

Determinação da absorção do feixe laser em ensaios de refusão em regime contínuo

M. Lima^(*) e J.D. Wagnière^(*)

Resumo Este trabalho estuda a absorção do feixe laser sobre a superfície de um ferro fundido branco por meio de ensaios calorimétricos. Um laser de CO₂, trabalhando no modo contínuo, foi utilizado para produzir um traço refundido sobre a superfície de um ferro fundido branco em intervalos de velocidade de varredura do feixe entre 0,01 e 1,00 cm/s. O registro da temperatura em função do tempo foi realizada por três termopares fixados à superfície inferior da amostra. Verificou-se que cerca de 13 % da radiação incidente sobre a superfície da amostra é absorvida em forma de calor, para um feixe com 0,65 mm de diâmetro, independentemente da velocidade de varredura do feixe. No caso do feixe com diâmetro de 1,11 mm, a absorção cai para cerca de 11 %.

Palabras clave: **Laser. Fusão. Absorção.**

Determinación de la absorción de haz láser en ensayos de refusión en régimen continuo

Resumen Se estudia la absorción del rayo láser por la superficie de una fundición blanca utilizando ensayos calorimétricos. Se utilizó un láser tipo CO₂ trabajando en modo continuo. Se realizaron trazos refundidos continuos en la superficie de la fundición blanca con velocidad de desplazamiento del haz láser comprendida entre 0,01 y 1,00 cm/s. Para el registro de la temperatura en función del tiempo se utilizaron tres termopares colocados sobre la superficie de la muestra. Se comprobó que, aproximadamente, el 13 % de la radiación incidente sobre la superficie de la muestra es absorbida en forma de calor, para un haz láser de 0,65 mm de diámetro, independientemente de la velocidad de paso del mismo. En el caso del haz láser de 1,11 mm de diámetro, la absorción disminuye a valores próximos al 11 %.

Palabras clave: **Láser. Fusión. Absorción.**

1. INTRODUÇÃO

A absorção do feixe laser sobre a superfície dos materiais é um parâmetro importante no processamento. O valor da absorção é definido como a razão entre a quantidade de energia que é efetivamente disponível para modificar a superfície do material e a energia incidente sobre a amostra.

Os metais absorvem mal os raios infravermelhos longínquos emitidos pelos lasers de CO₂ ($\lambda = 10,6 \mu\text{m}$), veja tabela 1. A absorção é inversamente proporcional à resistividade elétrica do material (1), portanto esta aumenta com a temperatura e, particularmente, sofre um aumento abrupto com a passagem do material base para o estado líquido. A rugosidade da superfície desempenha um papel

importante na absorção; o máximo valor de absorção é observado quando a rugosidade da superfície é da ordem do comprimento de onda do laser (2). Para uma interface perfeitamente polida, a absorção é dada pela lei de Branson (3):

$$\beta = 0,365 \cdot \sqrt{\frac{\rho}{\lambda}} - 0,0667 \cdot \frac{\rho}{\lambda} + 0,0006 \cdot \sqrt[3]{\left(\frac{\rho}{\lambda}\right)} \quad [1]$$

Onde: ρ é a resistividade elétrica e λ é o comprimento de onda do laser.

Levando-se em consideração a equação 1, o comportamento da absorção segundo a temperatura do substrato para o Fe puro é apresentado na figura 1.

No processo de refusão, a proporção relativa de sólido e líquido iluminado pelo feixe depende da velocidade de deslocamento. Como as absorções do líquido e do sólido são diferentes, a absorção global

^(*) Swiss Federal Institute of Technology. C.P. 110 - CH-1015 - Lausanne (Suíça).

TABLA I.— Valores de la absorción del haz en los principales láseres comerciales para algunos metales a 20 °C.

TABELA I.— Valores de absorção do feixe dos principais laseres comerciais para alguns metais a 20 °C [Duley, 1983].

Metal	Absorção			
	Ar ⁺ (500 nm)	Rubi (700 nm)	Nd:YAG (1000 nm)	CO ₂ (10µm)
Alumínio	0,09	0,11	0,08	0,019
Cobre	0,56	0,17	0,10	0,015
Chumbo	0,38	0,35	0,16	0,045
Ferro	0,68	0,64	—	0,035
Titânio	0,48	0,45	0,42	0,080
Tungstênio	0,55	0,50	0,41	0,026

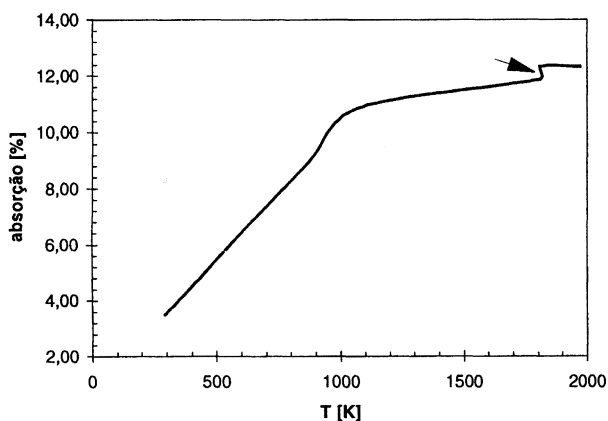


FIG. 1.— Absorção teórica do laser de CO₂ para o Fe puro conforme apresentado na equação 1. Os dados de resistividade foram obtidos em Iida e Guthrie [1988] e no Smithels Handbook [1983]. A seta indica a descontinuidade referente a fusão.

FIG. 1.— Absorción teórica del láser de CO₂ para el hierro puro conforme la ecuación 1. Los datos de la resistividad fueron obtenidos en Iida e Guthrie (4) en Smithels Handbook (5). La flecha indica una discontinuidad debido a la fusión.

observada deve também estar relacionada a esta velocidade de tratamento. Nota-se, também, que outros fatores podem influenciar a absorção como, por exemplo, a formação de camadas de óxido, as quais contribuem para aumentar a absorção, e a polarização do feixe laser, pois a componente paralela ao plano de incidência é melhor absorvida que a componente perpendicular. Em geral, a absorção nos aços é da ordem de 15 % (2).

Uma vez que a temperatura superficial atinge o ponto de vaporização do material, pode se formar

no banho líquido um canal de vapor desde que se produza um equilíbrio de forças entre a tensão de superfície e a pressão de vapor. Este mecanismo é chamado de *key hole*. Devido às múltiplas reflexões que se produzem, o *key hole* se comporta como um corpo-negro e a absorção chega a ordem de aproximadamente 75 %. Este fenômeno se produz quando a intensidade do feixe laser está entre 0,5 e 5 MW/cm² e a velocidade de deslocamento do espécime é suficiente para garantir a sua estabilidade (> 5 mm/s) (6). A formação desses *key holes* é importante nos processos de corte e perfuração de chapas.

Uma vez que a intensidade do feixe ultrapassa um valor crítico o campo elétrico se torna tão intenso que pode provocar a formação de um plasma. Ao ar seco, necessita-se de uma densidade de potência da ordem de 10¹⁰ W/cm² para gerar um plasma estável, porém a presença de vapores metálicos podem favorecer o seu aparecimento. O plasma absorve o raio laser e o reemite num comprimento de onda menor que o original (< 10,6 µm), melhorando a absorção pelos metais (7). Neste caso, a absorção global se torna relativamente grande, a menos que a intensidade de feixe seja muito elevada. No caso de potências elevadas, o plasma pode gerar Ondas de Combustão Assistidas por Laser (Laser Supported Combustion Waves, velocidade subsônica e com densidade de potência maior que 10⁵ W/cm²) ou Detonação Assistida por Laser (Laser Supported Detonation, velocidade supersônica e com densidade de potência maior que 10⁷ W/cm²) que agem como uma tela, ocultando totalmente a iluminação do laser sobre a peça (2). A ocorrência de plasma pode ser minimizada pela utilização de um gás protetor, neste caso o He é mais eficaz que o O₂ e que o Ar.

A absorção laser pode ser medida por elipsometria (1) ou por calorimetria (8). O último método é o utilizado no presente trabalho. O método de medida da absorção por calorimetria consiste em registrar a curva de temperatura em função do tempo, obtida quando uma peça (suficientemente pequena para ser considerada isotérmica) é aquecida através de um longo pulso laser. A peça em tratamento é considerada um calorímetro e a determinação da potência introduzida é obtida pelo aumento da sua temperatura. Este procedimento é possível devido a alta condutibilidade térmica dos metais. Assim, pouco após o laser ter passado sobre a amostra, a energia absorvida na zona influenciada pelo laser é distribuída para o volume do material, a fim de uniformizar a temperatura no espécimen.

2. MATERIAIS E MÉTODOS

A liga utilizada neste estudo é um ferro fundido branco com composição Fe - 3,48 % C - 1,04 % Si (em peso). A microestrutura da liga é composta de dendritas primárias de austenita numa matriz ledeburítica.

Os ensaios de absorção foram realizados conforme metodologia apresentada por Frenk et al. (8). As amostras são termicamente isoladas através de um empacotamento de alumina; apenas a superfície a ser tratada é exposta ao ambiente. Três termopares são fixados na superfície oposta àquela a ser tratada, monitorando constantemente a evolução da temperatura com o tempo. Uma figura esquemática do ensaio é apresentada na figura 2. Quando o traço é executado, o material se aquece, produzindo um gráfico semelhante ao mostrado na figura 3.

A amostra é empregada como um calorímetro e a absorção é calculada através da equação:

$$\bar{\beta} = \frac{mC_p(T_{\max} - T_a)}{P \cdot t_i} \quad [2]$$

Onde: $\bar{\beta}$ é a absorção média da amostra, m é a massa do espécimen, C_p é o calor específico (em J/kgK), T_{\max} é a temperatura máxima atingida pela amostra, obtida extrapolando-se as curvas de $T \times t$ (no caso do exemplo apresentado na figura 5.9, $T_{\max} = 54$ °C), T_a é a temperatura ambiente, P é a potência nominal e t_i é o tempo de interação^(*).

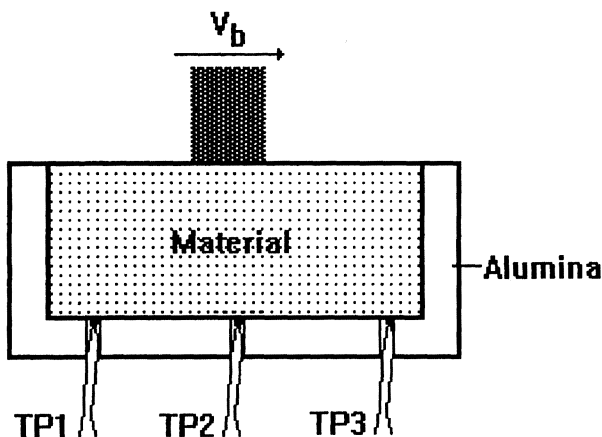


FIG. 2.—Desenho esquemático representando o ensaio de medida da absorção.

FIG. 2.— Esquema del dispositivo experimental para la medida de la absorción.

(*) Tempo em que o laser ficou ligado.

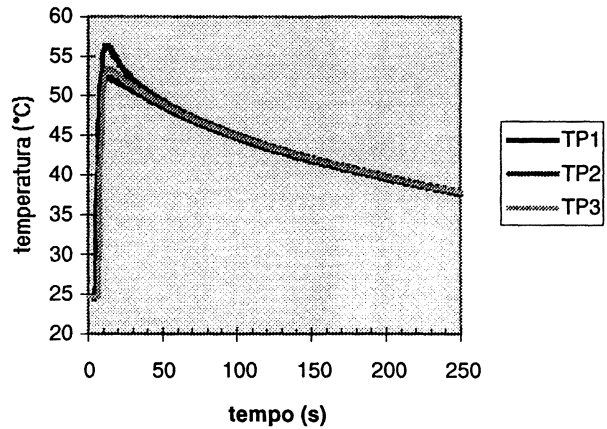


FIG. 3.— Evolução temporal da temperatura registrada pelos termopares na amostra sujeita a refusão a laser. $V_b = 1$ cm/s. $P_{\text{nom}} = 620$ W. $\beta = 12,49$ %.

FIG. 3.— Evolución temporal de la temperatura registrada en los termopares en la muestra refundida a láser. $V_b = 1$ cm/s. $P_{\text{nom}} = 620$ W. $\beta = 12,49$ %.

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os parâmetros de processamento e os resultados dos ensaios de absorção na amostra são apresentados na tabela 2.

Onde: V_b é a velocidade de varredura do feixe, P_{nom} é a potência nominal, P_{med} é a potência medida por meio de um potenciômetro de feixe específico para o laser de CO₂, \varnothing é o diâmetro do feixe, m é a massa do espécimen, L é o comprimento total do traço de tratamento, t_p é o tempo de interação (equivalente ao tempo de pulso), T_{\max} é a máxima temperatura atingida na amostra e β é a absorção.

Para o cálculo de β , utilizou-se a equação 2. Os valores do calor específico das ligas, C_p (em J/kgK), foram obtidos através da base de dados ThermoCalc (9) e são:

$$C_p = 450,6 + 0,23329 \cdot T$$

para a liga Fe1Si35C

$$C_p = 452,89 + 0,23342 \cdot T$$

para a liga Fe3Si35C

Os ensaios mostram boa reprodutibilidade, em relação a pequenas mudanças na potência do laser e na massa do espécimen, conforme pode ser observado na tabela 2. A absorção média foi de $13,6 \pm 0,8$ % e $11,3$ %, para diâmetros de feixe de $0,65$ mm e $1,11$ mm, respectivamente. Os valores da absorção, com diâmetro de feixe de $0,65$ mm, são independentes da velocidade de varredura num intervalo entre 1 e $0,01$ cm/s. Em termos gerais, os

TABLA II.– Parámetros y resultados de los análisis de la absorción.

TABELA II.– Parâmetros e resultados das análises de absorção.

Corrida	V_b (cm/s)	P_{nom} (W)	P_{med} (W)	ϕ (mm)	m (g)	$L t_p$ (mm)	(s)	$T_{max} \beta$ (°C)	(%)
Fe1Si35C-1	1,00	600	550	0,65	19,36	34	3,4	48	12,46
Fe1Si35C-2	1,00	620	575	0,65	19,28	36	3,6	54	12,49
Fe1Si35C-3	0,10	510	465	0,65	19,28	10	10,0	92	14,50
Fe1Si35C-4	0,10	510	465	0,65	9,50	10	10,0	168	13,65
Fe1Si35C-5	0,01	400	370	0,65	9,50	2	20,0	255	13,86
Fe1Si35C-6	0,01	510	465	1,11	9,50	2	20,0	260	11,27

valores medidos de absorção estão próximos aos valores normalmente encontrados na literatura (3), ou seja, 11-15 % nas ligas ferrosas em regime CO_2 -CW.

A equação 1 permite calcular a absorção em função da resistividade e do comprimento de onda. Utilizando-se esta equação e introduzindo-se os valores de resistividade do Fe puro(4, 5), obtém-se uma absorção média no líquido de cerca de 12,3 %. Este resultado é bastante próximo àqueles obtidos experimentalmente, para $\phi = 0,65$ mm, conforme apresentado na tabela 2. O decréscimo no valor da absorção para um diâmetro de feixe de 1,11 mm, em relação a 0,65 mm, está associado a maior quantidade de energia distribuída na região sólida, onde a absorção é efetivamente menor que no líquido.

Observando-se a saída de potência no ressonador, por meio de um osciloscópio, verifica-se que existe um transiente inicial de potência devido à alta reflexibilidade do substrato frio. Com o prosseguimento do processo, a reflexão do feixe diminui, pois o substrato se aquece e a reflexão se faz de modo difuso.

Voltando à tabela 2, verifica-se que o tratamento laser não provoca um aquecimento expressivo no volume da amostra, mesmo em tempos de interação relativamente longos. Esta é uma vantagem evidente do processamento laser, por exemplo, quando se trata superfícies próximas à juntas brasadas ou peças poliméricas.

4. CONCLUSÕES

Ensaio de absorção laser sobre a superfície de ferros fundidos brancos foram realizados utilizando

o método de calorimetria. Os resultados das análises das curvas de resfriamento em função do tempo indicam que a absorção média do feixe laser sobre a superfície do ferro é de $13,6 \pm 0,8$ % para um feixe de 0,65 mm de diâmetro. A experiência realizada para um diâmetro de feixe de 1,11 mm permitiu verificar uma absorção de cerca de 11 %. O aquecimento do substrato foi inferior a 300 °C, mesmo para tempos de interação longos.

REFERENCIAS

- (1) DREEHSEN, H.G., HARTWICH, C., SCHAEFER, J.H. e UHLENBUSCH, J. Journal of Applied Physics, Vol. 56, 1984, pp. 238-240.
- (2) MAGNIN, P. TRAITEMENT DE SURFACE PAR LASER: REVUE CRITIQUE DE LA LITTÉRATURE, Documento Interno, Centre de Traitement des Matériaux par laser, 1993.
- (3) KHAN, P.A.A. e DEBROY, T. Metallurgical Transactions, Vol. 16B, 1985, pp. 853-856.
- (4) IIDA, T. e GUTHRIE, R.I.L. THE PHYSICAL PROPERTIES OF LIQUID METAL ALLOYS, Oxford Science Publ., 1988, p. 232.
- (5) SMITHELLS METALS REFERENCE HANDBOOK, 6a. edição, Editado por E.A. Brandes, Inglaterra, 1983, p. 14-4.
- (6) BANAS, C. INDUSTRIAL LASER HANDBOOK, Edição 1986, Ed. D. Belforte e M. Levitt, Penn Well Publ., 1986, pp. 69-86.
- (7) DULEY, W.W. LASER PROCESSING AND ANALYSIS MATERIALS, Plenum Press, 1983, pp. 69-78.
- (8) FRENK, A., HOADLEY, A.F.A. e WAGNIERE, J.-D. Metallurgical Transactions, Vol. 22B, 1989, pp. 139-141.
- (9) THERMOCALC, Base de Dados Termodinâmicos, versão J, Royal Institute of Technology, Estocolmo, Suécia, 1994.