

## Processo Inovador de Corte Laser em Placas Cerâmicas

*Andrea Bresciani<sup>a</sup>, Alessandro Cocquio<sup>a</sup>, Cláudio Ricci<sup>a</sup>*

*<sup>a</sup>Sacmi Imola, Itália*

**Resumo:** Atualmente são fabricadas placas cerâmicas cada vez maiores para satisfazer a procura de novos produtos para a construção de edifícios e outras construções. A fabricação de placas de grandes dimensões simplifica as linhas de produção, mas, ao mesmo tempo, requer o desenvolvimento de tecnologias de corte eficientes, flexíveis e econômicas para a produção de uma ampla gama de formatos menores. Os métodos atualmente utilizados pela indústria cerâmica, como o corte com disco diamantado, o entalhe e separação ou o corte por jato de água apresentam diversos inconvenientes: má qualidade das bordas após o corte, alta percentagem de produtos rejeitados, geração de resíduos e lamas, baixa velocidade de produção, elevada necessidade de mão-de-obra e manutenção. Para superar os problemas mencionados, o presente estudo investiga a aplicação de um laser de CO<sub>2</sub> de alta intensidade para realizar o corte de material cerâmico queimado sem contato direto, de forma precisa e livre de defeitos. A presente tecnologia baseia-se num enfoque totalmente distinto: a fonte de laser de CO<sub>2</sub> é utilizada como uma “ferramenta de aquecimento” capaz de controlar os gradientes de temperatura no material. A combinação de aquecimento e resfriamento (através de um dispositivo adequado) permite induzir uma distribuição precisa de tensões mecânicas (tensão-compressão variável ao longo da espessura) dentro do material. A distribuição de tensões gera a fratura do material e o processo pode ser controlado perfeitamente conseguindo-se um corte reto e sem defeitos ao longo de todo o comprimento da placa. Foi realizada uma intensa análise computacional para encontrar os parâmetros de trabalho adequados utilizando simulações com auxílio do aplicativo Ansys MEF (Método de Elementos Finitos) para estudar o comportamento térmico estrutural do material cerâmico submetido aos efeitos da transferência de calor gerada pelos impulsos laser. As simulações foram validadas num dispositivo montado em escala piloto nos laboratórios da Sacmi. Finalmente, foram realizadas diversas sessões para cortar diferentes tipos de placas cerâmicas, fabricadas na sua maioria em grés porcelânico. Os parâmetros de controle foram otimizados para aumentar a velocidade de corte, mantendo uma qualidade de corte aceitável. Os resultados preliminares das experiências realizadas na Sacmi em escala piloto demonstram claramente a viabilidade do processo de corte laser e esta nova técnica parece ser uma verdadeira solução para a automatização do processo industrial na fabricação de placas cerâmicas, visto que proporciona um sistema de corte limpo, flexível e eficiente.

**Palavras-chave:** *placas cerâmicas, laser de CO<sub>2</sub>, tecnologias de corte cerâmico, método de elementos finitos.*

### 1. Introdução

O corte de placas cerâmicas representa um ponto crítico no processo de produção industrial. O material cerâmico, intrinsecamente frágil, não suporta facilmente a ação de corte, que geralmente provoca fissuras incontroladas e a rejeição do produto. Além disso, a elevada dureza do material cerâmico (em particular na superfície, mas também na massa no caso de grés porcelânico) implica em desgaste considerável das ferramentas de corte e, conseqüentemente, elevados custos e baixa produtividade.

Durante as décadas passadas desenvolveram-se diversas tecnologias de corte industrial de placas cerâmicas. A seguir são apresentadas algumas descrições breves destas tecnologias.

#### 1.1. Corte com disco diamantado

A tecnologia de corte com disco diamantado é derivada do corte de pedra, implicando na utilização de discos metálicos cuja seção periférica é diamantada (dispersão de partículas de diamante numa matriz metálica), conforme se vê na Figura 1a. O corte é realizado sob alta refrigeração para dissipar o calor gerado e preservar a eficiência da ferramenta. As máquinas de corte (ver a Figura 1b) devem ser muito rígidas para evitar as vibrações (que são prejudiciais para as ferramentas) e para limitar as elevadas forças de corte geradas.

Os cortes devem ser necessariamente em linha reta. Para separar completamente as duas partes é necessário eliminar um volume considerável de material cerâmico, equivalente à espessura do disco (alguns milímetros). Geralmente, a qualidade das bordas cortadas

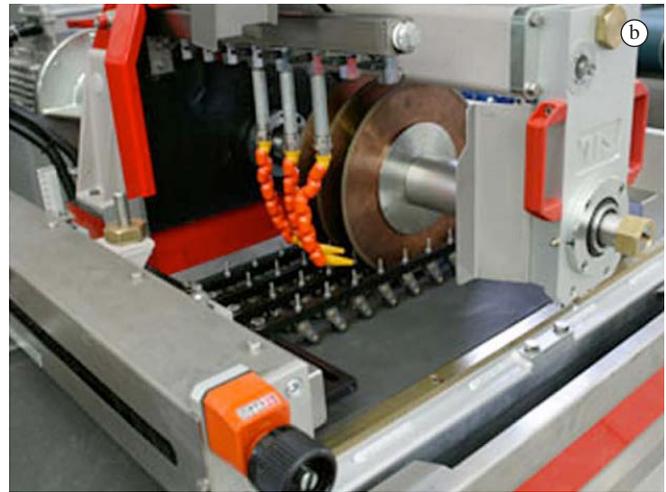
é excelente (comparável ao polido), e após o corte unicamente é necessária uma ligeira retificação dos cantos da borda superior, realizada com ferramentas diamantadas (biselado).

O corte com disco diamantado é, sem dúvida, o sistema mais difundido na indústria cerâmica, embora apresente algumas desvantagens:

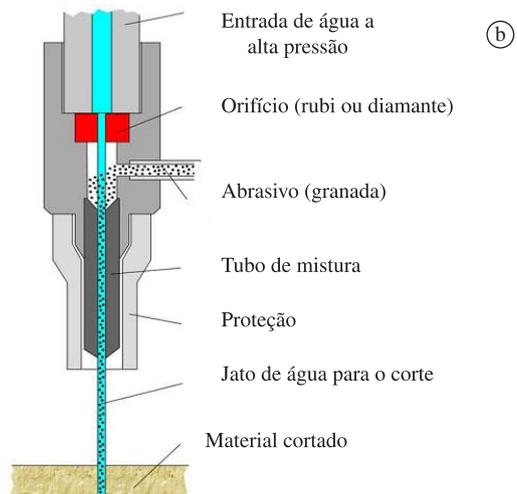
- Baixa flexibilidade quando da mudança de formatos (é necessário um tempo prolongado para fazer os ajustes);
- Elevados custos relacionados com as baixas velocidades de corte e a utilização prolongada de ferramentas diamantadas; e
- Problemas na eliminação de lamas do corte, que devem ser tratadas como resíduos perigosos, pois contêm metais pesados.

#### 1.2. Corte por jato de água

O corte por jato de água com material abrasivo foi difundido recentemente no campo da cerâmica (e de forma similar para pedras) graças à sua grande versatilidade, juntamente com a possibilidade do corte não retilíneo (curvo, poligonal, linhas abertas e fechadas, etc.). O processo consiste em forçar um fluxo de água a alta pressão (3.000 a 6.000 bares) através de um orifício de aproximadamente 0,1 a 0,2 mm de diâmetro até alcançar velocidades supersônicas (até Mach 3, aproximadamente 1.000 m/s). Uma vez fora do orifício, o jato é misturado com um pó abrasivo e é dirigido para o material que será cortado (Figura 2). A elevada energia de fluxo juntamente



**Figura 1.** Corte com disco diamantado: a) série de discos; b) máquina de corte.



**Figura 2.** Corte por jato de água: a) corte de material cerâmico; b) esquema funcional da cabeça do jato de água.

com as partículas abrasivas consegue cortar qualquer tipo de material (incluindo metais), mesmo de espessuras consideráveis.

Com relação à área cerâmica, o corte por jato de água é utilizado principalmente para realizar cortes curvos e inserções de diversos materiais. As máquinas são muito flexíveis, pois trabalham sem qualquer contato. A precisão de corte, dependendo da máquina utilizada, pode alcançar décimos de mm. Embora se obtenha uma boa qualidade das bordas cortadas, o corte por jato de água apresenta alguns inconvenientes que reduzem a sua aplicabilidade na cerâmica:

- Baixa produtividade devido à baixa velocidade de avanço (1 a 2 m/min para o grés porcelânico);
- Elevados custos, vinculados à baixa velocidade e à necessidade de pós abrasivos caros; e
- Problemas na eliminação de lamelas de trabalho, que contêm materiais residuais abrasivos.

### 1.3. Corte por entalhe e separação

O corte por entalhe e separação foi introduzido na cerâmica estimulado pelas máquinas de corte de vidro. A instalação é constituída por duas seções de trabalho diferentes. Na primeira seção (Figura 3a), um disco diamantado (ou composto por outro material duro) é pressionado contra a superfície cerâmica, fazendo um sulco de centésimos de mm de profundidade ao longo da linha de separação desejada. Em seguida (Figura 3b) a placa cerâmica

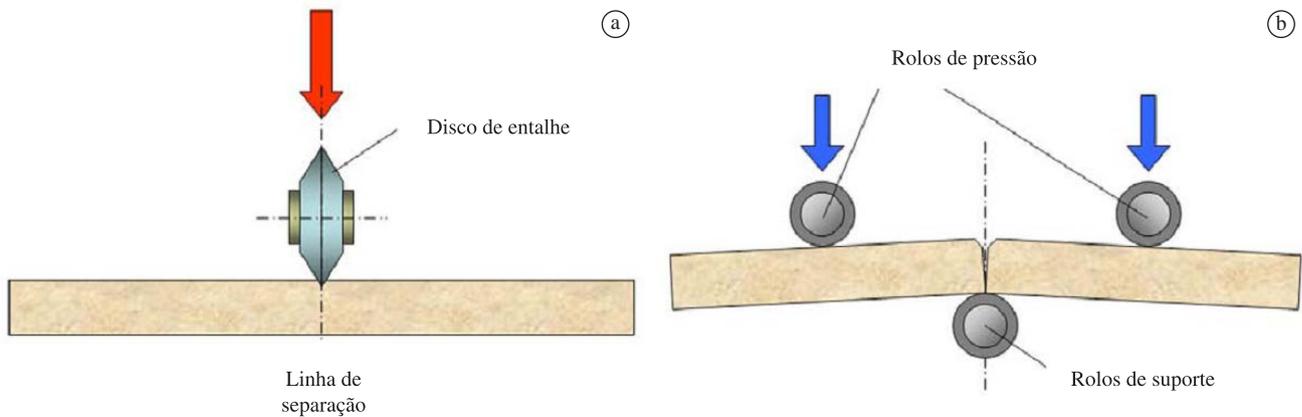
gravada passa para uma segunda seção de trabalho, na qual rolos de pressão geram uma flexão causando a ruptura devido à propagação da fissura (separação). Quanto mais homogêneo e mais frágil for o material, assim como menor for a sua espessura, mais eficiente é a separação. Para estes efeitos, os materiais totalmente vitrificados são os mais adequados para o corte.

A produtividade do método de entalhe e separação é sem dúvida maior do que a das tecnologias descritas anteriormente. Além disso, os custos das ferramentas são desprezíveis. De qualquer modo, esta tecnologia apresenta alguns inconvenientes:

- A tipologia do material pode influir no processo de corte até torná-lo incontrolável;
- A operação de entalhe pode ser particularmente difícil sobre superfícies estruturadas (não planas); e
- O processo necessita de operações de acabamento posteriores em superfícies de corte e bordas (retificação dos cantos e biselado), o que aumenta os custos do processo e implica na eliminação das lamelas.

### 1.4. Corte a cru

A Sacmi introduziu a técnica de corte a cru em 2001<sup>1</sup>, a qual consiste em cortar as placas cerâmicas antes da sua queima. O corte é realizado utilizando discos diamantados finos, obtendo-se uma elevada produtividade e sem utilizar água de resfriamento. As



**Figura 3.** Corte por entalhe e separação: a) entalhe com disco diamantado; b) separação.

placas cruas prensadas são transportadas para a máquina (Figura 4), na qual uma série de discos giratórios de alta velocidade faz o corte. Primeiramente, uma seção móvel realiza os cortes transversais, enquanto uma seção fixa faz os cortes longitudinais. Os tamanhos definitivos são facilmente programáveis e podem ser alterados por uma interface de software adequada.

Apesar da elevada flexibilidade e do baixo custo, o corte a cru unicamente pode ser feito em placas cruas. Segundo as variáveis do processo, a seguinte fase de queima pode ocasionar, por vezes, deformações não homogêneas que necessitam de operações de acabamento adicionais nas bordas (o que significa um aumento dos custos do processo). Mesmo a eliminação de pó da área de trabalho necessita de ferramentas de sucção específicas. Desta forma, deduz-se que as técnicas de corte existentes mostram uma série de aspectos limitantes, a seguir:

- Altos custos, devidos ao desgaste das ferramentas de corte (discos diamantados, pó abrasivo, etc.);
- Baixa produtividade e/ou baixa flexibilidade para mudar o tamanho;
- Problemas ligados à eliminação de resíduos de corte (lamas e poeiras); e
- O corte a cru representa uma solução unicamente para uma gama reduzida de produtos.

Portanto, é conveniente a investigação de um novo sistema de corte para placas queimadas, que seja capaz de superar os aspectos limitantes mencionados anteriormente. Para estes efeitos, o corte a laser pode ser considerado como uma possibilidade interessante.

## 2. O Corte Laser

O corte a laser de materiais é a aplicação mais comum e difundida do laser de alta potência, que é capaz de fundir e mesmo evaporar praticamente todos os materiais. Durante o processo de corte, a energia absorvida pelo material na área de foco converte-se em calor, ocasionando um repentino aumento da temperatura na peça.

Os tipos de laser mais comuns utilizados no corte industrial de diferentes materiais são:

- O laser CO<sub>2</sub> (onde o meio ativo é um gás, o dióxido de carbono); e
- O laser Nd:YAG (onde o meio ativo é um sólido, uma granada de ítrio e alumínio dopada com neodímio).

São diferenciados pelo tipo de fonte e nos comprimentos de onda da luz monocromática emitida (10,6 μm para o CO<sub>2</sub> e 1,06 μm para o Nd:YAG), que estão fora do espectro visível. Ambos os tipos de laser fazem o corte focando um feixe mediante lentes e espelhos numa pequena área (menor que 0,5 mm de diâmetro),



**Figura 4.** Máquina de corte a cru, modelo TPD175.

alcançando 105 W/mm<sup>2</sup> de potência superficial. A diferença entre os comprimentos de onda dos dois tipos de laser é muito importante visto que no caso do laser Nd:YAG a luz pode ser transmitida através de uma fibra ótica, enquanto a luz do laser CO<sub>2</sub> é transmitida até à peça através de espelhos e lentes óticas e é, conseqüentemente, a mais adequada para superfícies planas e para o entalhe. O laser Nd:YAG geralmente opera com luz pulsante, enquanto o laser CO<sub>2</sub> trabalha com luz contínua.

A Figura 5 representa a cabeça de corte a laser, geralmente utilizada para o corte de metais e outros materiais similares. O feixe laser é concentrado para que o material seja fundido em pouco tempo sem contato nem transporte de energia.

Recentemente foram realizadas tentativas de cortar placas cerâmicas diretamente com o laser CO<sub>2</sub>. Uma estimativa do rendimento do corte a laser foi proposta por Black em 1998<sup>2</sup>. Isso permite determinar a melhor velocidade de corte  $V_{opt}$  por intermédio de considerações termodinâmicas e de transferência de calor. A melhor velocidade  $V_{opt}$  foi determinada pela Equação 1:

$$V_{opt} = (2/\pi e)P/[\rho CR^2(T_p - T_0)] \quad (1)$$

Na Equação 1, P é a potência do laser, C é o calor específico do material, T<sub>p</sub> é a temperatura máxima (necessária para a fundição/evaporação completa), T<sub>0</sub> é a temperatura ambiente, ρ é a densidade do material. O parâmetro R é definido pela Equação 2 como sendo:

$$R = (r^2 + s^2)^{1/2} \quad (2)$$

Na Equação 2,  $r$  é o raio do ponto laser e  $s$  é a espessura da placa. O diagrama apresentado na Figura 6a mostra os valores de  $V_{opt}$  em função da espessura da placa a ser cortada, calculados segundo a Equação 1, considerando uma potência laser de 1.500 W. Para valores de espessura de placas padrão (8 a 10 mm), a velocidade de corte é apenas de 100 a 200 mm/min. Para espessuras menores (<2 mm) o processo é mais eficiente, mas inútil para a produção de cerâmica tradicional.

Consequentemente, este sistema não é adequado para a indústria cerâmica devido às baixas velocidades de corte em função da energia necessária. Além disso, devido à geração de alta densidade de energia, as bordas alteram-se de forma negativa, apresentando zonas fundidas e danificadas termicamente (Figura 6b), requerendo intensas operações de acabamento. Para aproveitar as vantagens do corte a laser, como a ausência de contato entre as ferramentas e a placa cerâmica, havia necessidade de se investigar uma solução diferente.

### 3. Entalhe por Tensão Induzido a Laser

A presente solução baseia-se na técnica conhecida como entalhe por tensão induzido a laser (LIST, *laser induced scoring by tension*). Esta técnica utiliza uma fonte de laser  $CO_2$  para induzir tensões no material que provocam uma fissura e permitem que esta se propague ao longo da linha de separação desejada, sem fundir o material cerâmico (como é o caso do corte por feixe laser). Esta técnica patenteada<sup>3</sup> foi originalmente desenvolvida para cortar lâminas de

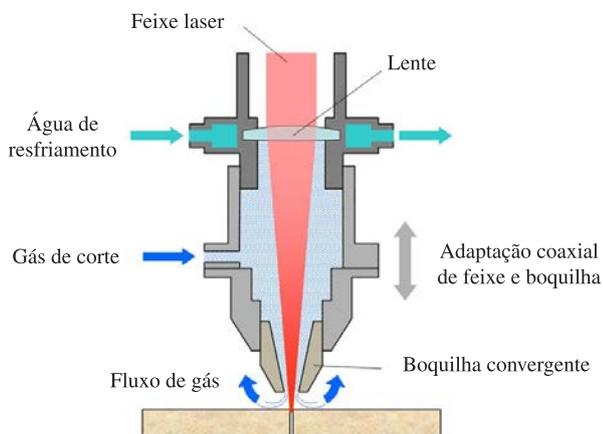
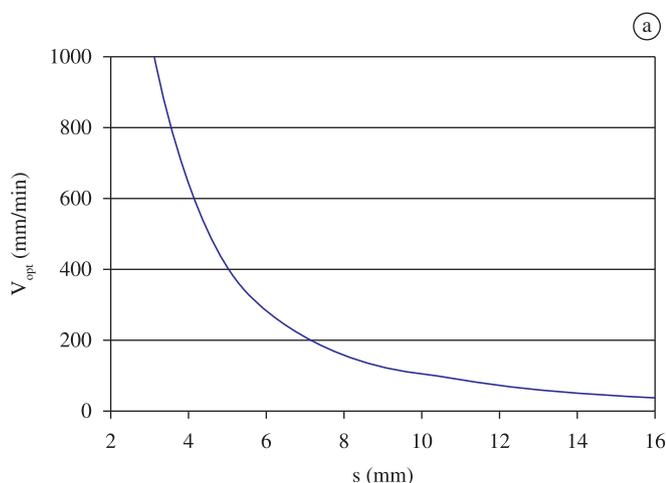


Figura 5. Diagrama da cabeça de corte por feixe laser.



vidro plano, cuja versão convenientemente adaptada à cerâmica é explicada a seguir.

A Figura 7a mostra o princípio de funcionamento: o feixe laser aquece a superfície ao longo de uma linha de separação pré-definida, seguido por um dispositivo de resfriamento adequado. Esta sequência de gradientes térmicos gera um estado de tensão de compressão dentro do material enquanto a superfície se encontra submetida a tensões de tração. A Figura 7b mostra a distribuição de temperaturas num corte transversal do material. Devido aos gradientes de temperaturas alternados, a superfície superior encontra-se submetida à tração e, ao superar um valor crítico ( $K_{Ic}$ ), começa a fissuração, que propaga-se de forma controlada ao longo de uma linha reta (seguindo o mecanismo de fratura de “abertura” de modo I).

A Figura 8 mostra detalhadamente os equipamentos necessários. Nestas representações não foram incluídos os sistemas de controle automáticos.

O feixe emitido pela fonte laser é encaminhado através de um grupo de lentes e é dirigido para um espelho de varredura. O espelho de varredura, convenientemente controlado por um software, desvia o feixe ao longo da linha de separação, segundo uma série de passagens múltiplas sobrepostas (Figura 8b). A velocidade de varredura do laser  $V_{scan}$  é de aproximadamente 10 a 20 m/s e este se move em um comprimento  $L_{scan}$ . O comprimento  $L_{scan}$  avança segundo a velocidade  $V_a$ , que representa a velocidade total de corte. Deste modo é possível controlar por completo a distribuição de temperatura dentro da placa cerâmica. A certa distância do feixe laser, o sistema de resfriamento move-se em paralelo lançando ar e pulverizando água sobre a placa, fazendo com que a superfície superior se resfrie rapidamente.

A energia aplicada  $E_{spec}$  a cada unidade de superfície pelo feixe laser é expressa segundo a Equação 3:

$$E_{spec} = P/(d V_{scan}) \quad (3)$$

Na Equação 3,  $P$  é a potência laser,  $d$  é o diâmetro do ponto laser,  $V_{scan}$  é a velocidade de varredura do feixe ao longo da linha de separação.

O valor  $E_{spec}$  deve ser mantido dentro de uma gama de valores limitados. Caso contrário poderiam aparecer efeitos não desejados, tais como fissuras transversais ou outro tipo de rupturas. Este valor está relacionado tanto com as características termodinâmicas (condutividade térmica, calor específico, emissividade e difusividade) como com as propriedades mecânicas (densidade, resistência à flexão, dilatação térmica, etc.) do material.



Figura 6. Corte laser: a) relação entre a velocidade e a espessura; b) aspecto da borda depois do corte.

Os valores utilizados no equipamento de teste para cortar placas cerâmicas são os seguintes:  $P = 800 \text{ W}$ ,  $d = 4,2 \text{ a } 11,5 \text{ mm}$  e  $V_{\text{scan}} = 5 \text{ a } 25 \text{ m/s}$ , pelo que resulta  $E_{\text{spec}} = 0,003 \text{ a } 0,038 \text{ J/mm}^2$ .

Deve-se destacar que a tecnologia LIST utiliza a energia laser para aquecer a zona de corte, sem fundir o material. De fato, é necessário ajustar uma distribuição de temperatura adequada na área próxima ao corte por um controle exato da varredura laser múltipla.

#### 4. Equipamento de Teste

Com a finalidade de verificar as possibilidades da tecnologia LIST em escala laboratorial e verificar a sua aplicabilidade no campo industrial foi fabricado um equipamento de teste. O sistema inclui uma fonte de laser  $\text{CO}_2$  capaz de trabalhar de forma descontínua sobre uma placa cerâmica individual (de até  $120 \times 120 \text{ cm}$ ). A fonte de laser

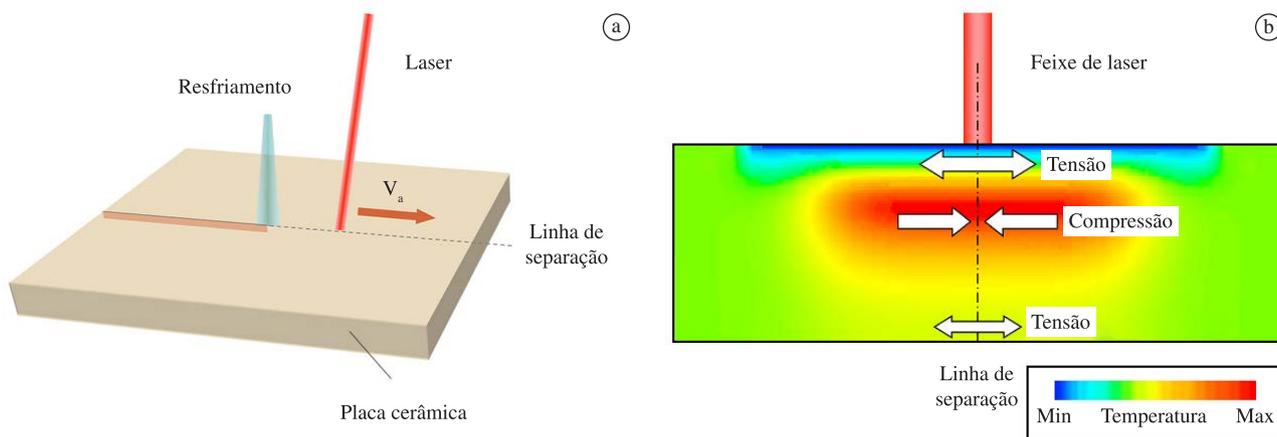


Figura 7. Método LIST: a) princípio de funcionamento; b) distribuição de tensões dentro do material depois do resfriamento.

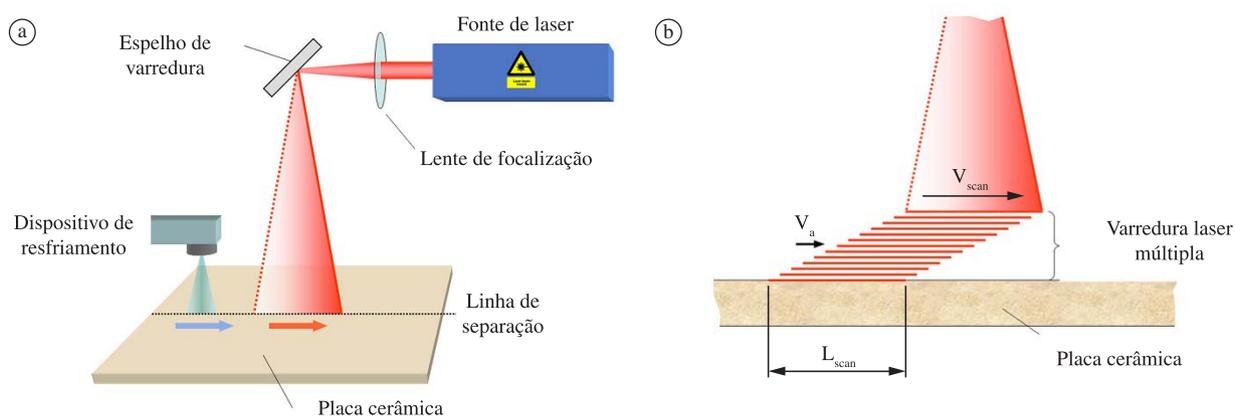


Figura 8. Método LIST: a) equipamentos de corte; b) detalhe da varredura múltipla.



Figura 9. Equipamento laser de teste: a) visão geral; b) detalhe da zona de corte.

CO<sub>2</sub>, com 1.000 W de potência nominal, é colocada na parte superior do equipamento para conseguir uma distância de aproximadamente 2 m entre o espelho de varredura e a superfície da placa.

A Figura 9 mostra o equipamento laser de teste operando nos laboratórios da Sacmi. A completa blindagem da máquina (Figura 9a) é realizada com paredes de vidro e metal, bloqueando por completo a radiação laser para segurança dos trabalhadores. Além disso, tomaram-se precauções especiais para prevenir reflexos do feixe para fora da área de trabalho. A Figura 9b mostra a zona de corte durante a operação da máquina. O feixe invisível aquece a linha de separação alguns mm antes do dispositivo de resfriamento. Somente uma marca tênue revela a ação do laser.

O software de controle foi desenvolvido para investigar os principais parâmetros, que poderiam afetar a qualidade final do

corte, em particular: a potência do feixe laser P; a velocidade de corte  $V_{scan}$ ; a velocidade de corte  $V_a$ ; o diâmetro do feixe laser d; o comprimento de varredura  $L_{scan}$ . A fim de simplificar o estudo e reduzir o número de ensaios, paralelamente realizou-se uma análise com elementos finitos térmicos estruturais utilizando-se o programa de simulação Ansys.

Em primeiro lugar foram estudados modelos bidimensionais para uma estimativa preliminar da influência de diferentes parâmetros termomecânicos. Depois foram realizadas análises tridimensionais mais complexas, as quais necessitaram de grandes recursos computacionais.

A Figura 10 mostra o resultado de uma das análises mencionadas, realizada para simular a temperatura e a distribuição de tensões em relação à linha de separação.

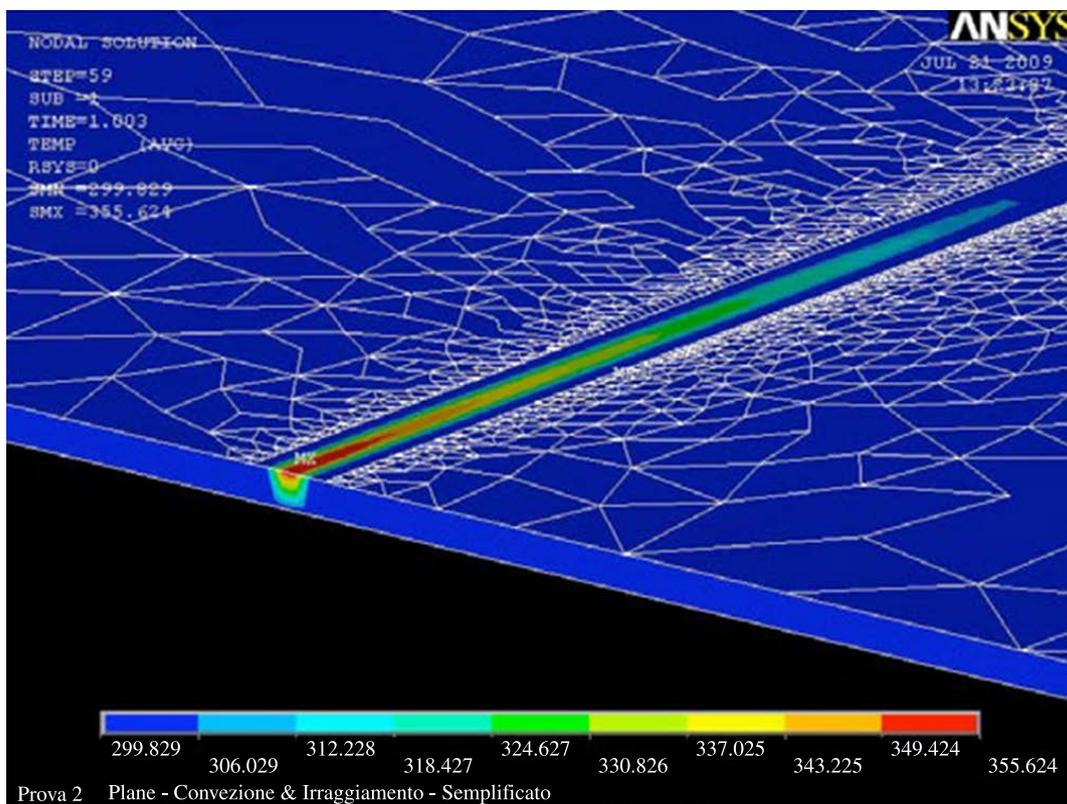


Figura 10. Análise MEF de distribuição térmica e de tensões.

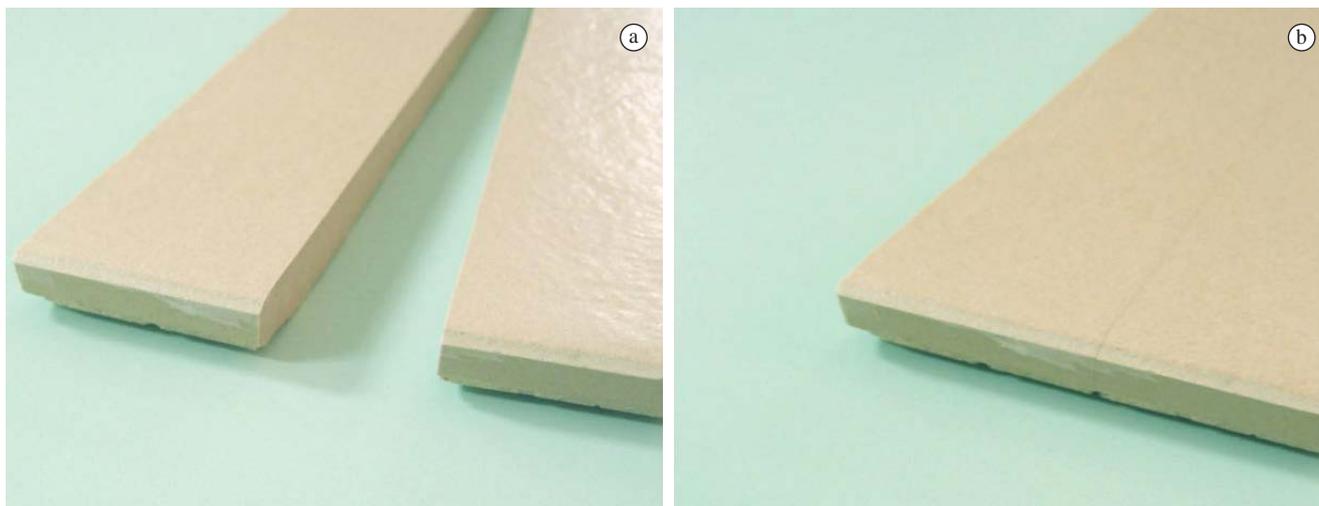


Figura 11. Exemplo de corte com LIST: a) partes separadas; b) encaixe das partes depois do corte.

Tabela 1. Resultados obtidos nos ensaios.

Número de ensaio	Espessura (mm)	D (mm)	$E_{spec}$ J/mm <sup>2</sup>	$L_{scan}$ (mm)	$V_{scan}$ (m/s)	$V_a$ (m/min)	Qualidade de corte	Observações
1	3,4	4,2	0,013	300	15	2,0	Boa	–
2	3,4	4,2	0,011	400	17	2,0	Boa	–
3	3,4	4,2	0,013	300	15	3,0	Bastante boa	–
4	3,4	4,2	0,013	300	15	4,0	Baixa	–
5	3,4	4,2	0,008	300	25	2,0	Bastante boa	–
6	3,4	4,2	0,038	300	5	2,0	Baixa	Queimaduras na superfície
7	10	11,5	0,005	300	15	0,6	Boa	–
8	10	9,2	0,006	300	15	0,6	Boa	–
9	10	11,5	0,005	300	15	1,2	Baixa	–
10	10	11,5	0,005	100	15	0,6	Baixa	Queimaduras na superfície
11	10	11,5	0,005	600	15	0,6	Baixa	

## 5. Ensaios Experimentais

Depois da otimização computacional foi realizada uma série de cortes de teste em placas de grés porcelânico. Os ensaios foram realizados com os seguintes parâmetros: 800 W de potência laser, placa de 30 × 60 cm, corte ao longo da linha central do lado curto (quer dizer, com um comprimento de corte de 600 mm). Os resultados obtidos são apresentados na Tabela 1.

Segundo os resultados apresentados na Tabela 1, foi obtida uma boa qualidade das peças para uma velocidade  $V_a$  de 2 m/min ou menor. Se a espessura é aumentada, o valor da velocidade  $V_a$  aceitável diminui ainda mais. Aumentando-se a velocidade de varredura  $V_{scan}$  (sem aumentar proporcionalmente a potência P) não se consegue nenhum benefício em relação à velocidade de corte  $V_a$  (ensaio 5 versus ensaio 1).

A Figura 11 mostra um exemplo de um corte de boa qualidade obtido durante os testes. Neste caso, o perfil de corte é completamente retilíneo e as duas partes encaixam perfeitamente entre si. A técnica LIST atua como uma tecnologia de corte a laser de “espessura zero” real.

A planeza da superfície de separação é aceitável e não necessita de um acabamento posterior. Se for necessária pode ser realizada uma ligeira retificação de cantos nas bordas superiores (biselado).

## 6. Conclusões

O método de corte LIST (Entalhe por tensão induzido a laser) representa uma alternativa potencial aos atuais sistemas de corte na cerâmica, dado que mostra as seguintes vantagens:

- Corte sem contato (sem desgaste das ferramentas);
- Elevada flexibilidade de produção (simplesmente modificando o programa de corte);
- Boa qualidade das superfícies de corte (comparada com o método de entalhe e separação); e

- Sem resíduos de processo (lamas, poeiras, etc.), o que significa um menor impacto ambiental.

Ao contrário o sistema LIST ainda apresenta alguns aspectos a serem melhorados, principalmente:

- A qualidade de corte depende da composição do corpo cerâmico;
- A velocidade de corte  $V_a$  não é suficiente (2 m/min em vez do objetivo de 5 m/min) e diminui se a espessura da placa é aumentada;
- O consumo de energia relativamente elevado devido ao baixo rendimento das fontes de laser CO<sub>2</sub> atuais; e
- A necessidade de proteções adequadas para a segurança do operador.

A tecnologia LIST aplicada à cerâmica (embora seja laboratorial) mostra resultados promissores. Contudo, é necessário realizar mais verificações para determinar as suas potencialidades e os custos industriais. Se os resultados finais, comparados aos das outras tecnologias, são positivos, poderia ser viável introduzir no processo cerâmico uma solução limpa, flexível e eficiente para o corte automático de placas queimadas.

## Referências

1. BRESCIANI, A.; GRAZIANI, G. P.; RICCI, C. New Glazed Porcelain Tile Manufacturing Technology: Pre-pressing, Dry Decoration and Green Cutting. *Qualicer*, v. 2, p. 255-270, 2002.
2. BLACK, I. Determining Cutting Speeds for the CO<sub>2</sub> Laser Machining of Decorative Ceramic Tile. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, v. 14, n. 9, p. 651-655, 1998. <http://dx.doi.org/10.1007/BF01192285>
3. DOLL, W. et al. *Method for Laser-induced Thermal Separation of Plate Glass*. Patent US 2007/0151962 A1, 05 July 2007.