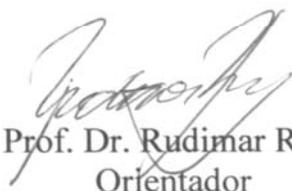


Tese apresentada à Pró-Reitoria de Pós-Graduação e Pesquisa do Instituto Tecnológico de Aeronáutica, como parte dos requisitos para obtenção do título de Mestre em Ciências no Curso de Pós-Graduação em Física, na Área de Física Atômica e Molecular.

**Aline Capella de Oliveira**

**MICROSSOLDAGEM EM CHAPAS FINAS UTILIZANDO UM  
LASER DE Cu-HBr**

Tese aprovada em sua versão final pelos abaixo assinados:



Prof. Dr. Rudimar Riva  
Orientador

Prof. Dr. Homero Santiago Maciel  
Pró-Reitor de Pós-Graduação e Pesquisa

Campo Montenegro  
São José dos Campos, SP – Brasil  
2006

**Dados Internacionais de Catalogação-na-Publicação (CIP)**  
**Divisão Biblioteca Central do ITA/CTA**

Oliveira, Aline Capella de  
Microsoldagem em chapas finas utilizando um laser de Cu-HBr / Aline Capella de Oliveira.  
São José dos Campos, 2006  
Número de folhas no formato 111f.

Tese de mestrado – Curso de Física e área de Física Atômica e Molecular –  
Instituto Tecnológico de Aeronáutica, 2006. Orientador: Dr. Rudimar Riva

1. Microsolda. 2. Laser pulsado. 3. Aço Inoxidável 304. I. Comando-Geral de Tecnologia Aeroespacial. Instituto Tecnológico de Aeronáutica. Divisão de Ensino Fundamental. II. Título: Microsoldagem em chapas finas utilizando um laser de Cu-HBr.

### **REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA –**

OLIVEIRA, Aline Capella de. **Microsoldagem em chapas finas utilizando um laser de Cu-HBr**. 2006. 111 páginas. Tese de Mestrado – Instituto Tecnológico de Aeronáutica, São José dos Campos.

### **CESSÃO DE DIREITOS –**

NOME DO AUTOR: Aline Capella de Oliveira

TÍTULO DO TRABALHO: Microsoldagem em chapas finas utilizando um laser de Cu-HBr

TIPO DO TRABALHO/ANO: Tese de Mestrado 2006

É concedida ao Instituto Tecnológico de Aeronáutica permissão para reproduzir cópias desta tese e para emprestar ou vender cópias somente para propósitos acadêmicos e científicos. O autor reserva outros direitos de publicação e nenhuma parte desta tese pode ser reproduzida sem a autorização do autor.

---

Aline Capella de Oliveira

Av. Francisco Martins Feitosa, 790 apto.43 – Vl. Lavínia – 08735-420 – Mogi das Cruzes – SP – Brasil

## **Microsoldagem em chapas finas utilizando um laser de Cu-HBr**

**Aline Capella de Oliveira**

Composição da Banca Examinadora:

Prof. Dr. Homero Santiago Maciel	Presidente - (ITA/CTA)
Prof. Dr. Rudimar Riva	Orientador - (IEAv/CTA)
Prof. Dr. Nicolau André Silveira Rodrigues	Membro Interno - (IEAv/CTA)
Prof. Dr. Milton Sérgio Fernandes de Lima	Membro Interno - (IEAv/CTA)
Prof. Dr. Wagner de Rossi	Membro Externo - (IPEN/USP)

**ITA**

## **Dedicatória**

Ao meu marido Paulo, que esteve sempre presente  
em todos os momentos desta empreitada.  
A minha filha Mariane, que me dá força e preenche  
minha vida de momentos de alegria.

## **Agradecimentos**

Ao meu orientador e amigo Dr. Rudimar Riva, por sua dedicação e paciência e, principalmente, por ter acreditado em mim.

Ao meu marido Paulo e à minha filha Mariane pela compreensão nos momentos em que não pude estar presente em suas vidas.

Ao professor Dr. Nicolau A. S. Rodrigues pela primeira oportunidade oferecida.

Ao professor Dr. Jayr Amorim pela permanente presteza e simpatia.

Ao professor Dr. Milton S. F. de Lima pela amizade e colaboração na análise metalográfica das amostras.

A Kelly, amiga de tantos anos, pela sempre pronta colaboração.

Aos colegas e amigos do IEAv pela colaboração direta ou indireta na realização deste trabalho, em particular:

- ao Getúlio por disponibilizar seu laboratório;
- ao Jaime pela disposição na resolução dos problemas relacionados ao laser;
- a Carmen, Elton, Márcio, Madalena, Elias e Tiago pela amizade, incentivo e colaboração;
- ao Néri pelo empréstimo dos equipamentos ópticos;
- ao Wander e Walter pela colaboração na execução dos experimentos;
- ao Guilherme, João, Lavras e Ferraz pela assistência técnica;
- ao IEAv pela infra-estrutura cedida;
- ao ITA pela permissão para a realização do trabalho;
- a CAPES pela concessão de uma bolsa de estudos;
- a PV Flex pelo apoio financeiro.

## Resumo

Este trabalho teve como objetivo investigar a viabilidade de um novo método de micro-soldagem de chapas finas utilizando um laser de Cu-HBr que emite pulsos intensos com duração de nanosegundos em alta taxa de repetição. Nos métodos tradicionais, a micro-soldagem de chapas finas é realizada com laser contínuos ou com pulsos de baixa intensidade e de longa duração ( $> 1\text{ms}$ ) que permitem um comprimento de difusão térmica da ordem da espessura das chapas. Lasers com pulsos curtos (10 a 100 ns) são utilizados preferencialmente em processos de corte e furação de materiais. Um amplo estudo experimental do processo de micro-soldagem com pulsos curtos foi realizado utilizando chapas de aço inoxidável (AISI 304) com espessuras entre 25  $\mu\text{m}$  e 100  $\mu\text{m}$ . As principais características do feixe do laser de Cu-HBr foram medidas em todas as condições experimentais, permitindo uma determinação precisa da intensidade do laser na região de micro-soldagem. Os resultados deste estudo indicaram que é possível controlar o intervalo de parâmetros do processo para se obter um cordão de solda com alta razão de aspecto e reduzida zona afetada termicamente. Foi desenvolvido um modelo teórico para explicar a interação de pulsos curtos emitidos com alta taxa de repetição no processo de soldagem. Os resultados deste modelo indicaram que embora a intensidade do laser de Cu-HBr seja suficiente para perfurar as chapas de aço, é possível controlar a geometria do furo de forma a que o material vaporizado fique aprisionado e condense nas paredes internas da cavidade perfurada. Nestas condições experimentais controladas as chapas finas de aço foram soldadas com potências médias de laser entre 10 e 20 W, muito inferiores aos valores utilizados pelos métodos tradicionais.

## Abstract

The objective of this work was to investigate the viability of a new method to micro-weld thin sheets using a high repetition rate Cu-HyBrID laser emitting intense nanoseconds pulses. In traditional methods, the micro-welding of thin sheets is obtained by using continuous or long pulses laser ( $> 1$  ms) that allows a thermal diffuse length comparable to the sheet thickness. Short pulse lasers (10 to 100 ns) are most used to drill and cut materials. A broad experimental study of micro-welding process using short laser pulses was conducted on stainless steel (AISI 304) thin sheets with thickness varying from 25  $\mu\text{m}$  to 100  $\mu\text{m}$ . The main characteristics of the Cu-HBr laser beam were measured for every experimental condition, allowing a precise determination of laser beam intensity on the micro-welding area. The results of the study demonstrated the possibility of controlling the process parameters in order to obtain penetration welds with high aspect ratio and reduced heat affected zone (HAZ). A theoretical model was developed to explain the interaction of short laser pulses emitted at high repetition rates on the micro-welding process. Model results indicated that however the high intensity of laser pulses is more than necessary to perforate the thin sheets, it is possible to control the hole geometry in a way that the vapor remains trapped and further condensate on the cavity inner walls allowing the welding of the sheets. In those controlled experimental conditions the thin sheets were welded using between 10 and 20 W of laser average power, that is much lower than the power used on traditional methods.

## Sumário

Dedicatória .....	IV
Agradecimentos .....	V
Resumo .....	VI
Abstract.....	VII
Sumário.....	VIII
Lista de Figuras .....	IX
Lista de Tabelas.....	XIII
1 Introdução.....	1
2 Fundamentos de Interação Laser-Matéria .....	4
2.1 Processo de interação e transformação da radiação em calor.....	4
2.1.1 Processo de absorção da radiação.....	4
2.1.2 Propriedades térmicas.....	6
2.1.3 Condução de calor .....	8
2.1.4 Propriedades Termodinâmicas .....	10
2.2 Processamento de materiais utilizando um laser .....	13
2.2.1 Parâmetros do feixe de laser .....	13
2.2.2 Aquecimento de um metal utilizando pulsos de laser com distribuição espacial retangular.....	17
2.3 Soldagem a laser.....	22
2.3.1 Solda a laser por condução .....	24
2.3.2 Solda a laser por penetração .....	28
3 Microsoldagem com Laser de Pulsos Curtos e Alta Taxa de Repetição .....	30
3.1 Aquecimento de um metal utilizando o laser pulsado.....	30
3.2 Formação da cavidade em uma amostra irradiada por um feixe de laser pulsado .....	33
4 Material e Procedimento Experimental .....	41
4.1 Aço inoxidável austenítico AISI 304 .....	41
4.2 O laser de Cu-HBr .....	42
4.2.1 Propagação de um feixe de laser .....	44
4.2.2 Arranjo experimental e o critério de medição para caracterização do feixe .....	47
4.2.3 Resultados da caracterização espacial do feixe de Cu-HBr .....	50
4.2.4 Caracterização temporal do feixe de Cu-HBr.....	54
4.3 Sistema de microsoldagem.....	55
4.3.1 Procedimento de focalização do feixe na amostra.....	57
4.4 Análise das Microsoldas .....	67
5 Resultados e Discussões .....	69
5.1 Microsoldagem entre chapas de aço inoxidáveis com 25 $\mu\text{m}$ de espessura.....	69
5.2 Microsoldagem entre chapas de aço inoxidáveis com 50 $\mu\text{m}$ de espessura.....	79
5.3 Microsoldagem entre chapas de aço inoxidáveis com 100 $\mu\text{m}$ de espessura.....	82
5.3.1 Influência do gás de proteção nas microsoldas obtidas entre chapas de 100 $\mu\text{m}$ ..	86
5.4 Metalografia do processo de microsoldagem em chapas de aço inoxidáveis com 100 $\mu\text{m}$ de espessura.....	88
6 Conclusão .....	91
Referências .....	94

## Lista de Figuras

Figura 2.1: Desenho esquemático do processo de absorção da radiação laser em metais. ....	5
Figura 2.2: Figura elementar para a análise da condução de calor unidimensional. ....	10
Figura 2.3: Variação da temperatura em relação ao tempo de absorção da energia do laser. ...	12
Figura 2.4: Diagrama esquemático das características que afetam a qualidade do processamento de materiais. ....	13
Figura 2.5: Fenômenos físicos que ocorrem durante a interação laser-matéria. ....	15
Figura 2.6: Regimes de intensidade do laser e tempo de interação para as aplicações no processamento de materiais. ....	16
Figura 2.7: Diagrama do comportamento do comprimento de difusão térmica em relação a um pulso “quadrado” de laser obtido ao final do tempo de pulso $t_p$ . ....	19
Figura 2.8: Processo de aquecimento e resfriamento do material após o término do pulso. ....	21
Figura 2.9: Desenho esquemático da técnica de solda a laser por condução. ....	24
Figura 2.10: Aquecimento de um sólido semi-infinito na presença de uma fase líquida. ....	25
Figura 2.11: Desenho esquemático da técnica de solda a laser por penetração. ....	28
Figura 3.1: Temperatura alcançada em relação à espessura da amostra, obtida após a aplicação de vários pulsos de laser - com intensidade de pico variando entre 1 e 3 GW/cm <sup>2</sup> - sobre as chapas de aço, considerando apenas o centro do feixe de distribuição gaussiana. ....	32
Figura 3.2: Desenho esquemático da geometria de uma amostra incidida por um feixe de laser pulsado. (a) após a aplicação de um pulso de laser, (b) cálculo da área deixada pelo pulso anterior. ....	35
Figura 3.3: Formação de cavidades em amostras de aço inoxidável, feitas através da aplicação de um feixe de laser pulsado com alta taxa de repetição e potência média na ordem de 20 W. ....	37
Figura 3.4: Desenho esquemático das situações geradas na amostra durante a absorção da energia do feixe de laser. (a) pequena quantidade de pulsos aplicados, (b) maior quantidade de pulsos aplicados e (c) quantidade muito grande de pulsos aplicados. ....	38
Figura 3.5: Geometria do modelo de penetração de uma chapa semi-infinita. ....	39
Figura 3.6: Representação do perfil de temperatura em chapas de aço inoxidável, baseado na equação de Rosenthal, após a incidência de um feixe com potência média de aproximadamente 20 W. (a) fração, $f_r$ , da potência do laser absorvida = 0.3; (b) $f_r = 1$ . ....	40
Figura 4.1: Desenho esquemático do laser de Cu-HBr. ....	43
Figura 4.2: Diagrama esquemático do arranjo experimental para a caracterização do feixe de Cu-HBr; onde 1 é o espelho refletor total do laser, 2 o tubo do laser, 3 uma íris, 4 é a primeira superfície de uma lente plano-convexa, 5 uma lente de focalização, 6 um filtro dicróico e 7 um espelho plano. 8 e 9 são divisores de feixe com filme antirefletivo (R= 2%), 10 uma régua de 1 m, 11 um captador de feixe e 12 o analisador de feixe (LBA-100 laser beam analyzer, Spiricon). ....	48
Figura 4.3: Mesa de caracterização do feixe de Cu-HBr. ....	49
Figura 4.4: Resultados da medição do raio $w(z)$ em função da posição $z$ . (a) $\lambda = 510$ nm e (b) $\lambda = 578$ nm. ....	51
Figura 4.5: Perfil espacial do feixe para o comprimento de onda de emissão verde, (a) $z \leq Z_R$ e (b) $z = 7 Z_R$ . ....	52
Figura 4.6: Perfil espacial do feixe para o comprimento de onda de emissão amarela, (a) $z \leq Z_R$ e (b) $z = 5 Z_R$ . ....	53

Figura 4.7: Posições focais da emissão verde e amarela do laser de Cu-HBr.....	54
Figura 4.8: Perfil espacial do feixe de Cu-HBr com emissão simultânea na posição intermediária das focais.....	54
Figura 4.9: Curva de intensidade em função do tempo de pulso do laser de Cu-HBr. (a) pulso laser de emissão verde, (b) pulso laser de emissão amarela.....	55
Figura 4.10: Desenho esquemático do arranjo experimental para produzir micro junções. ....	56
Figura 4.11: Dispositivo de fixação da amostra à mesa de translação com velocidade controlada.....	57
Figura 4.12: Diagrama esquemático de uma focalização padrão para uma lente convergente	58
Figura 4.13: Propagação do feixe de Cu-HBr. (a) no processo de caracterização do feixe e (b) que incide paralelamente na lente de focalização.....	59
Figura 4.14: Valores de $w(z)$ em função da posição $z$ , após incidir na lente convergente utilizada nos experimentos de microsoldagem.....	62
Figura 4.15: Diagrama esquemático do procedimento adotado para localização do ponto focal do feixe sobre a amostra.....	64
Figura 4.16: Distribuição de intensidade do feixe de Cu-HBr em relação à distância lateral $r$ . (a) na emissão verde, (b) na emissão amarela e (c) na emissão simultânea.....	66
Figura 4.17: Influência da resistência à deformação das amostras no processo de embutimento. (a) não resistente à deformação, amostras amassadas após o embutimento e (b) amostras resistentes à deformação, dobradas em “forma de onda”.....	67
Figura 4.18: Diferença entre uma superfície polida, (a) com a presença de riscos e (b) sem a presença de riscos.....	68
Figura 5.1: Microscopia óptica da microsolda obtida em chapas de aço 304, considerando uma velocidade de soldagem de 3 mm/s; e gráfico da cavidade formada nesta amostra em relação ao raio do feixe de laser focalizado.....	70
Figura 5.2: Microscopia óptica da microsolda obtida em chapas de aço 304, considerando uma velocidade de soldagem de 4 mm/s; e gráfico da profundidade da cavidade formada em relação ao raio do feixe de laser focalizado nesta amostra.....	71
Figura 5.3: Microscopia óptica da microsolda obtida em chapas de aço 304, considerando uma velocidade de soldagem de 10 mm/s; e gráfico da profundidade da cavidade formada em relação ao raio do feixe de laser focalizado nesta amostra.....	71
Figura 5.4: Microscopia óptica da microsolda obtida em chapas de aço 304, considerando uma velocidade de soldagem de 12 mm/s; e gráfico da profundidade da cavidade formada em relação ao raio do feixe de laser focalizado nesta amostra.....	71
Figura 5.5: Microscopia óptica da microsolda obtida em chapas de aço 304, considerando uma velocidade de soldagem de 15 mm/s; e gráfico da profundidade da cavidade formada em relação ao raio do feixe de laser focalizado nesta amostra.....	72
Figura 5.6: Microscopia óptica da microsolda obtida em chapas de aço 304, considerando uma velocidade de soldagem de 17 mm/s; e gráfico da profundidade da cavidade formada em relação ao raio do feixe de laser focalizado nesta amostra.....	72
Figura 5.7: Microscopia óptica da microsolda obtida em chapas de aço 304, considerando uma velocidade de soldagem de 20 mm/s; e gráfico da profundidade da cavidade formada em relação ao raio do feixe de laser focalizado nesta amostra.....	72
Figura 5.8: Largura da cavidade formada, na superfície inferior da amostra, (a) desenho esquemático da cavidade e (b) tamanho da largura em relação à velocidade de soldagem utilizada.....	73
Figura 5.9: Perfil de temperatura em chapas de aço inoxidável, após a interação com o feixe de Cu-HBr. (a) considerando uma área de $360 \times 360 \mu\text{m}^2$ da amostra e uma velocidade de soldagem de 3 mm/s; (b) variação da temperatura em relação a largura transversal da amostra, considerando a região de fusão como sendo equivalente à distância entre a reta V e a reta F.	75

Figura 5.10: Perfil de temperatura em chapas de aço inoxidável, após a interação com o feixe de Cu-HBr. (a) considerando uma área de $120 \times 120 \mu\text{m}^2$ da amostra e uma velocidade de soldagem de 20 mm/s; (b) variação da temperatura em relação a largura transversal da amostra, considerando a região de fusão como sendo equivalente à distância entre a reta V e a reta F. ....	75
Figura 5.11: Variação da fração de energia absorvida pela amostra, na interação com o feixe de laser, em relação a cada velocidade de soldagem utilizada. ....	76
Figura 5.12: Desenho esquemático das geometrias geradas, após a interação com o feixe de laser, dependendo da velocidade de soldagem utilizada. (a) entre 3 e 15 mm/s, (b) em 17 mm/s e (c) em 20 mm/s. ....	77
Figura 5.13: Formação de cavidades em relação ao raio do feixe focalizado, ao longo do volume da amostra, variando-se a potência média do laser em cada caso. ....	78
Figura 5.14: Microscopia óptica da microssolda obtida em chapas de aço 304, utilizando o laser de Cu-HBr com potência média de 11 W; e gráfico da profundidade da cavidade formada em relação ao raio do feixe de laser focalizado nesta amostra. ....	80
Figura 5.15: Microscopia óptica da microssolda obtida em chapas de aço 304, utilizando o laser de Cu-HBr com potência média de 20 W; e gráfico da profundidade da cavidade formada em relação ao raio do feixe de laser focalizado nesta amostra. ....	80
Figura 5.16: Perfil de temperatura em chapas de aço inoxidável, após a interação com o laser de Cu-HBr. (a) considerando a incidência do feixe com 11 W de potência média; (b) variação da temperatura em relação a largura transversal da amostra, considerando a região de fusão como sendo equivalente à distância entre a reta V e a reta F. ....	81
Figura 5.17: Perfil de temperatura em chapas de aço inoxidável, após a interação com o laser de Cu-HBr. (a) considerando a incidência do feixe com 20 W de potência média; (b) variação da temperatura em relação a largura transversal da amostra, considerando a região de fusão como sendo equivalente à distância entre a reta V e a reta F. ....	82
Figura 5.18: Microscopia óptica da microssolda obtida em chapas de aço 304, utilizando o laser de Cu-HBr com potência média de 20 W, variando-se a velocidade de soldagem utilizada. (a) 1 mm/s, (b) 2 mm/s e (c) 3 mm/s. ....	83
Figura 5.19: (a) profundidade da cavidade formada na amostra em relação ao raio do feixe de laser focalizado, considerando as velocidades utilizadas experimentalmente. (b) tamanho da largura da cavidade em relação à velocidade de soldagem utilizada. ....	84
Figura 5.20: Perfil de temperatura em chapas de aço inoxidável, após a interação com o laser de Cu-HBr. (a) velocidade de soldagem de 1 mm/s; (b) velocidade de soldagem de 2 mm/s e (c) velocidade de soldagem de 3 mm/s. ....	85
Figura 5.21: Variação de temperatura em relação a largura transversal da amostra considerando a velocidade de soldagem utilizada em cada situação. (a) 1 mm/s, (b) 2 mm/s e (c) 3 mm/s. ....	85
Figura 5.22: Reprodutibilidade da microssolda obtida em chapas de aço inoxidável 304 com 200 $\mu\text{m}$ de espessura, irradiadas pelo laser de Cu-HBr, com velocidade de soldagem de 3 mm/s. ....	86
Figura 5.23: Microscopia óptica da microssolda obtida em chapas de aço SS304 utilizando um fluxo de argônio (5 l/min) como gás de proteção, numa velocidade de soldagem de 1 mm/s. ....	87
Figura 5.24: (a) perfil de temperatura, em uma área de $45 \times 45 \mu\text{m}^2$ da amostra, considerando a velocidade de soldagem utilizada (1 mm/s). (b) variação de temperatura em relação à largura transversal da amostra, onde a distância entre a reta V e a reta F representa a região fundida no material. ....	88
Figura 5.25: Microssolda a laser obtida entre duas chapas de aço inoxidável SS304 com 100 $\mu\text{m}$ de espessura. ....	89

Figura 5.26: (a) Detalhe da microestrutura da solda e do material base obtida em nossos estudos; (b) placas de martensitas próximas à região fundida da amostra. ....	89
Figura 5.27: Resultados dos testes de microdureza para a região (a) fora e (b) dentro do cordão de solda. ....	90

## Lista de Tabelas

Tabela 2.1: Difusividade Térmica de alguns metais e ligas .....	7
Tabela 2.2: Propriedades térmicas no processo de interação laser-matéria .....	8
Tabela 2.3: Valores de intensidade do feixe nos processos dominantes da interação laser-matéria .....	16
Tabela 4.1: Composição química do aço inoxidável austenítico AISI 304.....	42
Tabela 4.2: Valores de $W_0$ , $Z_0$ , $M^2$ e $Z_R$ do feixe de laser de Cu-HBr .....	52
Tabela 4.3: Variação da velocidade da mesa de translação em relação à espessura da chapas. ....	57
Tabela 4.4: Valores de diâmetro, parâmetro confocal e posição focal para as emissões verde e amarela do feixe de Cu-Br a partir da lente de focalização usada no experimento de microssolda.....	61
Tabela 4.5: Valores da $P$ , $P_p$ e $E_p$ para emissão verde, amarela e simultânea do laser de Cu-HBr .....	65
Tabela 5.1: Parâmetros considerados na microssoldagem realizada em chapas com 25 $\mu\text{m}$ de espessura.....	69
Tabela 5.2: Parâmetros considerados na microssoldagem realizada em chapas com 50 $\mu\text{m}$ de espessura.....	79
Tabela 5.3: Parâmetros considerados na microssoldagem realizada em chapas com 100 $\mu\text{m}$ de espessura.....	83

## 1 Introdução

O primeiro laser ingressou na vida científica em 1960 e desde então, várias pesquisas para sua aplicação vêm sendo realizadas [1]. Com a verificação da capacidade do laser em fundir e vaporizar pequenas quantias de metais deu-se início às investigações das aplicações do laser em solda, corte e furação. A solda a laser, entretanto, passou a ser considerada economicamente competitiva com outros métodos de soldagem somente com o desenvolvimento dos lasers de CO<sub>2</sub> e de Nd:YAG [2].

Hoje em dia, o uso de um feixe de laser como ferramenta está entre os métodos de processamento de materiais mais avançados e modernos, ocupando uma posição de destaque na indústria [3].

No campo de microssoldagem, os lasers pulsados assumem um papel importante por possuir algumas características como: controle dimensional no processamento e alta concentração de energia em uma área muito pequena do material, resultando na habilidade de soldar componentes sensíveis ao calor. Assim, a micro-fabricação de componentes finos é possível e novas técnicas de junção a laser têm sido desenvolvidas em várias áreas, incluindo componentes elétricos e eletrônicos, dispositivos médicos, peças de relógio etc. [4,5,6,7].

Além dos fatos citados acima, outra motivação para este trabalho foi uma consulta feita pelo Centro Técnico Aeroespacial, CTA, à divisão de Fotônica do Instituto de Estudos Avançados, IEAv/CTA, sobre a possibilidade de soldagem a laser de chapas finas no diafragma do disparador dos foguetes propulsores do VLS.

Entretanto, a motivação principal deste trabalho surgiu dos resultados positivos na junção de chapas finas de aço, utilizando o laser de Cu-HBr [8,9]. Partindo-se destes resultados, chega-se ao objetivo deste trabalho que é investigar a viabilidade de realizar

microsoldas em chapas de aço inoxidável 304 utilizando um laser de pulsos curtos com alta taxa de repetição.

Esta investigação, nas condições em que foi realizada tem caráter inédito. Isso porque, em geral, os lasers utilizados para efetuar soldas em materiais com espessura entre 10 e 100  $\mu\text{m}$  são do tipo pulsado, com pulsos longos e energias de pulso de radiação elevada (0.1 a 1 J). Na literatura encontram-se estudos sobre microsoldas realizadas em chapas com estas espessuras utilizando lasers contínuos ou de pulsos longos (0,1 a 20 ms) [5,7,10,11,12]. Lasers com pulsos curtos (10 a 100 ns) não são utilizados devido ao pequeno comprimento de difusão térmica, limitado pelo tempo do pulso de laser a menos de 1  $\mu\text{m}$ . Por isso, o laser de Cu-HBr possui características – dentre elas, alta intensidade do feixe (na ordem de  $\text{GW}/\text{cm}^2$ ) - que viabiliza sua utilização no processo de corte e/ou perfuração [13]. Também na literatura, encontramos vários estudos sobre micro-perfuração e micro-ablação de materiais, utilizando este laser ou outros de características semelhantes [14,15,16,17,18].

Este trabalho está estruturado da seguinte forma: o capítulo 2 descreve os processos físicos que ocorrem durante a interação do laser com a matéria, além das propriedades relevantes do material utilizado, a condução do fluxo de energia envolvido e as mudanças de fase que podem ocorrer e influenciar o resultado desta interação. Este capítulo trata também, os aspectos gerais das técnicas de soldagem existentes, por condução e por penetração (*keyhole*).

O capítulo 3 dedica-se à apresentação do novo processo de microsoldagem proposto neste trabalho, desde o conceito de aquecimento de um metal utilizando um laser pulsado até a construção de um modelo sobre formação de cavidade, na amostra irradiada pelo feixe, e o mecanismo de redistribuição de energia do laser dependente da geometria desta cavidade.

As características pertinentes do aço utilizado nos experimentos e sua composição química estão descritas no capítulo 4. Além disso, este capítulo descreve o procedimento

experimental, detalhando os equipamentos utilizados, a metodologia empregada e os métodos de análise adotados nesta pesquisa e também, a caracterização do feixe de laser ao longo de seu ponto de focagem.

Os resultados obtidos e as discussões estão apresentados no capítulo 5. Para facilitar a compreensão, as análises estão divididas em função das espessuras das chapas que compõem a micro-junção.

No último capítulo, de conclusão, são destacados os resultados obtidos do processo de microsolda e algumas perspectivas de trabalhos futuros são sugeridas.

## 2 Fundamentos de Interação Laser-Matéria

### 2.1 Processo de interação e transformação da radiação em calor

Uma das mais importantes características do laser no processamento de materiais é sua capacidade de entregar altos valores de energia numa área pequena focalizada sobre a amostra, produzindo assim, um rápido aquecimento nesta região. Na interação laser-matéria, a energia do laser é absorvida pelo material e convertida em calor na amostra. Entender os processos físicos que ocorrem durante essa interação é importante para conhecer as capacidades e limitações no processamento de materiais utilizando um laser.

Este capítulo descreve, além desses processos físicos, as propriedades relevantes do material utilizado, a condução do fluxo de energia envolvido e também as mudanças de fase que podem ocorrer e influenciar o resultado da interação laser-matéria.

#### 2.1.1 Processo de absorção da radiação

Quando a radiação laser atinge a superfície da amostra, parte dela é absorvida e parte é transmitida. A energia que é absorvida transforma-se em calor numa camada fina próxima a superfície. Essa absorção ocorre de acordo com a equação [19,20]:

$$I(z) = I_0 \exp(-\alpha z) \quad (2.1)$$

Onde  $I(z)$  é a intensidade alcançada na profundidade  $z$ ,  $I_0$  é a intensidade absorvida e  $\alpha$ , o coeficiente de absorção. O coeficiente de absorção é uma propriedade do material que

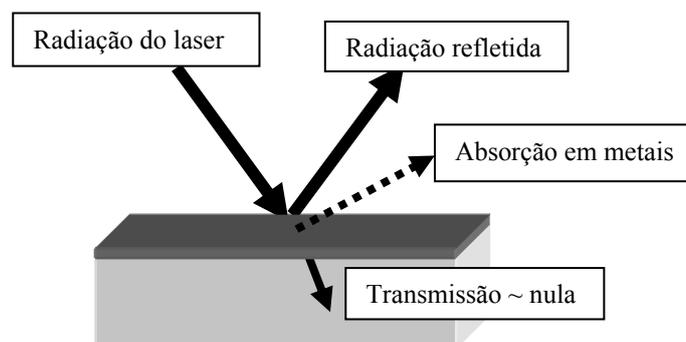
descreve a fração de energia óptica que é depositada por unidade de profundidade no material. Essa fração de energia depositada numa profundidade  $\Delta z$  é descrita por:

$$|\Delta E(z)| = E_0 \alpha \exp(-\alpha z) \Delta z \quad (2.2)$$

Onde  $E_0$  é a energia incidente na superfície. Assim, a energia depositada é máxima na superfície e decresce monotonamente com a profundidade.

Dessa forma, podemos dizer que a radiação laser é absorvida numa profundidade  $1/\alpha$  da superfície. Para metais, o coeficiente de absorção é da ordem de  $10^5 \text{ cm}^{-1}$  [20].

Um parâmetro que afeta a fração de luz que é absorvida no material é a refletividade. A Figura 2.1 mostra um desenho esquemático do processo de absorção da radiação laser em metais, considerando a refletividade da superfície. Por definição, refletividade é definida como a razão da radiação laser refletida da superfície pela radiação incidida sobre a superfície, sendo um número adimensional entre 0 e 1. A luz que é refletida é perdida, não podendo produzir aquecimento na amostra. Assim, a quantidade de luz absorvida por uma superfície metálica é proporcional a  $1-R$ , onde  $R$  é a refletividade. O exato valor da refletividade é dependente de vários fatores como: comprimento de onda e ângulo de incidência do feixe de luz na superfície [19], e ainda, composição, acabamento e estado de oxidação da superfície.



**Figura 2.1: Desenho esquemático do processo de absorção da radiação laser em metais.**

Podemos observar que a compreensão dos efeitos de aquecimento na interação laser-matéria requer o conhecimento de como a radiação incidente na superfície é absorvida e de como é refletida. Uma superfície ideal que absorva toda a radiação laser é chamada de “superfície negra”. Assim, para uma dada temperatura  $T$ , a radiação térmica máxima possível é emitida por esta superfície e um parâmetro pode ser definido [21]:

$$\varepsilon(T) = 1 - R(T) \quad (2.3)$$

Onde  $R$  é a refletividade e  $\varepsilon$  (variando de 0 a 1, adimensional) é a emissividade ou fração da radiação absorvida pelo material. Assim, as características de uma superfície opaca são descritas pela equação acima.

### 2.1.2 Propriedades térmicas

O aumento na energia térmica de um material pode ser obtido por trabalho mecânico, trabalho elétrico, radiação ou pelo contato direto com outros meios. Em geral, diferentes materiais necessitam de diferentes quantidades de calor para elevar, num certo intervalo, sua temperatura.

A reação do material à absorção da energia do laser depende do fluxo de calor no material. Esse fluxo de calor é dependente da condutividade térmica  $K$  e também do calor específico,  $c$ , do material. Um fator importante do fluxo de calor é a difusividade térmica do material. Esse fator é envolvido em todo estado fixo dos processos de fluxo de calor e determina quão rápido o material irá aceitar e conduzir a energia térmica. É dado por:

$$k = \frac{K}{\rho c} \quad (2.4)$$

Onde  $k$  é a difusividade térmica,  $K$  é a condutividade térmica,  $c$  é o calor específico e  $\rho$ , a densidade do material.

Em geral, a difusividade térmica de ligas é mais baixa do que de um metal puro [20]. O aço inoxidável, por exemplo, possui baixa difusividade térmica, limitando assim a penetração do calor no material. A Tabela 2.1 lista os valores da difusividade térmica de alguns metais e ligas.

**Tabela 2.1: Difusividade Térmica de alguns metais e ligas**

<b>Metal / Liga</b>	<b>Difusividade Térmica (cm<sup>2</sup>/s)</b>
Alumínio – comercialmente puro	0,850
Alumínio 2024	0,706
Alumínio A13	0,474
Ferro – comercialmente puro	0,202
Aço carbono (1.22 C, 0.35 Mn)	0,119
Aço inoxidável 303	0,056

Um outro fator, que determina a profundidade de penetração do calor por unidade de tempo, é dado por:

$$D = (4kt)^{\frac{1}{2}} \quad (2.5)$$

Onde  $D$  é o comprimento de difusão térmica do material,  $k$  é a difusividade térmica do material e  $t$ , o tempo de interação.

O tempo constante que o calor leva para se propagar em uma dada distância é chamado de tempo de difusão térmica. Para um metal com espessura  $z$ , por exemplo, o tempo de difusão térmica é igual a:

$$t_D = \frac{z^2}{4k} \quad (2.6)$$

A Tabela 2.2 a seguir, sumariza algumas propriedades térmicas relevantes no processo de interação laser-matéria.

**Tabela 2.2: Propriedades térmicas no processo de interação laser-matéria**

	<b>Definição</b>	<b>Propriedade</b>	<b>Unidade SI</b>
E W Q	Energia Trabalho Calor	Energia, trabalho e calor são equivalentes.	J = kg m <sup>2</sup> /s <sup>2</sup>
K	Condutividade Térmica	Constante que descreve a quantidade do fluxo de calor em um material.	J/m s K
k	Difusividade térmica	Constante que descreve a dependência temporal da distribuição espacial da temperatura.	m <sup>2</sup> /s

### 2.1.3 Condução de calor

A transferência de energia entre um sistema e seu ambiente, ou entre dois sistemas, é resultante das colisões de moléculas da amostra que estão em movimento aleatório. As moléculas da extremidade da amostra, com temperatura mais elevada estão se movendo, em média, mais depressa do que as moléculas da outra extremidade. Em uma colisão típica, a molécula mais lenta ganha energia e a molécula mais rápida perde energia. A média sobre muitas colisões envolvendo as moléculas ao longo de toda a amostra, promove a transferência de energia em razão da diferença de temperatura. Um dos mecanismos de transferência de energia é a condução de calor, descrita pela equação:

$$H = -K \frac{\partial T}{\partial z} \quad (2.7)$$

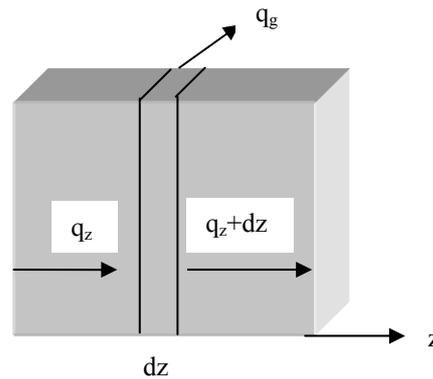
Onde  $H$  é o fluxo de calor,  $K$  é a condutividade térmica (característica do material),  $A$  é a área da amostra afetada e  $\frac{\partial T}{\partial z}$ , o gradiente de temperatura na direção do fluxo de calor.

Essa equação é chamada de Lei de Fourier da condução de calor [22].

Através da Equação (2.7) podemos determinar a equação geral que governa a transferência de calor através de um sólido. Considere um sistema unidimensional como mostrado na Figura 2.2. Se o sistema está em regime permanente, isto é, se a temperatura não varia com o tempo, deve-se apenas integrar a Equação (2.7) e substituir os valores apropriados para a solução nas quantidades desejadas. Entretanto, se a temperatura do sólido varia com o tempo, fluxos de calor podem ocorrer no interior da amostra. Para um elemento infinitesimal  $dz$ , o seguinte balanço de energia pode ser feito: energia conduzida para dentro da amostra pela face esquerda ( $q_z$ ) + calor gerado no interior do elemento ( $q_g$ ) = variação de energia interna + energia conduzida para fora da amostra pela face direita ( $q_z + dz$ ) [23]. A combinação dessas relações fornece a equação da condução de calor unidimensional:

$$\frac{\partial}{\partial z} \left( K \frac{\partial T}{\partial z} \right) + q = \rho c \frac{\partial T}{\partial t} \quad (2.8)$$

Onde  $K$ ,  $\rho$  e  $c$  são a condutividade térmica, a densidade e o calor específico do material, respectivamente.  $T$  é a variação de temperatura e  $q$ , a energia gerada por unidade de volume por unidade de tempo.



**Figura 2.2: Figura elementar para a análise da condução de calor unidimensional.**

Para tratar o fluxo de calor em três dimensões deve-se considerar o calor conduzido para dentro e para fora do volume elementar nas três direções coordenadas. Assim, a equação geral tridimensional da condução de calor é descrita como:

$$\nabla(K\nabla T) + q(x, y, z, t) = \rho c \frac{\partial T}{\partial t} \quad (2.9)$$

Onde  $T$  é a variação de temperatura,  $K$  é a condutividade térmica,  $q(x, y, z, t)$  é a quantidade de calor por unidade de tempo e por unidade de volume depositada na amostra,  $\rho$  e  $c$ , a densidade e o calor específico do material, respectivamente.

#### 2.1.4 Propriedades Termodinâmicas

O calor - transferência de energia entre um sistema e seu ambiente ou entre dois sistemas, ocorrida exclusivamente por uma diferença de temperatura entre eles [24], acrescentado a um sistema a pressão constante está relacionado com a variação de temperatura pelo calor específico. O calor específico de um material é definido como a

energia necessária para aumentar, num certo intervalo, sua temperatura [19]. Essas características podem ser expressas pela equação:

$$Q = mc_p \Delta T \quad (2.10)$$

Onde  $Q$  é o calor adicionado na amostra,  $m$  é a massa da amostra,  $c_p$  é calor específico à pressão constante e  $T$ , a temperatura.

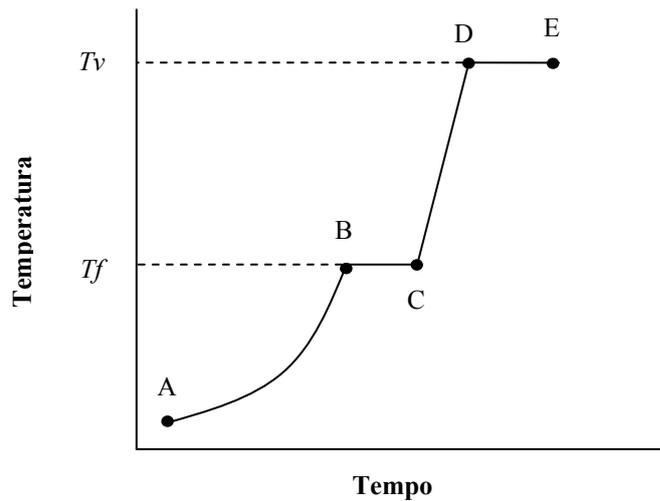
Como resultado da absorção da energia do laser, o material pode sofrer, com o aumento da sua temperatura, algumas alterações em seu estado físico. As propriedades termodinâmicas relatam a quantidade de energia requerida para causar essas alterações, como aquecimento do material ou ainda, uma mudança de fase – fusão e vaporização. No nível molecular, tal mudança de fase corresponde a um aumento da separação média das moléculas e a uma diminuição de sua interação. Assim, o calor acrescentado a uma amostra de massa  $m$  passando por uma variação de fase é igual a:

$$Q = mL \quad (2.11)$$

Onde  $L$  é o calor latente necessário para a variação de fase. O calor latente de uma substância em mudança de fase líquido-sólido é chamado de calor latente de fusão,  $L_f$ . Para a mudança de fase líquido-vapor, o calor latente de vaporização é denotado por  $L_v$ .

A Figura 2.3 mostra o comportamento da variação de temperatura em relação ao tempo de absorção da energia do laser, assumindo que não há perdas e que a pressão é constante. De acordo com a primeira lei da termodinâmica [24], a variação de temperatura inicia-se em A, onde o metal está na fase sólido e eleva-se até B, onde o material atinge a temperatura de fusão,  $T_f$ . Observa-se que a curva da temperatura tem certa inclinação que é

controlada pelo calor específico  $c_p$ . O ponto B é o início da fusão. Como o material continua absorvendo energia, ele segue de B para C, sofrendo a mudança da fase sólida para a fase líquida pelo calor latente de fusão,  $L_f$ . Em seguida, como absorve mais energia, a temperatura aumenta novamente até D. No ponto D atinge a temperatura de vaporização,  $T_v$ , que permanece constante durante a absorção de  $L_v$ . Em E, o material completa sua transformação para vapor e, a partir daí, não há mais absorção da energia do laser – exceto no caso onde a radiação seja tão alta que ocorra a formação do plasma. Essa formação e seus efeitos serão discutidos posteriormente.



**Figura 2.3:** Variação da temperatura em relação ao tempo de absorção da energia do laser.

Assim, a quantidade aproximada de energia exigida para uma substância passar por vários estados pode ser expressa com a correlação das Equações (2.10) e (2.11):

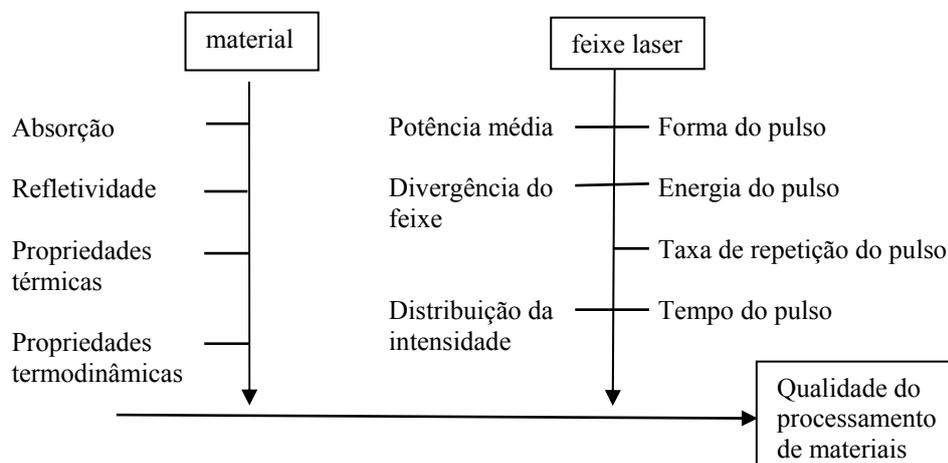
$$Q_i = \rho V \left[ c_p \Delta T_{s \rightarrow l} + L_f + c_p \Delta T_{l \rightarrow v} + L_v \right] \quad (2.12)$$

Onde os termos da equação correspondem respectivamente: 1º aquecimento do material sólido até a temperatura de fusão, 2º calor latente de fusão, 3º aquecimento do líquido até o ponto de vaporização e 4º o calor latente de vaporização.

## 2.2 Processamento de materiais utilizando um laser

### 2.2.1 Parâmetros do feixe de laser

A boa qualidade no processamento de materiais, utilizando um laser pulsado, é obtida da combinação das propriedades do material – já relatadas anteriormente - e dos parâmetros do feixe utilizado. A Figura 2.4 mostra um diagrama esquemático dessas características [2,25].



**Figura 2.4: Diagrama esquemático das características que afetam a qualidade do processamento de materiais.**

Dentre as características do feixe, a intensidade e o tempo do pulso de laser interagem diretamente nos fenômenos físicos que ocorrem na interação laser-matéria. A intensidade que

é definida como sendo a concentração da potência do laser sobre a superfície do material [25] é dada por:

$$I = \frac{P_p}{\pi w^2} \quad (2.13)$$

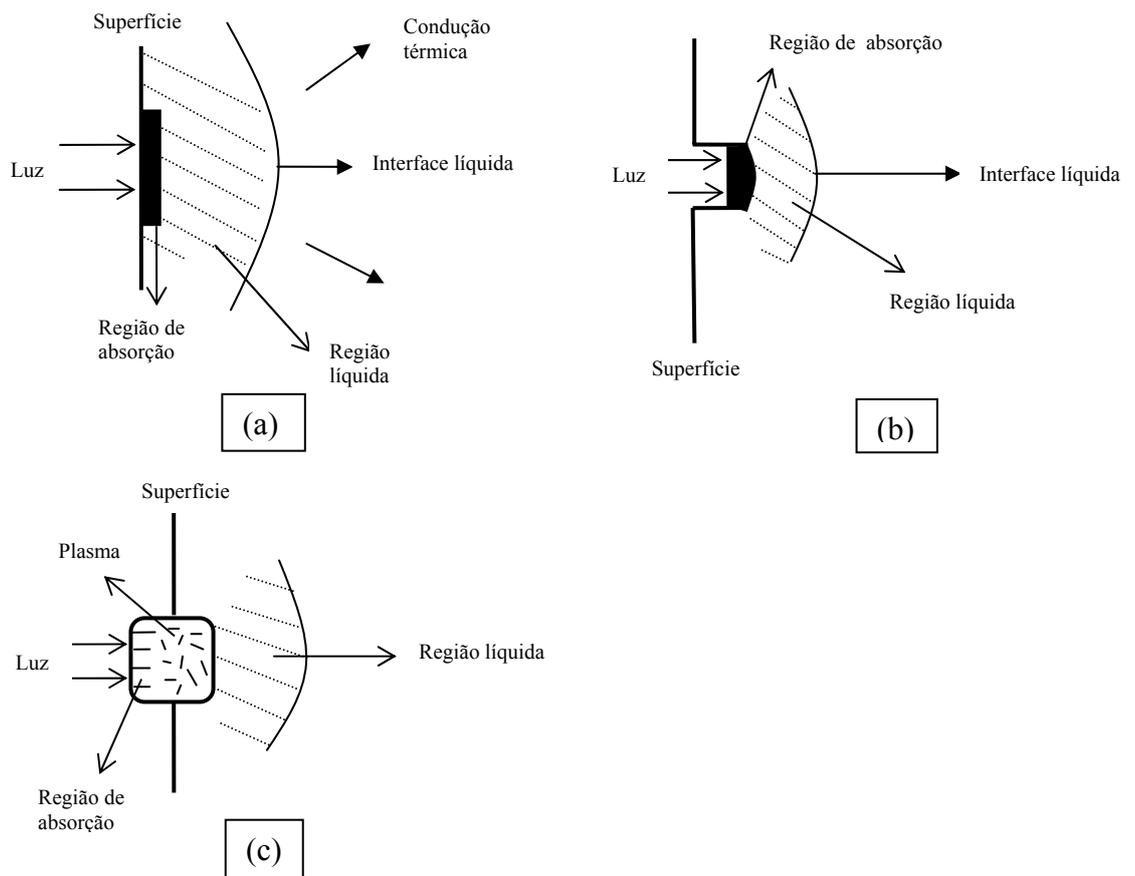
Onde  $P_p$  é a potência de pico do feixe,  $P_p = \frac{E_p}{t_p}$  (energia do pulso / tempo do pulso), e

$w$ , o raio do feixe focalizado sobre a superfície.

Os fenômenos físicos que ocorrem na interação laser-matéria estão descritos na Figura 2.5. A energia do laser depositada na superfície penetra no material por condução térmica (seção 2.1.2). Quando a superfície atinge a temperatura de fusão, um líquido se propaga para dentro da amostra, como indicado na Figura 2.5-a. Com a radiação laser contínua, o material atinge a temperatura de vaporização e um furo começa a ser formado na amostra – Figura 2.5-b. Se a radiação do laser for alta o suficiente, a absorção no material vaporizado conduz à formação do plasma (gás ionizado). Esse plasma absorve a luz do feixe e protege a superfície da amostra, Figura 2.5-c.

Os efeitos do aquecimento no material, devido à absorção da intensidade do laser, podem ocorrer muito rapidamente. A Tabela 2.3 [1,21] mostra alguns valores de intensidade do feixe nos processos dominantes da interação laser-matéria. Feixes com intensidades que induzem à fusão são geralmente aplicados no processo de soldagem [20]. Efetivamente, fusão e soldagem com lasers dependem da propagação da poça de fusão na amostra durante o tempo de interação e, ao mesmo tempo, evitando a vaporização da superfície. Entretanto, para alguns valores de intensidade, a vaporização inicia-se na superfície antes que a poça de fusão penetre pelo volume irradiado da amostra. Uma maneira de superar as limitações na profundidade de penetração da poça de fusão, no processo de soldagem, é a utilização de um mecanismo onde

um furo é aberto no material a fim de conduzir a energia do laser para o volume da amostra (processo de soldagem *keyhole*, que será descrito posteriormente). Para intensidades de feixe com valores acima de  $10^6 \text{ W/cm}^2$  [1], o processo dominante na interação laser-matéria é a vaporização, onde a poça de fusão tende a ser menos significativa. Neste caso, material é removido da amostra em forma de vapor ou por “expulsão de líquido” e o resultado é a formação de um furo nesta região [26]. Finalmente, quando a intensidade do feixe torna-se muito alta (acima de  $10^{13} \text{ W/cm}^2$ ), um plasma é formado entre o feixe de luz e a superfície do material podendo ocorrer, assim, um mecanismo adicional de absorção da energia do laser.

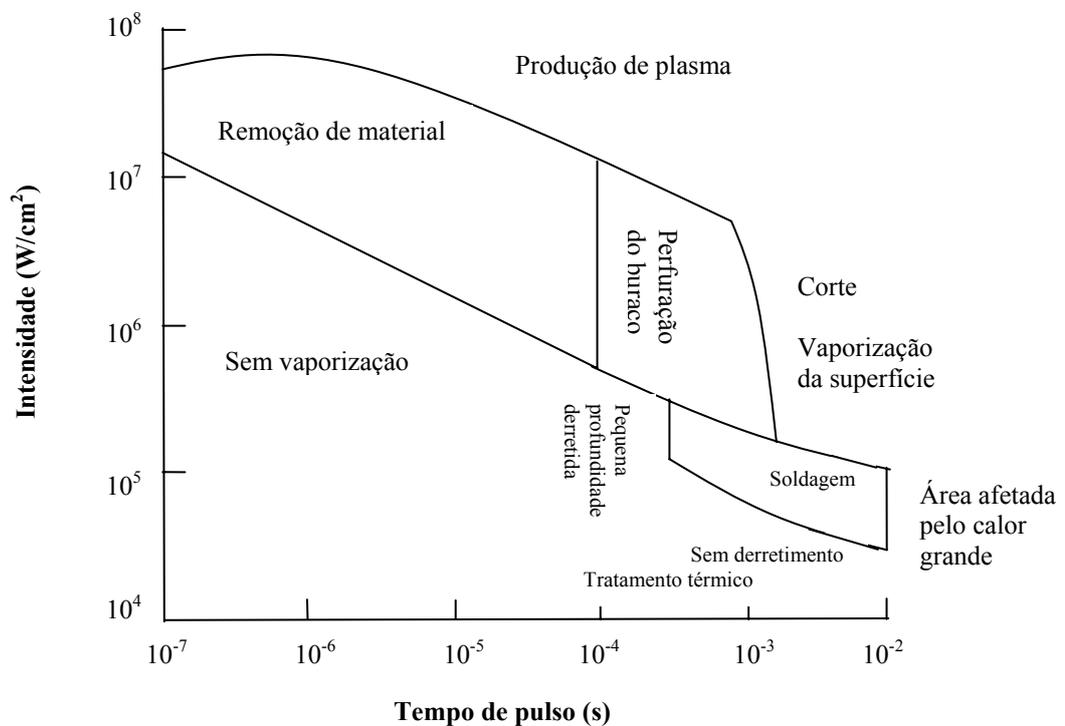


**Figura 2.5: Fenômenos físicos que ocorrem durante a interação laser-matéria.**

**Tabela 2.3: Valores de intensidade do feixe nos processos dominantes da interação laser-matéria**  
**Valores de intensidade do feixe (região do visível)**

Fusão	$\sim 10^5 \text{ W/cm}^2$
Vaporização	$> 10^6 \text{ W/cm}^2$
Formação de plasma	$\geq 10^8 \text{ W/cm}^2$

A Figura 2.6 [1,19] sintetiza as várias regiões de interações e suas aplicações, definindo-as em termos da intensidade do feixe e do tempo de interação com a amostra [1].



**Figura 2.6: Regimes de intensidade do laser e tempo de interação para as aplicações no processamento de materiais.**

Abaixo da linha marcada “sem derretimento” a superfície do material não é aquecida até seu ponto de fusão e a principal aplicação é o tratamento térmico de superfícies. Na região “soldagem” é obtida uma profundidade razoável de material líquido e aplicações de soldagem são possíveis. Acima da linha “vaporização da superfície”, a superfície é vaporizada e aplicações de soldagem são menos desejáveis. À esquerda da região de soldagem, a

penetração da poça de fusão é menor por causa do curto tempo de interação. À direita da região de soldagem, o calor se expande numa extensa área e a característica de aquecimento localizado é perdida. Assim, o processo de soldagem geralmente requer um controle cuidadoso dos parâmetros para permanecer nesta região. Além disso, a Figura 2.6 identifica os processos de corte, perfuração e remoção de pequenas quantidades de material. Acima da linha “produção de plasma”, poucas aplicações no processamento de materiais são relatadas [20].

### **2.2.2 Aquecimento de um metal utilizando pulsos de laser com distribuição espacial retangular**

Conforme já mencionado, o aquecimento de metais iluminados por um laser ocorre devido à absorção da energia irradiada por ele sobre a superfície do material. Quando um pulso de laser atinge a superfície de um metal, sua superfície sofre aquecimento e o calor começa a ser transferido por condução para o volume da amostra. Esse processo é descrito pela Equação (2.9), descrita anteriormente.

Se a dimensão da área iluminada pelo feixe de laser na superfície do material for muito maior do que o comprimento de penetração do calor abaixo da superfície, podemos utilizar o modelo de um sólido semi-infinito sendo aquecido uniformemente em toda sua superfície [21]. Neste caso, a Equação (2.9) pode ser resolvida em uma só dimensão e reescrita como:

$$K \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} + I(t)\delta(z) = \rho c \frac{\partial T}{\partial t} \quad (2.14)$$

Onde  $K$  é a condutividade térmica,  $I(t)$  é a intensidade do feixe,  $\rho$  e  $c$ , a densidade e o calor específico do material, respectivamente.  $\delta(z)$  é a função delta de Dirac [27].

No caso do laser pulsado, com uma duração de pulso definida por  $t_p$ , a variação temporal da intensidade incidente do laser é descrita por [21]:

$$I(t) = I_0 \quad \text{em} \quad 0 < t < t_p$$

$$I(t) = 0 \quad \text{em} \quad t < 0, t > t_p$$

Onde  $I$  é a intensidade do laser.

Assim, a solução da função delta de Dirac fornece uma equação que descreve a variação da temperatura, em uma dimensão para um sólido semi-infinito, enquanto o pulso é aplicado. É dada por [21]:

$$T(z, t) = \left( \frac{2\varepsilon I_0}{K} \right) (kt)^{\frac{1}{2}} \text{ierfc} \left( \frac{z}{2(kt)^{\frac{1}{2}}} \right) \quad (2.15)$$

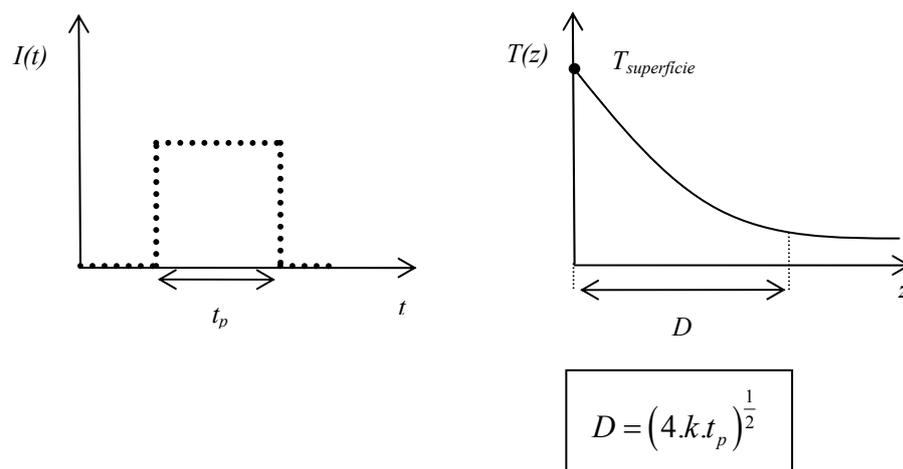
Onde  $\varepsilon$ ,  $K$ ,  $k$  são a emissividade, a condutividade térmica e a difusividade térmica do material, respectivamente.  $z$  é a espessura da amostra,  $t$ , a variação temporal e  $I_0$ , a intensidade incidente do laser. E ainda,  $\text{ierfc}$  é a integral da função erro complementar  $\text{erfc}$ , dada por:

$$\text{ierfc}(x) = \int_x^{\infty} \text{erfc}(s) ds \quad (2.16)$$

$$\text{erfc}(x) = \left( \frac{2}{\pi} \right)^{\frac{1}{2}} \int_x^{\infty} \exp(-s^2) ds \quad (2.17)$$

Podemos observar na Equação (2.15) o comprimento de difusão térmica - equação (2.5). Esse fator determina a profundidade de penetração do calor na amostra por unidade de tempo.

Portanto, as aproximações utilizadas na Equação (2.15) correspondem à situação em que o diâmetro da região iluminada pelo feixe na amostra é muito maior que o comprimento de difusão térmica. A Figura 2.7 mostra um diagrama esquemático deste comportamento, onde um pulso “quadrado” de laser com intensidade  $I$  e duração  $t_p$  é absorvido na superfície do metal e transferido em forma de calor para o volume da amostra.



**Figura 2.7:** Diagrama do comportamento do comprimento de difusão térmica em relação a um pulso “quadrado” de laser obtido ao final do tempo de pulso  $t_p$ .

Para esta solução supomos ainda que a condutividade térmica do material não é dependente da temperatura. Isso nos permite uma solução analítica do problema, considerando o seu valor médio no intervalo de temperatura, dado por [27]:

$$\bar{K} = \frac{\int_0^T K(T) dT}{\int_0^T dT} \quad (2.18)$$

O valor médio de  $K$ , utilizado em nossos estudos, está tabulado na referência [21]. O mesmo procedimento foi adotado para o valor da difusividade térmica do material,  $k$ , usando:

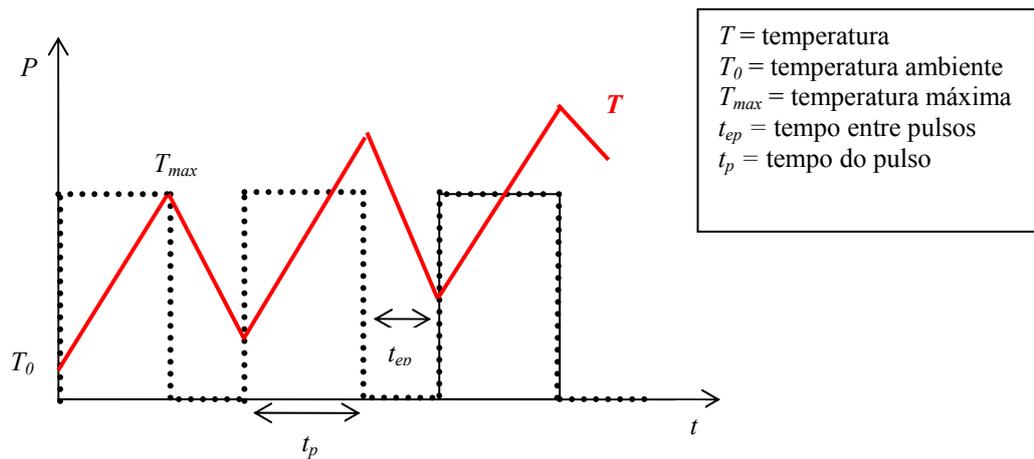
$$\bar{k} = \frac{\int_0^T k(T) dT}{\int_0^T dT} \quad (2.19)$$

No término de aplicação do pulso de laser sobre a amostra, a temperatura máxima alcançada na superfície é dada por:

$$T(0, t_p) = T_{\max} = \frac{2\varepsilon I_0}{K} (kt_p)^{\frac{1}{2}} \quad (2.20)$$

Onde  $\varepsilon$ ,  $K$  e  $k$  são a emissividade, a condutividade térmica e a difusividade térmica do material;  $I_0$  é a intensidade incidente do feixe e  $t_p$ , o tempo do pulso.

Com o término do pulso inicia-se um processo de resfriamento do material com o calor sendo transmitido da superfície para o volume da amostra e para o meio ambiente. Esse processo está indicado na Figura 2.8. Podemos observar que se o intervalo de tempo entre pulso,  $t_{ep}$ , não for longo, a temperatura na superfície do material é superior após a aplicação do pulso subsequente.



**Figura 2.8:** Processo de aquecimento e resfriamento do material após o término do pulso.

Dessa forma, a variação da temperatura após o término do pulso, no processo de resfriamento ( $t > t_p$ ), é dada por [21]:

$$T(z, t)_{t > t_p} = \frac{2\varepsilon I_0 k^{\frac{1}{2}}}{K} \left\{ t^{\frac{1}{2}} \operatorname{ierfc} \left( \frac{z}{2(kt)^{\frac{1}{2}}} \right) + \left[ -(t - t_p)^{\frac{1}{2}} \operatorname{ierfc} \left( \frac{z}{2 \left[ k(t - t_p)^{\frac{1}{2}} \right]} \right) \right] \right\} \quad (2.21)$$

Onde  $\varepsilon$ ,  $K$  e  $k$  são, respectivamente, a emissividade, a condutividade térmica e a difusividade térmica do material.  $z$  é a espessura do material,  $t$  é a variação temporal,  $t_p$ , o tempo de pulso e  $I_0$ , a intensidade incidente do laser. E ainda,  $\operatorname{ierfc}$  é a integral da função erro complementar  $\operatorname{erfc}$  dadas pelas Equações (2.16) e (2.17).

Sabendo que a temperatura final na superfície da amostra é a soma de vários pulsos de laser e considerando que o tempo de interação é muito maior que o tempo de pulso,  $t_p$ , podemos definir essa temperatura como sendo a solução da equação [23]:

$$T_n = \pi T_{\max} \left[ ierfc(Z, \tau) + \sum_{i=1}^{n-1} ierfc(Z, \tau + i\tau_{ep}) \frac{1}{2(\tau + i\tau_{ep})} \right] \quad (2.22)$$

Onde  $T_{\max}$  é a temperatura máxima – Equação(2.20) e,  $ierfc$  é a integral da função erro complementar  $erfc$  dadas pelas Equações (2.16) e (2.17).  $\tau_{ep} = \frac{t_{ep}}{t_p}$  (tempo entre pulsos / tempo do pulso). E ainda,  $Z$  e  $\tau$  são funções normalizadas, dadas por:

$$Z = \frac{z}{2\sqrt{kt_p}} \quad (2.23)$$

Onde  $z$  é a espessura do material,  $t_p$  é o tempo de pulso e  $k$ , a difusividade térmica do material.

$$\tau = \sqrt{\frac{t}{t_p}} \quad (2.24)$$

Onde  $t$  é a variação temporal e  $t_p$ , o tempo de pulso.

### 2.3 Soldagem a laser

A alta concentração do feixe de laser proporciona uma radiação de excelente qualidade, permitindo diversas aplicações, dentre elas a soldagem. A utilização do laser no processo de soldagem possibilita a obtenção de determinadas características impossíveis de serem obtidas por outros processos, tais como velocidade de soldagem elevadas, ausência de

contato entre a fonte de calor e o material utilizado, baixa distorção e pequenas áreas termicamente afetadas pelo calor [28].

A soldagem a laser é caracterizada por um delicado balanço entre aquecimento e resfriamento dentro de um volume, no qual uma poça líquida é formada e permanece estável até a solidificação. O objetivo da solda a laser é criar a poça de fusão pela absorção da radiação laser incidente, possibilitar o seu crescimento até o tamanho desejado e então propagar esta poça através da interface sólida, eliminando a linha de junta original entre componente a serem unidos [29].

Neste processo, a manutenção do balanço entre o calor que entra e o calor que sai depende da constante de absorção da radiação laser e da propagação do feixe no interior da peça [10,30]. Entretanto, essa propagação é muitas vezes interrompida pela formação de vapor no ponto focal, alterando assim, a absorção da radiação do laser [2]. Esse vapor poderá ainda, dentro de certas condições, transformar-se em plasma absorvendo, espalhando e atenuando o feixe severamente [31].

Dessa forma, muitas propriedades devem ser consideradas para otimizar a interação laser-matéria no processo de soldagem. Dentre elas [1]:

(a) A intensidade na superfície da amostra deve ser alta suficiente para produzir derretimento;

(b) Para lasers pulsados, a duração do pulso deve ser longa o suficiente a fim de permitir penetração da energia térmica em todo o volume do material;

(c) A taxa de repetição do laser deve ser alta suficiente para soldar as peças a uma taxa razoavelmente alta;

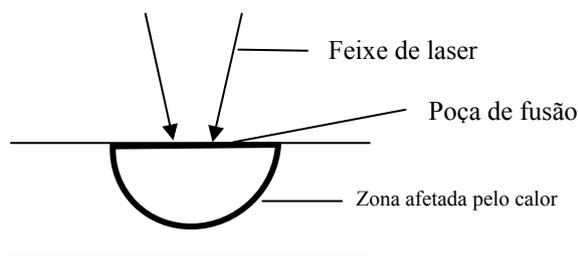
(d) A intensidade e a duração do pulso de laser devem estar num regime onde a vaporização da superfície não se torne excessiva.

Com todos esses obstáculos parece surpreendente que soldas de alta qualidade usando laser sejam possíveis. Entretanto, constantes térmicas e mecânicas agem para atenuar estes problemas com o balaço térmico na solda a laser, suavizando flutuações para uma amplitude mínima e estabelecendo condições para uma soldagem estável [29].

Existem duas técnicas fundamentais de soldagem a laser: por condução e por penetração ou “keyhole”. A diferença básica entre elas está na superfície da poça de solda, que permanece íntegra durante a solda por condução e é alterada na solda por penetração pelo feixe de laser que penetra na região de fusão [29]. Essas técnicas de soldagem são possíveis de serem executadas com laser contínuo ou pulsado. No caso do laser pulsado, a duração do pulso e a intensidade do feixe definem se a solda é feita por condução ou por penetração [32].

### 2.3.1 Solda a laser por condução

Na solda a laser por condução, o material de base é aquecido pelo feixe de laser até alcançar sua temperatura de fusão, sem criar vaporização [33]. A energia do feixe é absorvida pela superfície e penetra no material por condução térmica – Figura 2.9.

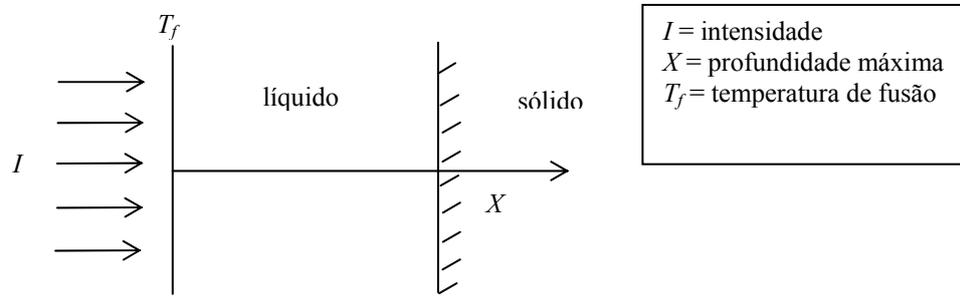


**Figura 2.9: Desenho esquemático da técnica de solda a laser por condução.**

Nas aplicações de soldagem por condução, é importante conhecer a profundidade de penetração máxima da poça de fusão, no tempo em que a superfície da amostra é exposta ao

feixe de laser incidente, até alcançar a temperatura de vaporização,  $T_v$ . Isso porque, para tempos maiores do que este, uma vaporização significativa poderá ocorrer na superfície fazendo com que a poça de fusão seja reduzida no material [21].

Para tratar este problema, é usualmente assumido que o sólido está na forma de uma chapa semi-infinita, seu aquecimento é uniforme a uma intensidade constante e que há presença de uma fase líquida no material [21]. Essa geometria é mostrada na Figura 2.10.



**Figura 2.10: Aquecimento de um sólido semi-infinito na presença de uma fase líquida.**

As condições mostradas na Figura 2.10 são produzidas quando a temperatura na superfície alcança a temperatura de fusão  $T_f$ , onde o tempo  $t$  é igual a zero quando  $t = t_f$  (tempo = tempo de fusão). A partir da Equação unidimensional (2.20) podemos tirar o tempo de fusão, dado por:

$$t_f = \frac{\pi K^2 T_f^2}{4k^2 I^2} \quad (2.25)$$

Onde  $K$  e  $k$  são, respectivamente, a condutividade térmica e a difusividade térmica do material;  $T_f$ , a temperatura de fusão e  $I$ , a intensidade do feixe de laser.

Dessa forma, a máxima profundidade de penetração da poça de fusão ocorre quando  $t = t_v$  (tempo = tempo de vaporização), isto é, onde a temperatura de vaporização  $T_v$  é alcançada na superfície da amostra [21]:

$$t_v - t_f = 4,76t_f \left[ \left( \frac{T_v}{T_f} \right) - 1 \right] \quad (2.26)$$

E a máxima profundidade de penetração é dada por [21]:

$$X = \left( \frac{1,2K}{I} \right) T_f \left[ \left( \frac{T_v}{T_f} \right) - 1 \right] \quad (2.27)$$

Onde  $t_v$ ,  $t_f$ ,  $T_v$  e  $T_f$  são, respectivamente, tempo de vaporização, tempo de fusão, temperatura de vaporização e temperatura de fusão.  $K$  é a condutividade térmica do material e  $I$ , a intensidade do feixe de laser.

Como pode ser observada, a máxima profundidade de penetração é maior quando  $K$  e  $T_v/T_f$  possuem valores altos.

Sob estas condições, isto é, que limitam a execução da solda a laser por condução, Duley [21] apresenta uma tabela com razão entre a temperatura de fusão  $T_f$  e a temperatura de vaporização  $T_v$  dos principais metais. Dos resultados, podemos dizer que, para a maioria dos metais,  $T_f$  é aproximadamente metade de  $T_v$ . Isso conduz a uma outra aproximação, utilizando as equações (2.26) e do comprimento de difusão térmica do material (Equação (2.5)), onde a máxima profundidade de penetração da poça de fusão é  $\sim (k.t_f)^{\frac{1}{2}}$ ; sendo  $t_f$ , o tempo de fusão descrito pela Equação (2.25).

Como resultado das condições acima apresentadas, a profundidade de penetração máxima só é obtida, na soldagem por condução, utilizando lasers contínuos (cw) ou com pulsos longos de baixa a moderada intensidade [21,29]. Nos lasers cw, a temperatura de vaporização da superfície pode ser controlada pelo tempo de exposição da amostra à radiação laser, que depende do raio do feixe focalizado (considerando um feixe de distribuição gaussiana) e da velocidade de propagação da amostra, descrita por:

$$t_{ex} = \frac{w}{v} \quad (2.28)$$

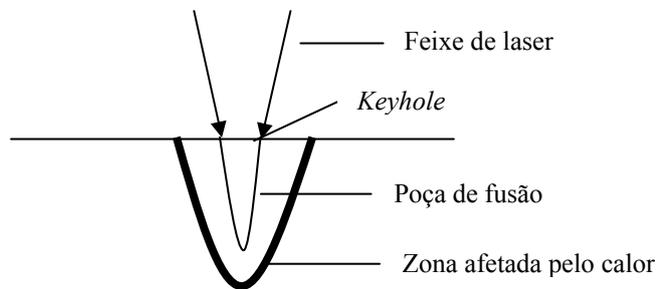
Onde  $w$  é o raio do feixe focalizado e  $v$ , a velocidade da amostra.

No caso de lasers com pulsos longos, a duração do pulso deve ser igual a  $t_v$ , fazendo que a poça de fusão atinja sua profundidade máxima sem uma vaporização indesejável na superfície. Na prática, a alteração da duração do pulso para obter tais condições, pode não ser possível e é preferível controlar a intensidade incidente do feixe, atenuando assim, a vaporização da superfície [21].

A utilização de lasers com pulsos curtos de alta intensidade não é possível na solda por condução, pois, a temperatura de vaporização é alcançada rapidamente, impedindo a propagação estável da poça de fusão dentro do material. Neste caso, a profundidade de penetração máxima é dada pelo comprimento de difusão térmica do material – Equação (2.5), onde o tempo de propagação da poça na amostra é igual ao tempo do pulso  $t_p$  do laser utilizado.

### 2.3.2 Solda a laser por penetração

Na soldagem por penetração o material é evaporado por um feixe de alta potência e, devido à pressão resultante do vapor, um orifício conduzido pelo feixe de laser é formado dentro da amostra. Esse orifício é chamado de *keyhole* – Figura 2.11. Quando a coluna de vapor se movimenta no orifício formado, o material é fundido ao longo de sua profundidade e se solidifica em torno de sua parede [2,33].



**Figura 2.11: Desenho esquemático da técnica de solda a laser por penetração.**

A formação do *keyhole* é de fundamental importância na soldagem a laser por penetração. A geometria do *keyhole* é uma função complexa das condições de focalização do feixe, propriedades do material e do tempo de interação [2].

Entretanto, a maneira como isto ocorre ainda não é suficientemente bem conhecida, mas comprovadamente inicia-se com a vaporização na superfície da poça de fusão [29,34]. O *keyhole* criado em uma situação estática tem uma geometria similar à furação a laser. Esta geometria é uma função complexa das condições de focalização do feixe, propriedades do material e do tempo de interação [2].

Segundo Duley [29], no estágio inicial de vaporização, a superfície do metal não sofre perturbação e o feixe de laser incidente está na direção normal a ela. Entretanto, a tensão superficial na poça de fusão próximo à temperatura de vaporização pode causar uma elevação

do líquido na periferia da poça de solda. Esta mudança de geometria facilita uma autofocalização no centro da poça, criando um aumento de intensidade neste ponto, fazendo com que o limiar de formação de um *keyhole* seja ultrapassado rapidamente.

Desta forma, o líquido do centro da poça de fusão flui para a periferia, aumentando a intensidade do feixe de laser no centro, promovendo a vaporização. A geometria cônica gerada deste modo penetra gradualmente e assume uma grande razão de aspecto. Por definição, a razão de aspecto, que é a relação da profundidade pela largura do cordão de uma solda a laser por penetração, pode atingir valores iguais ou superiores a quatro [2]. O mecanismo descrito acima pode acontecer em dois estágios. No primeiro, uma concavidade rasa é formada com uma profundidade comparada ao raio da poça de fusão. Em seguida, esta geometria focaliza o feixe no centro da concavidade líquida, onde o furo cilíndrico é formado. Assim, as condições de soldagem por penetração são atingidas satisfatoriamente [29].

### 3 Microsoldagem com Laser de Pulsos Curtos e Alta Taxa de Repetição

#### 3.1 Aquecimento de um metal utilizando o laser pulsado

A soldagem a laser pulsado tornou-se uma ferramenta versátil na soldagem de componentes pequenos e/ou sensíveis ao calor, onde o aquecimento localizado promove uma baixa distorção na região da solda [4].

Conforme já mencionado, a efetiva soldagem de uma amostra depende da propagação da fusão até o fim desta amostra durante o tempo de interação com o feixe de laser, ao mesmo tempo evitando a vaporização da superfície.

Em geral, os lasers utilizados para efetuar soldas com espessura entre 10 e 100  $\mu\text{m}$  são do tipo pulsado, com pulsos longos entre 0,1 e 1 ms [35]. Pulsos curtos não são geralmente utilizados nesta soldagem por causa da limitada profundidade de penetração térmica alcançada. Ao analisarmos, por exemplo, a penetração térmica em chapas de aço inoxidável utilizando um laser pulsado na ordem de nanosegundos, observa-se que a profundidade não ultrapassaria 1  $\mu\text{m}$  – Equação (2.5). Entretanto, se considerarmos o tempo de interação da radiação laser com a matéria, como sendo a superposição desses pulsos de laser – que depende da velocidade de soldagem e do raio do feixe focalizado sobre a superfície da amostra -, a profundidade de penetração do calor poderá ser maior do que o esperado com o tempo de um único pulso. Assim, para lasers pulsados com alta taxa de repetição, o tempo de exposição da amostra é equivalente ao tempo considerado no caso de lasers contínuos (Equação (2.28)) e pode ser descrito por:

$$t_{ex}' = \frac{n_p}{f_p} \quad (3.1)$$

Onde  $n_p$  é o número de pulsos aplicados sobre a superfície da amostra e  $f_p$  é a taxa de repetição do laser.

Dessa maneira, a fim de obter os resultados da condução do calor na amostra durante o tempo de interação com a radiação de um laser pulsado, utilizamos o modelo de aquecimento uniforme sobre a superfície de um sólido semi-infinito [21,23], descrito anteriormente na seção 2.2.2.

Considerando uma fonte gaussiana, a temperatura residual após a aplicação de um único pulso de laser na superfície da amostra pode ser descrita pela equação:

$$TRI(x, y, z, tt) = \int_0^{t_p} TR(I, x, y, z, tt - t) dt \quad (3.2)$$

Onde a função  $TR$  é dada por:

$$TR(I, x, y, z, t) = \frac{Iw^2 \sqrt{\frac{k}{\pi}}}{K\sqrt{t}} \frac{1}{4kt + w^2} \exp\left(\frac{-z^2}{4kt} - \frac{x^2 + y^2}{(4kt) + w^2}\right) \quad (3.3)$$

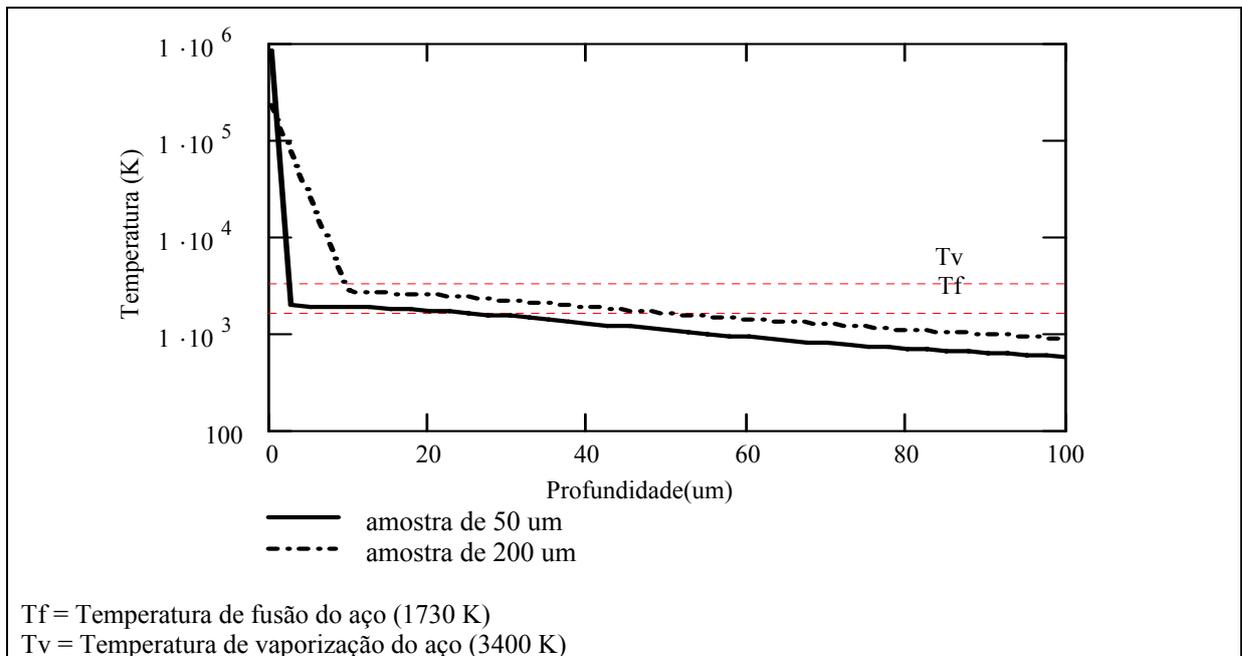
Onde  $I$  é a intensidade do feixe,  $w$  é raio do feixe focalizado sobre a amostra,  $k$  e  $K$  são respectivamente, difusividade e condutividade térmica do material;  $z$  é a espessura da amostra,  $x$  e  $y$  são as distâncias laterais do centro do feixe e  $t$ , a variação do tempo.

A partir das Equações (3.2) e (3.3) podemos calcular a temperatura final no material, acumulada após a aplicação de vários pulsos de laser:

$$TA(x, y, z, n) = \left( \sum_{i=0}^n TRI\left(x, y, z, \frac{i}{f_p} + t_p\right) \right) + T_0 \quad (3.4)$$

Onde  $n$  é o número de pulsos aplicado,  $fp$  é a taxa de repetição do laser,  $t_p$  é o tempo do pulso e  $T_0$ , a temperatura ambiente.

A Figura 3.1 descreve os resultados teóricos da temperatura alcançada em relação à espessura da amostra, obtida após a aplicação de vários pulsos de laser sobre as chapas de aço, considerando apenas o centro do feixe de distribuição gaussiana. Nos casos considerados, o laser, com intensidade de pico variando entre 1 e 3  $\text{GW}/\text{cm}^2$ , incide na superfície da amostra com uma velocidade de soldagem de 3  $\text{mm}/\text{s}$ .



**Figura 3.1: Temperatura alcançada em relação à espessura da amostra, obtida após a aplicação de vários pulsos de laser - com intensidade de pico variando entre 1 e 3  $\text{GW}/\text{cm}^2$  - sobre as chapas de aço, considerando apenas o centro do feixe de distribuição gaussiana.**

A Figura acima revela que as curvas atingem a temperatura de fusão do aço aproximadamente na metade da espessura total de cada amostra, isto é, o valor mínimo necessário para fundir o material e criar uma região de soldagem. Concluímos então que a penetração da poça de fusão é insuficiente, se considerarmos o processo de soldagem por

condução e, portanto, não pode explicar o processo de microssoldagem a laser com pulsos curtos de alta taxa de repetição. Entretanto, o valor da temperatura na amostra com a aplicação de um único pulso, excede a temperatura de vaporização do aço considerado, formando vapor e conduzindo ao mecanismo de perfuração da amostra na região focalizada pelo feixe de laser. É este processo que discutiremos na próxima seção.

### 3.2 Formação da cavidade em uma amostra irradiada por um feixe de laser pulsado

No processo de condução de calor, considerado na seção anterior, vimos que a vaporização da superfície é indesejável para as aplicações de soldagem a laser. Quando utilizamos lasers com altos valores de intensidade ( $> 10^6 \text{ W/cm}^2$ ) na interação com a matéria, o processo físico dominante é a vaporização e o papel da fusão do material tende a ser menos significativo [20]; fazendo com que as aplicações dominantes estejam ligadas à remoção de material, como: perfuração e corte. Entretanto, na utilização de lasers com pulsos longos, a condução transversal do calor no plano da superfície continua sendo significativa, criando uma dependência com o tamanho focal do feixe de laser. Já para lasers com pulsos curtos, o tempo de interação com a matéria é suficientemente baixo e a condução térmica pode ser desprezada [21].

Dessa maneira, a razão com que o material é removido na interação com o laser torna-se significativa quando a intensidade e a duração do pulso são tais que a superfície atinge a temperatura de vaporização do material em um tempo menor do que a largura do pulso. Muitas vezes, esse tempo - descrito pela equação abaixo -, é apenas uma pequena fração da duração do pulso de laser [20,21].

$$t_v = \frac{\pi K^2 T_v^2}{4 I^2 \varepsilon^2 k} \quad (3.5)$$

Onde  $I$  é a intensidade do laser e  $K$ ,  $k$ ,  $\varepsilon$ ,  $T_v$  são condutividade térmica, difusividade térmica, emissividade e temperatura de vaporização do material; respectivamente.

Assim, em equilíbrio, a remoção de material é governada pela equação de energia, dada por [21]:

$$v = \frac{\varepsilon I}{\rho(L_v + c_p T_{vap})} \quad (3.6)$$

Onde  $\varepsilon$ ,  $\rho$  e  $c_p$  são respectivamente emissividade, densidade e calor específico do material;  $L_v$  é o calor latente de vaporização,  $T_v$  é a temperatura do vapor e  $I$ , a intensidade do laser incidente.

A Equação (3.6) fornece a velocidade com que o material, em forma de vapor, é retirado na região de focalização do feixe de laser. Essa velocidade aumenta linearmente com a intensidade do feixe incidente sobre a amostra até um limite estabelecido pela equação termodinâmica, descrita por [21]:

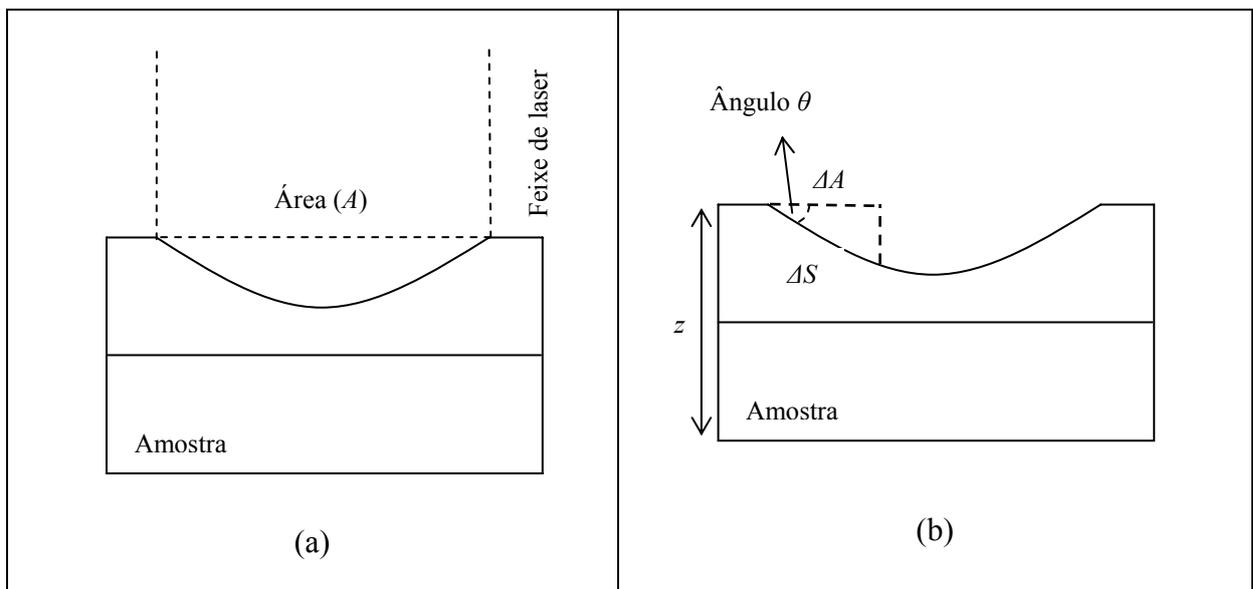
$$v = C \exp\left(\frac{-mL_v}{\kappa T_{vap}}\right) \quad (3.7)$$

Onde  $C$  é a velocidade do som no material (na ordem de 5000 m/s, em metais),  $L_v$  é o calor latente de vaporização,  $T_{vap}$  a temperatura de vapor e  $\kappa$ , a constante de Boltzmann. Esta equação estabelece a velocidade média das partículas ejetadas da superfície, considerando equilíbrio termodinâmico na temperatura  $T_{vap}$ .

Segundo Duley [21], a temperatura  $T_{vap}$  equivale à temperatura de evaporação do material ( $T_v = 3400$  K do aço), exceto para feixes de laser com alta intensidade ( $> 10^8$  W/cm<sup>2</sup>).

Para estes casos, o valor da temperatura de vapor no processo de remoção de material durante a interação laser-matéria é encontrado quando igualamos as Equações (3.6) e (3.7) e pode chegar a valores superiores à  $T_v$  – como em nossos estudos, onde o valor obtido foi de  $10^5$  K.

Sob as condições descritas acima, podemos afirmar que no estágio inicial de vaporização, isto é, na aplicação do primeiro pulso de laser, a superfície do material não sofre perturbação e o feixe incidente está na direção normal a ela [2]. A Figura 3.2-a mostra um desenho esquemático da geometria da amostra após a aplicação do primeiro pulso de laser sobre a superfície de um metal. Assim, para descrevermos a formação de uma cavidade numa amostra irradiada por um feixe de laser pulsado, devemos considerar a remoção de material ocorrida após a aplicação do pulso anterior, formando uma nova geometria no material e influenciando a área onde o pulso subsequente irá incidir. Para isso, consideramos um triângulo, conforme mostrado na Figura 3.2-b, e calculamos  $\Delta S$  como sendo  $\Delta S = \Delta A / \cos \theta$ , redefinindo assim uma nova geometria na amostra.



**Figura 3.2:** Desenho esquemático da geometria de uma amostra incidida por um feixe de laser pulsado. (a) após a aplicação de um pulso de laser, (b) cálculo da área deixada pelo pulso anterior.

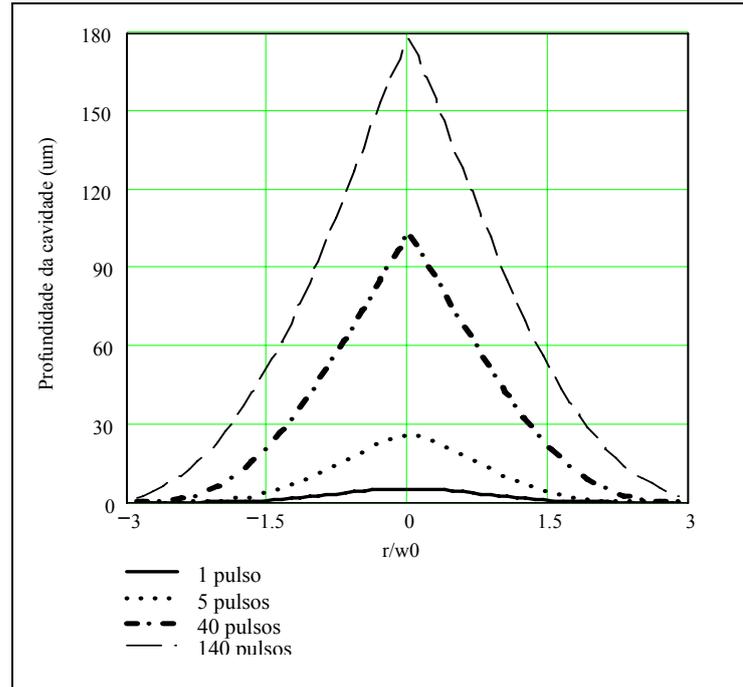
Dessa forma, em uma cavidade, ao considerarmos uma nova área para cada pulso incidido sobre o material, podemos definir a intensidade do feixe de laser dependente da posição,  $\Delta z$ , na espessura da amostra,  $z$ . Assim:

$$I^{(z)} = \frac{P\varepsilon(\theta)}{A} \cos \theta \quad (3.8)$$

Onde  $P$  é a potência do laser,  $\varepsilon$  é emissividade do material,  $A$  é a área focalizada na amostra e  $\theta$ , a inclinação formada para cada pulso incidido no material.

Outro fator que afeta a absorção da radiação laser na cavidade formada é a dependência da refletividade  $R$  com o ângulo de incidência,  $\theta$ , do feixe em relação à superfície do material (equações de Fresnel [36]), onde a refletividade é total ( $R \rightarrow 1$ ) quando  $\theta \rightarrow \pi/2$ . No modelo desenvolvido em nossos estudos, apenas uma reflexão constante do feixe foi considerada, onde  $\theta = \theta_{\text{critico}} = 80^\circ$  e  $R(\theta > \theta_{\text{critico}}) = 1$ . Como a geometria da cavidade é côncava, uma eficiente armadilha é formada para o feixe de laser, que fica aprisionado, refletindo  $n$  vezes dentro do orifício; resultando em uma contribuição extra de calor nas paredes da cavidade. Isso nos leva a concluir que o “afunilamento” da cavidade poderia ser maior, tornando sua geometria ainda mais côncava.

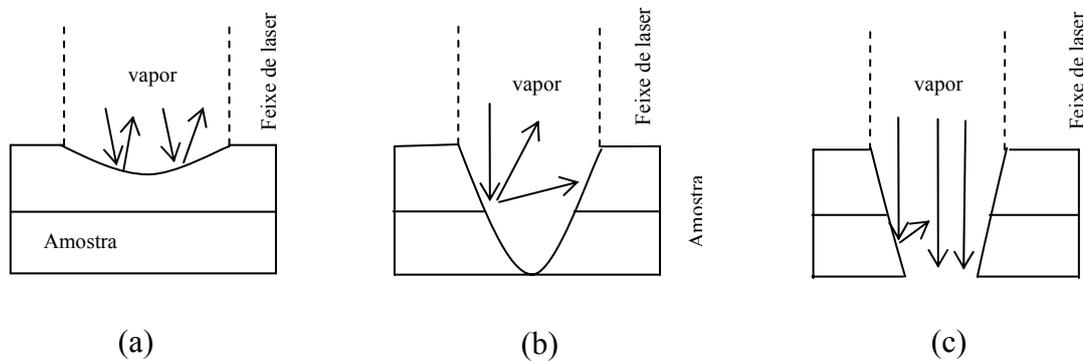
Considerando o modelo citado, a Figura 3.3 mostra os resultados teóricos da formação de cavidades em amostras de aço inoxidável, feitas através da aplicação de um feixe de laser pulsado com alta taxa de repetição e potência média na ordem de 20 W. Note que para um número pequeno de pulsos aplicados sobre a amostra, o perfil da cavidade formada aproxima-se do perfil de intensidade do feixe utilizado. Já para um número de pulsos maior, a refletividade nas paredes torna o perfil da cavidade cada vez mais côncavo.



**Figura 3.3:** Formação de cavidades em amostras de aço inoxidável, feitas através da aplicação de um feixe de laser pulsado com alta taxa de repetição e potência média na ordem de 20 W.

Conforme já mencionado, na interação da matéria com feixes de alta intensidade, a maior parte da energia incidente é consumida no processo de vaporização do material. Além disso, no caso da utilização de um laser de pulsos curtos com alta taxa de repetição, o tempo de exposição da amostra à radiação laser vai depender da quantidade de pulsos aplicados sobre a superfície do material - Equação (3.1). Dessa forma, a energia absorvida pela amostra gera três situações distintas. A Figura 3.4 mostra um desenho esquemático dessas situações. (a) Uma pequena quantidade de pulsos de laser é aplicada sobre a superfície do material. Nesta situação, a profundidade de penetração na amostra é pequena e o vapor gerado durante a interação é perdido para o meio. (b) Uma maior quantidade de pulsos de laser é aplicada sobre a superfície da amostra, gerando um orifício de geometria côncava. Neste caso, podemos dizer hipoteticamente que o vapor gerado, em cada pulso aplicado, se condensa na superfície interna do orifício, redistribuindo a energia do feixe de laser em toda a extensão da cavidade durante o tempo entre pulsos. (c) Uma quantidade muito grande de pulsos de laser é

aplicada sobre a amostra, criando uma cavidade profunda no material. Aqui, o vapor gerado pela ação do laser é transmitido através desse furo e a energia depositada na cavidade torna-se menor.

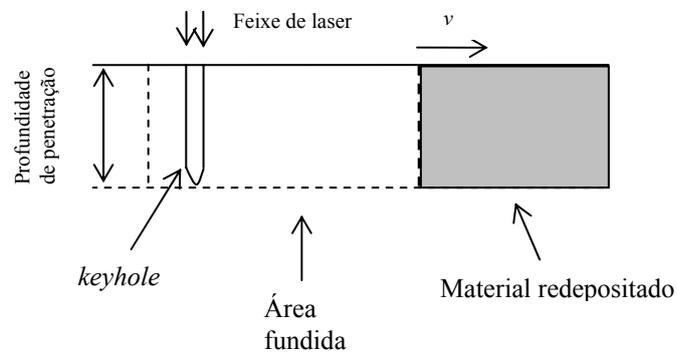


**Figura 3.4: Desenho esquemático das situações geradas na amostra durante a absorção da energia do feixe de laser. (a) pequena quantidade de pulsos aplicados, (b) maior quantidade de pulsos aplicados e (c) quantidade muito grande de pulsos aplicados.**

Considerando as situações descritas, existe então, uma fração de energia do laser acoplada no material que depende diretamente da geometria da cavidade. Esta fração pode ser considerada desprezível ( $f_r = 0$ ), se a profundidade de penetração da cavidade formada no material for pequena; e máxima ( $f_r = 1$ ), quando a profundidade de penetração na amostra cresce.

Isso nos leva a uma outra hipótese que a redistribuição da energia do feixe de laser ocorre em toda a profundidade da amostra, similar à ocorrida no processo de soldagem conhecido como *keyhole* (seção 2.3.2), feita por lasers contínuos (cw) ou de pulsos longos. Entretanto, note que em nossos estudos, a profundidade de penetração na amostra foi obtida utilizando um feixe de laser com potência média baixa, variando de 10 a 20 W. O mesmo não ocorre na utilização de um laser cw, por exemplo, onde a potência requerida é até 100 vezes maior [20].

Assim, para descrever o processo de redeposição de material na interação com um laser de pulsos curtos de alta taxa de repetição, podemos utilizar o modelo (desenvolvido por Rosenthal [37]) da teoria de keyhole, assumindo que uma fração de energia ( $f_r$ ) do laser incidente é absorvida em uma chapa semi-infinita ao longo de uma linha (no modelo original de Rosenthal,  $f_r$  é simplesmente a emissividade do material). A geometria desse modelo é esquematizada na Figura 3.5 [21].



**Figura 3.5: Geometria do modelo de penetração de uma chapa semi-infinita.**

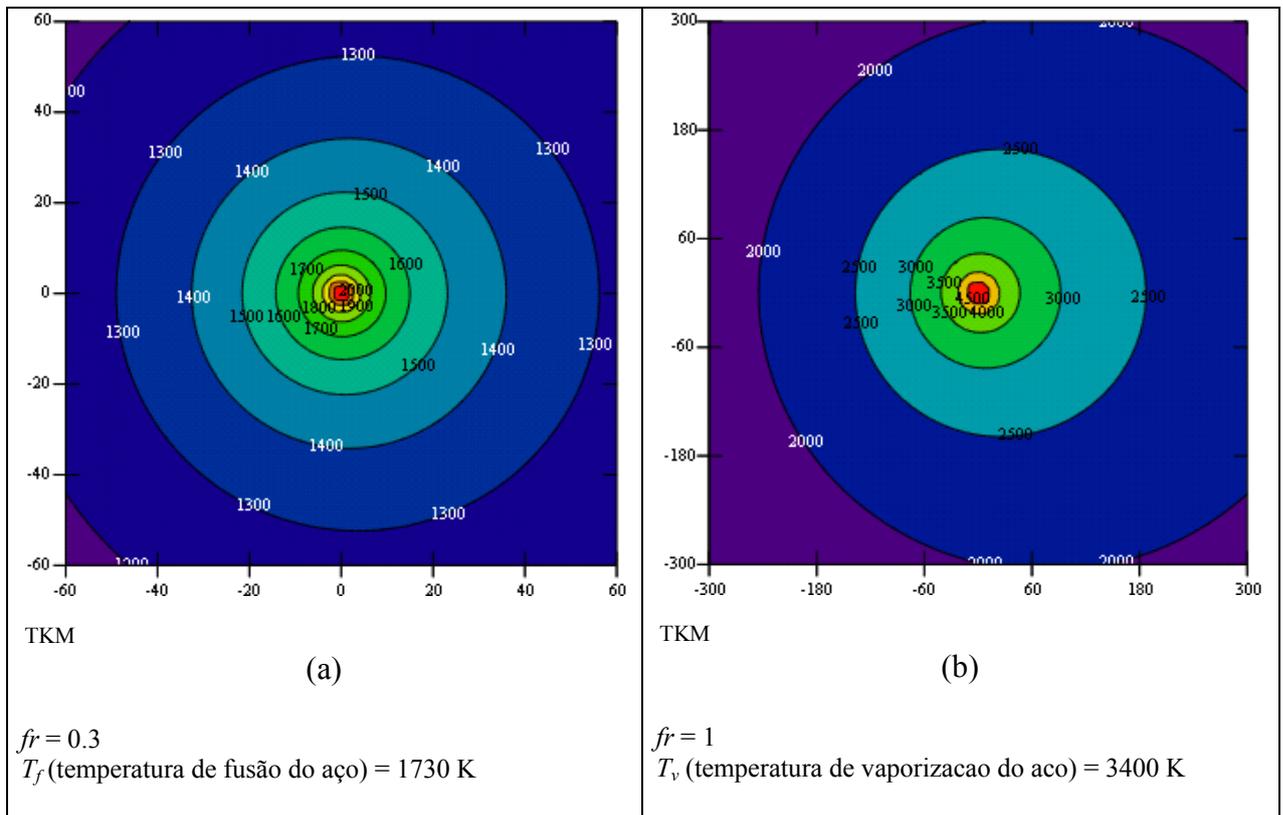
Dessa forma, o perfil de distribuição de temperatura neste modelo é dado pela fórmula de Rosenthal [37]:

$$T(x, y) = \frac{P f_r}{2\pi K L C} \exp\left(x \frac{v}{2k}\right) K_0\left(\sqrt{x^2 + y^2} \frac{v}{2k}\right) \quad (3.9)$$

Onde  $P$  é a potência média do laser,  $f_r$  é a fração da potência do laser absorvida,  $K$  e  $k$  são respectivamente, a condutividade e difusividade térmica do material.  $LC$  é a espessura da chapa e  $K_0$ , a função Bessel de ordem 0 e  $v$ , a velocidade de translação da chapa.

Baseado na Equação (3.9), uma representação do perfil de temperatura em chapas de aço inoxidável, após a incidência de um feixe com potência média de aproximadamente 20

W, é apresentado na Figura 3.6. Em ambos os casos, a velocidade de translação da chapa considerada foi de 3 mm/s. As temperaturas estão em Kelvin (apresentadas em cores) e as áreas mostradas estão em  $\mu\text{m}^2$ . Observe que em (a), numa área de aproximadamente  $20 \times 20 \mu\text{m}^2$ , a temperatura alcançada é suficiente para fundir o material considerado. Já em (b), considerando o fator de acoplamento máximo de energia, uma área muito grande da chapa ( $\sim 60 \times 60 \mu\text{m}^2$ ) é transformada em vapor. Isso nos leva a concluir que, apesar da região da fusão criada ao redor desta região, o perfil do cordão de solda gerado no processo de soldagem por penetração não é possível.



**Figura 3.6: Representação do perfil de temperatura em chapas de aço inoxidável, baseado na equação de Rosenthal, após a incidência de um feixe com potência média de aproximadamente 20 W. (a) fração,  $f_r$ , da potência do laser absorvida = 0.3; (b)  $f_r = 1$ .**

## **4 Material e Procedimento Experimental**

Neste capítulo são descritos as características do aço utilizado nos experimentos e sua composição química. E ainda, o aparato experimental utilizado nas experiências de microsoldagem, bem como os vários procedimentos utilizados na medição dos parâmetros importantes no processo de interação do laser com as amostras.

### **4.1 Aço inoxidável austenítico AISI 304**

O material utilizado para o estudo de microsoldagem foi o aço inoxidável austenítico AISI 304. Esse tipo de aço faz parte do grupo dos inoxidáveis que apresenta uma estrutura predominantemente austenítica à temperatura ambiente e possui, dentre outras características, excelente soldabilidade, baixa porosidade e boa resistência à corrosão [29]. A escolha desse tipo de material para o nosso estudo foi pelas características descritas acima e por sua grande aplicabilidade, como por exemplo, nas indústrias aeronáuticas, química, ferroviária, naval, petroquímica, de papel e celulose, têxtil, frigorífica, hospitalar, alimentícia, farmacêutica e cosmética; além de servir de matéria-prima para a fabricação de utensílios domésticos, estampagem geral e profunda, tubos e tanques em geral [38].

Os experimentos deste estudo utilizaram chapas AISI 304 com espessura de 25, 50 e 100  $\mu\text{m}$ , cortadas nas dimensões de 10 mm x 25 mm, aproximadamente. Na chapa de 100  $\mu\text{m}$  de espessura uma análise da composição química foi feita pelo Laboratório de Fluorescência de raios X do CQMA/IPEN, e os resultados desta análise estão apresentados na Tabela 4.1.

**Tabela 4.1: Composição química do aço inoxidável austenítico AISI 304**

	C (%)	Fe (%)	Cr (%)	Ni (%)	Mn (%)	Si (%)	Mo (%)
AISI 304	0,027	69,962	19,557	8,994	0,934	0,480	0,072

## 4.2 O laser de Cu-HBr

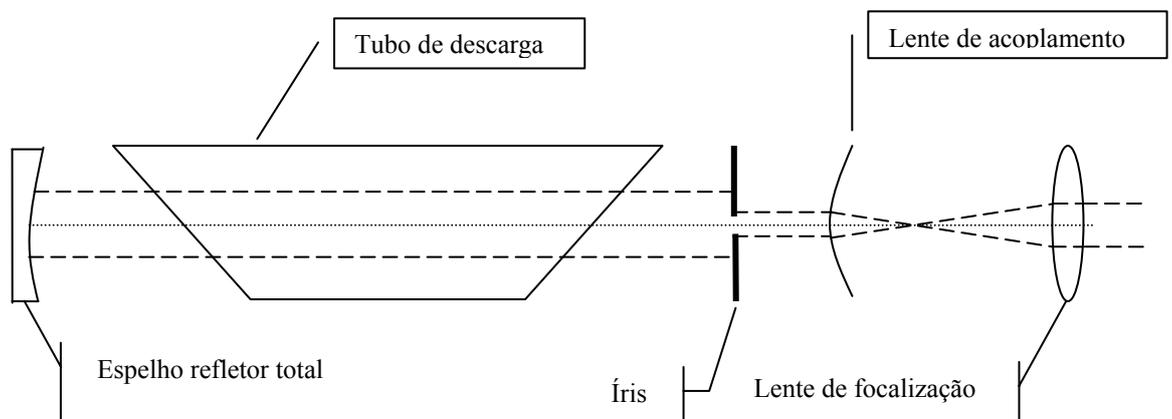
O laser de Cu-HBr, utilizado nas experiências, foi construído nos laboratórios da Divisão de Fotônica do IEAv/CTA [13]. Emite radiação simultaneamente em dois comprimentos de onda, 510 nm (verde) e 578 nm (amarelo). O meio ativo é gerado como se segue. Peças de cobre sólido são colocadas dentro do tubo de descarga elétrica; uma mistura de neônio e ácido bromídrico (HBr) é injetada no tubo de descarga. O HBr reage com o cobre sólido, gerando CuBr; o tubo de descarga é aquecido pela própria descarga elétrica e a partir de 400° C, vapor de sal é gerado. Colisões com elétrons da própria descarga dissociam as moléculas do sal gerando átomos de cobre e bromo. Os átomos são excitados por colisão com elétrons da descarga, permitindo a inversão de população e a emissão laser [27].

Esse laser opera em regime pulsado, a altas taxas de repetição (10 – 20 kHz), emitindo pulsos curtos (20 a 50 ns) com baixa potência média (5 a 30 Watts) e altas potências de pico na região visível do espectro de frequências. Devido a estas características, muitas aplicações vêm sendo estudadas como, por exemplo, deposição de filmes finos, espectroscopia em vapores metálicos, separação isotópica usando lasers e vapores metálicos [27] e processamento de materiais. No processamento de materiais, algumas vantagens podem ser destacadas:

1. Velocidade no processamento de materiais, devido à alta taxa de repetição de pulsos;
2. Menor região afetada no material (HAZ), devido ao tempo de pulso curto;

3. Controle dimensional no processamento, devido à baixa energia por pulso (0,5 a 3 milijoules);
4. Maior absorção da radiação em metais, devido à emissão acontecer no espectro visível de frequências;
5. Baixa divergência do feixe de radiação, o que permite uma alta concentração da energia na superfície do material (irradiância superior a  $1 \text{ GW} / \text{cm}^2$ ) [23,39].

No caso do laser de Cu-HBr, a boa qualidade do feixe pode ser obtida utilizando cavidades instáveis. A Figura 4.1 mostra o diagrama esquemático do laser utilizado neste trabalho. Possui um tubo de descarga com 1,23 m de comprimento e uma cavidade instável constituída de: um espelho refletor total com raio de curvatura de 3,88 m e um espelho de saída, formado pela primeira superfície de uma lente plano-convexa com 0,15 m de distância focal. Uma íris intra-cavidade é usada para o controle da potência do laser. Devido à utilização da lente plano-convexa como espelho de acoplamento, o feixe de saída do laser é focalizado. Para manter o feixe de laser colimado utiliza-se uma segunda lente plano-convexa com distância focal de 0.20 m que, em conjunto com a primeira lente, forma um telescópio expensor [40].



**Figura 4.1: Desenho esquemático do laser de Cu-HBr**

Entretanto, antes de efetuar qualquer aplicação que envolva um laser, é importante conhecer as características da qualidade do feixe, definida pelo produto de sua divergência por seu diâmetro mínimo; bem como seu perfil espacial e temporal.

Em nossos estudos sobre microsoldagem a laser, a caracterização do feixe tornou-se tão importante quanto conhecer as características do material utilizado, uma vez que o resultado no processo poderia não ser alcançado ou não ser reprodutivo se o perfil de intensidade do laser fosse de alguma maneira modificado nos experimentos. Assim, a caracterização do feixe de Cu-HBr foi feita e será apresentada a seguir. Iniciaremos com uma breve apresentação teórica da propagação de um feixe de laser e em seguida, serão apresentados o arranjo experimental, o critério de medição e os resultados obtidos.

#### 4.2.1 Propagação de um feixe de laser

Segundo a teoria de propagação de feixes gaussianos, para um modo transversal eletromagnético (TEM) fundamental, o raio do feixe,  $w(z)$ , e o raio de curvatura da frente de onda do feixe,  $R(z)$ , obedecem, respectivamente, às seguintes equações [41]:

$$w(z) = w_0 \sqrt{1 + \left( \frac{\lambda z}{\pi w_0^2} \right)^2} \quad (4.1)$$

$$R(z) = z \left[ 1 + \left( \frac{\pi w_0^2}{\lambda z} \right)^2 \right] \quad (4.2)$$

Onde  $w_0$  é o raio na cintura do feixe,  $\lambda$  é o comprimento de onda e  $z$  é a posição ao longo do eixo de propagação.

Para feixes de ordem superiores, a distribuição de amplitude de campo,  $U_{mn}(r,z)$ , pode ser escrita como o produto da amplitude de campo de um feixe gaussiano,  $u(r,z)$  - modo fundamental TEM<sub>00</sub> -, pelas funções  $F_{mn}$ , que representam polinômios de Laguerre (geometrias circulares) ou de Hermite (geometrias retangulares), onde  $m$  e  $n$  representam a ordem do modo transversal (TEM <sub>$mn$</sub> ):

$$U_{mn}(r,z) = F_{mn}(r/w) \cdot u(r,z) \quad (4.3)$$

As magnitudes das funções  $F_{mn}$  somente têm dependência com o raio normalizado  $r/w(z)$ , ao longo do eixo de propagação. Assim, os raios dos feixes de ordem superior,  $W(z)$ , podem ser expressos como o produto do raio de um feixe gaussiano,  $w(z)$ , por um fator constante  $M$ , ou seja:

$$W(z) = Mw(z) \quad (4.4)$$

Substituindo esta relação nas equações (3.1) e (3.2), de propagação de feixe gaussiano no modo fundamental, obtém-se:

$$W(z) = W_0 \sqrt{1 + \left( \frac{M^2 \lambda z}{\pi W_0^2} \right)^2} \quad (4.5)$$

$$R(z) = z \left[ 1 + \left( \frac{\pi W_0^2}{M^2 \lambda z} \right)^2 \right] \quad (4.6)$$

Estas equações têm o mesmo aspecto das Equações (4.1) e (4.2), exceto pela quantidade  $M^2$ . O valor de  $M^2$  serve para indicar numericamente a qualidade do feixe, ou seja,  $M^2 = 1$  corresponde ao feixe perfeitamente gaussiano e  $M^2 > 1$ , a feixes de ordem superior ou

multimodos. E também a magnificação do diâmetro de feixes de ordens superiores, em relação ao modo fundamental TEM<sub>00</sub>.

A região próxima ao diâmetro mínimo,  $W_0$ , indica a largura da profundidade de foco onde o diâmetro do feixe é praticamente constante. Essa região é conhecida como região de Rayleigh e é dada por:

$$Z_R = \frac{\pi W_0^2}{\lambda M^2} \quad (4.7)$$

O intervalo definido por  $\pm Z_R$  é conhecido como parâmetro confocal e é descrito por:

$$b = 2.Z_R \quad (4.8)$$

Lembrando que a divergência do feixe,  $\theta$ , é dada por:

$$\theta = \frac{dw}{dz} \quad (4.9)$$

Para campos distantes,  $z \gg z_R$ , pode-se escrever:

$$\theta = \frac{M^2 \lambda}{\pi W_0} \quad (4.10)$$

As equações acima mostram claramente que para um feixe com qualidade  $M^2 > 1$ , o parâmetro confocal é menor, reduzindo assim a região de aplicação do laser. O parâmetro  $M^2$  é uma característica intrínseca do feixe e se mantém para qualquer diâmetro do feixe.

Supondo-se que a cintura do feixe,  $W_0$ , está a uma posição  $z_0$ , pode-se reescrever a Equação (4.5) como:

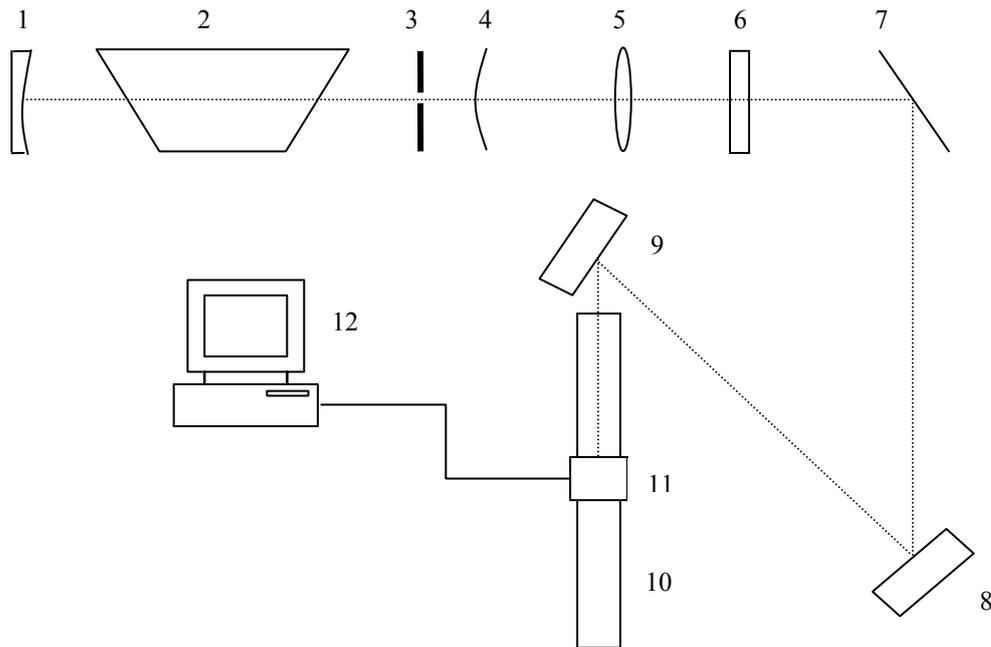
$$W^2(z) = W_0^2 + \theta^2 (z - z_0)^2 \quad (4.11)$$

Esta é a equação geral para a caracterização de um feixe de laser, válido tanto para feixes no modo fundamental, quanto para modos de ordem superior ou multimodos.

#### 4.2.2 Arranjo experimental e o critério de medição para caracterização do feixe

Para obtermos, em nossos estudos, as características do feixe de Cu-HBr (raio da cintura do feixe, divergência e  $M^2$ ) várias medidas experimentais foram realizadas ao longo do feixe e a partir daí ajustadas conforme o critério de segundo momento. Por este critério, considerando o modo fundamental TEM<sub>00</sub>, o diâmetro do feixe coincide com  $2 w_0$ , isto é, o diâmetro do feixe gaussiano [42,43].

A Figura 4.2 mostra um diagrama esquemático do arranjo experimental utilizado para a obtenção das distribuições espaciais de intensidade do feixe ao longo do seu eixo de propagação.

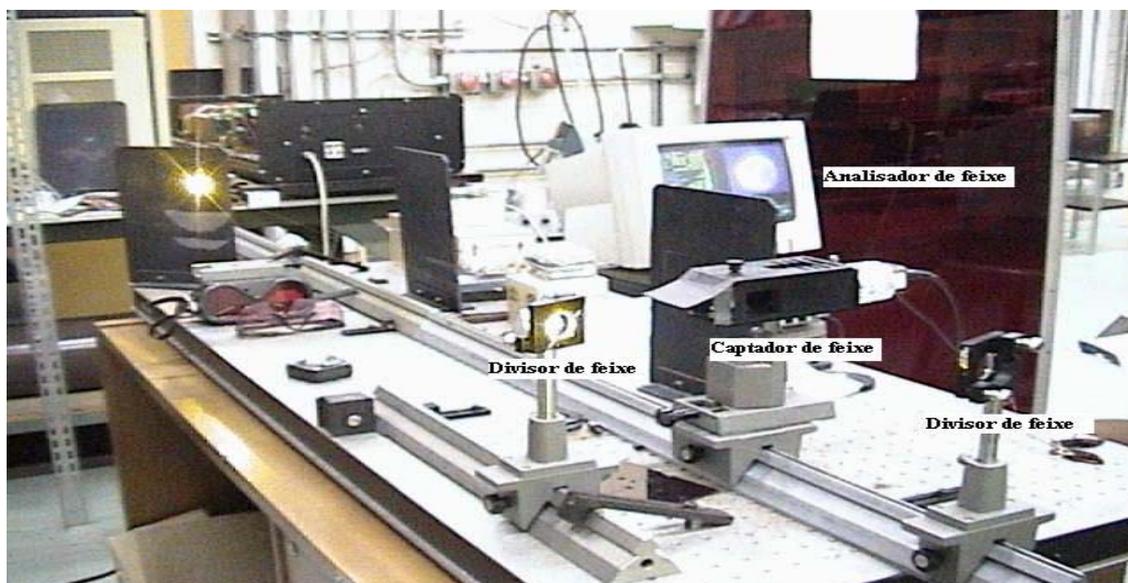


**Figura 4.2:** Diagrama esquemático do arranjo experimental para a caracterização do feixe de Cu-HBr; onde 1 é o espelho refletor total do laser, 2 o tubo do laser, 3 uma íris, 4 é a primeira superfície de uma lente plano-convexa, 5 uma lente de focalização, 6 um filtro dicróico e 7 um espelho plano. 8 e 9 são divisores de feixe com filme antirefletivo ( $R=2\%$ ), 10 uma régua de 1 m, 11 um captador de feixe e 12 o analisador de feixe (LBA-100 laser beam analyzer, Spiricon).

As lentes, plano-convexa e de focalização, formam um telescópio quando a distância entre elas é igual à soma das suas distâncias focais. Dessa forma, a alteração desta distância permite a focalização do feixe, sem a necessidade de utilização de uma terceira lente.

Para os nossos estudos a focalização do feixe e a origem, estabelecida para a coleta dos dados das distribuições espaciais, foram feitas a partir da lente de focalização do laser que atua na formação do seu telescópio. Um filtro dicróico foi colocado para separar os comprimentos de onda. Um espelho plano, a 33 cm de distância, reflete o feixe em direção à mesa de caracterização – Figura 4.3 -, que incide no primeiro divisor de feixe, com filme antirefletivo ( $R=2\%$ ). O feixe refletido no primeiro divisor de feixe incide no segundo divisor (180 cm de distância) redirecionando o feixe sobre um captador. O captador é formado por um prisma de quartzo, um conjunto de filtros atenuadores e uma câmera CCD (EIA, China).

A câmera CCD envia o sinal para o analisador de feixe (*Laser Beam Analyzer*, LBA-100, Spricon).



**Figura 4.3:** Mesa de caracterização do feixe de Cu-HBr

As medidas de distribuição de intensidade em relação à posição foram coletadas deslocando-se o captador sobre uma régua óptica, colocada na direção de propagação do feixe. As posições focais, encontradas para os dois comprimentos de onda de emissão verde e amarela, foram 250 cm e 237 cm respectivamente.

Os dados coletados (média de 100 quadros) foram calculados pelo próprio analisador de feixe e armazenados em disquete. Após essa coleta, esses dados foram transferidos para um computador e analisados com o auxílio do software *Mathcad 2001 Professional*. Usando o critério de segundo momento, como já mencionado, os diâmetros do feixe foram calculados e os resultados serão descritos a seguir.

### 4.2.3 Resultados da caracterização espacial do feixe de Cu-HBr

A caracterização do feixe foi feita para os dois comprimentos de onda de emissão do laser de Cu-HBr, 510 nm (verde) e 578 nm (amarelo).

Utilizando a equação geral para feixes (Equação (4.11)) e os resultados das medições dos diâmetros, obtidos em várias posições da régua para os dois comprimentos de onda de emissão verde e amarela, foi efetuado o ajuste da curva de propagação com o auxílio do software *Mathcad 2001 Professional*. A Figura 4.4-a mostra os valores medidos dos diâmetros e a curva ajustada para a emissão verde e a Figura 4.4-b, os valores medidos dos diâmetros e a curva ajustada para a emissão amarela. Os diâmetros do feixe foram obtidos em duas direções  $x$  e  $y$  transversais à propagação do feixe. Verificou-se que com o alinhamento preciso das lentes do telescópio, era possível obter um feixe com geometria razoavelmente circular, ao menos na região do parâmetro confocal. Nesta condição, definiu-se um diâmetro efetivo do feixe tomando o valor médio dos diâmetros medidos nas direções  $x$  e  $y$ .

A partir das curvas obtidas calculamos, para os dois comprimentos de onda de emissão verde e amarela, os valores de  $W_0$  e  $Z_0$  que representam o raio mínimo do feixe e sua posição ao longo do eixo de propagação, respectivamente; os valores de  $M^2$  (através da Equação (4.10)) que determina a qualidade do feixe e os valores de  $Z_R$ . Esses resultados estão apresentados na Tabela 4.2.

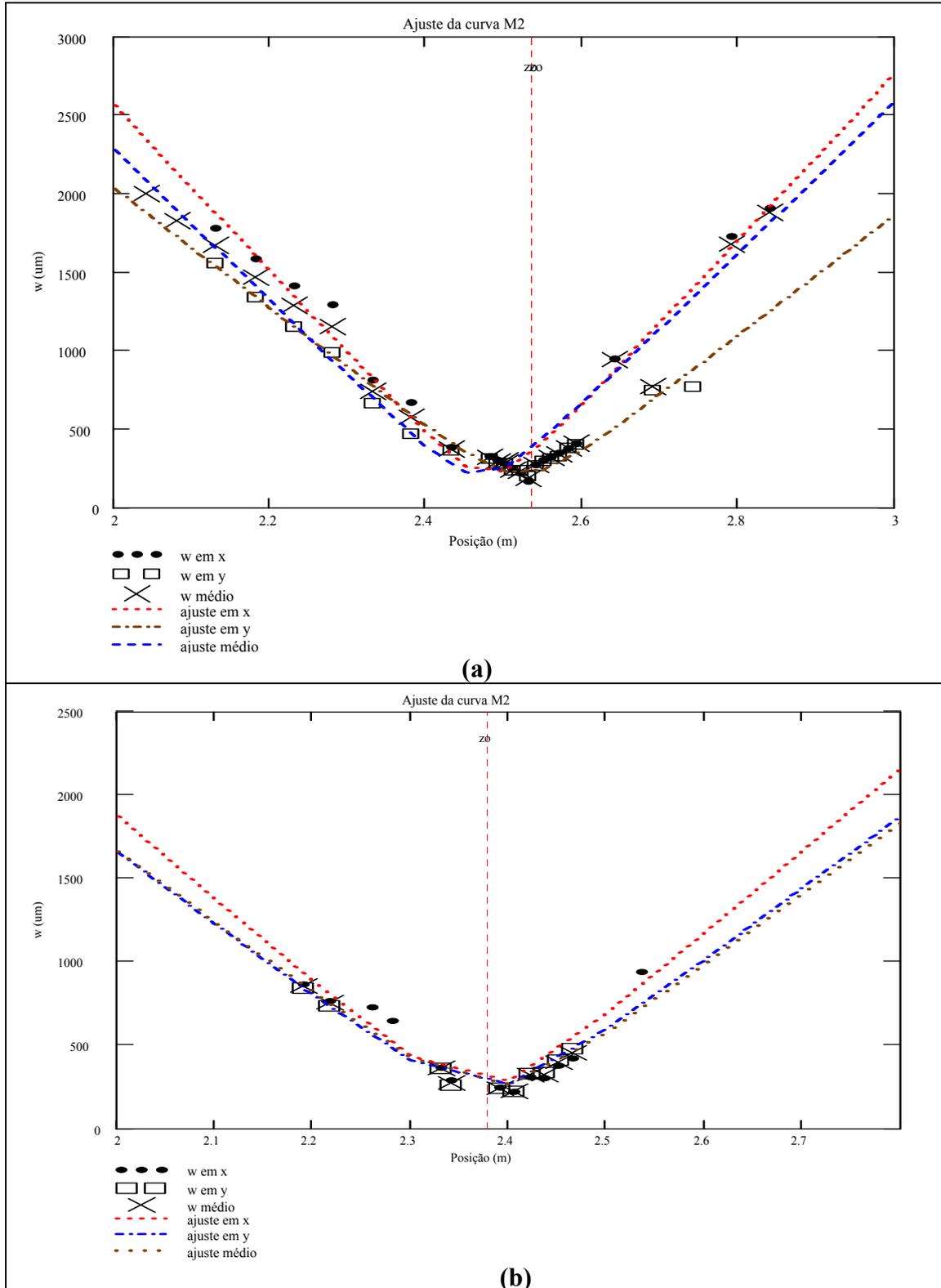
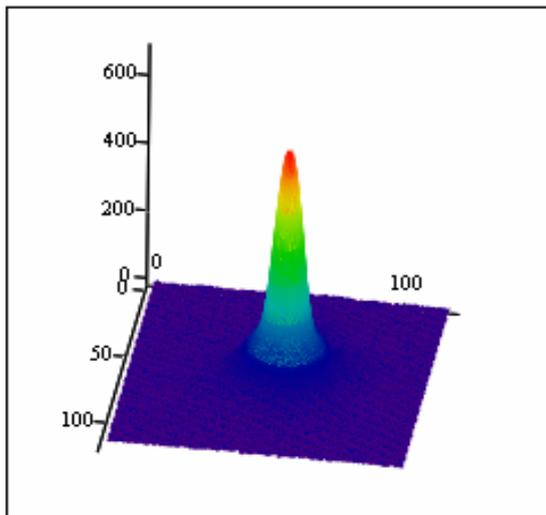


Figura 4.4: Resultados da medição do raio  $w(z)$  em função da posição  $z$ . (a)  $\lambda = 510$  nm e (b)  $\lambda = 578$  nm.

Tabela 4.2: Valores de  $W_0$ ,  $Z_0$ ,  $M^2$  e  $Z_R$  do feixe de laser de Cu-HBr

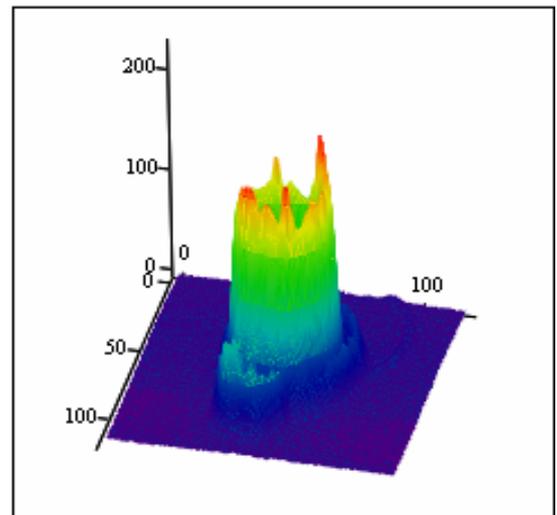
	$W_0$ ( $\mu\text{m}$ )	$Z_0$ (m)	$M^2$	$Z_R$ (m)
$\lambda = 510$ nm (verde)	$200 \pm 31$	$2.50 \pm 0.04$	$6 \pm 1$	$0.045 \pm 0.008$
$\lambda = 578$ nm (amarelo)	$220 \pm 39$	$2.37 \pm 0.01$	$6 \pm 1$	$0.047 \pm 0.011$

A Figura 4.5-a mostra o perfil espacial do feixe na região de focalização ( $z \leq Z_R$ ) e a Figura 4.5-b mostra o perfil espacial do feixe na região distante da posição de mínimo ( $z = 7 Z_R$ ), para o comprimento de onda de emissão verde. Da mesma forma, as Figuras 4.6-a e 4.6-b mostram, o perfil espacial do feixe na região de focalização ( $z \leq Z_R$ ) e na região distante da posição de mínimo ( $z = 5 Z_R$ ) para o comprimento de onda de emissão amarela.



AC2

(a)



AC1

(b)

Figura 4.5: Perfil espacial do feixe para o comprimento de onda de emissão verde, (a)  $z \leq Z_R$  e (b)  $z = 7 Z_R$ .

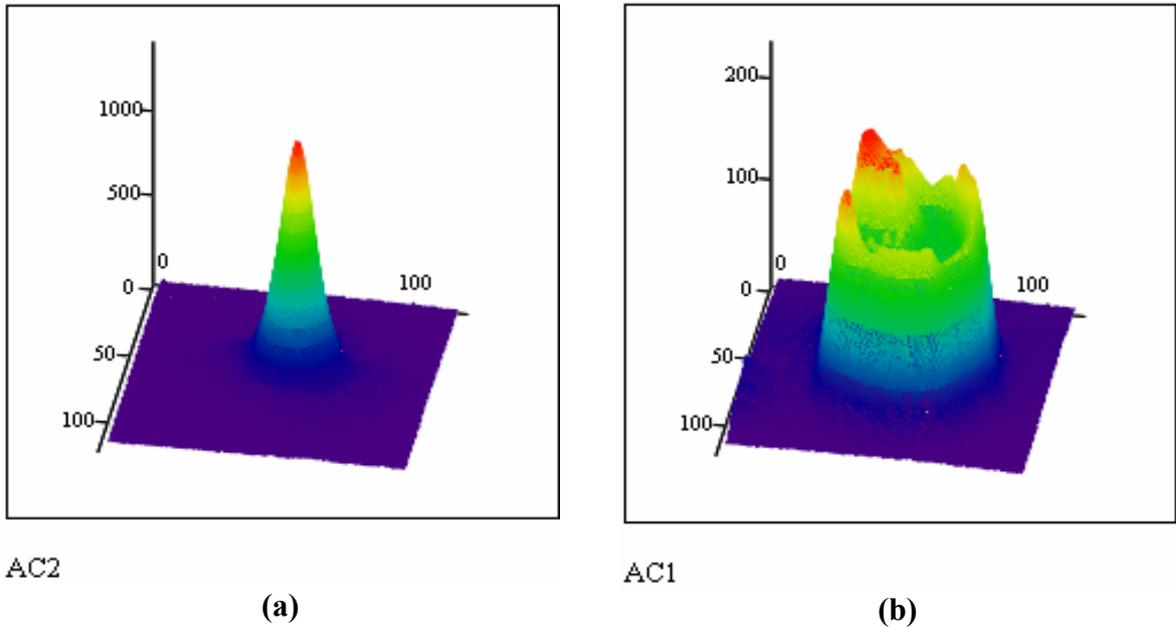


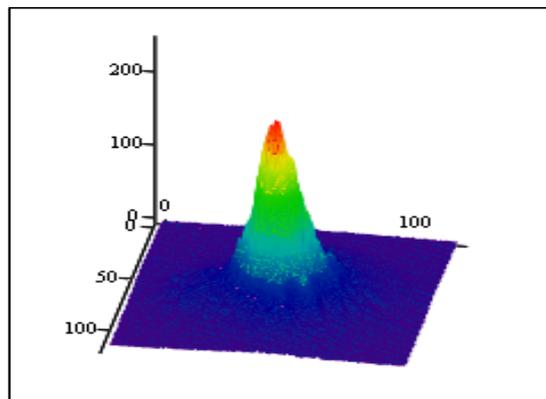
Figura 4.6: Perfil espacial do feixe para o comprimento de onda de emissão amarela, (a)  $z \leq Z_R$  e (b)  $z = 5 Z_R$ .

Observa-se que o feixe de radiação tem um perfil aproximadamente gaussiano e com geometria circular apenas na região confocal.

Conforme já mencionado, o laser de Cu-HBr emite radiação em dois comprimentos de onda simultaneamente e, devido a dependência do índice de refração do material das lentes com o comprimento de onda, as emissões verde e amarela são portanto, focalizadas em posições diferentes - Figura 4.7. Em nossos estudos, houve a necessidade de calcular essas distâncias focais e obter o perfil espacial do feixe com emissões simultâneas. Esse perfil espacial foi registrado, utilizando o mesmo aparato experimental descrito acima (exceto pelo filtro dicróico), em uma posição intermediária das distâncias focais de emissão no verde e amarelo e está apresentado na Figura 4.8.



**Figura 4.7:** Posições focais da emissão verde e amarela do laser de Cu-HBr



AC

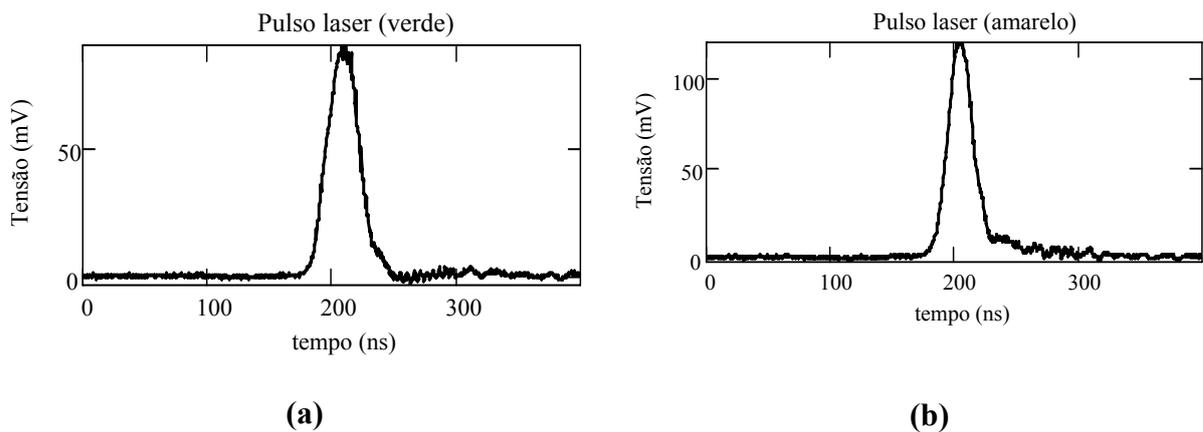
**Figura 4.8:** Perfil espacial do feixe de Cu-HBr com emissão simultânea na posição intermediária das focais.

Nesta situação, com ambas as emissões presentes no feixe de laser, a base do perfil de distribuição de energia do feixe é mais larga.

#### 4.2.4 Caracterização temporal do feixe de Cu-HBr

A caracterização temporal do feixe de laser de Cu-HBr foi medida por um detetor de fotodiodo rápido e um osciloscópio (TDS3052, Tektronix). Os arquivos foram gravados e tratados no *software Mathcad 2001 Professional*. O resultado encontrado para a largura temporal do pulso com comprimento de onda de 510 nm (verde) foi de 29 ns e para o pulso com comprimento de onda de 578 nm (amarela) foi de 28 ns. Em ambos os casos, o laser

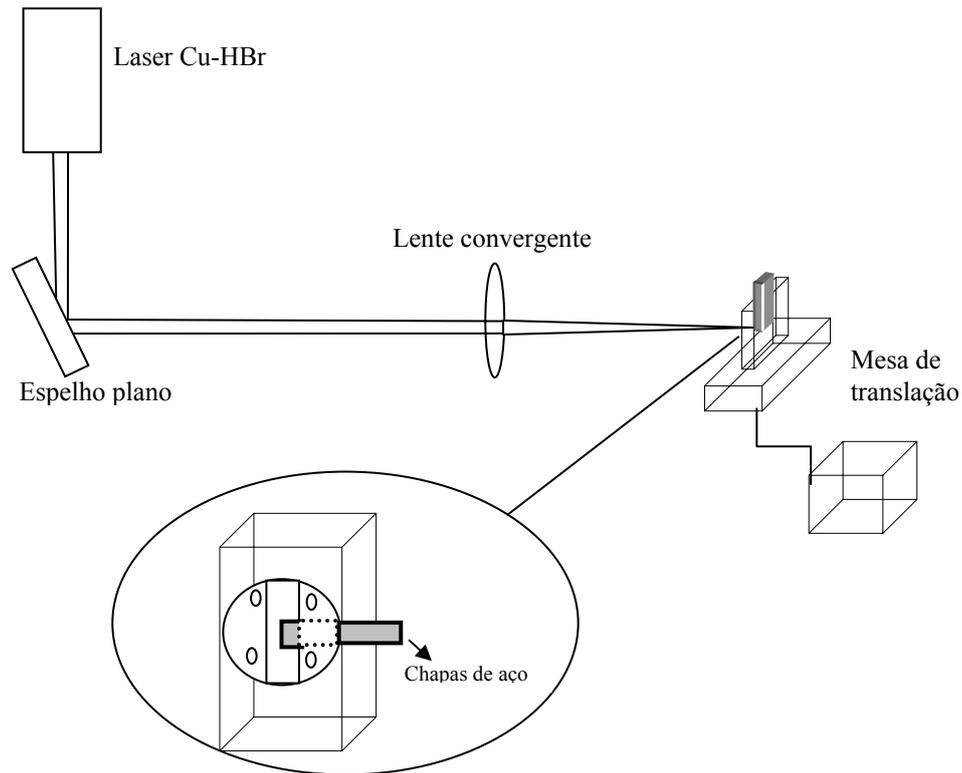
operava a 14 kHz. A Figura 4.9-a apresenta a curva de intensidade da emissão verde em função do tempo e a Figura 4.9-b a curva de intensidade da emissão amarela em função do tempo.



**(a)** **(b)**  
Figura 4.9: Curva de intensidade em função do tempo de pulso do laser de Cu-HBr. (a) pulso laser de emissão verde, (b) pulso laser de emissão amarela.

### 4.3 Sistema de microssoldagem

Neste trabalho, o laser de Cu-HBr foi usado nos experimentos de microssoldagem em chapas finas de aço inoxidável AISI 304. A Figura 4.10 mostra um diagrama esquemático do arranjo experimental para produzir as micro-junções. O feixe de laser é refletido por um espelho plano. Utilizando uma lente convergente, esse feixe é focalizado sobre duas chapas de aço inoxidável, presas a uma mesa de translação micrométrica de velocidade controlada.



**Figura 4.10: Desenho esquemático do arranjo experimental para produzir micro junções.**

As amostras utilizadas nos experimentos foram feitas de chapas de aço AISI 304 com espessuras de 25, 50 e 100  $\mu\text{m}$ , cortadas nas dimensões de 10 mm x 25 mm aproximadamente. Um dispositivo desenvolvido especialmente para este trabalho, foi feito para fixar e posicionar as amostras na mesa de translação – Figura 4.11. A Tabela 4.3 descreve a variação de velocidade da mesa em relação à espessura das amostras. Apenas nestes intervalos, houve efetivamente, interação do feixe de laser com a matéria. Além disso, para as amostras com espessura de 25 e 50  $\mu\text{m}$ , um filtro dicróico foi adicionado ao arranjo experimental – entre o laser de Cu-HBr e o espelho plano, Figura 4.10 -, a fim de refletir a emissão amarela do laser e transmitir apenas a emissão verde.

Em alguns experimentos, argônio foi usado como gás de assistência para analisar sua influência nos resultados das microssoldas [5]. Este gás foi soprado por um bocal de 5 mm de

diâmetro com uma vazão de 5 l/min, Figura 4.11. Os resultados serão apresentados posteriormente.

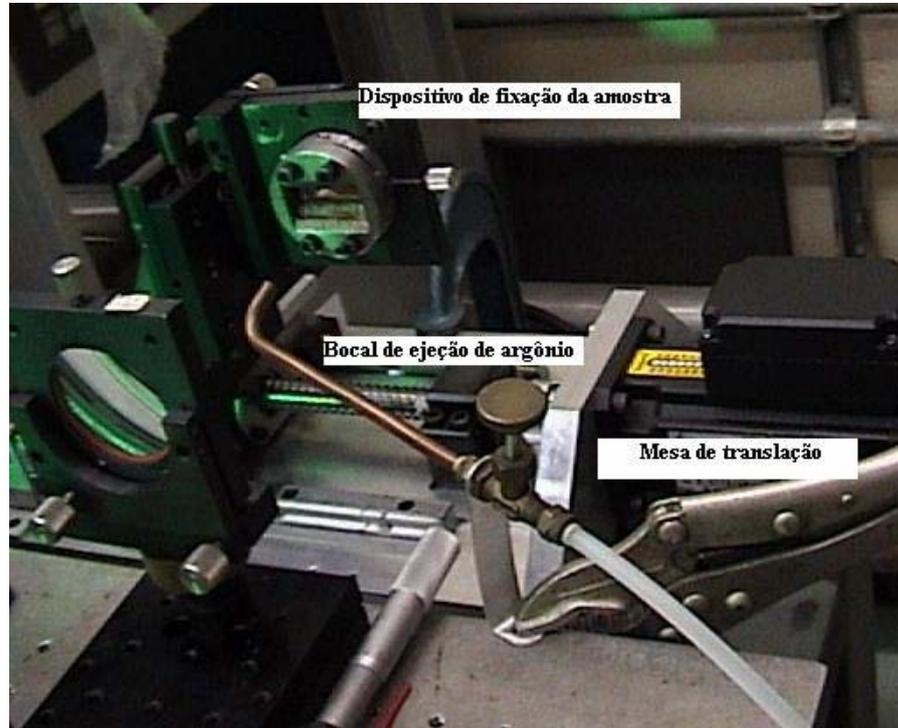


Figura 4.11: Dispositivo de fixação da amostra à mesa de translação com velocidade controlada.

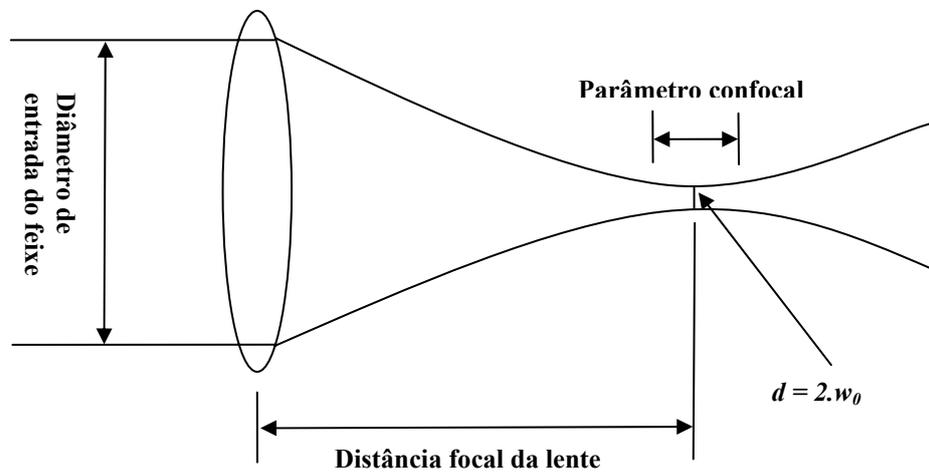
Tabela 4.3: Variação da velocidade da mesa de translação em relação à espessura da chapas.

	Chapas de 25 $\mu\text{m}$	Chapas de 50 $\mu\text{m}$	Chapas de 100 $\mu\text{m}$
Varição de velocidade	3 a 30 mm/s	1 a 8 mm/s	1 a 4 mm/s

#### 4.3.1 Procedimento de focalização do feixe na amostra

A profundidade de foco e a localização do ponto focal sobre a amostra são fatores que podem influenciar diretamente na qualidade e na reprodutibilidade das microssoldas. No ponto focal, por exemplo, a intensidade do laser é maior do que em qualquer outro ponto ao longo do eixo de propagação do feixe. Dessa forma, quando o ponto focal e a profundidade de

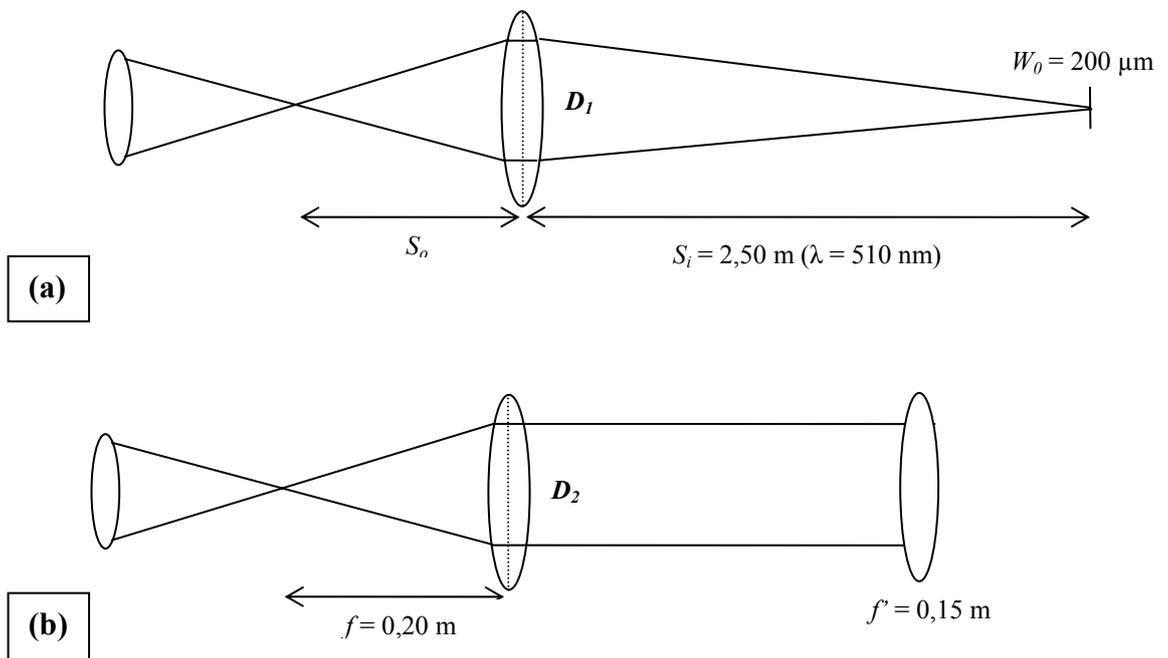
foco possuem dimensões muito pequenas, a posição da amostra em relação a eles assume um aspecto importante nos resultados experimentais. Em geral, lentes com grandes distâncias focais produzem profundidades de foco maiores do que as lentes com distâncias focais curtas [25,44]. A Figura 4.12 mostra um diagrama esquemático de uma focalização padrão para uma lente convergente. O feixe paralelo que incide em uma lente convergente é focalizado em um ponto com diâmetro específico,  $d = 2.w_0$ , e uma profundidade de foco definida pelo parâmetro confocal  $b$  – Equação (4.8).



**Figura 4.12: Diagrama esquemático de uma focalização padrão para uma lente convergente**

Nos experimentos de microssoldagem, o telescópio de saída do laser foi ajustado para se obter um feixe de radiação colimado. Este feixe incide sobre uma lente, com distância focal de 0,15 m e é, assim, focalizado sobre a amostra. Para estimar os valores do diâmetro do feixe,  $d$ , no ponto focal, o valor do parâmetro confocal para as duas emissões verde e amarela após a inserção desta lente, é necessário descrever a propagação do feixe de Cu-HBr após passar por esta lente. Descreveremos também as dificuldades encontradas em relação às duas emissões simultâneas do feixe e o procedimento experimental para a localização da focal do feixe sobre a amostra.

A Figura 4.13-a mostra a propagação do feixe de Cu-HBr utilizada no processo de caracterização, já descrito anteriormente. Nesta situação, a distância  $S_o$  é maior que a soma das distâncias focais das lentes (condição de telescópio) e assim, o feixe é focalizado a uma distância  $S_i$  da segunda lente. Na Figura 4.13-b,  $S_o = 0,20$  m, e o sistema opera como um telescópio, com um feixe de saída colimado que incide sobre a lente de focalização, utilizada nos experimentos de microssoldas.



**Figura 4.13: Propagação do feixe de Cu-HBr. (a) no processo de caracterização do feixe e (b) que incide paralelamente na lente de focalização.**

Dado que  $D_1$  e  $D_2$  são os diâmetros de entrada na lente de focalização do feixe – Figura 4.1, na posição de caracterização e na posição de incidência paralela do feixe, respectivamente; podemos dizer que:

$$\frac{D_2}{0,20m} = \frac{D_1}{S_o} \quad (4.12)$$

Utilizando a equação de propagação de imagem, dada por [36]:

$$\frac{1}{S_o} + \frac{1}{S_i} = \frac{1}{f} \quad (4.13)$$

podemos encontrar o valor de  $S_o = 0,217$  m e a partir da Equação (4.12), obter que  $D_2$  é aproximadamente 1,08 vezes maior do que  $D_1$ . Isso significa que o diâmetro de entrada na lente de focalização do feixe praticamente não se altera nas duas posições.

Sabendo que o diâmetro de entrada na lente de focalização é praticamente  $D_2$ , e utilizando a equação de divergência (4.10) e de raio mínimo do feixe no ponto focal, dada por [41]:

$$w_0 = \theta f' \quad (4.14)$$

podemos escrever uma relação entre os raios mínimos do feixe, um obtido da caracterização do feixe,  $W_0$ , e o outro,  $w_0$ , obtido em nossos experimentos de microssoldas. Essa relação é definida por:

$$w_0 = \frac{f'}{S_i} W_0 \quad (4.15)$$

Como o parâmetro  $M^2$  não muda com o diâmetro do feixe, é possível calcular o parâmetro confocal e a divergência do feixe a partir de  $w_0$ .

Conforme já mencionado, o feixe em cada uma das emissões nos comprimentos de onda verde e amarelo são focalizados em pontos diferentes. Para obter as posições focais de ambas as emissões, assim como a separação entre elas, consideramos o índice de refração da lente (BK7) [45] para os dois comprimentos de onda e as calculamos utilizando a equação dada por [36]:

$$f = \frac{R}{n-1} \quad (4.16)$$

onde  $R$  é o raio de curvatura da lente convergente utilizada ( $R= 0,075$  m) e  $n$  é o índice de refração da lente, dependente do comprimento de onda de emissão. Para o comprimento de onda de emissão verde ( $\lambda = 510$  nm),  $n = 1,5208$  e para o comprimento de onda de emissão amarela ( $\lambda = 578$  nm),  $n = 1,5173$  [45].

A Tabela 4.4 apresenta os valores do diâmetro  $d$ , ( $d = 2w_0$ ), e do parâmetro confocal  $b$ , Equação (4.8), encontrados para as emissões verde e amarela; as posições focais - Equação (4.16) – e também a separação entre elas a partir da lente de focalização, ao longo do eixo de propagação do feixe.

**Tabela 4.4: Valores de diâmetro, parâmetro confocal e posição focal para as emissões verde e amarela do feixe de Cu-Br a partir da lente de focalização usada no experimento de microssolda.**

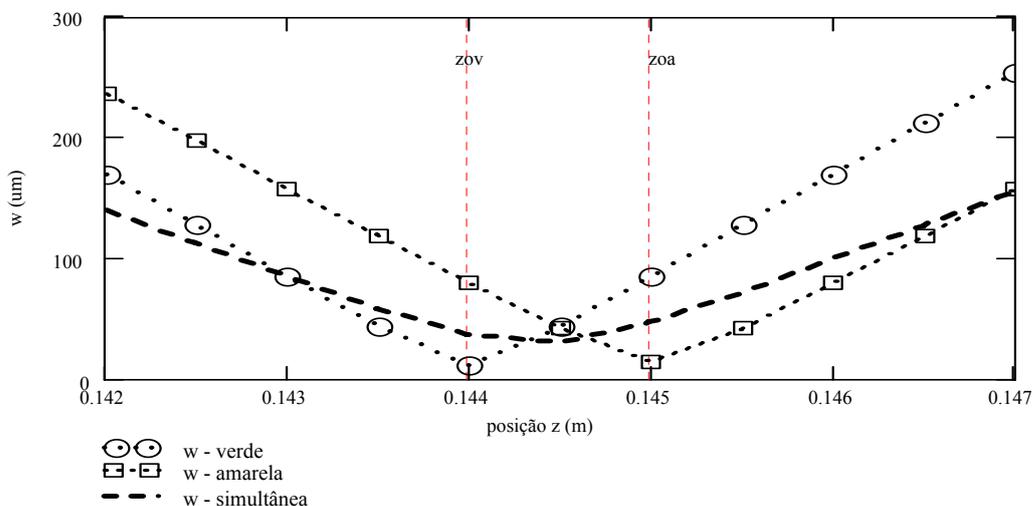
	<i>Diâmetro <math>d</math> (<math>\mu\text{m}</math>)</i>	<i>Parâmetro confocal <math>b</math> (<math>\mu\text{m}</math>)</i>	<i>Posição focal (<math>m</math>)</i>	<i>Separação entre as posições focais (<math>mm</math>)</i>
<b>Emissão verde (510 nm)</b>	<b>24</b>	<b>272</b>	<b>0.144</b>	<b>1</b>
<b>Emissão amarela (578 nm)</b>	<b>28</b>	<b>358</b>	<b>0.145</b>	

O diâmetro do feixe  $w_{sim}$  do laser, quando ambas as emissões estão presentes, pode ser estimado de forma aproximada, somando de forma ponderada (fração da potência em cada comprimento de onda de emissão) os diâmetros para cada uma das emissões em relação à posição  $z$  de propagação, ou seja:

$$w_{sim}^2(z) = fr_v w_v^2(z) + fr_a w_a^2(z) \quad (4.17)$$

Aqui,  $fr_v$  e  $fr_a$  representam as frações da potência total do laser nas emissões verde, com diâmetro  $2w_v$  e amarela, com diâmetro  $2w_a$ .

A Figura 4.14 mostra os valores de  $w_v$  e  $w_a$  em relação ao eixo de propagação  $z$  para a emissão verde e amarela, além dos valores de  $w_{sim}$  para o feixe com emissão simultânea, após incidir na lente convergente utilizada nos experimentos de microsoldagem. Nesta figura, podemos observar também a separação entre os pontos focais da emissão verde e amarela, bem como a localização, em uma posição intermediária, do diâmetro mínimo de emissão simultânea.

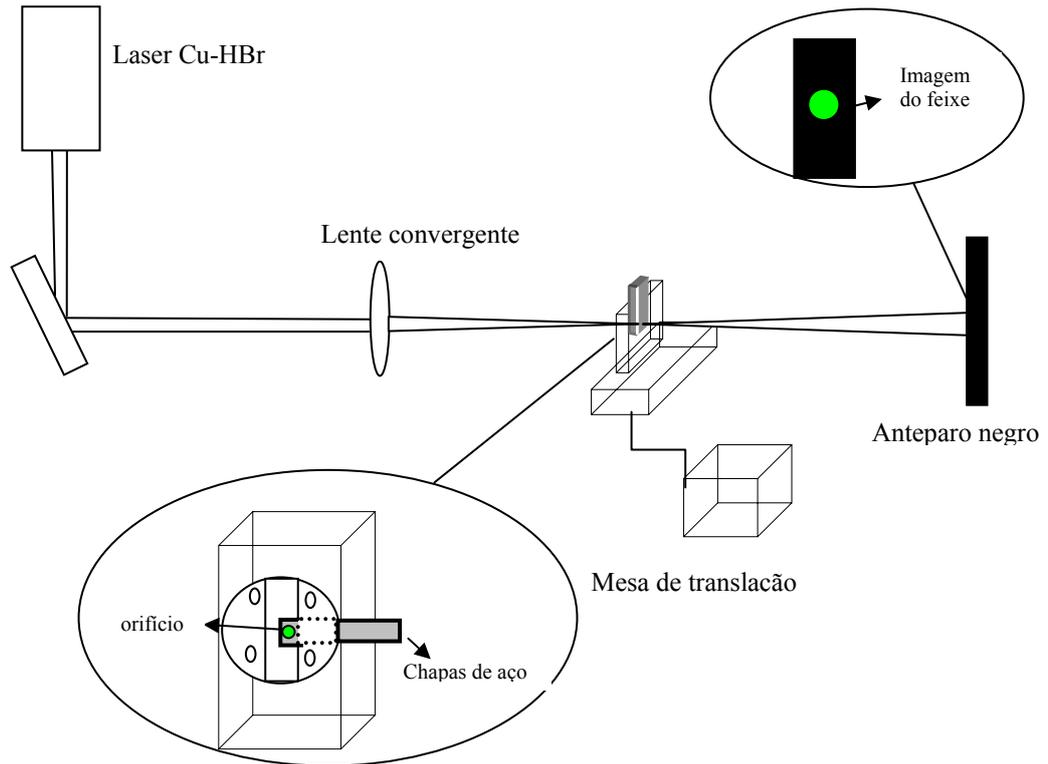


**Figura 4.14: Valores de  $w(z)$  em função da posição  $z$ , após incidir na lente convergente utilizada nos experimentos de microsoldagem.**

Devido ao reduzido valor do parâmetro confocal, foi adotado um procedimento em todos os experimentos de microssoldagem para a localização do ponto focal do feixe sobre a amostra de aço inoxidável. Este procedimento é apresentado no diagrama esquemático da Figura 4.15. O feixe de laser produz um pequeno orifício na amostra de aço inoxidável – fixada e posicionada no dispositivo desenvolvido para este trabalho (Figura 4.11). A luz do feixe que atravessa esse orifício é propagada até um anteparo escuro, colocado logo após a mesa de translação. A lente convergente, fixada a um micrometro, é então deixada numa posição onde a imagem projetada no anteparo tenha a maior intensidade de luz visível, isto é, no ponto focal.

Nos experimentos em que as emissões do feixe de laser incidem simultaneamente na lente convergente e, portanto, dois pontos focais estão presentes, a amostra de aço inoxidável é posicionada aproximadamente na média das posições focais, verde e amarela. O procedimento adotado é praticamente o mesmo descrito acima. Neste caso, obtém-se a maior intensidade de luz, projetada no anteparo, para as emissões verde e amarela e, em seguida, a lente convergente é posicionada em uma distância média dos pontos focais.

Em ambos os casos, o tempo de exposição da luz no orifício feito na amostra é relativamente pequeno, a fim de que o diâmetro do furo praticamente não se altere ao longo do procedimento de localização do ponto focal. Imediatamente após este procedimento, a mesma amostra é submetida ao experimento de microssoldagem.



**Figura 4.15: Diagrama esquemático do procedimento adotado para localização do ponto focal do feixe sobre a amostra.**

Outro parâmetro do laser, importante para os nossos estudos de microssoldas, é a intensidade do feixe sobre a superfície do material. A intensidade do feixe pode ser definida como a concentração de energia do laser incidida sobre a superfície do material [25]. É dada por [21]:

$$I(r) = I_0 \exp\left(\frac{-2r^2}{w^2}\right) \quad (4.18)$$

Onde  $r$  é a distância lateral do centro,  $w$  o raio Gaussiano e  $I_0$  a intensidade central dada por:

$$I_0 = \frac{2P_p}{\pi w^2} \quad (4.19)$$

Onde  $P_p$  é a potência de pico do laser e  $w_0$  o raio mínimo do feixe. A potência de pico é calculada por:

$$P_p = \frac{E_p}{t_p} \quad (4.20)$$

Onde  $E_p$  é a energia do pulso e  $t_p$  o tempo do pulso. A energia do pulso pode ser obtida com a potência média do pulso,  $P$ , dividida pela frequência de repetição dos pulsos. A potência média do pulso foi medida após a lente de focalização, utilizando-se um calorímetro (Ophir, modelo 30-A SH). A Tabela 4.5 mostra os resultados obtidos para a potência média, potência de pico e energia do pulso nos dois comprimentos de onda de emissão do laser, bem como os valores para a emissão simultânea.

**Tabela 4.5: Valores da  $P$ ,  $P_p$  e  $E_p$  para emissão verde, amarela e simultânea do laser de Cu-HBr**

	<i>Potência média - P</i>	<i>Potência de pico - P<sub>p</sub></i>	<i>Energia do Pulso-E<sub>p</sub></i>
<b>Emissão verde</b>	<b>11 W</b>	<b>26 kW</b>	<b>0,8 mJ</b>
<b>Emissão amarela</b>	<b>8 W</b>	<b>19 kW</b>	<b>0,6 mJ</b>
<b>Emissão simultânea</b>	<b>20 W</b>	<b>47 kW</b>	<b>1,4 mJ</b>

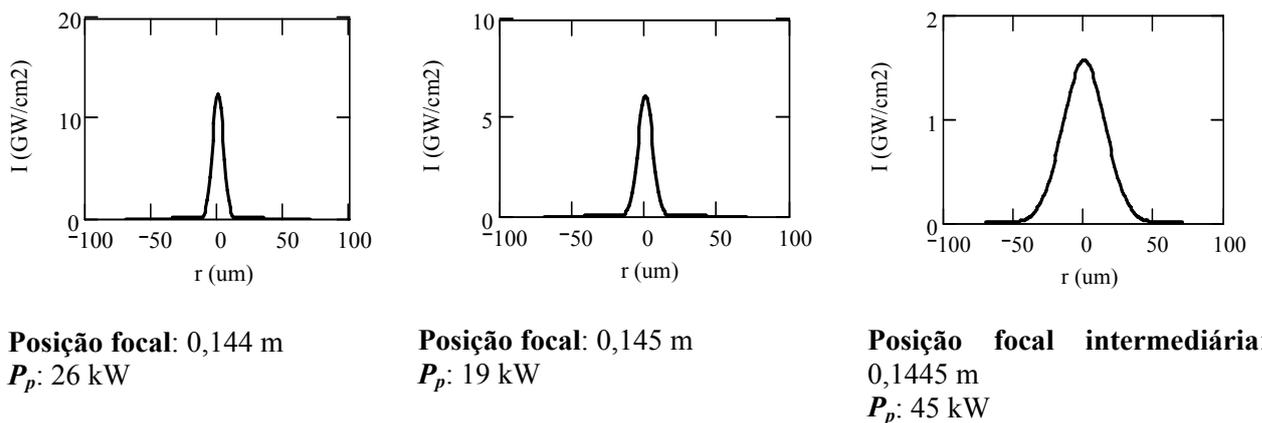
Com os valores dos diâmetros do feixe em cada emissão, podemos obter a distribuição de intensidade do feixe de Cu-HBr. Para estimar o perfil de intensidade com a emissão simultânea dos dois comprimentos de onda, utilizamos a expressão abaixo, que inclui o valor

do diâmetro na posição de focalização intermediária ( $z = 0.1445$  m) entre as posições focais das emissões verde e amarela:

$$I_{sim}(r, z) = I_v(z) + I_a(z) \quad (4.21)$$

Nesta equação, a intensidade das emissões verde e amarela é calculada utilizando os diâmetros na posição  $z = 0.1445$  m.

A Figura 4.16-a mostra a distribuição de intensidade do feixe, na posição focal ( $z = 0,144$  m) para emissão verde. Da mesma forma, a Figura 4.16-b mostra a distribuição de intensidade do feixe, na posição focal ( $z = 0,145$  m) para emissão amarela. A Figura 4.16-c apresenta a distribuição de intensidade do feixe na posição de focalização intermediária das emissões verde e amarela.

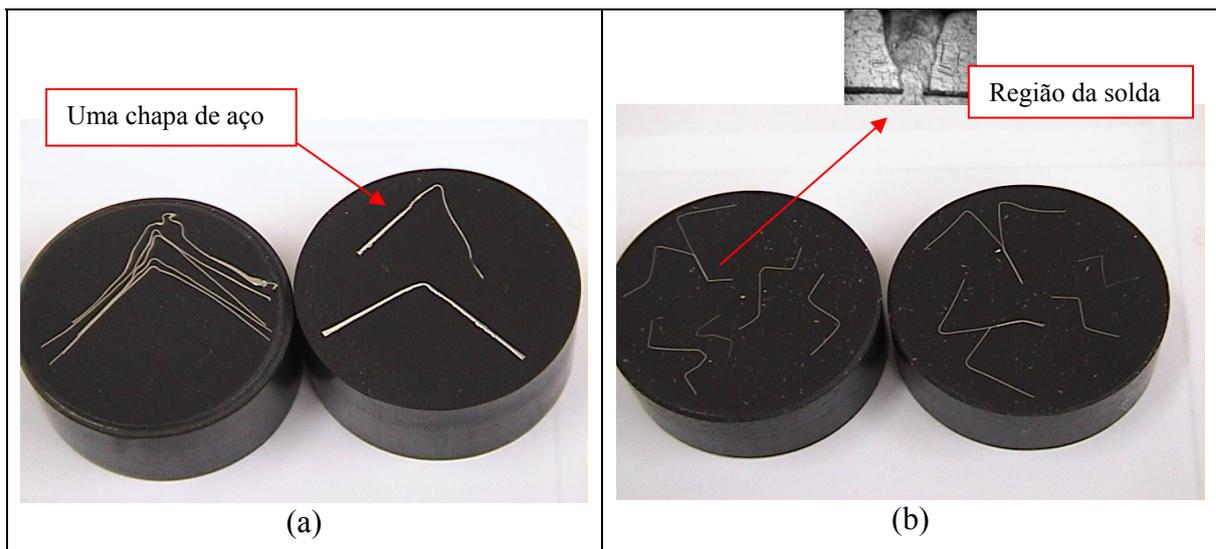


**(a)** **(b)** **(c)**  
**Figura 4.16: Distribuição de intensidade do feixe de Cu-HBr em relação à distância lateral  $r$ . (a) na emissão verde, (b) na emissão amarela e (c) na emissão simultânea.**

#### 4.4 Análise das Microssoldas

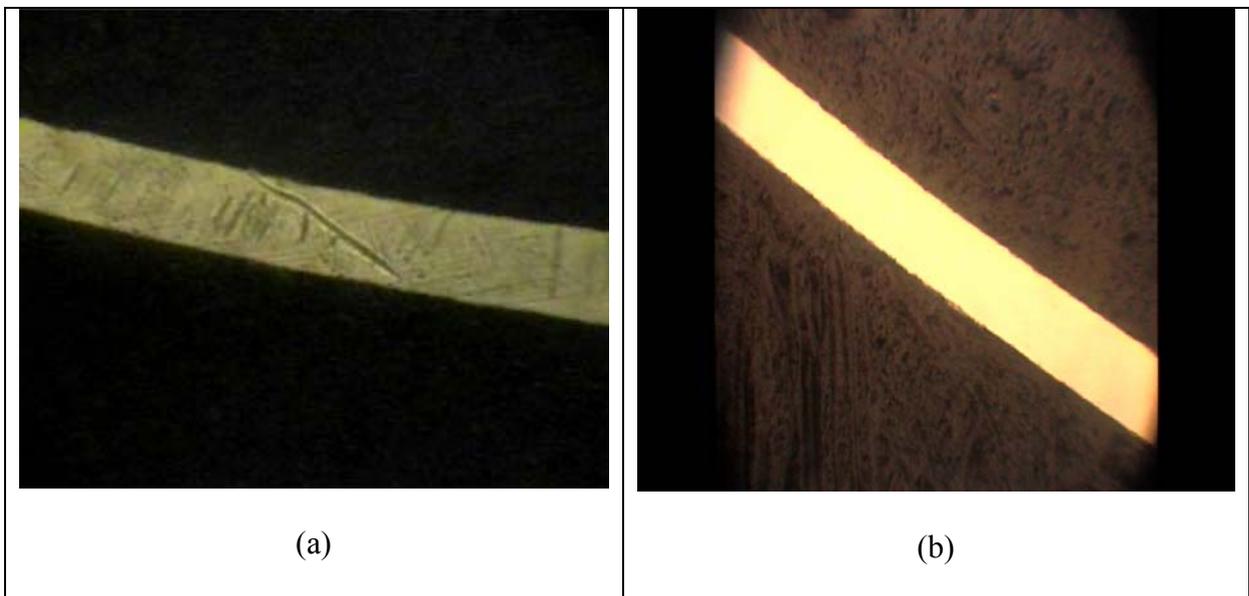
Uma análise metalográfica foi realizada na seção transversal das amostras. Devido à espessura das chapas, vários testes foram realizados a fim de criar uma técnica na preparação das amostras que não interferisse no resultado da microssolda.

Para a preparação do corpo de prova, primeiramente as amostras cortadas foram dobradas em “forma de onda”, a fim de criar aumento na sua resistência à deformação. Foram prensadas a  $70 \text{ kgF/cm}^2$  em baquelite utilizando uma prensa (PRÉ-30, Arotec) com dispositivo de aquecimento, sendo a pressão medida por um manômetro fixada à ela [46]. A Figura 4.17 mostra a influência da resistência à deformação das amostras durante o processo de embutimento, onde em (a) as chapas estão dobradas individualmente a fim de realizar testes de deformação das mesmas e em (b), cada amostra dobrada é formada por duas chapas de aço soldadas. Devido à espessura das chapas, alguns formatos favorecem a deformação das amostras, prejudicando assim a análise posterior da região de microssoldagem.



**Figura 4.17: Influência da resistência à deformação das amostras no processo de embutimento. (a) não resistente à deformação, amostras amassadas após o embutimento e (b) amostras resistentes à deformação, dobradas em “forma de onda”.**

Após o embutimento, os corpos de provas foram lixados, em politriz, com lixas d'água 220, 400, 600 e 1200 e polidos com pasta diamantada de 6 e 1  $\mu\text{m}$ , respectivamente. Todo o processo de desgaste do corpo de prova foi monitorado com o auxílio do microscópio óptico. Devido à espessura das chapas, foi grande a dificuldade na obtenção de uma superfície polida sem a presença de riscos que pudessem, posteriormente, prejudicar e inibir a revelação de grãos na superfície do aço. A Figura 4.18 mostra a diferença entre uma superfície polida, (a) com a presença de riscos e (b) sem a presença de riscos.



**Figura 4.18: Diferença entre uma superfície polida, (a) com a presença de riscos e (b) sem a presença de riscos.**

As estruturas metalográficas da superfície das amostras foram reveladas através de ataque eletro-químico. Utilizando uma solução química de 10% ácido oxálico, as amostras foram atacadas por esta solução durante aproximadamente 8 segundos, sendo distribuídos ao longo da superfície, sob uma diferença de potencial de 4 volts. Finalmente, utilizando um microscópio óptico, foram realizadas as análises das amostras. Os resultados desta análise serão mostrados e discutidos no próximo capítulo.

## 5 Resultados e Discussões

Neste capítulo são apresentados e discutidos os resultados relativos à microsoldagem feita em chapas de aço inoxidável SS304 utilizando o laser de Cu-HBr. Para expor com maior clareza, a apresentação desses resultados foi dividida em função das espessuras das chapas que compõem a micro-junção. A microsolda entre chapas com 25  $\mu\text{m}$  de espessura é a primeira análise apresentada e discutida. Em seguida temos a micro-junção entre chapas com 50  $\mu\text{m}$ . Por último são apresentados os resultados obtidos entre chapas com 100  $\mu\text{m}$  de espessura e também a metalografia desse processo.

### 5.1 Microsoldagem entre chapas de aço inoxidáveis com 25 $\mu\text{m}$ de espessura

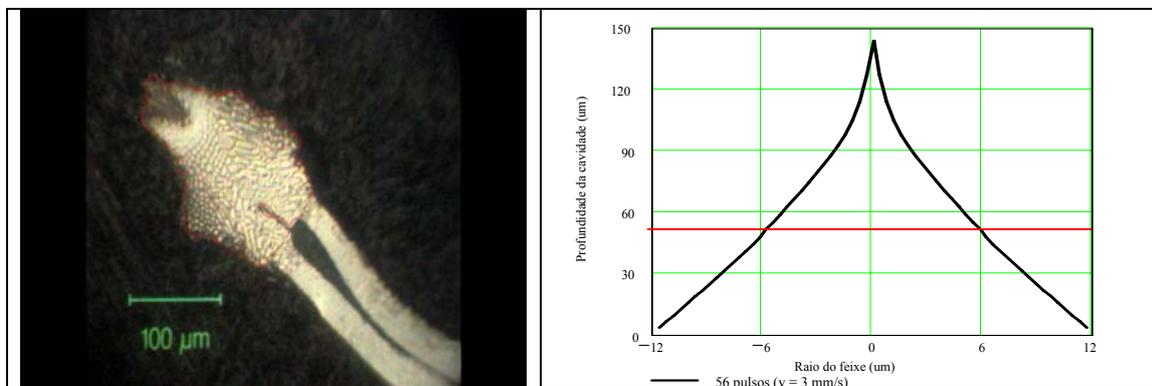
Inicialmente, após a realização do procedimento experimental – descrito no capítulo anterior - as microsoldas foram analisadas por microscopia óptica. Estas junções, realizadas em chapas de aço inoxidável 304 utilizando o laser de Cu-HBr, foram feitas mantendo-se os parâmetros do laser constantes e variando-se a velocidade de soldagem da amostra. A Tabela 5.1 descreve os parâmetros considerados e seus respectivos valores.

**Tabela 5.1: Parâmetros considerados na microsoldagem realizada em chapas com 25  $\mu\text{m}$  de espessura.**

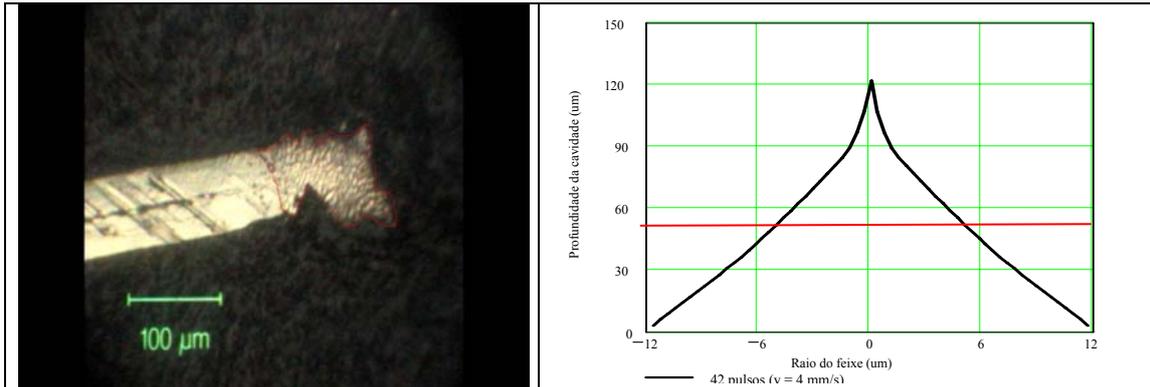
	<i>Valores dos parâmetros</i>
Velocidade de soldagem	1 a 20 mm/s
Potência média do laser (emissão verde)	11 W
Raio do feixe focalizado sobre a amostra ( $w_0$ )	12 $\mu\text{m}$
Taxa de repetição dos pulsos	14 kHz
Tempo de pulso do laser	30 ns

As seções transversais das amostras obtidas estão apresentadas desde a Figura 5.1 até a Figura 5.7. Observa-se que a variação na velocidade de soldagem, que é equivalente à

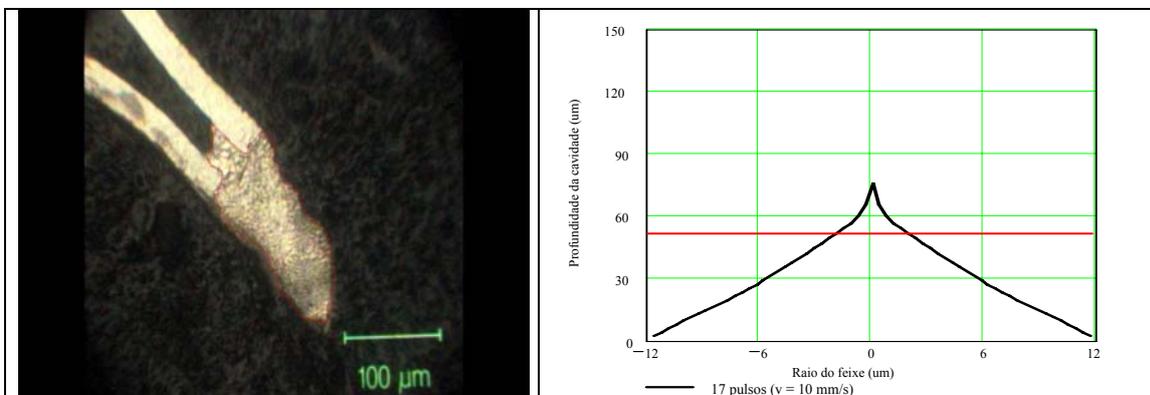
quantidade de pulsos de laser sobreposta no material (Equação (3.1)), influencia a geometria da microssolda realizada. Nas Figuras de 5.1 até 5.5, onde as velocidades são mais baixas (ou o número de pulsos sobrepostos é maior) as amostras foram completamente cortadas, gerando uma zona de fusão na parede desta abertura, criando assim, uma solda homogênea nesta região. Na Figura 5.6, utilizando uma velocidade soldagem um pouco acima das anteriores, as chapas não foram cortadas, criando uma poça de fusão na região exposta ao laser. Entretanto, tensões superficiais provavelmente provocaram o deslocamento do líquido fundido, gerando uma região de fusão efetivamente mais fina e alongada na amostra. Já no último caso, Figura 5.7, a velocidade de soldagem utilizada foi muito alta. Assim, com poucos pulsos sobrepostos sobre a superfície da amostra, apenas a primeira chapa foi cortada, não permitindo a fusão de toda a amostra, gerando somente uma alteração na estrutura das chapas de aço utilizadas.



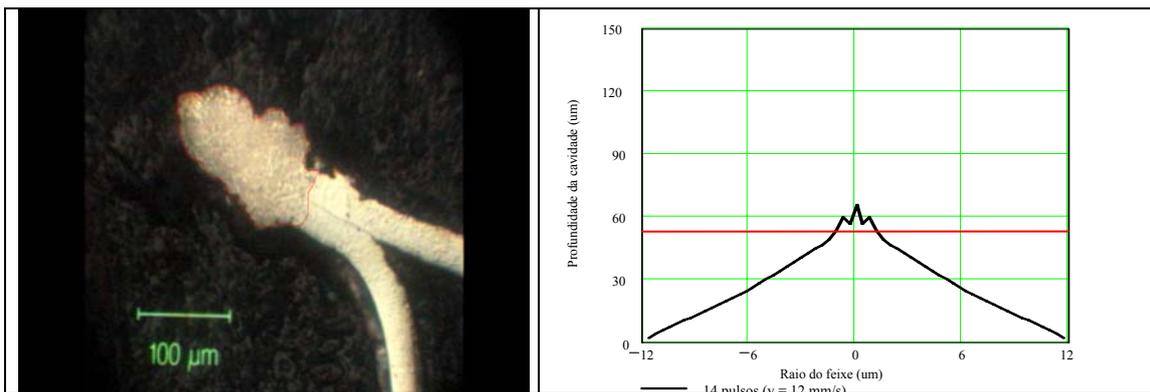
**Figura 5.1:** Microscopia óptica da microssolda obtida em chapas de aço 304, considerando uma velocidade de soldagem de 3 mm/s; e gráfico da cavidade formada nesta amostra em relação ao raio do feixe de laser focalizado.



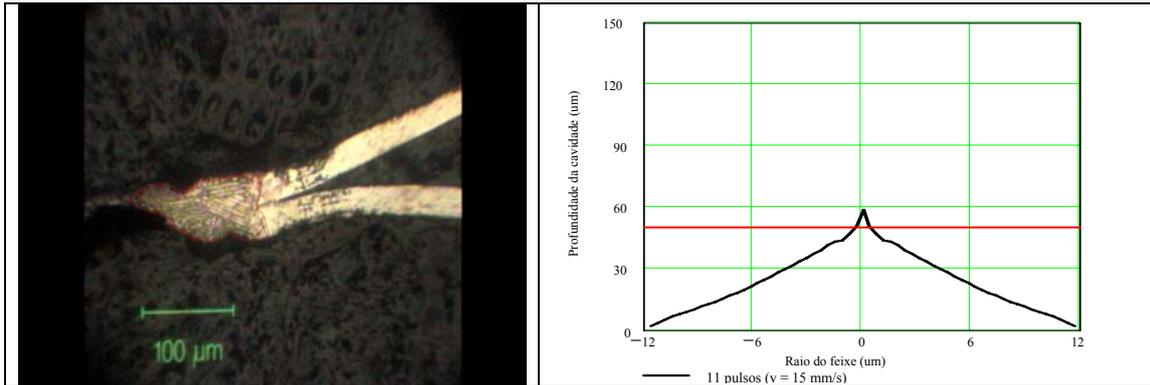
**Figura 5.2:** Microscopia óptica da microsolda obtida em chapas de aço 304, considerando uma velocidade de soldagem de 4 mm/s; e gráfico da profundidade da cavidade formada em relação ao raio do feixe de laser focalizado nesta amostra.



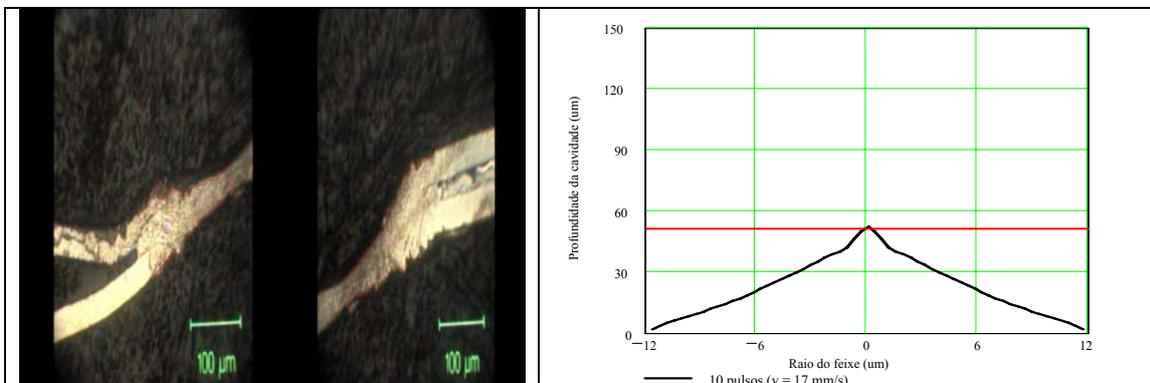
**Figura 5.3:** Microscopia óptica da microsolda obtida em chapas de aço 304, considerando uma velocidade de soldagem de 10 mm/s; e gráfico da profundidade da cavidade formada em relação ao raio do feixe de laser focalizado nesta amostra.



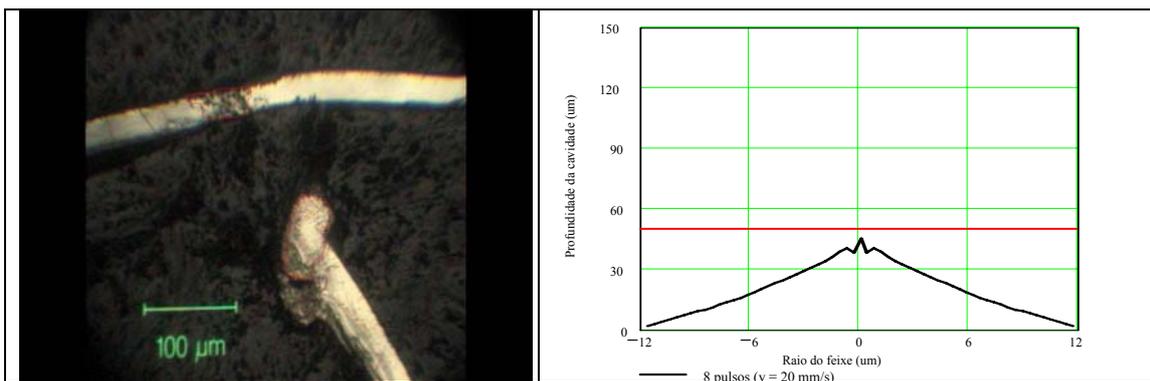
**Figura 5.4:** Microscopia óptica da microsolda obtida em chapas de aço 304, considerando uma velocidade de soldagem de 12 mm/s; e gráfico da profundidade da cavidade formada em relação ao raio do feixe de laser focalizado nesta amostra.



**Figura 5.5:** Microscopia óptica da microssolda obtida em chapas de aço 304, considerando uma velocidade de soldagem de 15 mm/s; e gráfico da profundidade da cavidade formada em relação ao raio do feixe de laser focalizado nesta amostra.



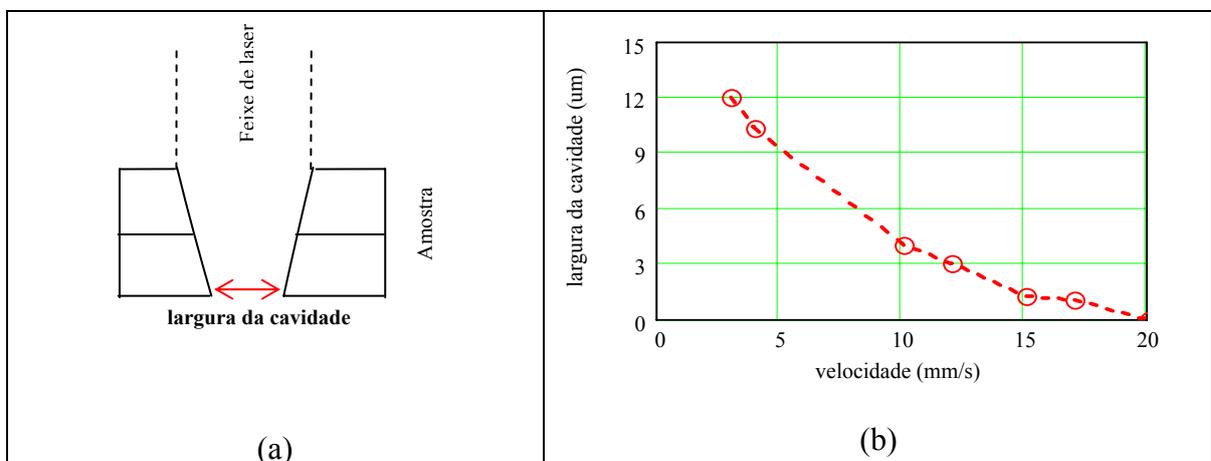
**Figura 5.6:** Microscopia óptica da microssolda obtida em chapas de aço 304, considerando uma velocidade de soldagem de 17 mm/s; e gráfico da profundidade da cavidade formada em relação ao raio do feixe de laser focalizado nesta amostra.



**Figura 5.7:** Microscopia óptica da microssolda obtida em chapas de aço 304, considerando uma velocidade de soldagem de 20 mm/s; e gráfico da profundidade da cavidade formada em relação ao raio do feixe de laser focalizado nesta amostra.

Na Figura 5.1 e até a Figura 5.7 também são apresentadas a formação da cavidade em relação ao raio do feixe focalizado, ao longo do volume da amostra. Em todos os casos, o

modelo descrito na seção 3.2 considerou a quantidade de pulsos sobrepostos em cada velocidade de soldagem utilizada durante o processo experimental. Estes resultados fornecem a geometria da cavidade criada na amostra, ou seja, além de sua profundidade - formada na amostra após a interação com o feixe de laser -, a largura desta cavidade na superfície inferior da amostra – Figura 5.8-a. O valor da largura está apresentado na Figura 5.8-b em relação à velocidade de soldagem utilizada em nossos estudos.



**Figura 5.8:** Largura da cavidade formada, na superfície inferior da amostra, (a) desenho esquemático da cavidade e (b) tamanho da largura em relação à velocidade de soldagem utilizada.

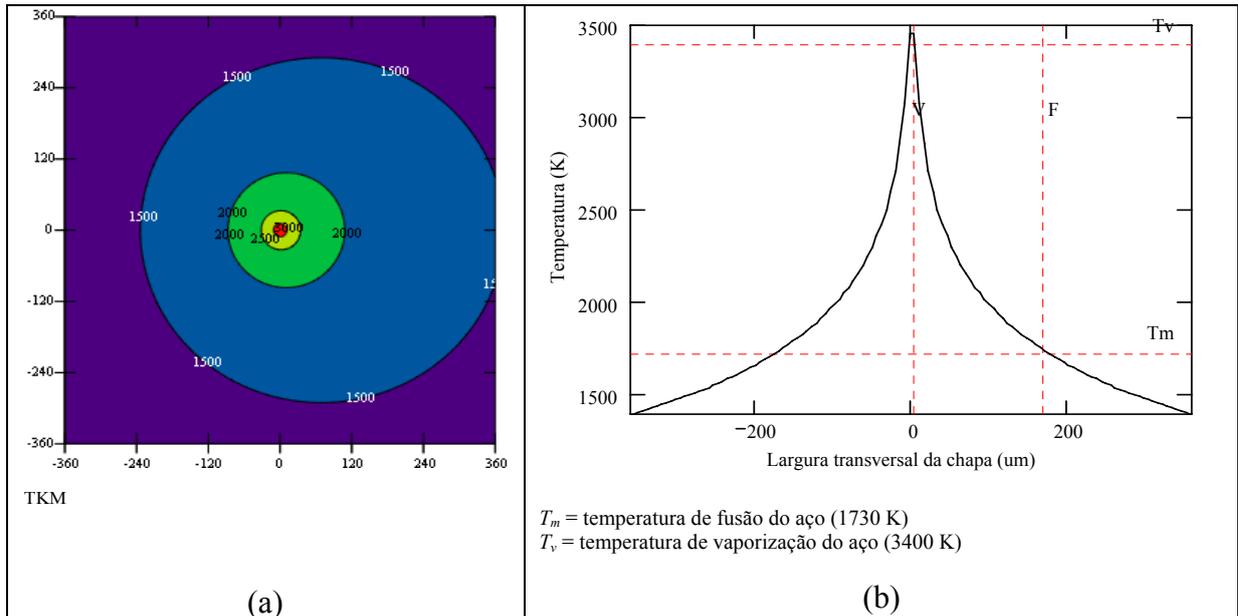
Dos resultados apresentados podemos observar três situações distintas. Para velocidades entre 3 e 15 mm/s (Figuras 5.1 a 5.5), a profundidade da cavidade formada ultrapassa a espessura total da amostra, ou seja, 50 µm. Nestes casos, a abertura gerada na superfície inferior da amostra é grande, gerando o corte da amostra na direção de incidência do feixe - como pôde ser observado na imagem feita por microscopia óptica. Para a velocidade de 17 mm/s (Figura 5.6), a profundidade formada aproxima-se da espessura da amostra, e a abertura gerada em sua superfície inferior, é de apenas 1 µm, fazendo com que o orifício gerado tenha uma geometria cônica. Já na terceira situação, onde a velocidade é de 20 mm/s (Figura 5.7), a profundidade da cavidade é menor do que a espessura total do material.

Os resultados experimentais obtidos mostram que o modelo desenvolvido no capítulo anterior descreve, ao menos qualitativamente, o ocorrido nas amostras após cada interação com o feixe de laser.

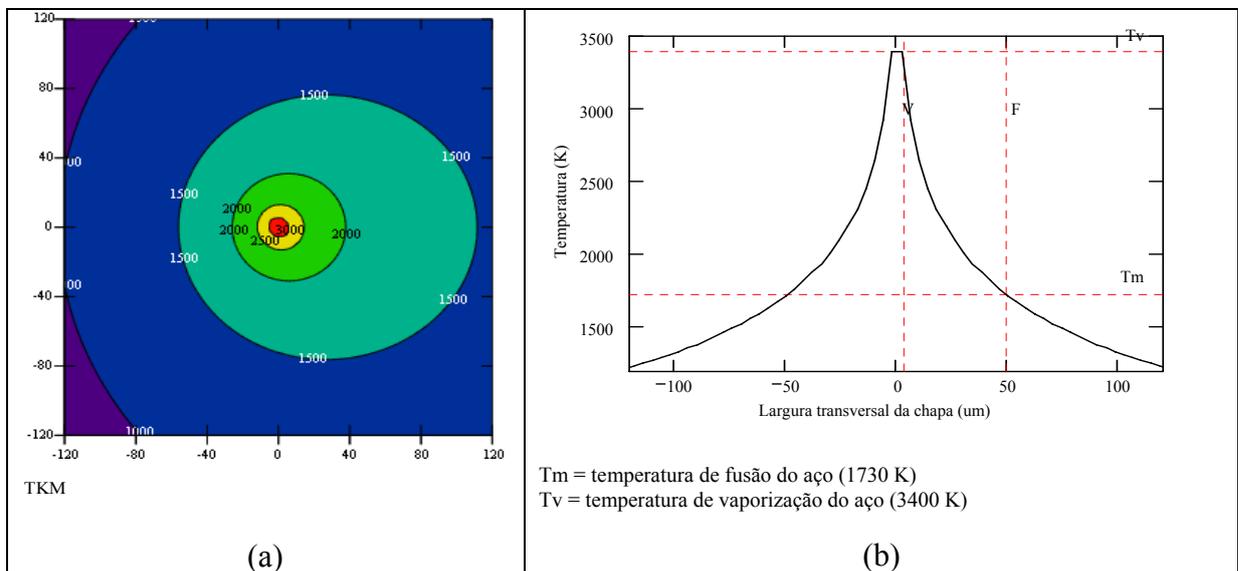
A variação da geometria da cavidade interfere na fração de energia absorvida pelo material durante o processo de interação com o laser. Dessa maneira, a fim de determinarmos essa fração de energia, uma análise da região fundida na amostra foi realizada. Primeiramente, através de uma investigação na seção transversal das amostras (Figuras 5.1 a 5.7), a área da zona de fusão gerada em cada situação foi medida com o auxílio do *software ImajeJ*. Em seguida, utilizando o comprimento da região de fusão obtido, simulamos o processo de redeposição de material na interação com o feixe de laser - através do modelo de Rosenthal da teoria de *keyhole* [37] -, variando a fração de energia absorvida em cada cavidade (Equação (3.9)), obtendo assim, a área de fusão correspondente aos resultados experimentais.

A Figura 5.9-a mostra o resultado da simulação do perfil de temperatura, em uma área de  $360 \times 360 \mu\text{m}^2$  da amostra de aço, considerando uma velocidade de soldagem de 3 mm/s. Neste caso, a fração de energia absorvida pelo material foi de 0,27. Essa fração foi variada até que a região de fusão – equivalente à distância entre a reta V e a reta F (Figura 5.9-b) – se aproximasse da obtida experimentalmente. A Figura 5.9-b mostra também uma distância entre o centro da amostra e a reta V (aproximadamente  $5 \mu\text{m}$ ) onde o material foi completamente vaporizado, resultando no corte da amostra após a incidência do feixe.

Da mesma maneira, a Figura 5.10-a mostra o resultado da simulação do perfil de temperatura, em uma área de  $120 \times 120 \mu\text{m}^2$  da amostra de aço, considerando uma velocidade de soldagem alta, ou seja, de 20 mm/s. Como o modelo de formação de cavidade indica que, nesta velocidade de soldagem, a energia é absorvida apenas na chapa superior da amostra, a largura da região fundida foi simulada considerando apenas sua espessura, ou seja,  $25 \mu\text{m}$  (Figura 5.10-b). Neste caso, a fração de energia absorvida pelo material foi de 0,17.



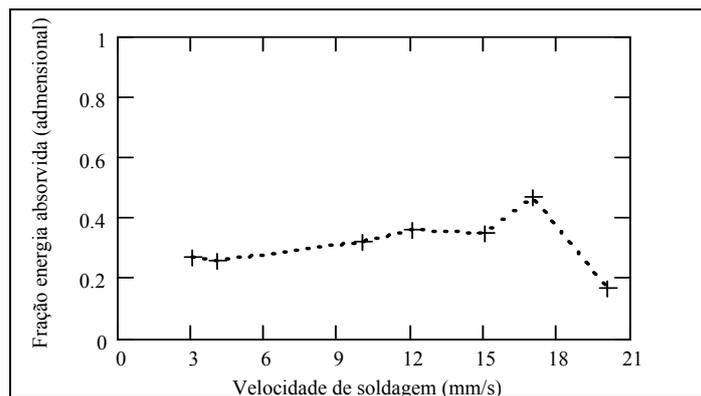
**Figura 5.9:** Perfil de temperatura em chapas de aço inoxidável, após a interação com o feixe de Cu-HBr. (a) considerando uma área de 360x360 μm<sup>2</sup> da amostra e uma velocidade de soldagem de 3 mm/s; (b) variação da temperatura em relação a largura transversal da amostra, considerando a região de fusão como sendo equivalente à distância entre a reta V e a reta F.



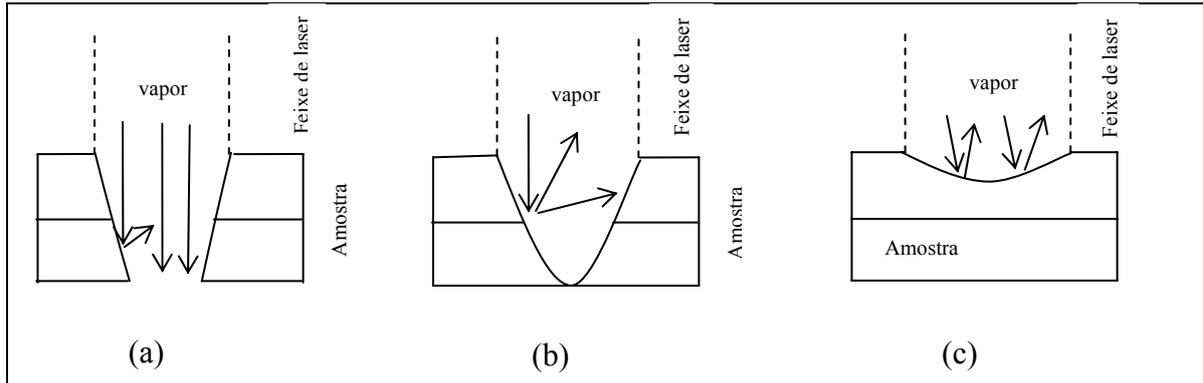
**Figura 5.10:** Perfil de temperatura em chapas de aço inoxidável, após a interação com o feixe de Cu-HBr. (a) considerando uma área de 120x120 μm<sup>2</sup> da amostra e uma velocidade de soldagem de 20 mm/s; (b) variação da temperatura em relação a largura transversal da amostra, considerando a região de fusão como sendo equivalente à distância entre a reta V e a reta F.

Considerando o mesmo procedimento descrito acima, a Figura 5.11 mostra a variação da fração de energia absorvida pela amostra, na interação com o feixe de laser, em relação a

cada velocidade de soldagem utilizada. Podemos observar que seu valor aumenta gradativamente com a velocidade de soldagem, torna-se aproximadamente constante entre 12 e 15 mm/s, atinge seu valor máximo em 17 mm/s e diminui na maior velocidade de soldagem considerada. Estes resultados estão de acordo com o discutido no capítulo anterior (seção 3.2), onde a fração de energia acoplada é dependente da geometria formada na amostra. A Figura 5.12 mostra um desenho esquemático das geometrias geradas, após a interação com o feixe de laser, dependendo da velocidade de soldagem utilizada. Assim, na situação onde a cavidade formada é profunda (velocidades entre 3 e 15 mm/s), a energia do laser é transmitida através do furo, fazendo com que a fração absorvida por suas paredes seja pequena. O maior acoplamento de energia se dá quando o orifício formado possui uma geometria cônica e sua profundidade aproxima-se da espessura da amostra, ou seja, numa velocidade de soldagem de 17 mm/s. Já na situação onde a profundidade de penetração na amostra é pequena, pois a velocidade de soldagem é muito alta (20 mm/s), o vapor gerado durante a interação é expulso da cavidade e a fração de energia absorvida pelo material torna-se menor.



**Figura 5.11: Variação da fração de energia absorvida pela amostra, na interação com o feixe de laser, em relação a cada velocidade de soldagem utilizada.**



**Figura 5.12:** Desenho esquemático das geometrias geradas, após a interação com o feixe de laser, dependendo da velocidade de soldagem utilizada. (a) entre 3 e 15 mm/s, (b) em 17 mm/s e (c) em 20 mm/s.

Dos resultados obtidos, através de experimentos e de modelos desenvolvidos, podemos concluir então que existe uma forte dependência entre a quantidade de energia acoplada no material com a geometria da cavidade formada na amostra, que é função da velocidade de soldagem (ou da quantidade de pulsos sobrepostos) e da intensidade do feixe de laser.

Uma outra característica que devemos considerar, pois influencia diretamente no processo de soldagem é a chamada eficiência de junção (*joining efficiency*) [3], que é definida como sendo o tamanho da área fundida no material pela quantidade de energia entregue pelo laser. Assim, quanto maior esse valor, menos energia do laser está sendo gasta em aquecimento desnecessário. A eficiência de junção é dada por:

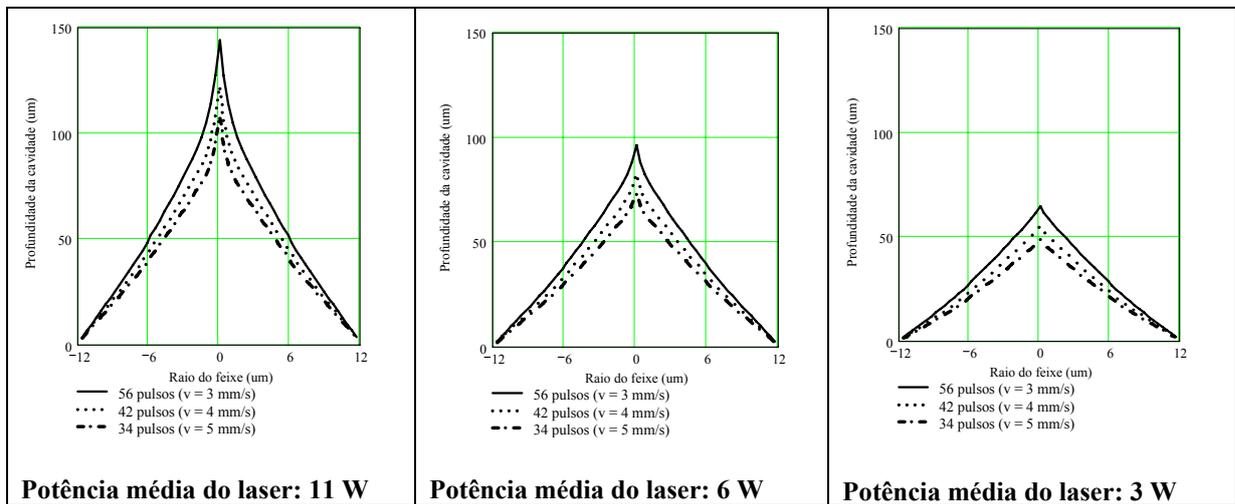
$$J = \frac{vL}{P} \quad (5.1)$$

Onde  $v$  é a velocidade de soldagem,  $L$  é a espessura soldada e  $P$ , a potência média do laser. Na soldagem a laser, segundo Steen [3], esse valor varia de 15 – 25 mm<sup>2</sup>/kJ.

Para obtermos essa eficiência em nosso processo de microssoldagem, a velocidade de soldagem deve estar aproximadamente, entre 3 e 5 mm/s. Entretanto, conforme já discutido,

como a região vaporizada na amostra é muito grande nestas velocidades, a cavidade formada é profunda e a quantidade de energia absorvida na amostra é pequena.

Dessa maneira, como a taxa de repetição dos pulsos de laser é fixa, um parâmetro a ser variado é a potência média do laser. Na Figura 5.13 é apresentada a formação de cavidades em relação ao raio do feixe focalizado, ao longo do volume da amostra, variando-se a potência média do laser em cada caso. Observe que, para a microsoldagem em chapas de aço com 25  $\mu\text{m}$  de espessura, a potência média do laser requerida para formar uma cavidade com profundidade próxima à espessura total da amostra é de apenas 3 W. Entretanto, experimentos neste sentido não foram efetuados. Isso porque, em nosso aparato experimental, a única maneira de diminuir a potência média do laser seria incidir o feixe numa íris - variando assim sua abertura -, o que modificaria o formato do feixe e sua distribuição espacial, acarretando uma provável alteração em cada resultado.



**Figura 5.13: Formação de cavidades em relação ao raio do feixe focalizado, ao longo do volume da amostra, variando-se a potência média do laser em cada caso.**

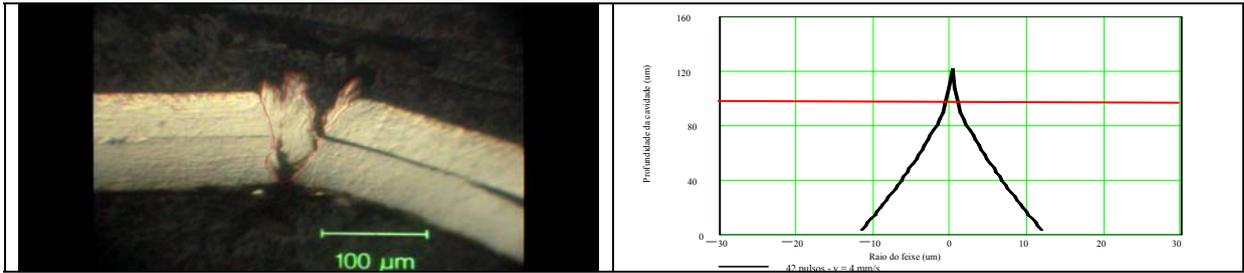
## 5.2 Microsoldagem entre chapas de aço inoxidáveis com 50 $\mu\text{m}$ de espessura

Aqui, microsoldas em chapas de aço com 50  $\mu\text{m}$  de espessura foram obtidas. A Tabela 5.2 descreve todos os parâmetros envolvidos no processo de microsoldagem e seus respectivos valores.

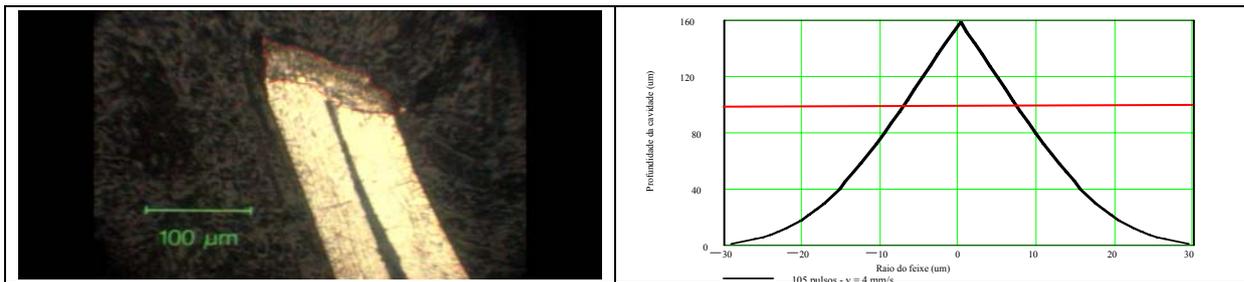
**Tabela 5.2: Parâmetros considerados na microsoldagem realizada em chapas com 50  $\mu\text{m}$  de espessura.**

	<i>Valores dos parâmetros</i>
Velocidade de soldagem	4 mm/s
Potência média do laser (emissão verde)	11 W
Raio do feixe focalizado sobre a amostra – emissão verde ( $w_0$ )	12 $\mu\text{m}$
Potência média do laser (emissão simultânea – verde + amarelo)	20 W
Raio do feixe focalizado sobre a amostra – emissão simultânea (verde + amarelo) - ( $w_0$ )	30 $\mu\text{m}$
Taxa de repetição dos pulsos	14 kHz
Tempo de pulso do laser	30 ns

As seções transversais das amostras obtidas estão apresentadas na Figura 5.14 e 5.15. Observe que o valor da potência média utilizada em cada situação, bem como a variação no diâmetro de focalização do feixe sobre a amostra, altera significativamente a geometria da microsolda produzida. Na Figura 5.14, um cordão de solda é formado em toda a amostra, apesar de apresentar uma descontinuidade entre o material de base e a região fundida (provavelmente gerada no processo de embutimento da amostra). Já na Figura 5.15, as chapas foram completamente cortadas, gerando uma região de fusão nas paredes desta abertura.



**Figura 5.14: Microscopia óptica da microssolda obtida em chapas de aço 304, utilizando o laser de Cu-HBr com potência média de 11 W; e gráfico da profundidade da cavidade formada em relação ao raio do feixe de laser focalizado nesta amostra.**



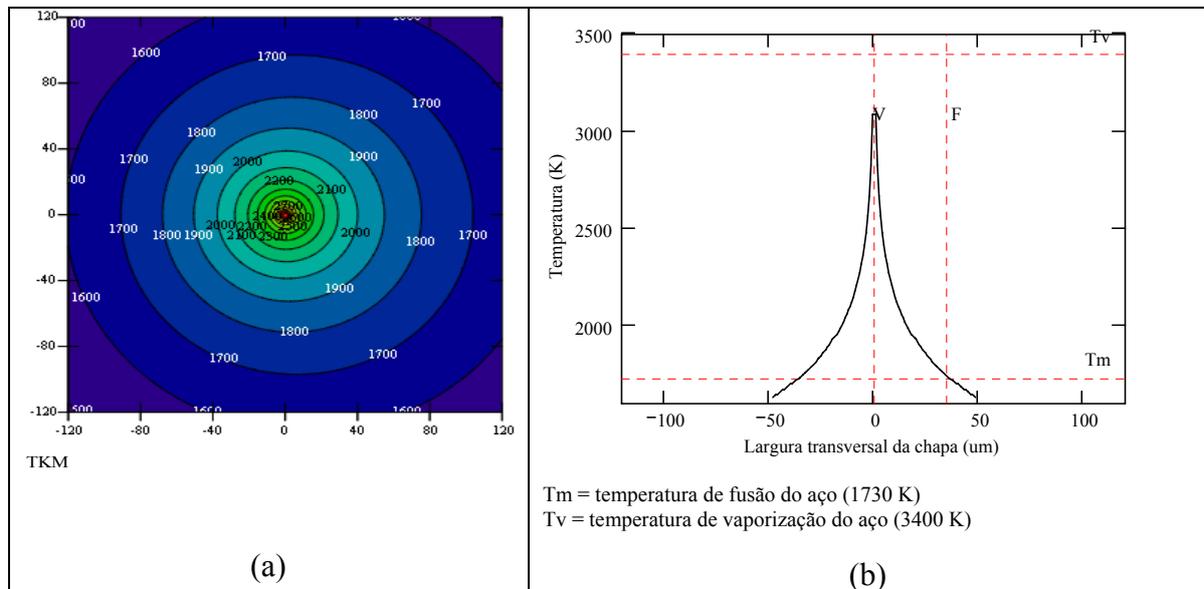
**Figura 5.15: Microscopia óptica da microssolda obtida em chapas de aço 304, utilizando o laser de Cu-HBr com potência média de 20 W; e gráfico da profundidade da cavidade formada em relação ao raio do feixe de laser focalizado nesta amostra.**

Na Figura 5.14 e Figura 5.15 também são apresentadas a formação da cavidade em relação ao raio do feixe focalizado, ao longo do volume da amostra, variando-se o valor da potência média do laser. Podemos observar que quando o feixe de laser incide na amostra com uma potência média de 11 W (com raio de focalização de 12 μm) -, a geometria da cavidade é cônica, com uma abertura gerada em sua superfície inferior de apenas 1 μm. Quando os valores da potência média e do raio de focalização do feixe, utilizado na interação com o material, são maiores - 20 W e 30 μm respectivamente -, a abertura na superfície inferior da amostra é grande, gerando o corte da amostra na direção de incidência do feixe - como pôde ser observado na imagem feita por microscopia óptica.

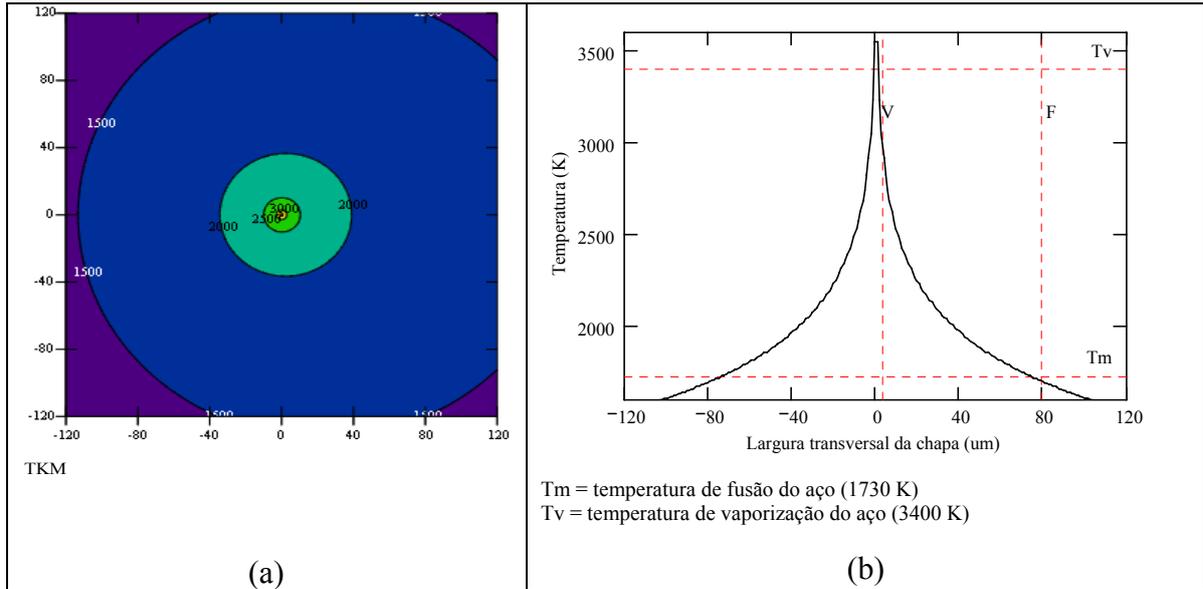
Para determinarmos a fração de energia absorvida pela amostra em cada situação, adotamos o procedimento descrito anteriormente na seção 5.1. Na primeira delas, considerando a incidência do feixe com 11 W de potência média, a Figura 5.16-a mostra o

perfil de temperatura, em uma área de  $120 \times 120 \mu\text{m}^2$  da amostra de aço e também, a variação de temperatura em relação a sua largura transversal – Figura 5.16-b. Nesta situação, a fração de energia absorvida encontrada foi de 0,38.

Da mesma maneira, considerando um feixe com 20 W de potência média, a Figura 5.17-a mostra o resultado do perfil de temperatura, em uma área de  $120 \times 120 \mu\text{m}^2$  da amostra, e a Figura 5.17-b, a variação de temperatura em relação à sua largura transversal. Neste caso, a fração de energia absorvida pelo material foi de 0,25.



**Figura 5.16: Perfil de temperatura em chapas de aço inoxidável, após a interação com o laser de Cu-HBr. (a) considerando a incidência do feixe com 11 W de potência média; (b) variação da temperatura em relação a largura transversal da amostra, considerando a região de fusão como sendo equivalente à distância entre a reta V e a reta F.**



**Figura 5.17:** Perfil de temperatura em chapas de aço inoxidável, após a interação com o laser de Cu-HBr. (a) considerando a incidência do feixe com 20 W de potência média; (b) variação da temperatura em relação a largura transversal da amostra, considerando a região de fusão como sendo equivalente à distância entre a reta V e a reta F.

Nos resultados acima, além da variação na intensidade do feixe sobre a amostra, a diminuição de sua potência média interfere na geometria da cavidade formada na amostra, resultando no aumento de energia absorvida pelo material e também na melhora da eficiência de junção. Observe que isto está de acordo com a discussão feita sobre os resultados das microsoldas obtidas em chapas de 25 μm.

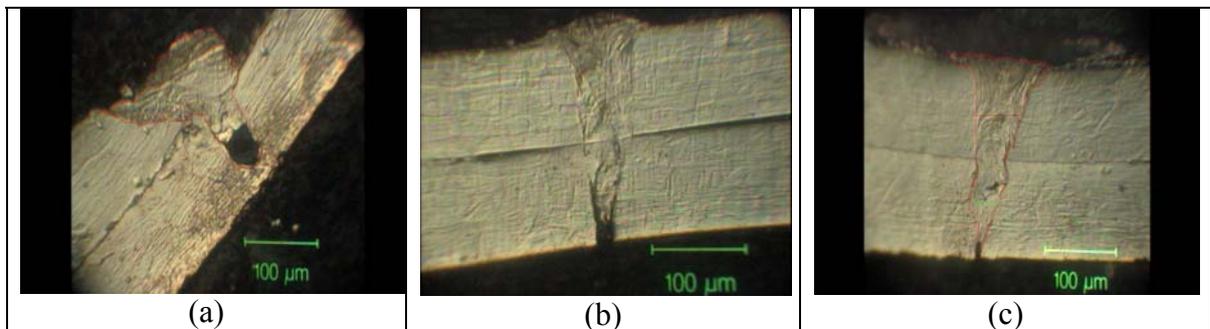
### 5.3 Microsoldagem entre chapas de aço inoxidáveis com 100 μm de espessura

Junções foram realizadas em chapas de aço com espessura de 100 μm considerando os parâmetros de soldagem descritos na Tabela 5.3.

**Tabela 5.3: Parâmetros considerados na microssoldagem realizada em chapas com 100  $\mu\text{m}$  de espessura.**

	<i>Valores dos parâmetros</i>
Velocidade de soldagem	1 a 3 mm/s
Potência média do laser (emissão simultânea)	20 W
Raio do feixe focalizado sobre a amostra ( $w_0$ )	30 $\mu\text{m}$
Taxa de repetição dos pulsos	14 kHz
Tempo de pulso do laser	30 ns

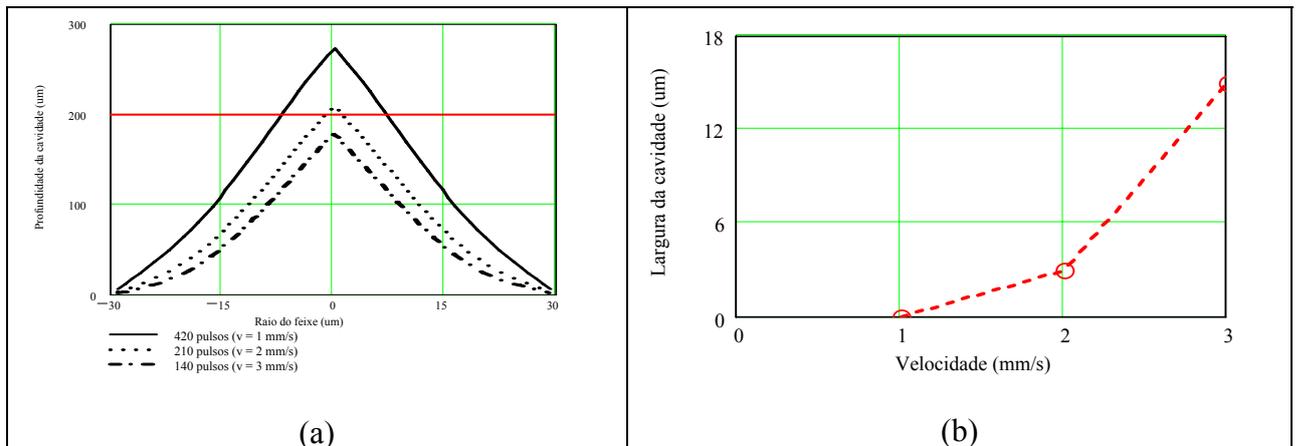
As seções transversais das amostras obtidas estão apresentadas na Figura 5.18. Na Figura 5.18-a, onde a velocidade de soldagem utilizada foi de 1 mm/s, um cordão de solda formou-se em toda a amostra irradiada pelo feixe, embora a chapa superior tenha sido completamente cortada após a interação com o laser. Nas velocidades de soldagem entre 2 e 3 mm/s (Figuras 5.18-b e 5.18-c), os resultados obtidos foram aproximadamente os mesmos. Conforme observado, as amostras não foram cortadas, gerando um cordão de fusão na região exposta ao laser.



**Figura 5.18: Microscopia óptica da microssolda obtida em chapas de aço 304, utilizando o laser de Cu-HBr com potência média de 20 W, variando-se a velocidade de soldagem utilizada. (a) 1 mm/s, (b) 2 mm/s e (c) 3 mm/s.**

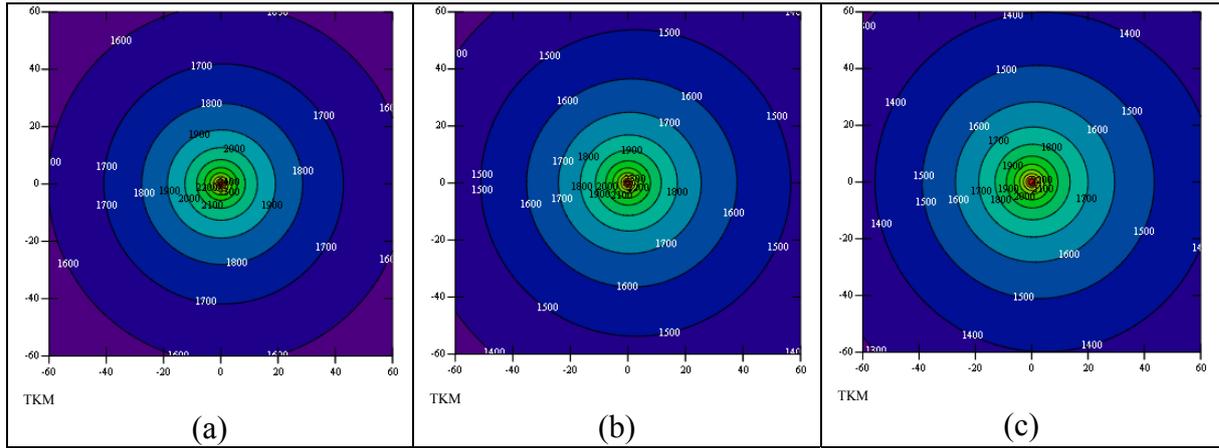
Os resultados da geometria da cavidade formada na amostra estão apresentados na Figura 5.19-a. Observe que, para as velocidades de soldagem de 2 e 3 mm/s, a cavidade formada possui uma geometria cônica e sua profundidade aproxima-se da espessura da amostra, ou seja, 200  $\mu\text{m}$ . O mesmo não ocorreu na situação onde a velocidade de soldagem

utilizada foi de 1 mm/s, onde a profundidade da cavidade gerada ultrapassa a espessura da amostra. A Figura 5.19-b apresenta os resultados da largura da cavidade na superfície inferior da amostra. Nas velocidades de soldagem entre 2 e 3 mm/s, a abertura gerada é muito pequena. Já na situação onde a velocidade de soldagem considerada foi de 1 mm/s, a largura da cavidade na amostra é relativamente maior do que nas anteriores.

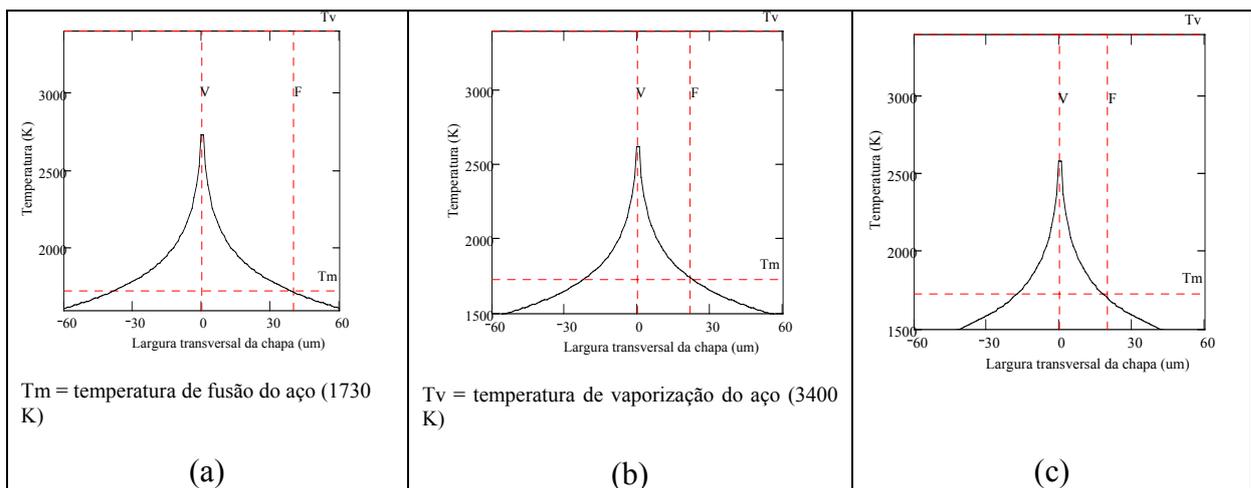


**Figura 5.19: (a) profundidade da cavidade formada na amostra em relação ao raio do feixe de laser focalizado, considerando as velocidades utilizadas experimentalmente. (b) tamanho da largura da cavidade em relação à velocidade de soldagem utilizada.**

Adotando novamente o procedimento descrito na seção 5.1, a Figura 5.20 mostra o resultado da simulação do perfil de temperatura, em uma área de  $60 \times 60 \mu\text{m}^2$  da amostra, e a Figura 5.21 apresenta a variação de temperatura em relação à sua largura transversal, considerando as velocidades de soldagem utilizadas. Nas três situações descritas, a fração de energia absorvida pelo material foi aproximadamente a mesma, ou seja, 0,33.



**Figura 5.20:** Perfil de temperatura em chapas de aço inoxidável, após a interação com o laser de Cu-HBr. (a) velocidade de soldagem de 1 mm/s; (b) velocidade de soldagem de 2 mm/s e (c) velocidade de soldagem de 3 mm/s.



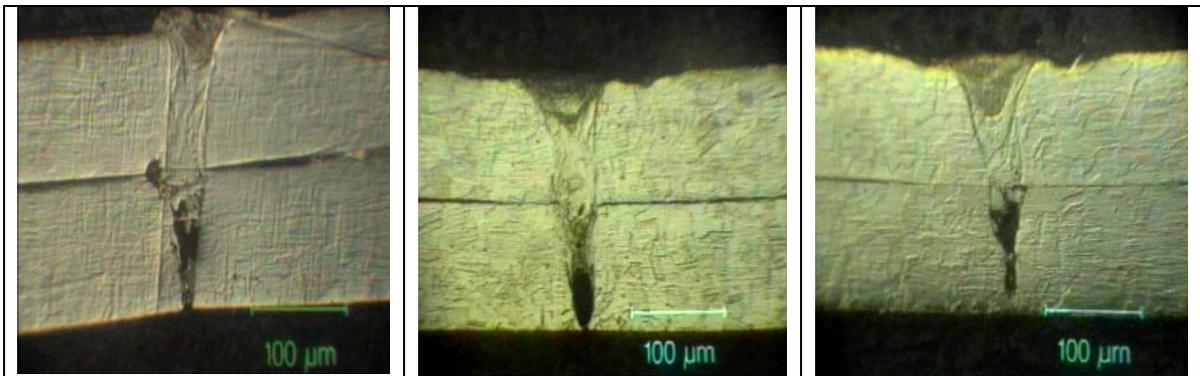
**Figura 5.21:** Variação de temperatura em relação a largura transversal da amostra considerando a velocidade de soldagem utilizada em cada situação. (a) 1 mm/s, (b) 2 mm/s e (c) 3 mm/s.

Os resultados obtidos acima apontam para uma condição de soldagem, onde a cavidade formada na amostra - função da velocidade de soldagem e da intensidade do feixe de laser - gerou uma absorção de energia ideal, capaz de produzir um cordão de solda com alta razão de aspecto [19] (conforme pôde ser observado na microscopia óptica dos resultados experimentais).

Em relação à eficiência de junção em nosso processo de microssoldagem, a variação calculada foi de 10-30 mm<sup>2</sup>/kJ. Esse resultado pode explicar a situação quando a velocidade

de soldagem utilizada foi mais baixa (1 mm/s) e parte da energia do laser foi usada em aquecimento desnecessário, gerando um corte na chapa superior da amostra (Figura 5.18-a). Apesar disso, esta variação na eficiência de junção está muito próxima da encontrada nos processos de soldagens em geral, isto é, entre 15 e 25 mm<sup>2</sup>/kJ.

Concluimos então que os parâmetros de soldagem descritos acima (Tabela 5.3) são ideais para obtermos microssoldas com alta razão de aspecto. A fim de verificarmos a reprodutibilidade dos resultados, outras amostras foram submetidas ao procedimento experimental (capítulo 4) e em seguida, analisadas por microscopia óptica. A Figura 5.22 apresenta a reprodutibilidade das microssoldas obtidas em amostras de aço inoxidável 304 com 200 µm de espessura, irradiadas pelo laser de Cu-HBr. Neste caso, a velocidade de soldagem utilizada foi de 3 mm/s.



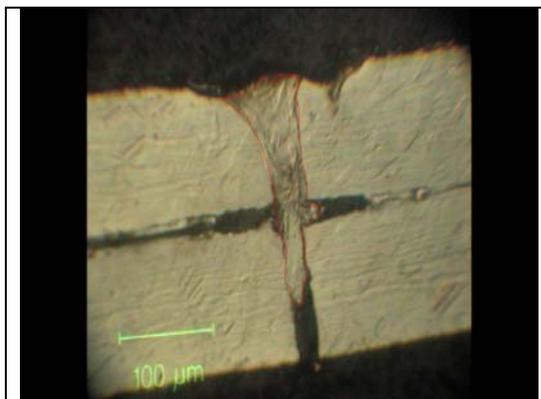
**Figura 5.22:** Reprodutibilidade da microssolda obtida em chapas de aço inoxidável 304 com 200 µm de espessura, irradiadas pelo laser de Cu-HBr, com velocidade de soldagem de 3 mm/s.

### 5.3.1 Influência do gás de proteção nas microssoldas obtidas entre chapas de 100 µm

Para verificarmos a influência do gás de proteção nos resultados obtidos em nossos estudos, experimentos foram realizados em chapas de aço inoxidável SS304 com espessura de 100 µm, utilizando argônio – com um fluxo de 5 litros/minuto –, como gás de proteção. Após

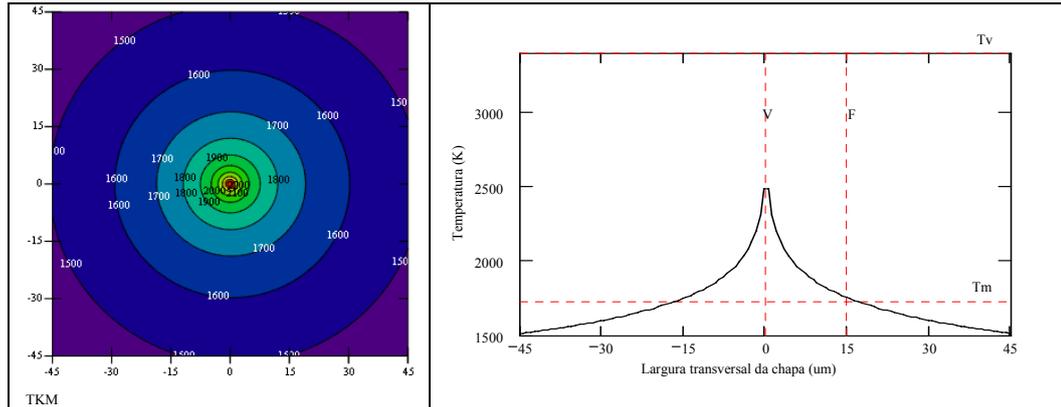
a realização do procedimento experimental – descrito no capítulo anterior –, a microssolda foi analisada por microscopia óptica. Esta junção foi feita mantendo-se os parâmetros considerados na seção anterior (Tabela 5.3), exceto na velocidade de soldagem, onde esta foi mantida 1 mm/s

A seção transversal da amostra obtida está apresentada na Figura 5.23. Embora a geometria da cavidade formada seja cônica, comparando com a amostra obtida na seção anterior (Figura 5.18-a), podemos perceber que o cordão de solda formado nesta situação é mais estreito do que na anterior.



**Figura 5.23:** Microscopia óptica da microssolda obtida em chapas de aço SS304 utilizando um fluxo de argônio (5 l/min) como gás de proteção, numa velocidade de soldagem de 1 mm/s.

O resultado obtido acima indica uma alteração na fração de energia absorvida pela amostra, durante o processo de microssoldagem. A Figura 5.24-a mostra o resultado da simulação do perfil de temperatura, em uma área de  $45 \times 45 \mu\text{m}^2$  da amostra, considerando a velocidade de soldagem utilizada (1 mm/s). A Figura 5.24-b apresenta a variação de temperatura em relação à sua largura transversal. Nesta situação a fração de energia absorvida pelo material, na interação com o feixe de laser, foi de 0,27.

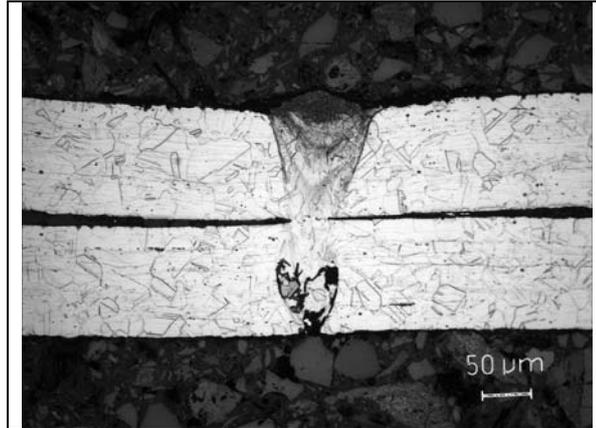


**Figura 5.24:** (a) perfil de temperatura, em uma área de  $45 \times 45 \mu\text{m}^2$  da amostra, considerando a velocidade de soldagem utilizada (1 mm/s). (b) variação de temperatura em relação à largura transversal da amostra, onde a distância entre a reta V e a reta F representa a região fundida no material.

Concluimos então que, a fração de energia absorvida pela amostra (ou o acoplamento de energia) é menor com o uso do gás de proteção. Isso ocorre provavelmente devido ao maior resfriamento da amostra e à expulsão de vapor da cavidade, causados pelo fluxo de gás sobre o material.

#### **5.4 Metalografia do processo de microsoldagem em chapas de aço inoxidáveis com 100 μm de espessura**

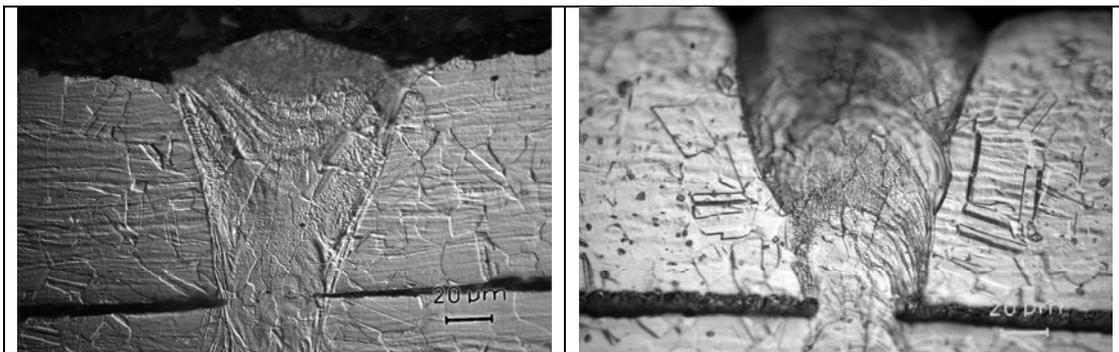
Nas condições de soldagem descritas na seção anterior, utilizando chapas de aço SS304 com 100 μm de espessura, uma análise metalográfica foi feita sobre o cordão de solda obtido. Verificou-se que esse cordão se estende pelas duas chapas, apresentando um topo pronunciado e uma raiz com alguma retração – Figura 5.25. Em alguns resultados experimentais, a distância entre a chapa superior e inferior não foi otimizada para o processo de soldagem. Entretanto, uma boa junção entre elas foi constatada.



**Figura 5.25:** Microsolda a laser obtida entre duas chapas de aço inoxidável SS304 com 100 µm de espessura.

A Figura 5.26-a apresenta em detalhe a microestrutura da solda e do material base. Observe que os grãos estão definidos tanto no material base quanto no cordão de solda e que dendritas finas crescem da borda do cordão até seu topo, seguindo a direção do fluxo de calor. Na junção das chapas, não há desenvolvimento de trincas, garantindo que o método de soldagem não induz tensões entre a chapa superior e a inferior.

Um resultado importante é a reduzida zona afetada termicamente. Como pode ser observado na Figura 5.26-b, placas de martensitas estão presentes próximos ao cordão de solda formado. Isso significa que, muito próximo à interface da solda, a transferência de calor para o material base foi controlada, pois martensitas se decompõem rapidamente em temperaturas entre 600 e 700 K (aproximadamente 300 e 400°C).



**Figura 5.26:** (a) Detalhe da microestrutura da solda e do material base obtida em nossos estudos; (b) placas de martensitas próximas à região fundida da amostra.

Ao longo da seção transversal do cordão de solda também foi executado ensaios de dureza Vicker's com carga de 25g (0,25 N). A Figura 5.27 apresenta os resultados das regiões (a) fora e (b) dentro do cordão de solda. O teste indicou que o material soldado apresenta uma dureza média de  $370 \pm 50$  HV<sub>0,25</sub>, enquanto o material base apresenta uma dureza média de  $280 \pm 10$  HV<sub>0,25</sub>. Essa variação indica um ligeiro endurecimento no cordão de solda, porém, insuficiente para afetar significativamente as propriedades mecânicas do conjunto.

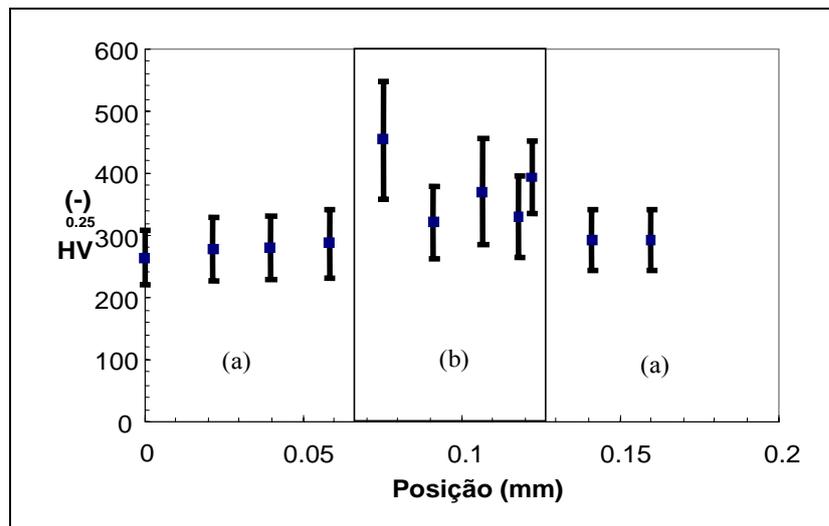


Figura 5.27: Resultados dos testes de microdureza para a região (a) fora e (b) dentro do cordão de solda.

## 6 Conclusão

Neste trabalho foi mostrada a viabilidade de realizar microssoldas de penetração em chapas finas, utilizando um laser de pulsos curtos com alta taxa de repetição. Em geral, os lasers utilizados para efetuar soldas em materiais com espessura entre 10 e 100  $\mu\text{m}$  são do tipo pulsado, com pulsos longos (0,1 a 1 ms) e energias de pulsos elevadas (0,1 a 1 J). Pulsos curtos não são geralmente utilizados na soldagem a laser por causa da limitada profundidade de penetração térmica no material.

Primeiramente verificou-se, através de experimentos e de modelos desenvolvidos, que a geometria da cavidade formada - função da velocidade de soldagem (ou da quantidade de pulsos sobrepostos) e da intensidade do feixe de laser -, influencia fortemente na fração de energia absorvida pelo material na interação com o feixe de laser; e uma maior absorção se dá quando esta cavidade possui geometria cônica e sua profundidade aproxima-se da espessura da amostra.

Conclui-se que esta condição ocorre na interação do feixe – com potência média de 20 W – com chapas de aço de 100  $\mu\text{m}$  de espessura e velocidades de soldagem entre 1 e 3 mm/s, onde obtivemos uma condição ideal de soldagem capaz de produzir um cordão de solda com alta razão de aspecto. Observamos também nesta situação, uma melhora na eficiência de junção, com valores próximos aos considerados nas soldagens a laser convencionais.

Uma análise metalográfica foi feita sobre o cordão de solda citado acima. Verificou-se que esse cordão se estende pelas duas chapas, apresentando um topo pronunciado e uma raiz com alguma retração. Os grãos estão definidos tanto no material base quanto na região fundida. Na junta das chapas não houve o desenvolvimento de trincas, garantindo assim que o método não induz tensões entre a chapa superior e a inferior. Um resultado importante obtido foi a reduzida zona afetada termicamente.

Foi constatada a influência do gás de proteção nos resultados obtidos em nossos estudos. Conclui-se que a fração de energia absorvida pelo material é menor com o uso do gás, provavelmente devido ao maior resfriamento da amostra e à expulsão de vapor da cavidade, causado pelo fluxo de gás sobre ela.

Foi desenvolvido um modelo simples, mas que demonstra a formação da cavidade na amostra dependente da quantidade de pulsos sobrepostos em cada velocidade de soldagem considerada na interação com o feixe de laser.

Dessa maneira, foi proposto um mecanismo de redistribuição de energia do laser dependente da geometria da cavidade formada na amostra. Conclui-se que, o maior acoplamento de energia se dá quando a cavidade formada possui uma geometria cônica e sua profundidade aproxima-se da espessura da amostra. Para uma cavidade muito profunda, a energia do laser é transmitida através do furo e a fração de energia absorvida por suas paredes é menor. O mesmo ocorre na situação onde a profundidade da cavidade é pequena fazendo com que a fração de energia absorvida pelo material também diminua.

Por fim, a técnica de microssoldagem em chapas finas utilizando o laser com pulsos curtos e alta taxa de repetição é promissora, podendo futuramente concorrer com outros métodos já consolidados e que estão sendo utilizados.

## **Perspectivas para trabalhos futuros**

Novos experimentos com melhor controle da potência do laser – mantendo as características do feixe - a fim de adequar sua intensidade em cada tipo de união, possibilitando assim, maiores eficiências de soldagem.

Melhoria do modelo desenvolvido aprimorando, por exemplo, o modelo que considera a redistribuição de energia em uma chapa semi-infinita não apenas ao longo de uma linha, mas na cavidade gerada na amostra.

Desenvolvimento de experimentos, utilizando um calorímetro, para a confirmação da variação do fator de acoplamento de energia em cada cavidade, dependendo de sua geometria. E ainda, o controle desse fator, utilizando-se a transmissão da radiação do feixe de laser pela cavidade formada na amostra.

## Referências

---

- 1 READY J. F. **Industrial Applications of Lasers**. Ed. Academic Press. 2ª ed., ISBN 0125839618. 1997.
- 2 BERRETTA, J.R. **Solda laser em materiais dissimilares com laser de Nd:YAG pulsado**. 2005. 120f. Tese Doutorado em Ciências – Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares, São Paulo.
- 3 STEEN, W. M. **Laser Material Processing**. Ed. Springer-Verlag. 2ª ed., ISBN 3540761748. 1998.
- 4 FREWIN M. R., SCOTT D. A., Finite element model of pulsed laser welding. **Welding Research Supplement**; p. 15-s-21-s, 1999.
- 5 MIYAMOTO I., PARK S., TOSHIHIKO O., Ultrafine-keyhole welding process using single-mode fiber laser. **LMP**; Section A, p. 203-316.
- 6 DEARDEN G., Recent advances in laser micro welding, soldering and bonding. **Laser in Manufacturing 2005** – Proceedings of the Third International WLT-Conference on Lasers in Manufacturing, pp. 615-623, Munich, Germany, June 2005.
- 7 NAEEM M., COLLINS P., Micro-joining with Nd:YAG laser, **Laser in Manufacturing 2005** – Proceedings of the Third International WLT-Conference on Lasers in Manufacturing, pp. 643-649, Munich, Germany, June 2005.
- 8 RIVA, R.; WATANUKI, J.T.; RODRIGUES, N.A.S.; CAPELLA DE OLIVEIRA, A. Estudo de micro-junção de chapa finas metálicas usando um laser de Cu-HBr. In: **XXV ENCONTRO NACIONAL DE FÍSICA DA MATÉRIA CONDENSADA**, 2002.
- 9 RIVA, R; RODRIGUES, N.A.S.; SCHWAB, C.; CAPELLA DE OLIVEIRA, A. Welding of Stainless Steel Membrans with a Cu-HyBrID laser. In: **XXIII CONGRESSO BRASILEIRO DE APLICAÇÕES DE VÁCUO NA INDÚSTRIA E NA CIÊNCIA**, 2002.
- 10 DU, J., LONGOBARDI, J., LATHAM, W. P., KAR, A. Laser marginal lap microwelding for ultra thin sheet metal. **J. Laser Applications**, v. 14, n. 1, p. 4-8, 2002.

- 
- 11 SEMAK, V. V., KNOROVSKY, G. A., MAC CALLUM, D. O. On the possibility of microwelding with laser beams. **J. Phys. D: Appl. Phys.**; n. 36, p. 2170-2174, 2003.
  - 12 KLEINE K. F., WATKINS K. G., Micro welding with single mode fiber lasers. **Laser in Manufacturing 2005** – Proceedings of the Third International WLT-Conference on Lasers in Manufacturing, pp. 637-641, Munich, Germany, June 2005.
  - 13 SANTOS C. L. **Determinação dos parâmetros ótimos de operação de um laser de Cu-HBr**. Dissertação de Mestrado – Instituto Tecnológico de Aeronáutica, São José dos Campos, 1999.
  - 14 STAUTER C., FONTAINE J., ENGEL TH., Real-time determination of the amount of removed material during short pulses laser micromachining. **Applied Surface Science**; 96-98, p. 522-527, 1996.
  - 15 KORNER C., MAYERHOFER R., HARTMANN M., BERGMANN H. W., Physical and material aspects in using visible laser pulses of nanosecond duration for ablation. **Applied Physics**; A 63, p. 123-131, 1996.
  - 16 LUFT A., FRANZ U., EMSERMANN A., KASPAR J., A study of thermal and mechanical effects on materials induced by pulsed laser drilling. **Applied Physics**; A 63, p. 93-101, 1996.
  - 17 GOVORKOV S. V., SLOBODTCHIKOV E. V., WIESSNER A. O., BASTING D., High accuracy microdrilling of steel with solid-state UV laser at 10 mm/sec rate. **Lambda Highlights**; n. 57, p. 3-5.
  - 18 KNOWLES M. R. H., Micro-ablation with high power pulsed copper vapor lasers. **Optics Express**; vol 7, n. 2, p. 50-55, 2000.
  - 19 READY J.F., **LIA Handbook of Laser Processing**, v. 1, 1<sup>st</sup> Ed. Laser Institute of America, 2001.
  - 20 CHARSHAN S. S., **Guide to laser materials processing**. Laser Institute of America, ISBN 0-912035-11-0. 1993.
  - 21 DULEY, W. W. **CO2 Lasers: Effects and Applications**, Ed. Academic Press, 1976.

- 
- 22 HOLMAN J. P., **Transferência de calor**, São Paulo, MCGraw-Hill, 1983.
- 23 CAPELLA DE OLIVEIRA, A. **Estudo da condução de calor em chapas finas utilizando um laser de Cu-HBr**. Monografia de Graduação – Universidade Braz Cubas, Mogi das Cruzes, 2002.
- 24 KELLER F. J., GETTYS W. E., SKOVE M. J. **Física**. Vol 1, Makron Books, 1ª ed., ISBN: 8534605424. 1999.
- 25 YEO C. Y., TAM S. C., JANA S., LAU M. W. S., A technical review of the laser drilling of aerospace materials. **J. Materials Processing Technology**; n. 42, p. 15-49, 1994.
- 26 EL-BANDRAWY M., NAGARATHNAM K., GUPTA M. C., Copper vapor laser micromachining of 304 stainless steel. **J. Laser Applications**, v. 15, n. 2, p. 101-106, 2003.
- 27 PRIANTE M. A., **Estudo experimental da evaporação de metais refratários com laser de Cu-HBr**. Dissertação de Mestrado – Instituto Tecnológico de Aeronáutica, São José dos Campos, 2000.
- 28 SENAI-SP, **Soldagem**. Coleção Tecnologia Senai. 1ª ed., 1994.
- 29 DULEY, E. E. **Laser welding**, Ed. A Wiley-Interscience publication. ISBN: 0-471-24679-4. 1998.
- 30 DU, J., LONGOBARDI J., LATHAM W. P., KAR A., Weld strength and process controllability for laser welding of thin sheet metals. **J. Laser Applications**, v. 12, n. 6, p. 239-243, 2000.
- 31 DOWDEN J., KAPADIA P., POSTACIOGLU N., An analysis of the laser-plasma interaction in laser keyhole welding. **J. Phys. D: Appl. Phys.**; n. 22 (6), p. 741-749, 1989.
- 32 HEL, X., FUERSCHBACH, P. W., DEBROY, T. Heat transfer and fluid flow during laser spot welding of 304 stainless steel. **J. Phys. D: Appl. Phys.**; n. 36, p. 1388-1398, 2003.

- 
- 33 BENTER C., PETRING D., POPRAWE R., Investigation of the transition from heat conduction to deep penetration welding with high power diode lasers. **Laser in Manufacturing 2005** – Proceedings of the Third International WLT-Conference on Lasers in Manufacturing, pp. 67-71, Munich, Germany, June 2005.
- 34 LEE, J. Y., KO, S. H., FARSON, D. F., YOO, C. D. Mechanism of keyhole formation and stability in stationary laser welding. **J. Physics D: applied physics**; n. 35, p. 1570-1576, 2002.
- 35 CAPELLA DE OLIVEIRA, A; RIVA, R.; LIMA, M.S.F; WATANUKI, J.T. Microsoldagem em chapas finas utilizando um laser de Cu-HBr. In: **XXXI CONGRESSO DE SOLDAGEM**, 2005.
- 36 HECHT, E. **Optics**. Addison-Wesley Longman, Inc. 3rd Edition, 1997.
- 37 ROSENTHAL D., The theory of moving sources of heat and its application to metal treatments. **Trans. ASME**; 43(11), p. 849-866, 1946.
- 38 GILET J.Y. A. A., Disponível em : <http://www.acesita.com.br/>. Acesso em 17/05/2006.
- 39 CHANG J.J.; WARNER B.E.; DRAGON E.P; MARTINEZ M.W. Precision micromachining with pulsed green laser. **Journal of Laser Applications**; n. 10 (6), p. 285-291, 1998.
- 40 GIÃO, M.A.P.; MIYAKAWA, W; RODRIGUES, N.A.S.; ZECELL, D.M.; RIVA R.; DESTRO, M.G.; WATANUKI, J.T.; SCHWAB, C. High beam quality in a HyBrID copper laser operating with an unstable resonator made of a concave mirror and a plano-convex BK7 len. **Optics and Laser Technology**; 38, p. 523-527, 2006.
- 41 SIEGMAN A.E. **Lasers**. Mill Valley, CA: Univ. Sci. 1986.
- 42 JORGE K. C. **Novo método de caracterização de feixes de laser utilizando espalhamento Rayleigh**. Dissertação de Mestrado – Instituto Tecnológico de Aeronáutica, São José dos Campos, 2004.
- 43 Document ISO/11146. Test methods for laser beam parameters: beam widths, divergence angle and beam propagation factor.. International Organization for Standardization.

- 
- 44 YILBAS B. S., Effect of focus settings on laser hole drilling quality. **Lasers in Engineering**; vol. 6, p. 203-211, 1997.
- 45 BASS M. Handbook Optics, Optical Society of America, McGraw-Hill, 2<sup>nd</sup> Ed. v.1, 1994.
- 46 COLPAERT H. **Metalografia dos produtos siderúrgicos comuns**. Editora da Universidade de São Paulo, 3. ed., 1974.

## FOLHA DE REGISTRO DO DOCUMENTO

<sup>1.</sup> CLASSIFICAÇÃO/TIPO  <p style="text-align: center;">TM</p>	<sup>2.</sup> DATA  <p style="text-align: center;">24 de agosto de 2006</p>	<sup>3.</sup> DOCUMENTO N°  <p style="text-align: center;">CTA/ITA-IEF/TM-008/2006</p>	<sup>4.</sup> N° DE PÁGINAS  <p style="text-align: center;">111</p>				
<sup>5.</sup> TÍTULO E SUBTÍTULO: Microssoldagem em chapas finas utilizando um laser de Cu-HBr							
<sup>6.</sup> AUTOR(ES): <b>Aline Capella de Oliveira</b>							
<sup>7.</sup> INSTITUIÇÃO(ÕES)/ÓRGÃO(S) INTERNO(S)/DIVISÃO(ÕES): Instituto Tecnológico de Aeronáutica. Divisão de Ensino Fundamental – ITA/IEF							
<sup>8.</sup> PALAVRAS-CHAVE SUGERIDAS PELO AUTOR: Microssolda, Laser pulsado, Aço Inoxidável 304							
<sup>9.</sup> PALAVRAS-CHAVE RESULTANTES DE INDEXAÇÃO: Soldagem a laser; Aços inoxidáveis; Lasers pulsados; Aplicação de laser; Óptica; Engenharia de materiais; Metalurgia.							
<sup>10.</sup> APRESENTAÇÃO: <table style="width: 100%; border: none;"> <tr> <td style="width: 60%;"></td> <td style="text-align: center;"><b>X Nacional</b></td> <td style="text-align: center;"><b>Internacional</b></td> </tr> </table> ITA, São José dos Campos, 2006, 111 páginas					<b>X Nacional</b>	<b>Internacional</b>	
	<b>X Nacional</b>	<b>Internacional</b>					
<sup>11.</sup> RESUMO:  Este trabalho teve como objetivo investigar a viabilidade de um novo método de micro-soldagem de chapas finas utilizando um laser de Cu-HBr que emite pulsos intensos com duração de nanosegundos em alta taxa de repetição. Nos métodos tradicionais, a micro-soldagem de chapas finas é realizada com laser contínuos ou com pulsos de baixa intensidade e de longa duração ( > 1ms) que permitem um comprimento de difusão térmica da ordem da espessura das chapas. Lasers com pulsos curtos (10 a 100 ns) são utilizados preferencialmente em processos de corte e furação de materiais. Um amplo estudo experimental do processo de micro-soldagem com pulsos curtos foi realizado utilizando chapas de aço inoxidável (AISI 304) com espessuras entre 25 µm e 100 µm. As principais características do feixe do laser de Cu-HBr foram medidas em todas as condições experimentais, permitindo uma determinação precisa da intensidade do laser na região de micro-soldagem. Os resultados deste estudo indicaram que é possível controlar o intervalo de parâmetros do processo para se obter um cordão de solda com alta razão de aspecto e reduzida zona afetada termicamente. Foi desenvolvido um modelo teórico para explicar a interação de pulsos curtos emitidos com alta taxa de repetição no processo de soldagem. Os resultados deste modelo indicaram que embora a intensidade do laser de Cu-HBr seja suficiente para perfurar as chapas de aço, é possível controlar a geometria do furo de forma a que o material vaporizado fique aprisionado e condense nas paredes internas da cavidade perfurada. Nestas condições experimentais controladas as chapas finas de aço foram soldadas com potências médias de laser entre 10 e 20 W, muito inferiores aos valores utilizados pelos métodos tradicionais.							
<sup>12.</sup> GRAU DE SIGILO:  <table style="width: 100%; border: none;"> <tr> <td style="width: 25%;"><b>(X) OSTENSIVO</b></td> <td style="width: 25%;"><b>( ) RESERVADO</b></td> <td style="width: 25%;"><b>( ) CONFIDENCIAL</b></td> <td style="width: 25%;"><b>( ) SECRETO</b></td> </tr> </table>				<b>(X) OSTENSIVO</b>	<b>( ) RESERVADO</b>	<b>( ) CONFIDENCIAL</b>	<b>( ) SECRETO</b>
<b>(X) OSTENSIVO</b>	<b>( ) RESERVADO</b>	<b>( ) CONFIDENCIAL</b>	<b>( ) SECRETO</b>				