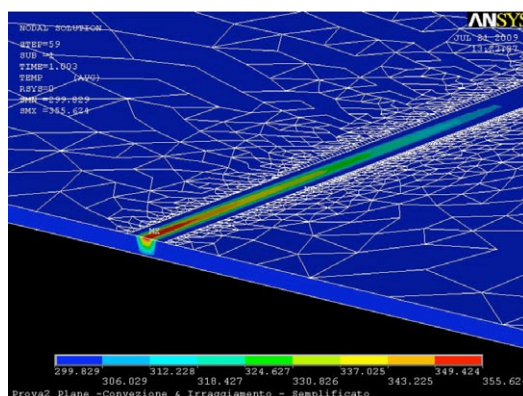


Figura 10. Análisis MEF de distribución térmica y de tensiones.

5. ENSAYOS EXPERIMENTALES

Luego de la optimización computacional se realizaron una serie de cortes de prueba en placas de gres porcelánico. Los ensayos se realizaron con los siguientes parámetros: 800 W de potencia láser, placa de 30x60 cm, corte a lo largo de la línea central del lado corto (es decir, longitud de corte: 600 mm).

Los resultados se resumen en la siguiente tabla:

Nº de ensayo	Espesor [mm]	d [mm]	E_{scan} [J/mm ²]	L_{scan} mm	V_{scan} [m/s]	V_a [m/min]	Calidad de corte	Observaciones
1	3,4	4,2	0,013	300	15	2,0	Buena	
2	3,4	4,2	0,011	400	17	2,0	Buena	
3	3,4	4,2	0,013	300	15	3,0	Bastante buena	
4	3,4	4,2	0,013	300	15	4,0	Baja	
5	3,4	4,2	0,008	300	25	2,0	Bastante buena	
6	3,4	4,2	0,038	300	5	2,0	Baja	Quemaduras en la superficie
7	10	11,5	0,005	300	15	0,6	Buena	
8	10	9,2	0,006	300	15	0,6	Buena	
9	10	11,5	0,005	300	15	1,2	Baja	
10	10	11,5	0,005	100	15	0,6	Baja	Quemaduras en la superficie
11	10	11,5	0,005	600	15	0,6	Baja	

Según los resultados mostrados en la tabla anterior, se obtuvo una buena calidad de la piezas para una velocidad V_a de 2 m/min o menor. Si se aumenta el espesor, el valor de la velocidad V_a aceptable disminuye aún más.

Incrementando la velocidad de barrido V_{scan} (sin aumentar proporcionalmente la potencia P) no se consigue ningún beneficio en la velocidad de corte V_a (Ensayo #5 vs. Ensayo #1).

La figura 11 muestra un ejemplo de un corte de buena calidad obtenido durante las pruebas. En este caso, el perfil de corte es completamente rectilíneo y las dos partes encajan perfectamente entre sí. La técnica LiST actúa como una tecnología de corte láser de "espesor cero" real.

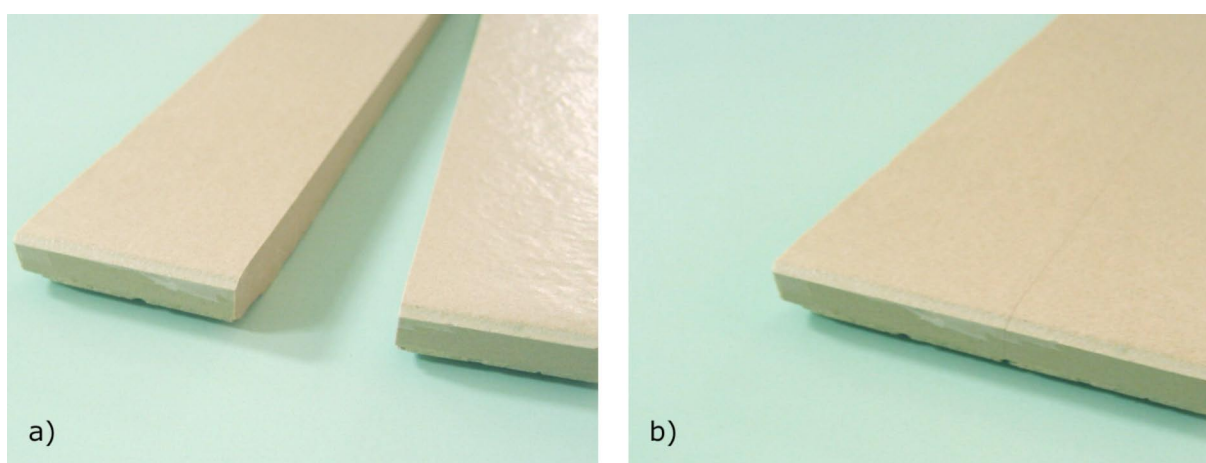


Figura 11. Ejemplo de corte con LiST: a) partes separadas
b) encaje de las partes luego del corte.

La planeidad de la superficie de separación es aceptable y no requiere de un acabado posterior. Si fuera necesario puede realizarse una ligera rectificación de cantos en los bordes superiores (biselado).

6. CONCLUSIONES

El método de corte LiST (Entalladura inducida por Láser por Tensión) representa una alternativa potencial a los actuales sistemas de corte en el campo de la cerámica, dado que muestra las siguientes **ventajas**:

- corte sin contacto (sin desgaste de las herramientas);
- alta flexibilidad de producción (simplemente modificando el programa de corte);
- buena calidad de las superficies de corte (comparado con el método de entalladura y separación);
- sin residuos de trabajo (lodos, polvos, ...) lo que significa un menor impacto medioambiental.

Por el contrario el sistema LiST aún presenta algunos **aspectos a mejorar**, principalmente:

- la calidad de corte depende de la composición del cuerpo cerámico;
- la velocidad de corte V_a no es suficiente (2 m/min en vez del objetivo de 5 m/min) y disminuye si aumenta el espesor de baldosa;
- consumo de energía relativamente alto debido al bajo rendimiento de las fuentes láser CO_2 actuales;
- necesidad de protecciones adecuada para la seguridad del operador

La tecnología LiST aplicada al campo de la cerámica (aunque sea a nivel de laboratorio) muestra resultados prometedores. Sin embargo, es necesario realizar más verificaciones para determinar sus potenciales y costes a nivel industrial. Si los resultados finales, comparados con las otras tecnologías, son positivos, podría ser factible introducir en el proceso cerámico una solución limpia, flexible y eficiente para el corte automático de baldosas cocidas.

BIBLIOGRAFÍA

- [1] A. Bresciani, G.P. Graziani, C. Ricci, "New glazed porcelain tile manufacturing technology: pre-pressing, dry decoration and green cutting", Qualicer 2002, Vol. 2, P. GI, pp. 255-270.
- [2] I. Black, "Determining cutting speeds for the CO_2 laser machining of decorative ceramic tile", The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, Springer London 1998, Vol. 14, No. 9, pp. 651-655.
- [3] Patent US 2007/0151962 A1, "Method for Laser-induced thermal separation of plate glass", publ. 05/07/2007.