



Carta de Processamento na Fusão a Laser da Liga Ti-6Al-4V

Rodrigo Andrade Paes^{1,2}, Rogério de Moraes Oliveira^{1,3}, Sérgio Luiz Mineiro^{1,4}, Eder Paduan Alves⁵

¹Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, SP, Brasil

²Aluno de Mestrado do curso de Ciência e Tecnologia de Materiais e Sensores – CMS

³Pesquisador do Laboratório Associado de Plasmas – LABAP

⁴Pesquisador do Laboratório Associado de Sensores e Materiais – LABAS

⁵Instituto de Aeronáutica e Espaço, São José dos Campos, SP, Brasil

ranpaes@yahoo.com.br

Resumo. O objetivo deste trabalho foi produzir uma carta de processamento na fusão com laser Yb:fibra em chapas de Ti-6Al-4V com 2 mm de espessura. Empregou-se aportes térmicos na faixa de 5 – 100 J/mm, obtendo-se 20 amostras sob condições distintas. Realizou-se a metalografia e a microscopia óptica da seção transversal das amostras de fusão, medindo-se as respectivas áreas da zona fundida com o auxílio do software ImageJ. Avaliou-se a eficiência de fusão em termos do volume de metal fundido por unidade de energia para cada condição de fusão. Determinou-se uma equação para estimar a área da zona fundida da amostra de fusão em função do aporte térmico. O aporte térmico de 25 J/mm apresentou a maior eficiência de fusão (0,058 mm³/J), possibilitando a penetração total da espessura da chapa. Para aportes térmicos superiores à 25 J/mm, ocorreu a redução gradual da eficiência de fusão devido às perdas térmicas.

Palavras-chave: Fusão a laser; Laser à fibra; Eficiência de fusão; Liga Ti-6Al-4V.

1. Introdução

A soldagem a laser da liga Ti-6Al-4V é um processo de junção eficaz para obter estruturas aeroespaciais, devido à alta precisão do feixe laser e à qualidade superior da solda resultante. O processo também se destaca pelas reduzidas deformações e distorções em comparação aos demais processos de soldagem por fusão [Auwal et al. 2018].

No entanto, a soldagem a laser da liga Ti-6Al-4V requer controle sobre as distribuições heterogêneas de temperaturas, composições químicas e tensões residuais resultantes. Além disso, o aporte térmico influencia diretamente a microestrutura e as propriedades mecânicas resultantes, pois a liga Ti-6Al-4V possui baixa condutividade térmica [Auwal et al. 2018].

Portanto, é essencial avaliar a influência do aporte térmico sobre a eficiência de fusão do processo, de modo a reduzir os efeitos indesejáveis do excesso de temperatura. Assim, o objetivo principal deste trabalho foi confeccionar uma carta de processamento para a fusão a laser, de modo a auxiliar posteriormente a soldagem autógena da liga Ti-6Al-4V.

2. Metodologia

2.1. Material

O material utilizado neste trabalho foi a liga Ti-6Al-4V, grau 5 segundo a norma ASTM B265, na condição recozida. A liga estava sob a forma de chapas com dimensões de 100 mm



de comprimento, 25 mm de largura e 2 mm de espessura, tendo sido fornecido pela Divisão de Fotônica do Instituto de Estudos Avançados (IEAv).

2.1.1. Caracterização da composição química

Foi realizada a caracterização da composição química da liga Ti-6Al-4V por fluorescência de raios X por dispersão em energia (*Energy Dispersive X-ray Fluorescence – EDXRF*), conforme a metodologia proposta pela norma ASTM E539.

O espectrômetro de fluorescência de raios-X utilizado (marca *PANalytical*, modelo *Axios Advanced*) está instalado no Laboratório de Fluorescência e Difração de Raios-X da Divisão de Materiais do Instituto de Aeronáutica e Espaço (IAE).

2.2. Fusão autógena com *laser* Yb:fibra

Os dispositivos utilizados na fusão autógena a *laser* estão instalados no Laboratório Multiusuário de Desenvolvimento e Aplicações de *Lasers* e Óptica (DedALO) da Divisão de Fotônica do IEAv.

O equipamento utilizado na fusão foi um *laser* Yb:fibra (marca IPG, modelo YLR-2000S) com 2,0 kW de potência nominal de saída, operando em modo contínuo e a configuração laboratorial empregada é esquematizada na Figura 1.

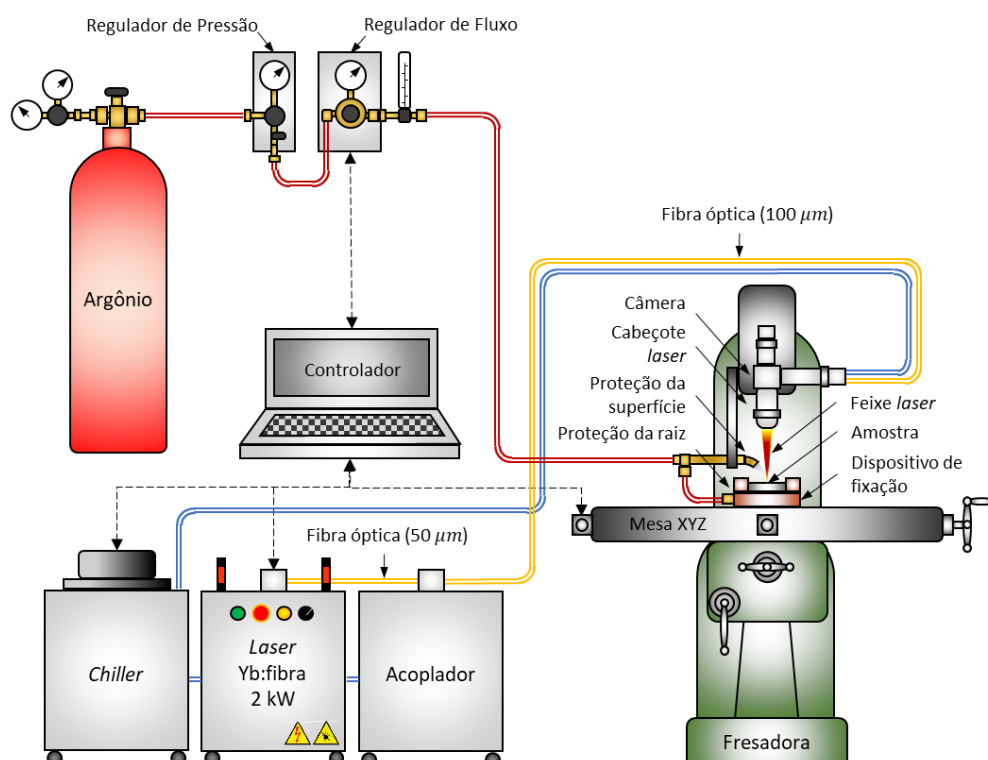


Figura 1. Configuração laboratorial empregada nos experimentos.

2.2.1. Definição dos parâmetros de processo e condições de fusão

De modo a realizar a fusão autógena a *laser* na liga Ti-6Al-4V, foram definidos os respectivos parâmetros de processo e condições de fusão da Tabela 1.

**Tabela 1. Parâmetros e condições empregados na fusão a laser.**

Parâmetros ópticos do feixe <i>laser</i>			
Comprimento de onda	1070 nm (Yb:fibra)		
Perfil	Gaussiano		
Distância focal	160 mm		
Foco	Superfície		
Diâmetro do <i>spot</i> à $1/e^2$	100 μm		
Fator de qualidade M^2	9,98 – 15,85		
Parâmetros do sistema de proteção gasosa			
Gás inerte de proteção	Argônio		
Fluxo	10 L/min.		
Posição de distribuição	Superfície		
Fusão a <i>laser</i>			
Tipo	Autógena		
Posição do feixe <i>laser</i>	Topo		
Modo	Contínuo, <i>keyhole</i>		
Parâmetros da fusão a <i>laser</i>			
Condição	Potência, P (W)	Velocidade, V (mm/min.)	Aporte térmico, A_t (J/mm)
1	600	7200	5
2	600	3600	10
3	700	2800	15
4	700	2100	20
5	800	1920	25
6	800	1600	30
7	900	1543	35
8	900	1350	40
9	1000	1333	45
10	1000	1200	50
11	1100	1200	55
12	1100	1100	60
13	1200	1108	65
14	1200	1029	70
15	1300	1040	75
16	1300	975	80
17	1400	988	85
18	1400	933	90
19	1500	947	95
20	1500	900	100
Densidade de potência do feixe <i>laser</i>			
Densidade de potência mínima	$1,53 \times 10^7 \text{ W/cm}^2$		
Densidade de potência máxima	$3,82 \times 10^7 \text{ W/cm}^2$		



Os aportes térmicos da Tabela 1 foram calculados para cada condição de fusão através da Equação 1:

$$A_t = \eta_t \frac{P}{V} \quad (1)$$

Na Equação 1, P representa a potência (em W) e V a velocidade do feixe *laser* (em mm/min.). O parâmetro η_t corresponde à eficiência térmica do processo, sendo um valor compreendido entre 0 – 1. Segundo Bertolotti, a eficiência térmica na fusão a *laser* em modo de penetração profunda devido à formação do *keyhole* é em torno de 90% ($\eta_t = 0,9$). No entanto, esta pode variar significativamente de acordo com o material e os parâmetros de processo, sendo necessário avaliá-la especificamente para cada condição de fusão [Bertolotti 1983].

Neste trabalho, a eficiência térmica na fusão a *laser* da liga Ti-6Al-4V foi considerada como sendo máxima ($\eta_t = 1$), pois a contribuição efetiva desta foi avaliada experimentalmente através da eficiência de fusão (η_f). A eficiência de fusão foi determinada em razão do volume de metal fundido por unidade de energia para cada condição de fusão descrita na Tabela 1.

2.2.2. Realização da fusão autógena com *laser* Yb:fibra

Inicialmente, a posição do feixe *laser* foi alinhada em relação ao dispositivo de fixação das chapas e à mesa de trabalho, cujos eixos são controlados numericamente por computador. Cada chapa foi fixada ao conjunto conforme a Figura 2.

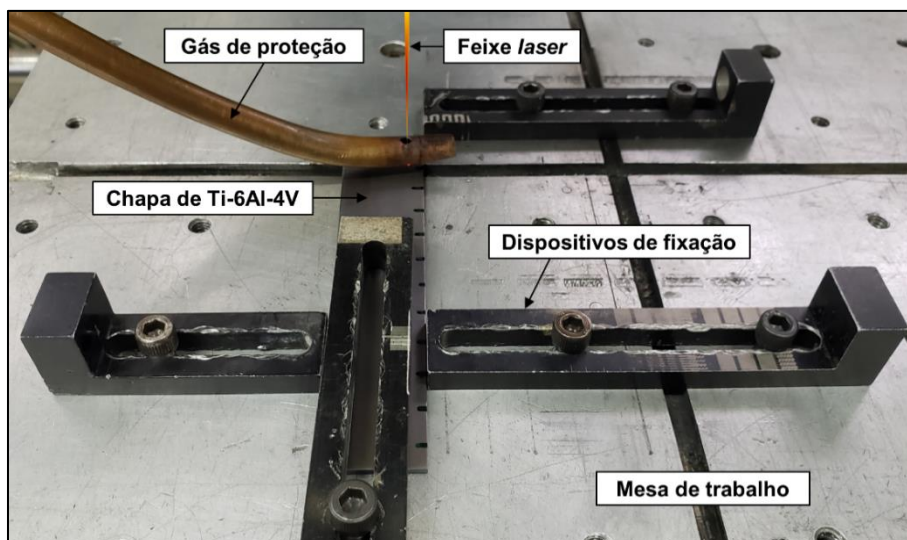


Figura 2. Fixação da chapa de Ti-6Al-4V sobre a mesa de trabalho.

Em seguida, o feixe *laser* de perfil gaussiano foi focalizado sobre a superfície de cada chapa, de modo que sua potência estivesse concentrada em um *spot* de 100 μm de diâmetro, correspondendo à $1/e^2$ de intensidade.

Durante a fusão, o feixe *laser* percorreu linearmente a largura de cada chapa, resultando na formação de um volume fundido e ressolidificado, semelhante ao que ocorre no processo de soldagem a *laser*. Doravante, tal volume será denominado de amostra de fusão. As linhas de



centro das amostras de fusão distavam igualmente de 10 mm. Simultaneamente, o gás inerte de proteção foi distribuído sobre a superfície das chapas.

A energia do feixe *laser* foi depositada sobre a liga Ti-6Al-4V, empregando-se aportes térmicos na faixa de 5 – 100 J/mm, com incrementos de energia de 5 J/mm para cada condição de fusão subsequente. Ao total, foram obtidos 20 amostras de fusão conforme as condições definidas na Tabela 1.

2.3. Preparação metalográfica das amostras de fusão

As amostras de fusão tiveram suas seções transversais seccionadas. Em seguida, foi realizada a preparação metalográfica destes no Laboratório de Metalografia da Divisão de Fotônica do IEAv, conforme a metodologia exemplificada na Figura 3.

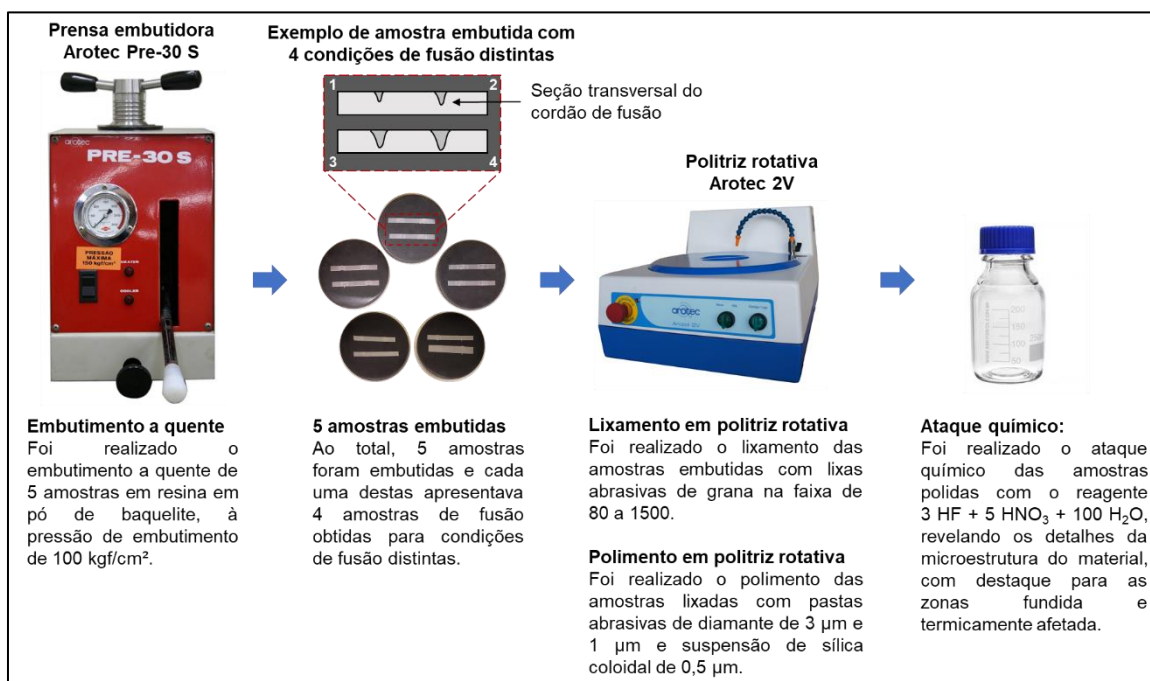


Figura 3. Metodologia de preparação metalográfica das amostras de fusão.

2.3. Macroscopia óptica e processamento digital das imagens

Para viabilizar a carta de processamento, foi realizada a macroscopia óptica da seção transversal das amostras de fusão em um microscópio digital (marca Zeiss, modelo Axio Imager.A2M) instalado no Laboratório de Microscopia da Divisão de Fotônica do IEAv.

A área da zona fundida na macrografia de cada amostra de fusão foi calculada com o auxílio do *software* de processamento digital ImageJ, conforme o exemplo da Condição 6 exibido na Figura 4. O *software* permite calibrar uma escala de comprimento de referência, medindo as dimensões em *pixels* e convertendo-as para o sistema métrico de unidade de área.

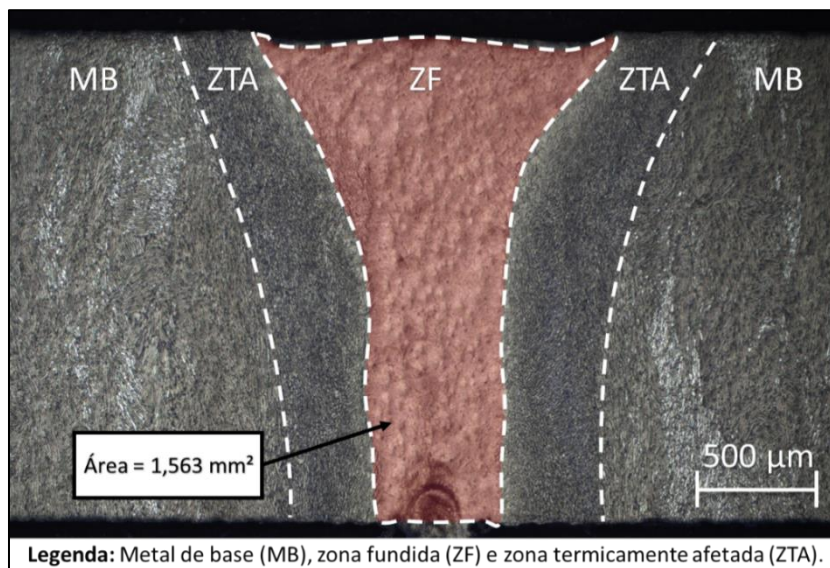


Figura 4. Cálculo de área da zona fundida na macrografia de uma amostra de fusão através do *software* ImageJ.

3. Resultados e Discussão

3.1. Caracterização da composição química da liga Ti-6Al-4V

O resultado da análise semi-quantitativa por EDXRF identificou a concentração química dos elementos presentes na liga Ti-6Al-4V conforme a Tabela 2.

Tabela 2. Resultado da análise semi-quantitativa por EDXRF.

	Elementos da liga Ti-6Al-4V (% em peso atômico)			
	Ti	Al	V	Fe
Teor nominal (ASTM B348)	Balanço	5,5 – 6,75	3,5 – 4,5	Máx. 0,4
Teor identificado por EDXRF	91,85	5,72	2,19	0,24

Analisando-se a Tabela 2, observa-se que a concentração percentual em peso atômico dos elementos identificados por EDXRF na amostra é próxima aos teores especificados na norma ASTM B348 para a liga Ti-6Al-4V. No entanto, o teor de V identificado apresenta uma diferença de cerca de 37,4% em relação ao teor mínimo de V especificado pela norma.

3.2. Aspecto macroscópico da fusão autógena com *laser* Yb:fibra

A Figura 5 apresenta o aspecto macroscópico das amostras de fusão obtidos para cada condição de fusão, sendo observados em relação à superfície no qual o feixe *laser* incidiu e à raiz da amostra de fusão.

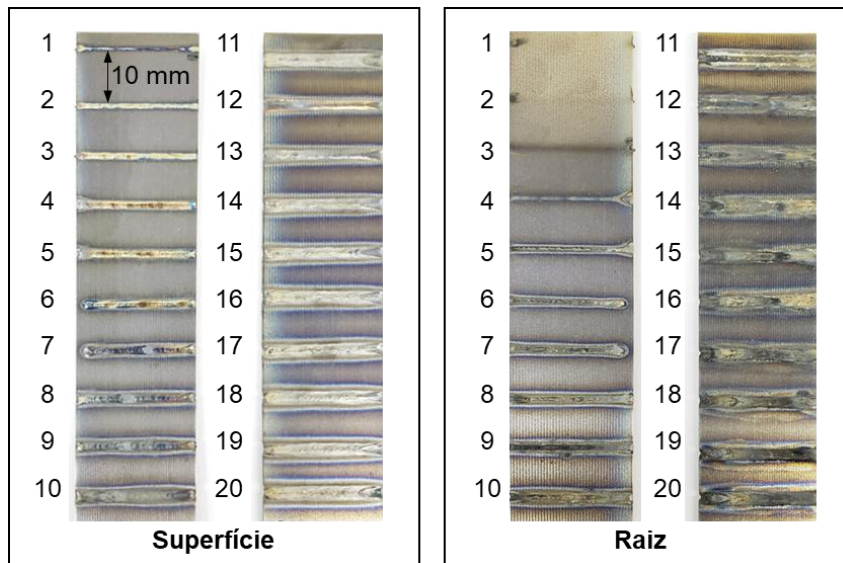


Figura 5. Aspecto macroscópico das amostras de fusão.

Analisando-se a Figura 5, constata-se que o aumento do aporte térmico para cada condição de fusão subsequente promoveu o aumento da espessura da amostra de fusão, do volume de metal fundido e da extensão da zona termicamente afetada, a qual é evidenciada pelo gradiente de cores. Além disso, observa-se que somente para aportes térmicos superiores a 25 J/mm (a partir da Condição 5) ocorreu a fusão com penetração total da espessura da chapa de 2 mm.

3.3. Cartas de processamento na fusão autógena a *laser*

Na Figura 6, é apresentada uma carta de processamento que indica o aumento de área da zona fundida de cada amostra de fusão em função da variação do aporte térmico empregado.

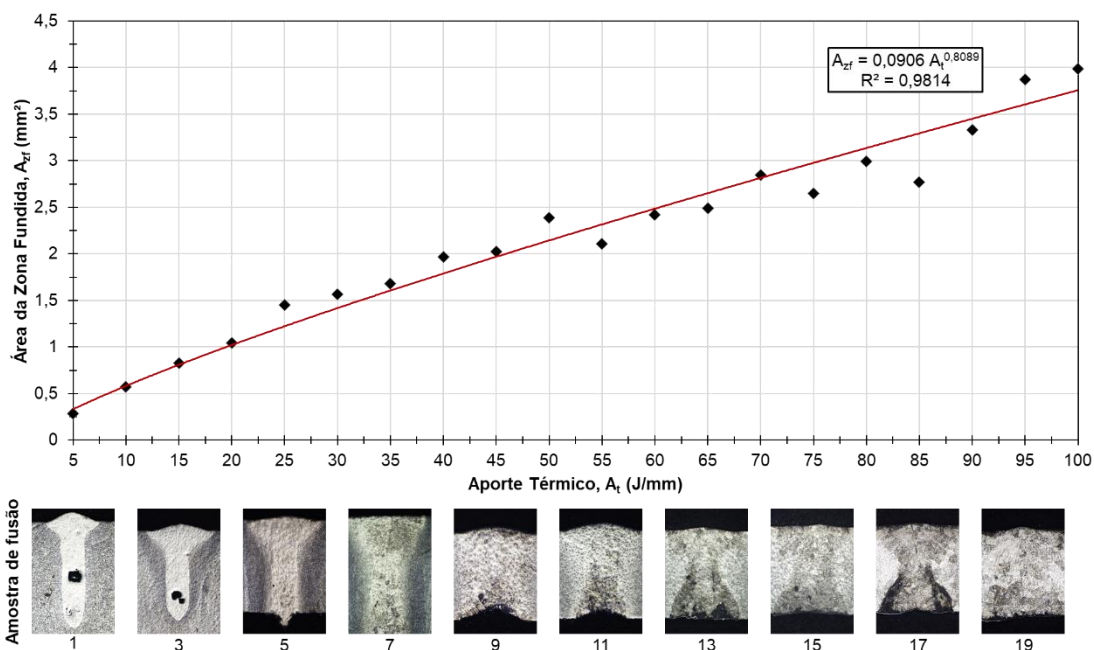


Figura 6. Área da zona fundida das amostras de fusão em função do aporte térmico.



Analisando-se o gráfico da Figura 6, observa-se que os dados foram analisados pelo método de regressão, de modo que a curva de tendência em vermelho fosse ajustada adequadamente ($R^2=98,14\%$) às medições experimentais obtidas. Assim, o aumento de área da zona fundida (A_{zf}) nas amostras de fusão em função do aporte térmico (A_t) ocorre proporcionalmente segundo a função potência da Equação 2:

$$A_{zf} = 0,0906 A_t^{0,8099} \frac{mm^{2,8099}}{J^{0,8099}} \quad (2)$$

A Equação 2 indica que, quanto maior for o aporte térmico, maior será a área da zona fundida da amostra de fusão. Consequentemente, maior será o volume de metal fundido. Porém, a Equação 2 não representa a eficiência de fusão em termos do volume de metal fundido por unidade de energia depositada pelo feixe *laser*. Conhecendo-se a área da zona fundida de cada amostra de fusão, é possível calcular para cada condição de fusão a respectiva eficiência de fusão (η_f) através da Equação 3:

$$\eta_f = \frac{A_{zf}}{A_t} \quad (3)$$

Logo, a eficiência de fusão em função do aporte térmico empregado é representada no gráfico da Figura 7:

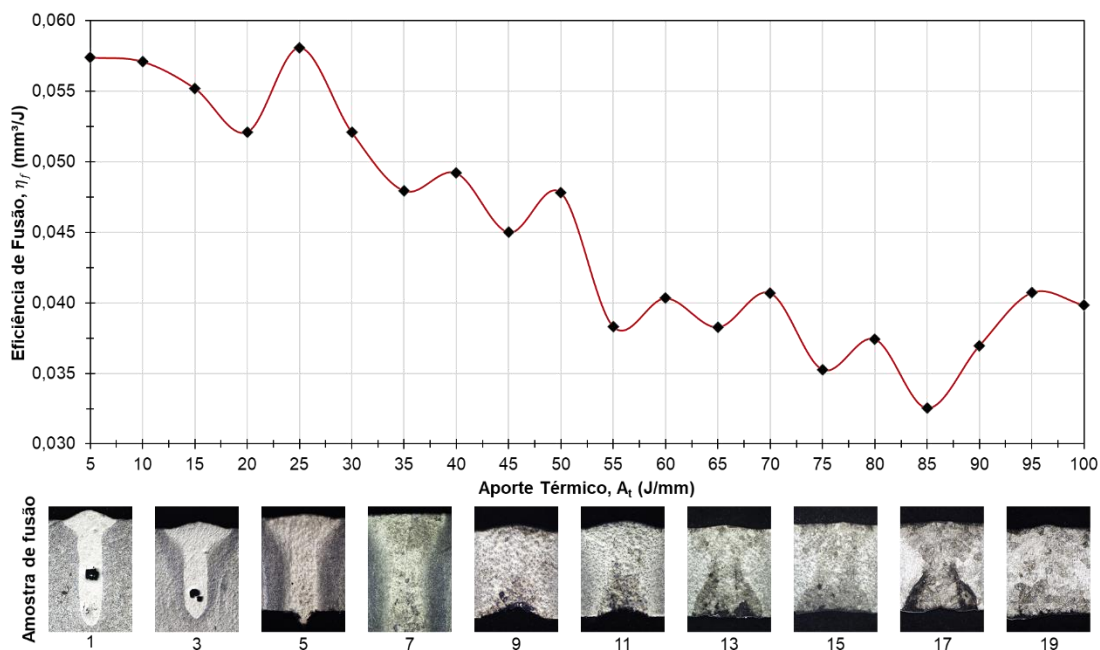


Figura 7. Eficiência de fusão em função do aporte térmico.

Analisando-se o gráfico da Figura 7, observa-se que a máxima eficiência de fusão ($\eta_f=0,058 \text{ mm}^3/\text{J}$) ocorre para o aporte térmico de 25 J/mm. Segundo Peretz, o aumento da eficiência de fusão observado pode ser explicado pelo acréscimo localizado de temperatura entre as fases envolvidas durante a fusão. Tal fenômeno se deve ao maior tempo de interação do feixe *laser* com o metal durante a fusão, atingindo mais altas temperaturas de processo [Peretz 1988].



Em outras palavras, o aumento de temperatura na região promove o aumento localizado da população de fótons no metal. Consequentemente, as trocas térmicas entre os fótons e os elétrons são acentuadas, reduzindo a refletividade e aumentando a absortividade e eficiência de fusão até certo grau [Peretz 1988].

Além disso, dois mecanismos de absorção são favorecidos pelo aumento do aporte térmico e contribuem para elevar a eficiência de fusão, sendo exemplificados na Figura 8 [Blackburn 2012; Kaplan 2009]:

- As múltiplas reflexões de Fresnel do feixe *laser* nas paredes do keyhole;
- A absorção de *bremsstrahlung* inverso pelo vapor metálico e pela pluma de plasma gerados no interior do *keyhole* e imediatamente acima da superfície metálica.

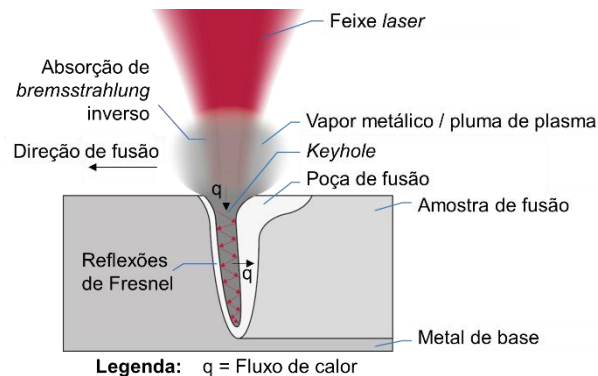


Figura 8. Mecanismos de absorção favorecidos pelo aumento do aporte térmico e que contribuem para elevar a eficiência de fusão.

Portanto, empregando-se o aporte térmico de 25 J/mm, é possível tanto fundir um volume metálico superior com maior eficiência de fusão, como atingir totalmente a profundidade de penetração da chapa de 2 mm.

Para aportes térmicos superiores a 25 J/mm, embora o feixe *laser* seja capaz de penetrar totalmente a profundidade da chapa de 2 mm, observa-se que há a redução gradual da eficiência de fusão. Assim, a menor eficiência de fusão observada ($\eta_f=0,033 \text{ mm}^3/\text{J}$) ocorre para o aporte térmico de 85 J/mm.

A redução gradual da eficiência de fusão com o aumento do aporte térmico pode ser explicada por perdas térmicas acentuadas por mecanismos combinados, tais como:

- Transferência de calor para fora da poça de fusão, a qual é promovida por condução, convecção e irradiação [Sparkes e Steen 2018];
- Escoamento de metal líquido a partir poça de fusão, conforme os defeitos evidenciados nas macrografias das amostras de fusão;
- Absorção excessiva de *bremsstrahlung* inverso pela pluma de plasma gerada acima da superfície metálica [Blackburn 2012];
- Desfocalização do feixe *laser* e espalhamento luminoso decorrente da interação dos fótons com plumas de plasma de maior densidade eletrônica [Blackburn 2012];
- Geração de ondas de choque a partir da colisão do feixe *laser* de alta densidade de potência com as fases envolvidas na fusão [Sparkes; Steen 2018];



- Fenômenos de turbulência na poça de fusão governados pelo efeito Marangoni, resultando na espalçamento de debris [Kidess et al. 2016].

4. Conclusão

Neste trabalho experimental, foi gerada uma carta de processamento fusão com *laser* Yb:fibra em chapas de Ti-6Al-4V, tendo como principais conclusões:

- Foi determinada uma equação para estimar a área da zona fundida da amostra de fusão em função do aporte térmico.
- O aporte térmico de 25 J/mm possibilitou a maior eficiência de fusão ($\eta_f=0,058 \text{ mm}^3/\text{J}$), permitindo a penetração total da chapa de espessura de 2 mm.
- Para aportes térmicos superiores à 25 J/mm, ocorreu a redução gradual da eficiência de fusão devido às perdas térmicas.

Referências

- ASTM International. (2019). ASTM E539 - 19 – Standard test method for analysis of titanium alloys by wavelength dispersive x-ray fluorescence spectrometry.
- ASTM International. (2020). ASTM B265 - 20a – Standard specification for titanium and titanium alloy strip, sheet, and plate.
- Auwal, S. T. et al. (2018). A review on laser beam welding of titanium alloys. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, v. 97, p. 1071-1098. Springer-Verlag, London.
- Bertolotti, M. (1983). Physical processes in laser-materials interaction. Nato Science Series B, v. 84, 512 p. Springer, New York.
- Blackburn, J. (2012). Laser welding of metals for aerospace and other applications. In: Chaturvedi, M. C. (Welding and joining of aerospace materials. Chap. 3, p. 75-108. Woodhead Publishing, Cambridge.
- Kaplan, A. (2009). Keyhole welding: The solid and liquid phases. In: Dowden, J; Schulz, W. (Eds.) The theory of laser materials processing: Heat and mass transfer in modern technology. Chap. 4, p. 89-112. Springer, Netherlands.
- Kidess, A. et al. (2016). Marangoni driven turbulence in high energy surface melting processes. International Journal of Thermal Sciences, v. 104, p. 412-422. Elsevier, Netherlands.
- Peretz, R. (1988). The preheating temperature parameter for deep penetration welding with high energy focused beams. Optics and Lasers in Engineering, v. 9, p. 23-34. Elsevier, England.
- Sparkes, M.; Steen, W. M. (2018). “Light” industry: An overview of the impact of lasers on manufacturing. In: Lawrence, J. Advances in laser material processing: Technology, research and applications. Chap. 1, p. 1-22. Woodhead Publishing.