

O processamento de materiais por Laser

DIETMAR APPELT

Departamento de Investigação e Desenvolvimento, EFACEC
Laboratório de Física, Faculdade de Ciências do Porto

1. Introdução

Vem de longa data a ideia de utilizar a radiação luminosa como fonte de calor: já Arquimedes, no séc. III AC, tentou defender a sua cidade de Siracusa contra a invasão da armada romana, focando numa pequena área a radiação solar, por meio de grandes espelhos parabólicos de sua construção.

No entanto, só após a invenção do laser, cuja primeira edição apareceu em 1960 devida a Theodore H. Maiman, é que um feixe luminoso convenientemente focado se converteu numa fonte de calor com viabilidade prática no processamento industrial de materiais. Embora esta aplicação, tal como a maioria das outras actualmente implementadas, fosse reconhecida bem cedo após aquele marco histórico, durante o período de 1962 a 1968 o estado de desenvolvimento dos lasers era ainda muito rudimentar o que os tornava demasiado frágeis, pouco fiáveis e duradouros, não permitindo a sua introdução em aplicações industriais. Daí que há cerca de 10 anos ainda o laser era tido como uma invenção que procurava aplicação prática.

Entretanto tal situação mudou radicalmente: máquinas-ferramenta baseadas em sistemas laser são amplamente utilizadas no corte, furação, soldadura, tratamento térmico superficial, recobrimento superficial, nos mais diversos materiais metálicos e não metálicos, em indústrias tão variadas como a metalomecânica em geral, automóvel, cortumes, plásticos, têxtil, cerâmica, electrónica, etc.

Na presente exposição pretendemos dar uma primeira ideia sobre a forma como os lasers intervêm nesta classe de aplicações.

2. Fundamentos do processamento de materiais com laser

O mecanismo do processamento de materiais com radiação laser pode ser interpretado fundamentalmente como uma acção térmica resultante da absorção da energia luminosa (Fig. 1). A radiação laser é focalizada por

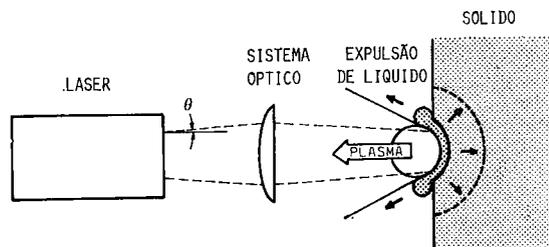


Fig. 1 — Esquema do processamento de materiais por laser.

meio de um sistema óptico adequado sobre a peça a trabalhar (o alvo) em cuja superfície é absorvida. O calor assim produzido intervém como calor de processamento, que pode desencadear um conjunto de fenómenos localizados entre duas situações extremas:

- a) todo o calor é transportado por condução térmica — é o caso dos tratamentos térmicos por transformação de estrutura;
- b) o calor leva um pequeno elemento de volume do alvo ao estado de plasma, sem que haja aquecimento do material restante — esta é a situação desejada sempre que se pretenda uma remoção de material.

Os parâmetros mais influentes em todos os processos que se situam entre estes limites são, por um lado, as características específicas da radiação laser — intensidade, modo (TEM)

e, em menor grau, o comprimento de onda — e, por outro as características ópticas e térmicas do material — absorção, condução térmica e, em menor grau, calores de fusão e vaporização.

2.1 Características da radiação laser

De acordo com as leis da óptica geométrica não é possível aumentar, por concentração óptica, a intensidade (isto é, densidade de potência, potência por unidade de área) da luz convencional, incoerente, para além da intensidade da fonte luminosa. Assim, por concentração da radiação solar não é possível atingir-se uma temperatura superior à da superfície do Sol, cerca de 6,3 kK.

No laser tal situação é essencialmente diferente. O laser constitui um amplificador de luz com realimentação, que emite luz monocromática, espacial e temporalmente coerente. Quando o laser opera no modo fundamental, TEM₀₀ a distribuição de energia através da secção do feixe segue uma distribuição de Gauss.

Focalizando um feixe de luz nestas condições com uma lente (Fig. 2) obtém-se na

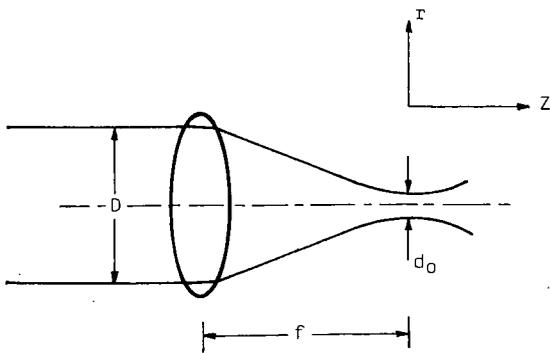


Fig. 2—Formação da cintura por focalização do feixe.

proximidade do plano focal um estrangulamento do feixe. A cintura do feixe («Waist»), isto é, a sua zona mais estreita, situa-se no plano focal e tem um diâmetro d_0 , que é dado com boa aproximação por

$$d_0 = \frac{4 \lambda f}{\pi D}$$

em que λ representa o comprimento de onda

da radiação, D o diâmetro do feixe incidente, e f a distância focal.

Fora do plano focal ($Z \neq 0$) o feixe alarga para um e outro lado deste ($Z = 0$) tomando um valor

$$d(Z) = d_0 \sqrt{1 + \left(\frac{4 \lambda Z}{\pi d_0^2} \right)^2}$$

Se o laser emite num modo superior ao fundamental, formam-se vários focos, o diâmetro da cintura é significativamente maior, e, para uma mesma potência total do laser há uma diminuição da densidade de potência e energia no foco.

Para muitas aplicações, em particular corte e furação, a potência total do laser é menos determinante para o bom êxito do processo do que a sua intensidade. Em muitas circunstâncias, um laser de menor potência de saída mas com uma estrutura modal ótima e consequentes melhores características de focalização conduz a melhores resultados do que um laser multimodo de potência mais elevada.

Uma intensidade de feixe elevada é requisito fundamental em processos em que há remoção de material, tais como furação e corte, além da soldadura em profundidade, vitrificação e endurecimento superficial por tratamento térmico de choque. A remoção do material dá-se essencialmente na fase de vapor ou plasma. É característico destes processos a formação de um plasma induzido pelo laser e uma absorção de radiação dependente da intensidade. A interacção da radiação laser com o plasma em expansão, a acção sobre o movimento do banho em fusão na zona de processamento e bem assim as alterações da realimentação óptica através do plasma em expansão, são fenómenos extremamente complexos mas que influenciam fortemente a qualidade do processamento.

Os processos de tratamento térmico, tais como têmpera, endurecimento por transformação da estrutura ou fusão, formação de ligas e soldaduras, são realizados com baixa intensidade de feixe. A característica comum destes

processos é a ausência de formação de plasma induzido pelo feixe laser e uma consequente absorção independente da intensidade. Neste tipo de processamento o material tem de ser levado à fusão numa zona apreciavelmente larga e profunda, para o que se torna essencialmente necessário o fornecimento de uma certa energia total, o que geralmente dispensa a minimização do diâmetro da mancha de focalização. Em muitas circunstâncias deste tipo é até razoável trazer o foco nitidamente para fora do alvo para evitar um sobreaquecimento local tão grande que possa conduzir a vaporização do material.

Há aqui diferenças significativas relativamente aos processos convencionais, devido à muito maiores velocidades de aquecimento e arrefecimento bem como zonas termicamente afectadas (HAZ, «heat-affected zone») muito mais finas.

Há lasers mais aptos a trabalho em regime contínuo (CW, «continuous wave»), outros podem ser vantajosamente operados em regime pulsado, o que permite obter potências de ponta muito grandes — no quadro I comparam-se

QUADRO I—Comparação das intensidades atingíveis com as diversas fontes de energia utilizáveis no processamento de materiais.

Fone	Duração do impulso	Potência	Intensidade
Laser CO ₂	CW	1 kW	10 MW/cm ²
Laser Nd:YAG	1 ms	0,1 MW	10 GM/cm ²
	10 ns	100 MW	10 TW/cm ²
Laser excímero	10 ns	25 MW	10 GW/cm ²
Feixe electrónico	CW	3 kW	1 GW/cm ²
Maçarico	CW	1,5 kW	50 kW/cm ²
Sol focalizado com lente (D ≈ 3 cm)	CW	0,7 W	1 kW/cm ²

as potências e intensidades correntes nos lasers habitualmente utilizados no processamento de materiais com fontes tradicionais, pondo claramente em evidência a superioridade do laser.

Para além do comprimento de onda da radiação utilizada, parâmetro que condiciona essencialmente a absorção por parte do material (ver § 2.2), a intensidade do feixe e a duração da interacção são as grandezas determinantes no processamento. A Fig. 3 representa as zonas

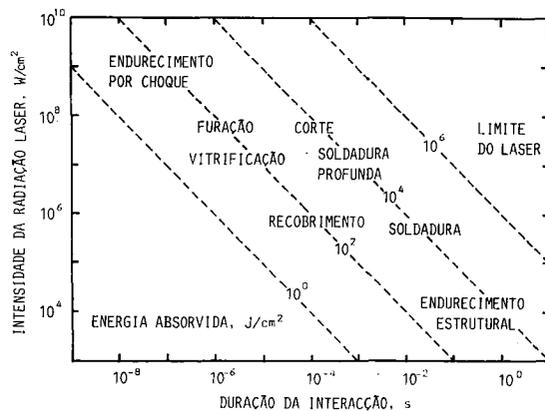


Fig. 3 — Espectro da interacção feixe-material, pondo em evidência as zonas ocupadas pelos vários tipos de processamento.

do «plano intensidade/tempo de interacção» onde, de acordo com a ampla experiência já acumulada, se situam os vários processamentos de materiais.

Dadas as suas características peculiares — densidades de energia e potência notáveis e facilmente controláveis, facilidade de dirigir e concentrar essa potência — a radiação laser tornou-se uma valiosa ferramenta com múltiplos aspectos singulares:

- a facilidade de concentração superficial permite trilhos de corte e HAZ muito reduzidos;
- a transmissão da energia para o alvo é feita sem contacto nem perdas, o que põe de parte contaminações do alvo por material dos eléctrodos ou produtos de combustão — não há desgaste de ferramentas. Para além da facilidade de deflexão e focalização do feixe com elementos ópticos relativamente simples (espelhos e lentes) é ainda possível, em particular no caso de lasers de alta potência, subdividir o feixe, com divisores de feixe, em vários feixes parciais

que podem ser enviados para outras tantas estações de trabalho, permitindo operação em paralelo;

- o ar e outros gases são essencialmente transparentes à radiação laser, o que permite o processamento em praticamente qualquer tipo de atmosfera — oxidante, redutora, inerte — e mesmo no vácuo. Em muitos casos é mesmo possível o processamento de objectos encapsulados através do material envolvente, desde que este seja transparente para o comprimento de onda da radiação utilizada;
- a precisão associada ao feixe permite tolerâncias de processamento apertadas e óptima reprodutividade;
- os métodos de processamento por laser adaptam-se muito bem a sistemas automatizados de fabricação, o que em muitos casos possibilita uma melhor produtividade — os custos de manutenção e operação dos sistemas a laser são em geral baixos.

2.2 Influência dos parâmetros dos materiais

Quando uma onda luminosa incide sobre a superfície de um material, há reflexão de uma parte da energia de acordo com a reflectividade do meio. A parte restante penetra no material, onde é absorvida em maior ou menor extensão. Quer a reflexão quer a absorção da radiação dependem fortemente do comprimento de onda da radiação e da natureza do material. A Fig. 4

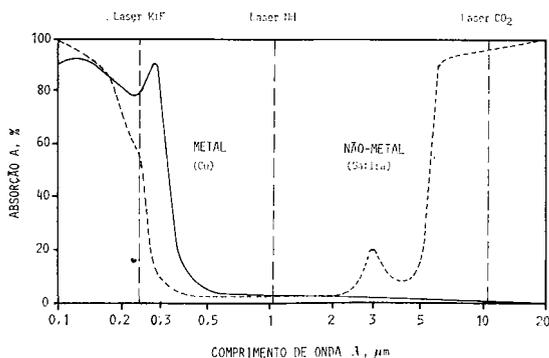


Fig. 4 — Absorção (A) de um metal típico (Cu) e um não metal (safira) em função do comprimento de onda.

mostra os espectros de absorção típicos de um metal e um não metal.

Para o processamento de qualquer material exige-se sempre uma potência apreciável. Daí que até aqui tenham sido utilizados essencialmente dois tipos de lasers para a aplicação em apreço: o laser de CO_2 , capaz de fornecer elevadas potências em CW — há já sistemas de 20 kW — e operando a um comprimento de onda de 10,6 μm , e o laser de Nd, utilizando mais habitualmente o YAG («Y-Al-Garnet», granada de ítrio e alumínio) como hospedeiro, que em CW opera a potências mais modestas (no máximo até apenas algumas centenas de watts), permite no entanto atingir facilmente elevadas potências em regime pulsado (megawatts), e emite a 1,06 μm .

Em geral pode dizer-se que, dentre estes dois comprimentos de onda, os metais absorvem melhor a radiação do laser de Nd e os não-metais a do laser de CO_2 . As considerações sobre as potências atingíveis em regime CW e pulsado destes dois tipos de lasers, por um lado, e os níveis de energia e potência necessários aos vários tipos de processamento (Fig. 3) por outro, acabam por, na prática, determinar os campos de intervenção como se segue:

Laser de CO_2 — processamento de materiais não metálicos (corte, furação) e processamento de metais em que não haja necessidade de vaporizar o material: corte assistido por gás (oxicorte), soldadura, tratamentos térmicos.

Laser de Nd:YAG — processamento de metais com vaporização — gravação, marcação, traçagem («scribing»), corte em atmosfera inerte, rectificação («trimming») de componentes electrónicos (tipicamente resistências) e ainda, dada a sua focabilidade mais fina, o processamento de precisão de metais — corte e soldadura finos.

O mecanismo da absorção da radiação é muito complexo. Distinguem-se duas formas.

Nos não-metais, por efeito da excitação com radiação de comprimento de onda relativamente elevado, são as moléculas ou iões da

rede cristalina que entram em vibração, enquanto radiações de menor comprimento de onda excitam os electrões das camadas atómicas, que por sua vez transmitem os choques à rede onde há a transformação em calor. No seu trajecto para o interior do meio, a energia da onda luminosa diminui exponencialmente com a constante de amortecimento. Nos materiais transparentes a profundidade de penetração é ilimitada; se a absorção é muito forte, a penetração é pequena, podendo situar-se na ordem grandeza do comprimento de onda da radiação.

Nos metais a absorção dá-se nos electrões da banda de condução — por isso o comportamento óptico é essencialmente determinado pela condutividade eléctrica do metal, especialmente no domínio do infravermelho. Devido à elevada mobilidade dos electrões de condução, há como que um efeito peculiar que tem por consequência reduzir muito significativamente a profundidade de penetração da onda luminosa, que na maioria dos casos se situa entre uns 10 nm e 100 nm, isto é, apenas uma fracção do comprimento de onda da luz. Também a reflectividade aumenta com a condutividade eléctrica, o que na prática significa que a maioria dos metais no estado não recoberito reflecte entre 90 % e 100 % da energia infravermelha incidente. Felizmente que na incidência de radiação laser de forte intensidade sobre os metais há outros efeitos que compensam parcialmente aquele comportamento desfavorável: a reflectividade dos metais depende fortemente da temperatura, com a qual diminui — metais altamente reflectivos à temperatura ambiente podem ser bons absorventes a temperaturas elevadas e no estado de fusão (Fig. 5).

Também o estado da superfície condiciona de forma significativa a reflectividade: enquanto uma superfície polida actua como um espelho, aumentando a rugosidade superficial e aplicando revestimentos superficiais (p. ex.° finas camadas de óxido) melhora-se substancialmente a absorção.

A combinação destes vários efeitos pode resultar em que a reflectividade dos metais possa baixar até cerca de 10 % do seu valor inicial. Desta forma se torna possível o pro-

cessamento, em condições económicas, de metais mesmo com lasers de CO₂ ($\lambda = 10,6 \mu\text{m}$), tão atractivos devido à sua elevada potência de saída e alto rendimento.

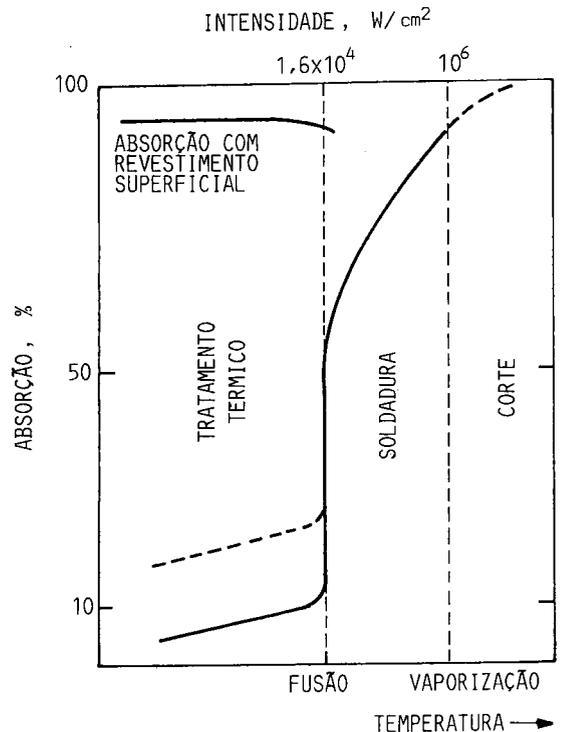


Fig. 5 — Efeito da temperatura e do revestimento superficial na absorção ($\lambda = 10,6 \mu\text{m}$).

Quando à condução térmica, há que considerar que no caso de a acção da radiação sobre o metal ser de duração relativamente longa, há condução de uma apreciável quantidade de calor, podendo atingir-se um equilíbrio térmico. Se a duração for curta — regime pulsado — não se atinge equilíbrio térmico. Estes fenómenos são naturalmente influenciados pela condutividade térmica do metal e o seu coeficiente de difusão térmica.

Nos não-metais a condutividade térmica é praticamente irrelevante, intervindo efeitos diferentes sob a acção de radiação laser intensa. Em geral a penetração da energia é muito mais profunda que no caso dos metais. Os efeitos variam muito conforme o tipo de material, pelo que não pormenorizaremos aqui.

Em qualquer caso a interacção da radiação laser com a matéria é um processo térmico

intensivo. Dada a reduzida penetração da radiação em materiais fortemente absorventes, a temperatura superficial no centro da mancha focal cresce muito rapidamente: com impulsos de elevada potência conseguem-se taxas de aquecimento da ordem dos 10^{10} K/s, numa zona muito localizada — surgem gradientes da ordem dos 10^6 K/cm!

3. Campos de aplicação

Com o laser passa a dispor-se de uma nova ferramenta que graças à sua versatilidade, facilidade de comando e elevada precisão, tem um vastíssimo campo de aplicação no processamento de materiais metálicos e não-metálicos.

O quadro II apresenta uma classificação dos materiais quanto à sua aptidão ao trabalho por laser. Quanto aos métodos de trabalho é costume considerar a seguinte classificação:

a) Com remoção de material:

Corte — por fusão, vaporização, oxidação;

Furação, de reduzidas dimensões;
Gravação, marcação, traçagem, rectificação.

b) Sem remoção de material:

Soldadura, soldadura profunda;
Tempera, endurecimento superficial;
Recobrimento, ligação superficial.

Está naturalmente fora do âmbito desta exposição abordar todos estes processos e materiais, pelo que referiremos brevemente apenas alguns deles a título de exemplificação.

O corte de materiais metálicos e não metálicos é um domínio em que provavelmente há maior número de sistemas instalados.

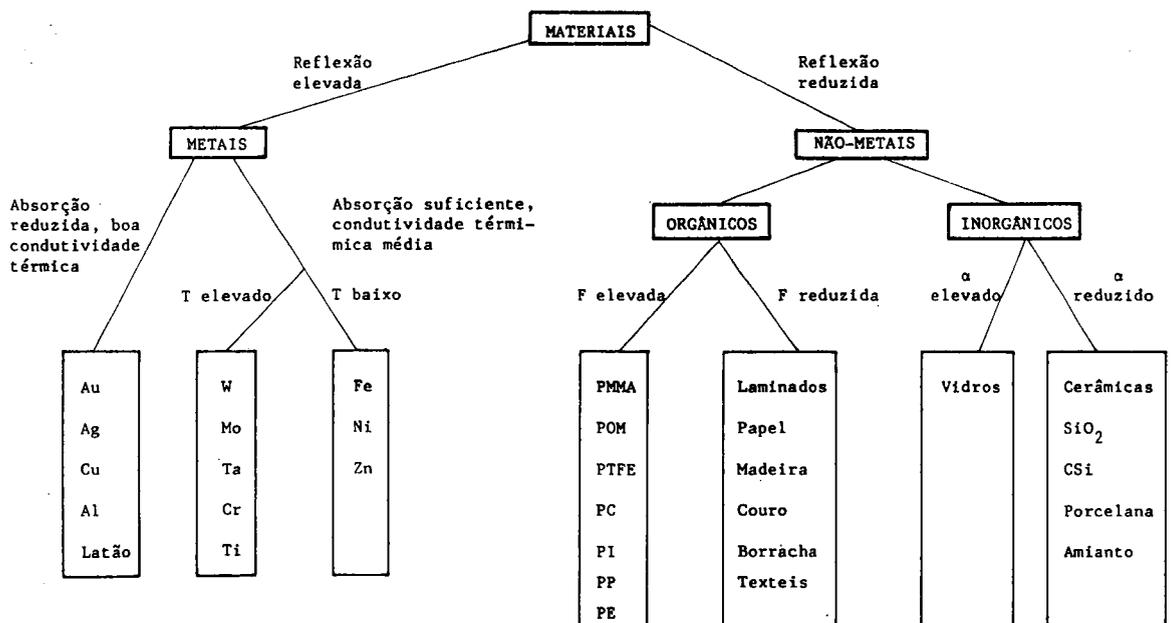
Utilizam-se para o efeito essencialmente lasers de CO_2 em regime CW e em menor escala, especialmente para materiais delicados, o laser de Nd:YAG, geralmente em regime pulsado.

Normalmente faz-se incidir sobre a peça a cortar, concentricamente com o feixe focalizado, um jacto de gás. Nalguns casos trata-se de um gás inerte (Ar, N_2) que tem por fim

QUADRO II

Classificação dos materiais quanto à sua processabilidade por laser

T = ponto de fusão F = inflamabilidade α = coeficiente de dilatação térmica



proteger o material da oxidação, ao mesmo tempo que favorece a expulsão do material em fusão.

Noutras circunstâncias, em particular no corte de materiais ferrosos, usa-se O_2 como gás de corte, que reage de forma exotérmica com o metal em fusão, elevando ainda mais a temperatura localmente atingida — é o oxicorte.

Dois parâmetros fundamentais são determinantes para o processo de corte, como de resto para outros processos: a potência disponível e a velocidade de corte, que condiciona afinal a duração da interacção.

Se a intensidade é muito elevada, há vaporização superficial do material, sem haver fusão em camadas subjacentes; se, pelo contrário, a intensidade é baixa, a energia é fornecida lentamente, dando tempo a que se disperse por um volume maior e o aqueça. Nestas condições, a profundidade de fusão no foco é igualmente pequena enquanto o material circundante aquece indesejavelmente.

Quando se pretende uma grande profundidade de fusão, é necessário aumentar a densidade de energia total fornecida, sem aumentar a densidade de potência (intensidade). A prática tem mesmo mostrado que só se alcança o efeito desejado trabalhando com intensidade mais reduzida mas aumentando correspondentemente o tempo de interacção. Há no entanto aqui limites, pois que rapidamente se atinge um estado de equilíbrio entre a energia fornecida e as perdas de energia por convecção, irradiação e condução, não havendo mais elevação de temperatura.

A escolha dos parâmetros de corte é pois crítica para cada material e há, em cada caso, que fazer um certo número de ensaios experimentais para os dimensionar de forma a obter uma qualidade de corte óptima — uma das vantagens do corte por laser é fornecer superfícies de corte impecáveis que não necessitam de posterior acabamento. Hoje em dia há naturalmente já um grande número de dados acumulados que permitem fazer uma previsão aproximada dos parâmetros a utilizar. As Figs. 6 e 7 representam alguns exemplos de velocidades de corte obtidas em vários materiais. A Fig. 8 mostra alguns exemplos de peças

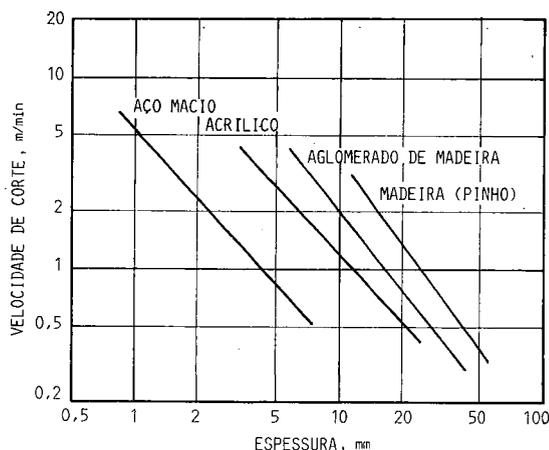


Fig. 6 — Velocidades de corte para diversos materiais, usando um laser de CO_2 de 500 W. O corte de aço é assistido por O_2 , os restantes são realizados sob atmosfera protectora de Ar.

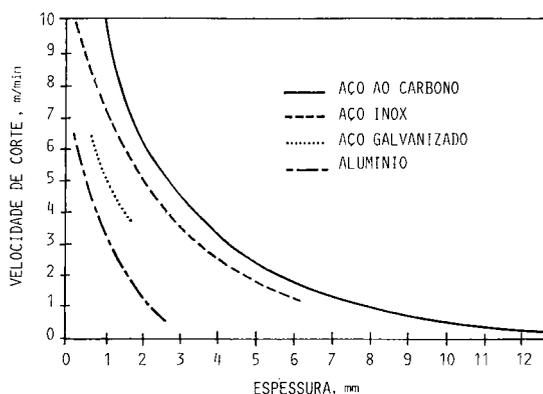


Fig. 7 — Velocidade de corte de alguns metais correntes com laser de CO_2 de 1 kW, assistido por O_2 . É bem patente a maior dificuldade de corte do Al.

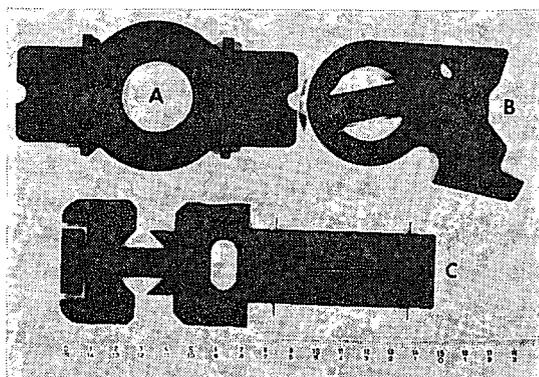


Fig. 8 — Exemplos de peças recortadas com uma máquina-ferramenta comercial usando um laser de CO_2 de 600 W. A — aço de construção, espessura 3 mm; B — idem, 5 mm; C — alumínio, 2 mm.

recortadas com uma máquina comercial equipada com um laser CO₂ de 600 W, a uma velocidade de cerca de 4 m/min. A gravação e marcação em suporte metálico ou plástico, para a produção de etiquetas, placas de características, etc., é uma aplicação que tem vindo a adquirir grande popularidade nos últimos anos. Para este efeito utiliza-se normalmente um laser de Nd:YAG, que permite uma focalização muito fina, com uma potência (multimodo) da ordem dos 50 W. Um sistema informático mais ou menos desenvolvido faz desviar o feixe focalizado sobre o alvo segundo o desenho de caracteres alfa-numéricos de variados tipos, permitindo escrever qualquer texto. A possibilidade de desenhar quaisquer logotipos, devidamente programados, confere grande versatilidade a estes sistemas. A Fig. 9 mostra alguns exemplos obtidos com sistemas comerciais.

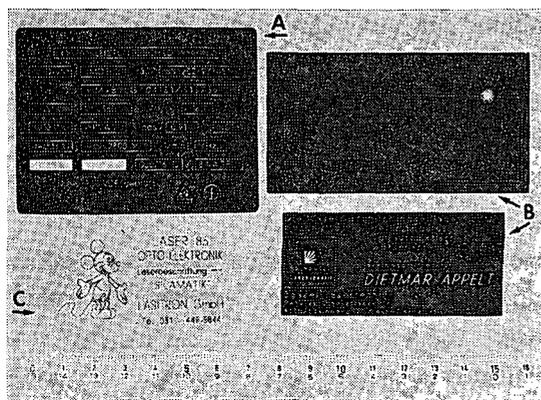


Fig. 9—Exemplos de etiquetas gravadas com um equipamento comercial utilizando um laser de Nd:YAG de 50 W. A — folha acrílica; B — alumínio anodizado; C — marcação por decalque sobre plaqueta de plástico.

A soldadura é um campo em que o laser apresenta grandes vantagens — é possível realizá-la justapondo as peças topo a topo, sem o acrescimento de material do exterior. O processo pode ser realizado sob qualquer tipo de atmosfera, e, desde que se disponha de potência suficiente, é possível soldar até profundidades superiores a 10 mm com HAZ mínimo.

É nesta aplicação que se encontram os lasers de maior potência, chegando a atingir 20 kW em regime contínuo (lasers de CO₂). As previsões apontam para um grande aumento, como nos tratamentos térmicos.

4. Implantação de lasers no processamento de materiais

Com uma taxa de crescimento de cerca de 30 %, o mercado total de lasers só é comparável à evolução no mercado de computadores. O volume de mercado total de lasers, considerando como tal apenas o laser propriamente dito, isto é, a fonte de radiação, situou-se em 1984 em 363 MUS\$, dos quais cerca de 104 MUS\$ são relativos a lasers para processamento de materiais. Para 1985 as previsões apontam respectivamente para 465 MUS\$ (total de lasers) e 140 MUS\$ (lasers para processamento de materiais).

O volume total de vendas de lasers de CO₂ está previsto crescer de 90 MUS\$ (1984) para 110 MUS\$ (1985), constituindo assim a dianteira de todos os tipos de lasers, logo seguidos dos Nd:YAG para os quais se prevê um aumento de vendas de 85 MUS\$ (1984) para 100 MUS\$ (1985). Em ambos estes casos, mais de 60 % daqueles lasers são destinados a processamento de materiais.

É de referir ainda neste contexto o caso dos lasers excímeros. A sua introdução no domínio do processamento de materiais está ainda muito no início. Emitindo na região UV, permitem processamento de elevada precisão com elevadas intensidades a potências médias relativamente modestas de praticamente todos os materiais. A experiência com eles adquirida neste tipo de aplicações é, no entanto, ainda reduzida.

Está estimado em cerca de 6200 o número de lasers processadores de materiais instalados nos Estados Unidos da América, dispersos pelas mais variadas indústrias, desde cigarros, têxtil, produtos farmacêuticos, todo o tipo de metalo-

mecânica, etc. Avalia-se em cerca de 1200 os instalados na Europa, onde a maior concentração se localiza naturalmente nos países mais industrializados como RFA, França e Reino Unido. No Japão estarão instalados cerca de 800 equipamentos.

Portugal ocupa neste momento uma posição muito modesta neste contexto. Temos conhecimento de uma unidade de Nd:YAG utilizada no corte de diamantes, uma do mesmo tipo mas associada a um sistema de gravação, instalada numa empresa do ramo da mecânica de precisão, e três lasers de CO₂ de baixa potência (entre 50 W e 100 W) instalados em unidades fabris da indústria têxtil de confecções.

Esta tão reduzida introdução de lasers em Portugal está certamente ligada ao deslocamento do binómio investimento demasiadamente elevado — mão-de-obra relativamente barata no sentido desta. Por outro lado, o facto de a tecnologia laser ser uma das mais avançadas e não haver entre nós muitas pessoas familiarizadas com ela, faz encarar a sua adopção com bastante reserva.

Dada a sua flexibilidade de adaptação, a tecnologia do processamento de materiais por laser está naturalmente indicada em todos os casos em que seja reduzido o número de peças a produzir — protótipos de desenvolvimento, séries reduzidas, adaptação a necessidades específicas. Nestas circunstâncias nem sempre será rentável uma unidade industrial lançar-se num investimento tão vultoso como o representado por uma máquina a laser.

Nos países tecnicamente mais desenvolvidos assiste-se à proliferação dos «centros laser» («laser shops»), oficinas de pequena ou média dimensão dispostas de uma ou várias máquinas-ferramenta a laser e que vendem serviços de processamento por laser em regime de subcontrato. Também na vizinha Espanha se assiste já ao aparecimento de iniciativas deste género.

5. Conclusão

A interacção entre a radiação laser intensa e a matéria constitui um fenómeno térmico

relativamente complexo, que permite o processamento de materiais, em muitas circunstâncias bem para além dos limites de possibilidade das tecnologias convencionais. A experiência acumulada neste domínio nos últimos quinze anos tem fomentado a introdução de máquinas de diversas dimensões para processamento de materiais por laser. Encontram aplicação essencialmente lasers de CO₂ de potências compreendidas entre pouco mais de uma dezena de watts até algumas dezenas de quilowatts, operando em regime contínuo, lasers de Nd:YAG até algumas centenas de watts, operando em regime contínuo ou pulsado e, mais recentemente, lasers excímeros, emitindo na região de UV em regime pulsado.

Na generalidade o processamento de materiais por laser é uma técnica muito versátil, em muitos casos vocacionada para pequenas séries, produzindo um bom acabamento, permitindo um «trabalho limpo» em que não há desgaste de ferramentas, e, como processo térmico, resultando em zonas termicamente afectadas muito reduzidas. Se bem que o custo de investimento inicial de uma máquina a laser seja elevado, os custos de exploração e manutenção são normalmente baixos. Os opositores de máquinas-laser apontam frequentemente como factor negativo o seu baixo rendimento energético — a eficiência de lasers de CO₂ raramente ultrapassará 25 %, situando-se mais frequentemente na zona de 15 %, no caso Nd:YAG é até de 1 % a 3 %; o rendimento total de uma máquina a laser é, no entanto, ainda substancialmente menor devido aos subsistemas associados (arrefecimentos, vácuo, circulação de gás, etc.). Sem contestar este facto, diremos, porém, que mais interessante que a eficiência do laser ou da máquina é a eficiência do processo, isto é, a razão entre a energia absorvida no processo e a absorvida no sistema. Como a radiação emergente de uma fonte laser pode ser dirigida e concentrada sobre o alvo com perdas muito

pequenas, e a energia posta em jogo pode ser fortemente concentrada sobre o processo realmente interessante, reduzindo ao mínimo os efeitos secundários (p. ex.º deformações, zonas termicamente afectadas mais ou menos extensas, etc.), o aspecto da eficiência energética é certamente em muitos casos favorável ao laser como processador de materiais.

Reconhece-se menor eficiência energética no corte por laser do que no corte mecânico; a soldadura por laser apresenta, pelo contrário, maior eficiência energética que a soldadura a arco. No caso dos tratamentos térmicos, o laser pode ser energeticamente mais eficiente que o tratamento em forno desde que o feixe só seja aplicado em zonas localizadas.

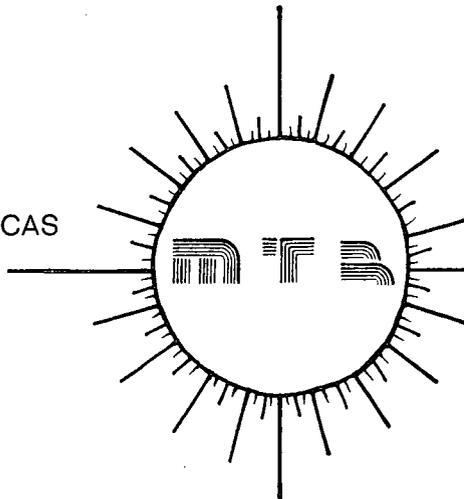
BIBLIOGRAFIA

- S. S. CHARSCHAN — *Lasers in Industry*, Van Nostrand Reinhold Company, 1972.
 J. F. READY — *Industrial Applications of Lasers*, Academic Press, 1978.

- The Engineering Staff of Coherent, Inc, Lasers-Operation, Equipment, Application and Design*, McGraw Hill, 1980.
 E. A. METZBOWER, ed. — *Source Book on Applications of the Laser in Metalworking*, American Society for Metals, 1981.
 M. F. KIMMITT, ed. — *Proceedings of the 1st International Conference on Lasers in Manufacturing*, IFS (Publications) Ltd., 1983.
 E. A. METZBOWER, ed. — *Lasers in Materials Processing*, American Society for Metals, 1983.
 VDI Berichte 535, Materialbearbeitung mit CO₂ — Hochleistungslasern, VDI, 1984.
 H. KOEBNER, ed. — *Industrial Applications of Lasers*, John Wiley & Sons, 1984.
 G. HERZIGER — *Werkstoffbearbeitung mit Laserstrahlung, Teil 1, Feinwerktechnik & Messtechnik*, Vol. 91, n.º 4, 156-162 (1983).
 EPRI—Electric Power Research Institute, Assessment of Materials-Processing Lasers, EM-3465, EPRI 1984.
 E. BEYER, P. LOOSEN, R. POPRAWA, G. HERZIGER — *Entwicklung der Lasertechnik und Bedeutung für die Materialbearbeitung, Laser und Optoelektronik*, vol. 17, n.º 3, 274-277 (Sept. 1985).

EQUIPAMENTO ELECTRO-ÓPTICO

MESAS ÓPTICAS



LASERS

(He-Ne; Ar; N₂)

COMPONENTES ÓPTICAS E MECÂNICAS

CONSULTORIA E ASSISTÊNCIA TÉCNICA

Peça-nos informações detalhadas • Telef. 691116/667437 • Telex 26250
 M. T. Brandão, Lda. • Praça Pedro Nunes, 94 • 4000 Porto - PORTUGAL