

ESTE EXEMPLAR CORRESPONDE A REDAÇÃO FINAL DA  
TESE DEFENDIDA POR FELIPE BERTELLI  
..... E APROVADA  
PELA COMISSÃO JULGADORA EM 14 / 10 / 2009

Amauri Garcia  
.....  
ORIENTADOR

**UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS**  
**FACULDADE DE ENGENHARIA MECÂNICA**  
**COMISSÃO DE PÓS- GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA**

# **Simulação Numérica e Análise Experimental do Tratamento Superficial por Refusão a Laser de uma Liga Al-Fe**

Autor: Felipe Bertelli

Orientador: Prof. Dr. Amauri Garcia

Co-orientador: Dr. Noé Cheung

**UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS**  
**FACULDADE DE ENGENHARIA MECÂNICA**  
**COMISSÃO DE PÓS- GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA**  
**DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA DE MATERIAIS**

# **Simulação Numérica e Análise Experimental do Tratamento Superficial por Refusão a Laser de uma Liga Al-Fe**

Autor: Felipe Bertelli

Orientador: Prof. Dr. Amauri Garcia

Co-orientador: Dr. Noé Cheung

Curso: Engenharia Mecânica

Área de Concentração: Materiais e Processos de Fabricação

Dissertação de Mestrado apresentada à Comissão de Pós-Graduação da Faculdade de Engenharia Mecânica, como requisito para a obtenção do título de Mestre em Engenharia Mecânica

Campinas, 2009

S.P. – Brasil

FICHA CATALOGRÁFICA ELABORADA PELA  
BIBLIOTECA DA ÁREA DE ENGENHARIA E ARQUITETURA - BAE - UNICAMP

B461s	<p>Bertelli, Felipe</p> <p>Simulação numérica e análise experimental do tratamento superficial por refusão a laser de uma Liga Al-Fe / Felipe Bertelli. -- Campinas, SP: [s.n.], 2009.</p> <p>Orientadores: Amauri Garcia, Noé Cheung.</p> <p>Dissertação de Mestrado - Universidade Estadual de Campinas, Faculdade de Engenharia Mecânica.</p> <p>1. Modelos matemáticos. 2. Simulação por computador. 3. Fusão a laser. 4. Metais - Processos de solidificação rápida. I. Garcia, Amauri. II. Cheung, Noé. III. Universidade Estadual de Campinas. Faculdade de Engenharia Mecânica. IV. Título.</p>
-------	---

Título em Inglês: Numerical simulation and experimental analysis of laser surface remelting treatment of an Al-Fe alloy

Palavras-chave em Inglês: Mathematical models, Computer simulation, Laser fusion, Metals - Rapid solidification processing

Área de concentração: Materiais e Processos de Fabricação

Título: Mestre em Engenharia Mecânica

Banca examinadora: Carlos de Moura Neto, Célia Marina de Alvarenga Freire

Data da defesa: 14/10/2009

Programa de Pós Graduação: Engenharia Mecânica

**UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS**  
**FACULDADE DE ENGENHARIA MECÂNICA**  
**COMISSÃO DE PÓS- GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA**  
**DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA DE MATERIAIS**

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO ACADÊMICO

**Simulação Numérica e Análise Experimental do**  
**Tratamento Superficial por Refusão a Laser de uma**  
**Liga Al-Fe**

Autor: Felipe Bertelli

Orientador: Prof. Dr. Amauri Garcia

Co-orientador: Dr. Noé Cheung

A Banca Examinadora composta pelos membros abaixo aprovou esta Dissertação:

  
\_\_\_\_\_  
Prof. Dr. Amauri Garcia, Presidente

Universidade Estadual de Campinas – Faculdade de Engenharia Mecânica - UNICAMP

  
\_\_\_\_\_  
Prof. Dr. Carlos de Moura Neto

Comando Geral de Tecnologia Aeroespacial - Instituto Tecnológico de Aeronáutica - CTA-ITA

  
\_\_\_\_\_  
Profa. Dra. Célia Marina de Alvarenga Freire

Universidade Estadual de Campinas – Faculdade de Engenharia Mecânica - UNICAMP

Campinas, 14 de outubro de 2009.

## **Dedicatória**

Este trabalho é dedicado principalmente aos meus pais, Daniel Bertelli e Alice Maria Bertelli, base de minha formação.

Às minhas irmãs, Cristiane Bertelli do Espírito Santo e Juliana Bertelli Dimbarre.

Às minhas sobrinhas Ana Luíza Dimbarre, Manuela Bertelli Dimbarre e Gabriela Bertelli Dimbarre.

Aos meus cunhados Rafael Mikowski Dimbarre e Marcos Luciano do Espírito Santo.

Aos meus queridos avôs Osmar Rebelatto e Luíza Monfron Rebelatto.

A todos vocês que me acompanharam em mais essa etapa de minha vida, muito obrigado!

## **Agradecimentos**

A contribuição de diversas pessoas e instituições foi imprescindível para que este trabalho fosse concluído. Portanto, registro aqui meus agradecimentos pela amizade, pelos ensinamentos, pelo apoio financeiro e pelo suporte administrativo a todos que colaboraram direta ou indiretamente para esta tese. Em particular presto minha homenagem:

Ao Prof. Dr. Amauri Garcia, pela confiança em mim depositada e por sua orientação, dedicação e incentivo dados durante todo meu mestrado. Agradeço ainda por sua amizade, exemplo de trabalho e pessoa na qual me inspirei em minha formação.

À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior, pela bolsa que permitiu o desenvolvimento deste trabalho.

À Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo, pelo financiamento de equipamentos utilizados para o desenvolvimento desse trabalho.

À Faculdade de Engenharia Mecânica da Universidade Estadual de Campinas, pelo programa de pós-graduação.

Ao amigo e co-orientador Dr. Noé Cheung, pelo companheirismo e pelos conselhos e conhecimentos transmitidos, que me ajudaram a ter uma melhor visão em todos os trabalhos desenvolvidos durante todo mestrado.

À amiga Elisangela dos Santos Meza, pelos dias incansáveis ao meu lado durante os trabalhos ao longo desta jornada nas intensas discussões e sugestões nos trabalhos desenvolvidos em conjunto.

À Profa. Dra. Maria Clara Filippini Ierardi, pelas sugestões no trabalho de pesquisa e pela amizade que data desde minha entrada na pós-graduação.

À professora. Dra. Cecília Zavaglia e a amiga Lonetá Lima, pela disponibilidade e ajuda no Laboratório de Biomateriais, indispensável na obtenção de alguns dos resultados deste trabalho. Agradeço o auxílio e atenção durante a execução em parte dos trabalhos.

Ao professor Dr. Moisés Meza Pariona, que me acompanha desde a graduação em trabalhos científicos.

Ao Instituto de Estudos Avançados do DCTA, localizado em São José dos Campos-SP Agradecimentos estendidos ao Prof. Dr. Rudimar Riva, Prof. Dr. Milton Sérgio Fernandes de Lima e à doutoranda Aline Capella de Oliveira pela presteza e solicitude imprescindíveis no processamento a laser das amostras.

Aos membros do Grupo de Pesquisa em Solidificação pelas possibilidades científicas geradas e pelo companheirismo da equipe.

Aos técnicos do Laboratório do Departamento de Engenharia de Materiais, pelas orientações na preparação das amostras e disponibilidades.

Por último, mas não menos importante, à sociedade brasileira que converte parte de seu trabalho nos impostos que dão suporte aos programas de pós-graduação e às bolsas de estudos, contribuindo para a formação de recursos humanos de alto nível imprescindíveis para o desenvolvimento de nosso País.

*“O homem sensato adapta-se ao mundo;o insensato  
persiste em adaptar o mundo a ele. Portanto, todo progresso  
depende do homem insensato” – George Bernard Shaw  
[White, 2003]*



## Resumo

BERTELLI, Felipe, *Simulação Numérica e Análise Experimental do Tratamento Superficial por Refusão a Laser de uma Liga Al-Fe*. 2009. 79p.

Dissertação (Mestrado) - Faculdade de Engenharia Mecânica, Universidade Estadual de Campinas, Campinas.

Neste trabalho, o software ANSYS, baseado no Método dos Elementos Finitos, é adaptado para a simulação tridimensional do fluxo de calor no processo de refusão superficial a laser. A análise numérica é validada com resultados simulados por outros modelos existentes na literatura para casos de refusão superficial a laser de alumínio puro e com resultados simulados e experimentais de uma liga Al-5%Ni. Ensaios experimentais próprios foram realizados em amostras de uma liga Al-1,5%Fe, utilizando um laser à fibra dopado com Itérbio, com potência máxima disponível de 2 kW. Para efeito comparativo, as trilhas foram feitas variando-se valores de velocidade de deslocamento do feixe laser para um mesmo valor de potência. Observou-se que a microestrutura tanto do substrato quanto da zona tratada apresentou morfologia tipicamente celular. As microestruturas resultantes dos tratamentos a laser foram analisadas através de microscopia eletrônica de varredura, sendo observados espaçamentos celulares extremamente refinados na área tratada a laser refletindo no aumento significativo da dureza confirmado por ensaios de microdureza Vickers. Uma técnica de dissolução parcial das amostras tratadas a laser foi aplicada para evidenciar os intermetálicos no substrato e na região tratada a laser, mostrando a modificação da redistribuição dos intermetálicos no interior da poça fundida e dando indicações de aumento da resistência à corrosão na região tratada.

## Palavras Chaves

Modelagem Matemática, Simulação Numérica, Tratamento Superficial a Laser, Refusão

## **Abstract**

BERTELLI, Felipe, *Numerical Simulation and Experimental Analysis of Laser Surface Remelting Treatment of an Al-Fe Alloy*. 2009. 79p.

Dissertation (Master Degree in Mechanical Engineering): Faculty of Mechanical Engineering, State University of Campinas, Campinas

In this work, the software ANSYS, based on the Finite Element Method, is adapted to simulate the three-dimensional heat flux during the laser remelting surface treatment. The numerical analysis is validated against theoretical results furnished by other models from the literature for laser surface remelting of aluminum and against theoretical and experimental results of Al-5wt%Ni alloy samples. Laser remelting experiments with Al-1,5%wtFe samples have been carried out by using a 2kW Yb fiber laser. For comparative effects, the laser tracks were performed with different laser beam velocities for a fixed value of power. It was observed that both the substrate and the treated region had a typical cellular morphology. The microstructures resulting from the laser treatment were analyzed by using electron scanning microscopy and very refined cell spacing has been observed, which can induce a significant hardness increase confirmed by Vickers microhardness tests. A partial dissolution technique has been performed to foreground the intermetallics at the substrate and at the laser treated zone, showing the intermetallics redistribution inside the molten pool and giving indications of increased corrosion resistance on the treated region.

## *Key Words*

Mathematical Modeling, Numerical Simulation, Laser Surface Treatment, Remelting,

## Lista de Figuras

1.1 Processo de refusão superficial à laser .....	2
2.1 Áreas de aplicação do laser .....	6
2.2 Emissão estimulada .....	7
2.3 Principais partes do laser .....	9
2.4 Comparação entre a fonte de luz convencional e laser.....	10
2.5 Comparação entre ondas de luz: a) incoerente e b) coerente .....	10
2.6 Absorção da luz num material .....	11
2.7 Coeficiente de absorção em função da frequência .....	12
2.8 Distribuição uniforme da energia laser: a) na superfície e b) sua forma espacial .....	13
2.9 Distribuição gaussiana da energia laser: a) na superfície e b) sua forma espacial .....	14
2.10 Relação entre os fluxos de calor uniforme e gaussiano quando a potência absorvida na superfície da região circular é idêntica .....	15
2.11 Comprimentos de onda operacionais dos principais tipos de laser .....	18
2.12 Reflexão, absorção e transmissão de um feixe laser que incide num substrato .....	20
2.13 Seção transversal do substrato indicando a poça líquida.....	21
2.14 Refletividade de alguns materiais em função do comprimento de onda .....	25
2.15 Influência do aumento de temperatura sobre o comportamento da absorção da radiação do laser de comprimento de onda $\lambda = 1,06 \mu\text{m}$ .....	26
3.1 Fluxograma da etapa de pré-processamento no programa ANSYS .....	31
3.2 Fluxograma da etapa de pós-processamento no programa ANSYS.....	31
3.3 Representação da malha tridimensional de elementos finitos gerada pelo software	

ANSYS .....	32
3.4 Evolução da temperatura em função do tempo para um ponto no centro da poça localizado na superfície tratada com diferentes malhas .....	33
3.5 Interface do programa DEVCC++ compilador de linguagem C++ .....	36
3.6 Aplicação de fluxo de calor sobre os elementos na superfície do modelo .....	37
3.7 Comparação entre o modelo bidimensional, segundo Hsu, e a simulação via ANSYS com radiação laser de distribuição uniforme .....	39
3.8 Comparação entre o modelo bidimensional, segundo Hsu, e a simulação via ANSYS com radiação laser de distribuição gaussiana .....	39
3.9 Comparação das delimitações teóricas de poça fundida previstas pelo ANSYS e por um modelo bidimensional em relação à delimitação experimental.....	41
4.1 Vista geral da máquina laser .....	44
4.2 Processo de tratamento superficial da liga Al-Fe .....	44
4.3 Diagrama de equilíbrio parcial Al-Fe .....	45
4.4 Aparato experimental: a) registrador e dispositivo de solidificação e b) lingoteira dentro do dispositivo .....	47
4.5 Corte longitudinal do lingote para obtenção das amostras para ensaios experimentais .....	48
4.6 Representação esquemática das trilhas processadas a laser em uma amostra de Al-1,5%Fe para potência de 600 W defocada e velocidades de 20 a 100 mm/s. ....	49
4.7 Microscópio Eletrônico de Varredura (MEV) Jeol .....	50
4.8 Dispositivo utilizado para dissolução de alumínio em 1-butanol - esquema e foto ....	51
5.1 Comparação entre isotermas <i>líquidus</i> simuladas para P = 600 W com laser operando defocado à velocidade de 40 e 80 mm/s .....	54
5.2 Isotermas espaciais para velocidade de 40 mm/s e potência de 600 W no instante em que o laser pára de agir sobre a amostra. Os valores apresentados na barra colorida são valores de isotermas em K.....	55
5.3 Isotermas espaciais para velocidade de 80 mm/s e potência de 600 W no instante em que o laser pára de agir sobre a amostra. Os valores apresentados na barra colorida são valores de isotermas em K.....	55
5.4 Gráfico de convergência para simulação via ANSYS .....	56

5.5 Sobreposição entre a zona fundida simulada e a micrografia obtida por MEV para o laser operando a velocidade de 40 mm/s. ....	57
5.6 Sobreposição entre a zona fundida simulada e a micrografia obtida por MEV para o laser operando a velocidade de 80 mm/s. ....	57
5.7 Zona fundida para velocidade de 20 mm/s .....	58
5.8 Zona fundida para velocidade de 40 mm/s .....	59
5.9 Zona fundida para velocidade de 60 mm/s .....	59
5.10 Zona fundida para velocidade de 80 mm/s .....	60
5.11 Zona fundida para velocidade de 100 mm/s .....	60
5.12 Correlação entre profundidade/velocidade para a liga Al-1,5%Fe com potência do laser P = 600W .....	61
5.13 Correlação largura/posição para a liga Al-1,5%Fe com potência do laser P = 600W e com velocidades de 40, 60 e 80 mm/s .....	62
5.14 Curvas profundidade/posição para a liga Al-1,5%Fe com potência do laser P = 600W e com velocidades de 40, 60 e 80 mm/s .....	63
5.15 Ampliação da zona tratada e não tratada .....	64
5.16 Corte transversal de amostras após o processo de dissolução parcial em butanol ....	66
5.17 Vista superior da amostra após o processo de dissolução parcial em butanol .....	66
5.18 Ampliação da região de interface substrato/camada tratada a laser após o processo de dissolução parcial.....	67
5.19 Visualização dos intermetálicos na camada refundida da laser.....	68
5.20 Visualização dos intermetálicos no substrato .....	68

## Lista de Tabelas

1 Tempo necessário para se alcançar a temperatura de ebulição .....	23
2 Propriedades termofísicas utilizadas para uma liga Al-1,5%Fe .....	35
3 Propriedades termofísicas utilizadas para alumínio puro .....	38
4 Propriedades termofísicas utilizadas para a liga Al-5%Ni .....	40
5 Análise química dos materiais utilizados na preparação da liga Al-Fe, obtido em espectrômetro de fluorescência de raios X.....	45
6 Propriedades mecânicas para a zona tratada e não-tratada para a liga Al-1,5%Fe .....	65

## Nomenclatura

### Letras Latinas

$a$ = raio do feixe	[m]
$A$ = área	[m <sup>2</sup> ]
$A_b$ = absorção	[adimensional]
$c$ = calor específico	[J/kg.K]
$D$ = profundidade de penetração do calor	[m]
$D_S$ = difusividade do soluto no sólido	[m <sup>2</sup> /s]
$F$ = densidade de potência absorvida	[W/m <sup>2</sup> ]
$I$ = intensidade da luz transmitida	[W/m <sup>2</sup> ]
$I''$ = densidade de potência do feixe laser	[W/m <sup>2</sup> ]
$I_0$ = intensidade da luz incidente	[W/m <sup>2</sup> ]
$I_{\max}$ = intensidade máxima da potência	[W/m <sup>2</sup> ]
$k$ = condutividade térmica	[W/m.K]
$l$ = espessura do material	[m]
$L$ = calor latente de fusão	[J/kg]
$P$ = potência do laser	[W]
$q''$ = fluxo de calor	[W/m <sup>2</sup> ]
$R$ = refletividade	[adimensional]
$t$ = tempo	[s]
$t_e$ = tempo necessário para que a superfície atinja a temperatura de ebulição	[s]

$T$ = temperatura	[K]
$T_e$ = temperatura de ebulição	[K]
$T_0$ = temperatura ambiente	[K]
$V$ = volume	[m <sup>3</sup> ]
$V_f$ = velocidade do feixe	[m/s]
$x$ = coordenada cartesiana	[m]
$z$ = coordenada cartesiana	[m]
$y$ = coordenada cartesiana	[m]

### **Letras Gregas**

$\alpha$ = difusividade térmica	[m <sup>2</sup> /s]
$\Delta$ = variação	
$\lambda$ = comprimento de onda	[m]
$\rho$ = densidade	[kg/m <sup>3</sup> ]
$\nu$ = frequência	[s <sup>-1</sup> ]

### **Abreviações**

CTA = Comando Geral de Tecnologia Aeroespacial

IEAv= Instituto de Estudos Avançados

ITA = Instituto Tecnológico de Aeronáutica

MEF= Método dos Elementos Finitos

MEV= Microscopia Eletrônica de Varredura



## Sumário

1. Introdução .....	1
1.1. Considerações gerais .....	1
1.2. Objetivos do trabalho .....	4
2. Revisão Laser .....	6
2.1. Introdução.....	6
2.2. As principais partes do laser.....	8
2.3. Propriedades da luz laser .....	9
2.4. O fenômeno da ampliação e absorção de luz .....	11
2.5. Distribuição da energia laser .....	13
2.6. Os tipos de laser .....	16
2.7. Interação da radiação laser com a matéria.....	19
2.8. O efeito do calor no substrato.....	20
2.9. Absorção da radiação laser.....	24
3. Metodologia Numérica .....	27
3.1. Introdução.....	27
3.2. Simulação numérica computacional.....	28
3.3. Condições de contorno .....	34
3.4. Implementação de rotina no software ANSYS para simulação do processo de refusão superficial a laser .....	35
3.5. Aferição do modelo computacional .....	37
4. Metodologia Experimental .....	42
4.1. Introdução.....	42
4.2. Descrição da máquina laser utilizada nos ensaios.....	43
4.3. Preparação de amostras para ensaio experimental .....	44
4.4. Ensaios de tratamento superficial em liga Al-1,5%Fe .....	48
4.5. Ensaios para visualização de intermetálicos .....	50
5. Resultados Numéricos, Experimentais e Discussões .....	53
5.1. Considerações iniciais .....	53
5.2. Resultados numéricos.....	53

5.3. Resultados experimentais .....	58
5.3.1. Visualização dos intermetálicos .....	65
6. Conclusões e Sugestões para Trabalhos Futuros .....	69
6.1. Conclusões.....	69
6.2. Sugestões para trabalhos futuros .....	70
7. Bibliografia.....	72

# Capítulo 1

## Introdução

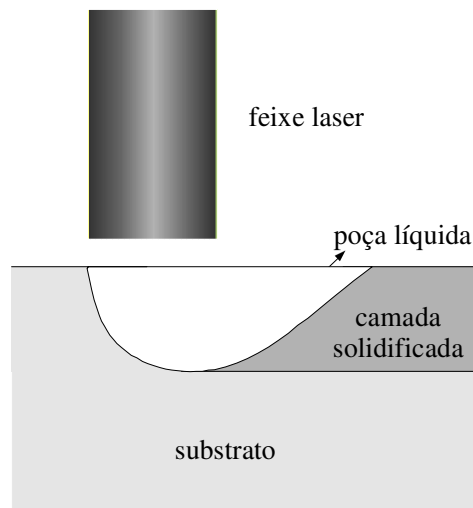
### 1.1 – Considerações gerais

Os tratamentos superficiais dos materiais, sobretudo dos metais e suas ligas, têm desempenhado um papel de grande importância na melhoria das suas propriedades superficiais. Vários processos existentes visam a transformação microestrutural ou química de uma camada da superfície da ordem de milímetros ou micrometros, dependendo do tipo de processo empregado. Em particular, os tratamentos superficiais a laser têm um enorme potencial de aplicação devido a uma série de vantagens não proporcionadas pelos métodos convencionais. Os tratamentos superficiais a laser constituem um meio eficiente de modificação localizada das propriedades mecânicas ou químicas, sem haver a necessidade de reprocessamento do material como um todo, ou seja, permitindo manter as características geométricas originais da amostra ou peça submetida ao tratamento. A limpeza, a velocidade e a automação inerentes ao processamento a laser são outros pontos fortes que tornam a aplicação do laser extremamente competitiva no ambiente industrial

Os tratamentos superficiais a laser podem ser divididos em dois grupos: os que envolvem a fusão e a subsequente resolidificação, e aqueles onde não ocorre a fusão do substrato. Os que envolvem a fusão são: deposição a laser (*“laser cladding”*), formação de ligas de superfície

(“*laser alloying*”) e a modificação microestrutural por refusão a laser (“*laser remelting*”) [Frenk, 1991].

Na modificação microestrutural por refusão a laser (*laser remelting*) não é adicionado nenhum elemento químico sobre a superfície a ser tratada, que é submetida somente à radiação laser até a fusão completa da profundidade de camada desejada. A resolidificação que se segue, em função da existência de um volumoso substrato frio, dá-se sob taxas de resfriamento elevadíssimas ( $10^5 - 10^8$  °C/s) [Basu, 1992], conduzindo a microestruturas extremamente refinadas. A Figura 1.1 traz a representação esquemática da incidência do feixe e a correspondente formação da poça de material líquido [Steen, 1996].



**Figura 1.1-** Processo de refusão superficial a laser [adaptado de Steen, 1996].

A resolidificação que ocorre após a fusão a laser pode atingir taxas de resfriamento de até  $10^8$  °C/s, que comparada com as taxas da ordem de 1 a  $10^{-1}$  °C/s, que ocorrem em processos convencionais de lingotamento ou fundição, deixam evidente que os mecanismos de solidificação nos dois casos podem ser bastante diferentes. A literatura tem apresentado diversos trabalhos que mostram que, sob elevadas taxas de resfriamento, propriedades como resistência mecânica, plasticidade, fadiga, corrosão sob tensão, dentre outras, são bastante modificadas [Munitz, 1985, Frenk, 1991; Gremaud, 1990; Noordhuis, 1993; Pelletier, 1991]. Evidentemente, que estas modificações têm sua principal razão em fenômenos decorrentes tais como: refino da

microestrutura, formação de fases fora do equilíbrio, crescimento de fases cooperativas como os eutéticos fora da composição nominal, extensão da faixa de solubilidades no sólido, redistribuição do produto segregado, recolocação de precipitados em solução, volatilização de inclusões, etc.

O arranjo estrutural obtido na solidificação depende de vários parâmetros, mas principalmente da velocidade de solidificação e dos gradientes térmicos envolvidos, e da composição química do material [Monson, 1990]. Do ponto de vista metalúrgico, várias microestruturas podem ser obtidas ao se variar a potência do feixe laser incidente e o tempo local de interação, traduzido este último pela velocidade de deslocamento do feixe [Kou, 1981], já que a profundidade da poça de material líquido e o campo térmico são consequentemente afetados.

Atualmente, a busca pelo controle e otimização dos tratamentos superficiais a laser tem se intensificado em função da necessidade de uma prática industrial mais eficiente. A modelagem matemática do processo é uma ferramenta útil que está sendo cada vez mais utilizada no ambiente industrial com o objetivo de determinar condições ótimas de operação, garantindo a qualidade final do produto. Os avanços que a informatização têm conquistado permitem a implementação de técnicas numéricas de rotinas sequenciais escritas em linguagem de máquina. Isto proporciona simulações de diferentes condições operacionais, o que torna o modelo matemático uma poderosa ferramenta para análise do sistema fonte de calor-matéria e para relacionar variáveis de processo com a abrangência do tratamento pretendido, objetivando a programação microestrutural e, consequentemente, das resistências mecânica, ao desgaste e à corrosão desejadas.

Os tratamentos superficiais que envolvem o fenômeno da solidificação do substrato podem ser divididos em quatro estágios: aquecimento do substrato, fusão (formação da poça líquida), solidificação da poça líquida e resfriamento do substrato. Cada estágio corresponde a uma formulação matemática peculiar, uma vez são quatro fenômenos distintos, ou seja, a modelagem completa do processo exige quatro modelos matemáticos integrados num único, em que o perfil térmico fornecido por cada estágio é a condição inicial do estágio posterior.

As ligas Al-Fe apresentam interesse industrial considerável, em parte porque o Fe é elemento invariavelmente presente tanto em Al comercialmente puro quanto em ligas de Al, em proporções minimamente na faixa de 0,2 a 1,0 % Fe em massa. Em ligas de alguns sistemas metálicos, tais como o Al-Ni, o ferro é adicionado para melhorar a resistência à corrosão, enquanto que em ligas de alumínio usadas na fabricação de cabos condutores de eletricidade, é adicionado para aumentar a resistência mecânica sem perda significativa da condutividade elétrica [Mondolfo, 1976]. Em condições de equilíbrio na solidificação, as ligas Al-Fe são constituídas por uma fase  $\alpha$  primária, rica em Al, e um eutético formado por  $\alpha$  e partículas de intermetálico  $\text{Al}_3\text{Fe}$ . Entretanto, em condições de solidificação fora do equilíbrio, dependendo da espessura da peça, ocorrerão diferenças significativas entre as taxas de resfriamento da superfície ao centro da peça, o que pode levar à formação de fases metaestáveis como  $\text{Al}_m\text{Fe}$  e  $\text{Al}_6\text{Fe}$  além da fase estável  $\text{Al}_3\text{Fe}$  [Allen, 1998]. Em trabalhos recente, Goulart *et al.* [Goulart, 2009 A] mostram que, na faixa de composições hipoeutéticas (até cerca de 1,8% em massa de Fe), as ligas Al-Fe apresentam uma microestrutura com a fase rica em Al de morfologia essencialmente celular, sem qualquer indício de transição celular/ dendrítica. Em outros trabalhos, Goulart *et al.* mostram que, para condições transitórias de solidificação em moldes refrigerados, o intermetálico predominante é o  $\text{Al}_6\text{Fe}$ , e que a morfologia, distribuição e tamanho dessa fase dependem fortemente da taxa de resfriamento na solidificação e têm influência determinante em propriedades mecânicas como limites de escoamento e de resistência à tração e alongamento específico [Goulart 2009 B, Goulart 2009 C].

## 1.2 – Objetivos do trabalho

Tendo em vista a importância da aplicação de ferramentas numéricas para a caracterização das dimensões da região tratada no processo de refusão superficial a laser e as interessantes características de microestrutura e propriedades de ligas hipoeutéticas Al-Fe, o presente trabalho está dimensionado com o objetivo de realizar uma análise numérica do processo de refusão a laser confrontada com resultados experimentais de uma liga Al-Fe. Para tanto, foi estabelecida a metodologia com metas sequenciais de trabalho:

1- Levantamento crítico e atualizado da literatura, no que diz respeito a tratamentos superficiais com laser e técnicas desenvolvidas para esses tratamentos;

2- Realização de um experimento preliminar de solidificação unidirecional com uma liga Al-1,5% Fe;

3- Retirada de amostras do lingote solidificado unidirecionalmente e realização de tratamentos de refusão a laser sob diferentes condições de potência e velocidade de deslocamento do feixe laser;

4- Caracterização microestrutural das amostras solidificadas e das tratadas por refusão a laser, caracterização da dureza das regiões tratada e não-tratada e estimativa de suas propriedades de tração;

5- Estabelecimento das condições de contorno visando a aplicação do software ANSYS e do modelo computacional de transferência de calor e solidificação disponível no grupo às condições de análise da refusão a laser;

6- Desenvolvimento de simulações da interação do feixe de laser com o substrato até a fusão do volume de controle a ser tratado, em função da velocidade de deslocamento e da potência do feixe laser e validações das simulações desenvolvidas por meio de comparações com os resultados experimentais obtidos;

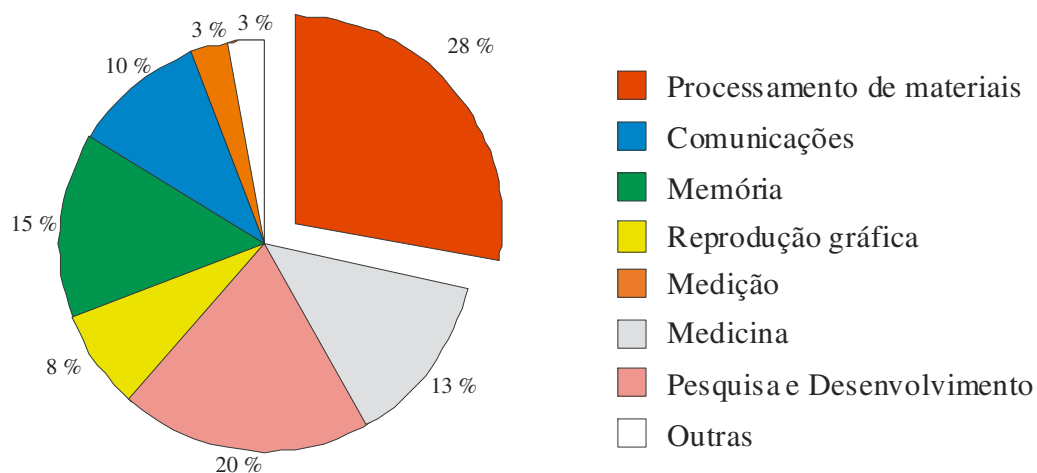
7- Estabelecimento de correlações entre dimensões das regiões tratadas e condições de operação do equipamento laser.

## Capítulo 2

### Revisão Laser

#### 2.1 - Introdução

O laser é um amplificador óptico, análogo a um amplificador eletrônico. O amplificador eletrônico produz um grande sinal de saída a partir de um pequeno sinal de entrada. No caso do laser, um pequeno sinal de luz é amplificado produzindo um feixe de luz com características peculiares que tornam o laser uma ferramenta de aplicação estratégica em diversas áreas, como processamento de materiais, medicina, comunicação e metrologia. A Figura 2.1 mostra que a área de processamento de materiais ocupa uma posição de destaque, que tem uma estimativa de crescimento de 10-20% ao ano [Steen, 1996].



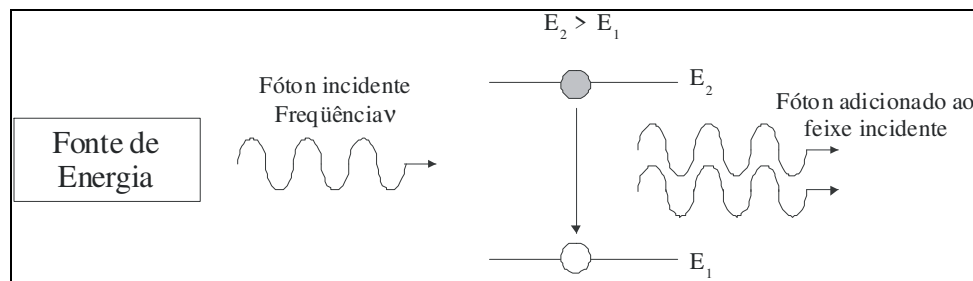
**Figura 2.1** - Áreas de aplicação do laser [Steen, 1996]



Atualmente, existem no mercado tipos de laser específicos para cada aplicação. É importante conhecer os principais dispositivos que compõem o sistema laser e sua interação entre si, para a compreensão de como o feixe de luz laser é formado e suas principais características para a correta especificação do tipo de laser a ser utilizado.

Um laser básico consiste em dois espelhos que são colocados paralelamente para formar um oscilador óptico, que é uma câmara (cavidade de Pérot-Fabry), na qual a luz oscila em movimentos de ida e volta entre um espelho e outro, de forma ininterrupta se nenhum mecanismo, por exemplo absorção, provocar alguma interferência. Entre os dois espelhos existe um meio ativo que é capaz de amplificar as oscilações de luz por um mecanismo de emissão estimulada, que gerou a denominação “Laser”: *Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation*, ou luz amplificada por emissão estimulada de radiação [Maillet, 1987].

O processo de emissão estimulada é ilustrado na Figura 2.2. Uma fonte de energia externa com um fóton de frequência apropriada (uma das frequências de ressonância do átomo) estimula um átomo no estado energético excitado a emitir um fóton de mesma fase, frequência e direção do sinal original, provocando um efeito aditivo de amplificação. No interior do meio ativo, esse fóton emitido estimula processos semelhantes em outros átomos, como uma reação em cadeia, originando o feixe de luz laser, que é gerado desde que haja mais átomos num mesmo nível mais energético do que o nível inferior, que não necessariamente precisa ser o fundamental. Esta condição é denominada de Inversão de População. Para que os átomos estejam num estado de energia excitado, é preciso um sistema para bombear o meio ativo que pode ser, por exemplo, um pulso de luz irradiado por um flash [Ready, 1978].



**Figura 2.2** - Emissão estimulada[adaptado de Ready, 1978].

## 2.2 - As principais partes do laser [Laser Institute of America, 1985]

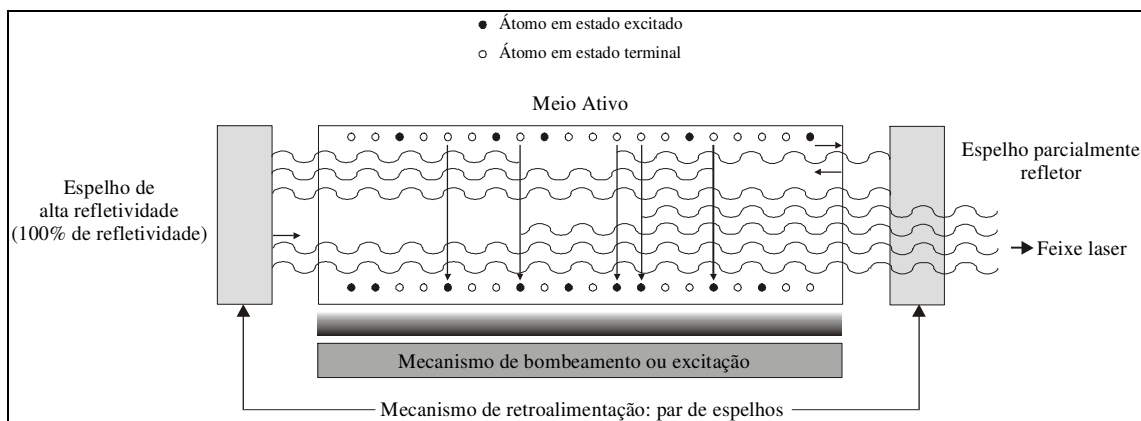
Apesar de existir em vários tipos de laser, todos apresentam três partes principais: meio ativo, mecanismo de bombeamento energético ou de excitação e a cavidade de Pérot-Fabry.

- Meio Ativo: é um conjunto de átomos que são excitados, gerando a inversão de população e produzindo a emissão estimulada. O primeiro laser, inventado por Theodore Maiman em 1960, utiliza um cristal de rubi como meio ativo. Álcool etílico ou metílico, com certos corantes dissolvidos, agem como meios ativos líquidos, enquanto gases ou misturas de gases como de hélio e neônio, por exemplo, são meios ativos gasosos. Existem ainda meios ativos compostos de semicondutores, como é o caso da junção do semicondutor p-n, formado de arseneto de gálio ou fosfeto de gálio.

- Mecanismo de bombeamento energético: é a fonte de energia necessária para excitar os átomos do meio ativo do estado fundamental energético para o de maior, para que a inversão de população ocorra. Por exemplo, num laser de rubi, os átomos de cromo dentro do cristal são excitados por uma descarga de luz vinda de uma lâmpada de *flash*. No caso de um laser a gás, os átomos ou moléculas podem ser excitados por uma corrente alternada ou contínua. Os lasers de Nd:YAG (*Yttrium Aluminum Garne*) admitem uma potência instantânea de bombeamento mais fraca que a do flash, e podem ser bombeados por tubos de emissão contínua (arco de xenônio, por exemplo).

- Cavidade de Pérot-Fabry: possui um mecanismo de retroalimentação formado por dois espelhos dispostos nas extremidades do meio ativo que têm a função de refletir a luz produzida para o meio ativo, amplificando o sinal original pela adição de fótons de mesma frequência e fase. Um dos espelhos é especial transmitindo parcialmente a luz incidida sobre ele, proporcionando a saída do feixe, enquanto a maior quantidade é refletida para o meio ativo.

A Figura 2.3 mostra esquematicamente as quatro principais partes do laser.



**Figura 2.3** - Principais partes do laser [*Laser Institute of America, 1985*].

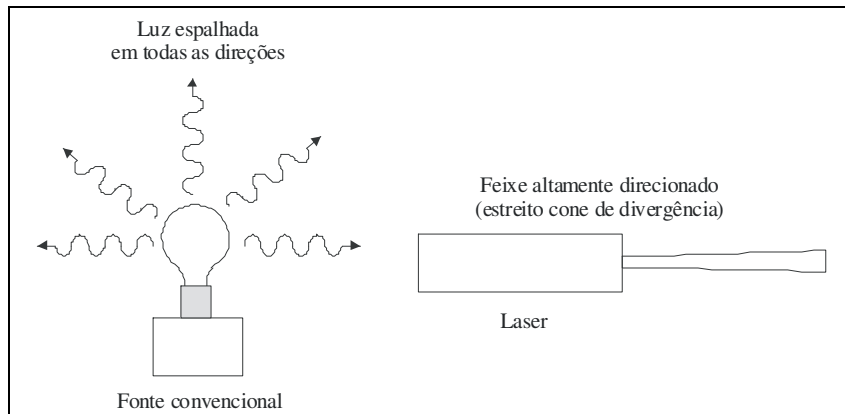
### 2.3 - Propriedades da luz laser [*O'Shea, 1976*]

A luz emitida por lasers apresenta propriedades peculiares que diferem da produzida por fontes comuns de luz, por exemplo, as lâmpadas incandescentes ou fluorescentes. Observando-se a luz emitida por um laser de gás hélio-neônio (He-Ne), notam-se diversas características desse feixe de luz:

- Monocromaticidade: o feixe é de uma cor vermelha brilhante, não apresentando existência de outras cores no feixe. Essa propriedade pode ser verificada colocando-se um prisma na frente do feixe de luz. A luz branca, como a luz solar ou de uma lâmpada, é dispersa em várias cores (vermelha, laranja, amarela, verde, azul e violeta) pelo prisma. Quando o feixe emitido pelo laser He-Ne é transmitido pelo prisma, somente emerge a cor vermelha.

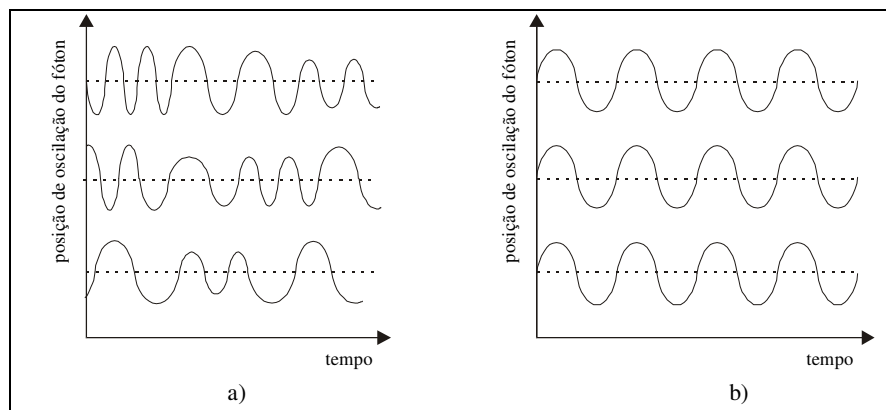
- Direcionalidade: a energia contida no feixe laser não se espalha em todas as direções, por exemplo, a de uma lâmpada incandescente, mas fica concentrada num estreito cone de divergência, conforme mostra a Figura 2.4.

- Brilho: o brilho do laser descreve a quantidade de potência irradiada pelo laser no estreito cone de divergência. Se dois lasers têm a mesma direcionalidade, o de maior potência terá maior brilho. Inversamente, se dois lasers têm a mesma potência, o que tiver menor cone de divergência possui maior brilho.



**Figura 2.4** - Comparação entre a fonte de luz convencional e laser [adaptado de O'Shea, 1976]

- Coerência: para se compreender esta última propriedade, é necessário entender a natureza ondulatória da luz. As diferentes cores de luz estão associadas com diferentes frequências de ondas. A frequência de uma onda é o número completo de oscilações percorrendo um ponto do espaço por unidade de tempo. As ondas geradas pela lâmpada incandescente (Figura 2.5a) são incoerentes, enquanto as do laser (Figura 2.5b) são coerentes. Nas ondas incoerentes há uma mistura de várias frequências de luz e as várias ondas não estão em fase uma com a outra, enquanto nas coerentes há somente uma frequência e todas as ondas permanecem em fase entre si. A relação da coerência com as propriedades anteriores é: ondas de luz coerente são monocromáticas; como estão em fase umas com as outras são altamente direcionais; como a energia é concentrada num cone estreito de luz, o brilho é alto.



**Figura 2.5** - Comparação entre ondas de luz: a) incoerente e b) coerente [adaptado de O'Shea, 1976].

## 2.4 - O fenômeno da amplificação e da absorção de luz [*Laser Institute of America, 1985*]

A Figura 2.6 ilustra um feixe de luz branca sendo transmitido através de uma placa de material óptico. Um medidor é utilizado para avaliar a intensidade de luz depois que o feixe passa pelo material. Desconsiderando-se as perdas por reflexão na superfície da placa e por dispersão, constata-se que, em espessuras crescentes de placa, a intensidade de luz é atenuada exponencialmente segundo a lei conhecida como a Lei de Beer-Lambert:

$$I = I_0 \cdot e^{-q \cdot l}, \quad (2.1)$$

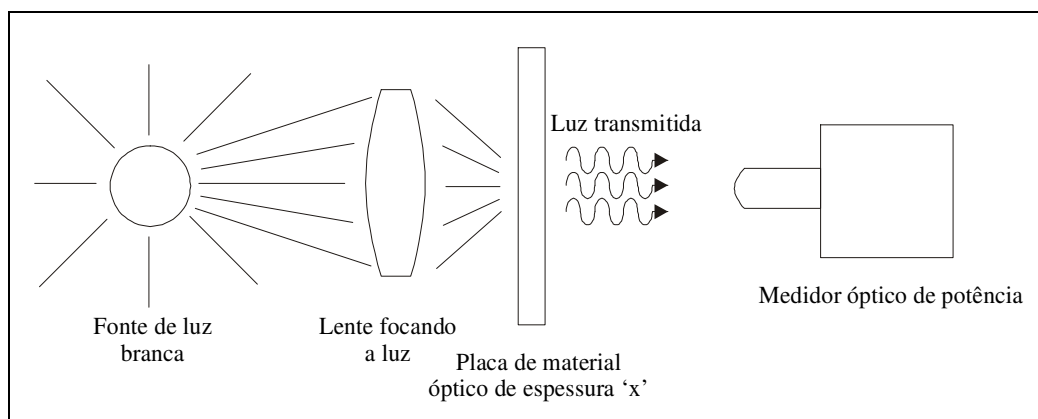
onde:

$I$  = intensidade da luz transmitida [ $\text{W/m}^2$ ];

$I_0$  = intensidade da luz incidente [ $\text{W/m}^2$ ];

$Q$  = coeficiente de absorção [ $\text{m}^{-1}$ ];

$l$  = espessura do material [m].



**Figura 2.6** - Absorção da luz num material [*Laser Institute of America, 1985*].

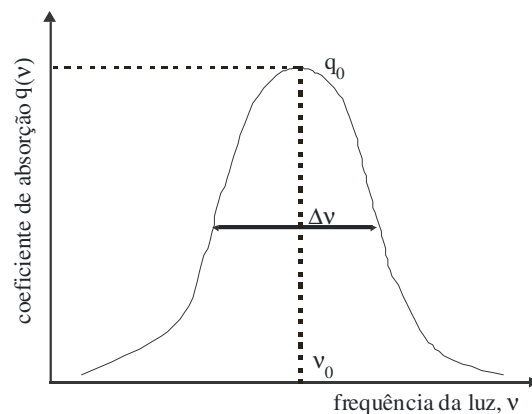
O coeficiente de absorção é uma função da frequência da luz incidente sendo interpretado como o inverso da distância que o feixe de luz deve percorrer em um dado meio para que a intensidade decresça para '1/e' da intensidade da luz incidente.

A Figura 2.8 mostra o gráfico em forma de sino do coeficiente de absorção como função da frequência ( $\nu$ ). Essa curva apresenta uma largura de banda  $\Delta\nu$  centrada na frequência  $\nu_0$ , conhecida como centro da linha de absorção. O coeficiente de absorção  $q(\nu)$  é diretamente proporcional ao número de átomos por unidade de volume  $N_1$  capazes de absorver fótons na faixa de frequência  $(\nu+d\nu)$  menos o número  $N_2$  de átomos por unidade de volume capazes de emitir fótons também na faixa  $(\nu+d\nu)$ :

$$q(\nu) = F(\nu, \Delta\nu) \cdot (N_1 - N_2) \quad (2.2)$$

onde  $F(\nu, \Delta\nu)$  é um fator de proporcionalidade dependente da frequência da luz  $\nu$  e da espessura de banda  $\Delta\nu$ . Se  $N_1 < N_2$ , então o sinal do coeficiente de absorção muda de positivo para negativo (absorção negativa) e, portanto, a intensidade de luz  $I$  de um feixe irá aumentar exponencialmente quando passa pelo meio ativo. O efeito obtido é o de amplificação ao invés de atenuação:

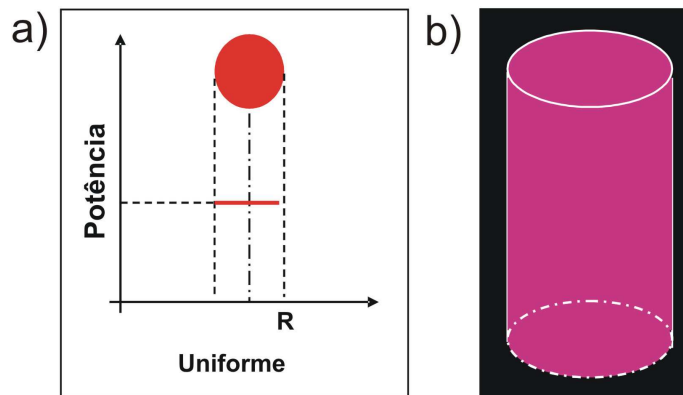
$$I = I_0 \cdot e^{+q \cdot l} \quad (2.3)$$



**Figura 2.7** - Coeficiente de absorção em função da frequência [*Laser Institute of America, 1985*].

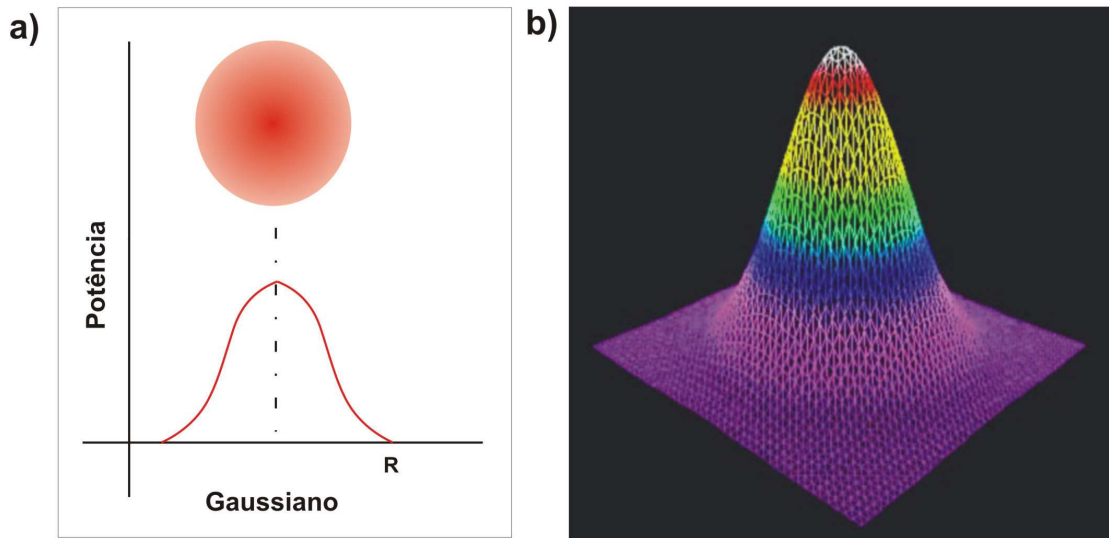
## 2.5 - Distribuição da energia laser [Hsu, 1980]

Um equipamento laser pode operar de vários modos diferentes no que diz respeito à distribuição de energia sobre a superfície da amostra. A forma mais simples é a distribuição uniforme, mostrada na Figura 2.8. Neste modo, o laser imprime uma região circular (Figura 2.8 a) sobre a superfície do material onde, em qualquer ponto dentro dessa região circular, a densidade de potência possui um mesmo valor. No espaço, o feixe laser pode ser representado por um cilindro em que a distribuição de energia é a mesma em todo o volume, como indicado na Figura 2.8 b.



**Figura 2.8** - Distribuição uniforme da energia do laser: a) na superfície e b).sua forma espacial.

Porém, alguns equipamentos laser podem também assumir a distribuição de energia segundo a forma de uma gaussiana, como indicado na Figura 2.9. A impressão do laser sobre a superfície da amostra é uma região circular; porém, a partir do centro dessa região cada ponto mais externo apresenta uma densidade de potência cada vez menor, segundo mostra a Figura 2.9.



**Figura 2.9** - Distribuição gaussiana da energia do laser: a) na superfície e b).sua forma espacial.

A correlação entre as duas formas de distribuição de energia do laser pode ser vista na Figura 2.10. O fluxo de calor absorvido pelo material sujeito às duas formas de distribuição de energia para um mesmo raio do feixe laser é idêntico, podendo ser adotada a seguinte equação:

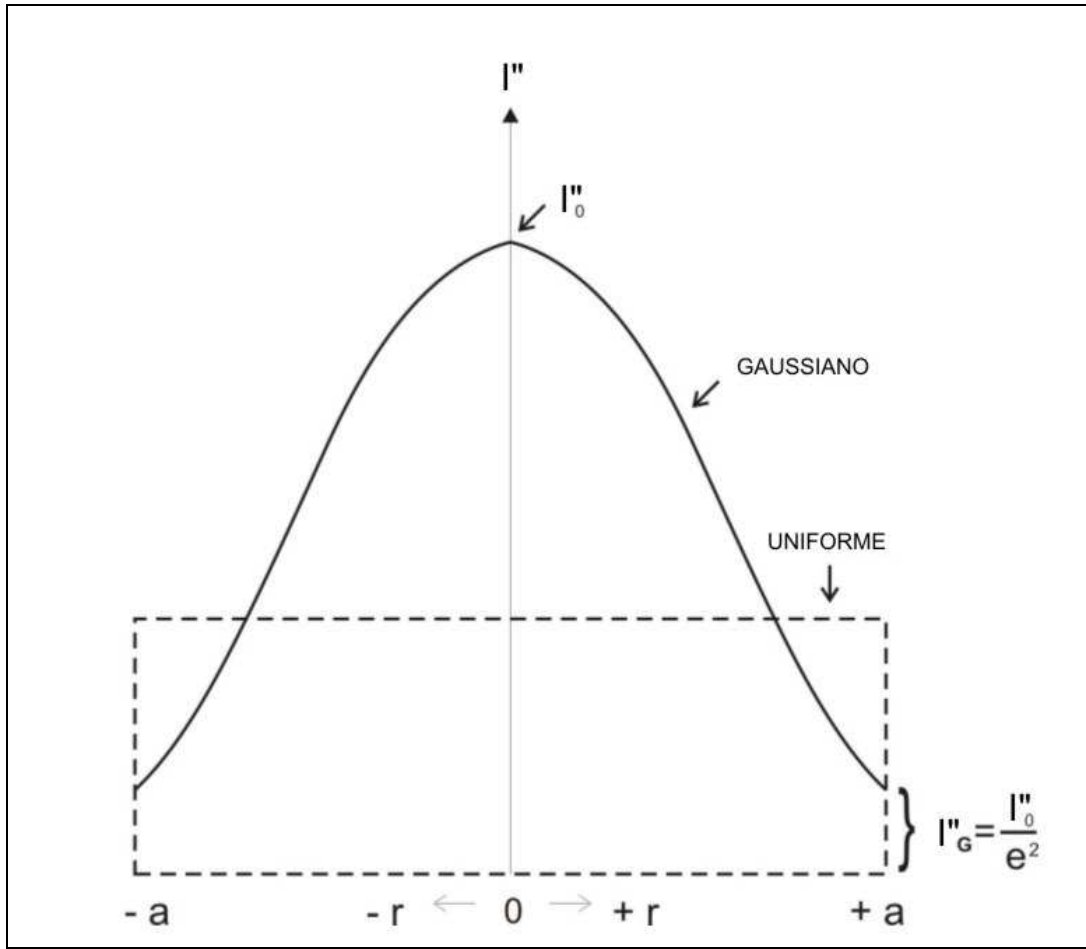
$$I''_{\text{uniforme}} = \frac{I''_0}{2,313}, \quad (2.4)$$

onde:

$I''_{\text{uniforme}}$  é o fluxo de calor uniforme;

$I''_0$  é o fluxo de calor máximo no centro da região circular.





**Figura 2.10** - Relação entre os fluxos de calor uniforme e gaussiano quando a potência absorvida na superfície da região circular é idêntica [Hsu, 1980].

A distribuição de energia para o fluxo de calor gaussiano é dada pela equação:

$$I'' = I''_0 \cdot e^{-\frac{2r^2}{a^2}}, \quad (2.5)$$

onde:

$I''$  = densidade de potência ( $\text{W}/\text{m}^2$ );

$I''_0$  = densidade de potência máxima ( $\text{W}/\text{m}^2$ );

$r$  = raio do laser (m);

$a$  = valor máximo admitido para o raio da gaussiana quando  $I'' = I''_G$ .

## 2.6 - Os tipos de lasers [Maillet, 1987]

Atualmente, existem vários tipos de lasers que demonstraram sua viabilidade em laboratório, funcionando em vários meios ativos e comprimentos de ondas. Os principais lasers são agrupados em quatro famílias de acordo com o tipo de meio ativo empregado:

- Lasers de isolantes dopados;
- Lasers de corantes;
- Lasers de semicondutores e
- Lasers a gás;

Nos lasers de isolantes dopados, a radiação proveniente de uma lâmpada flash ou de arco excita opticamente a emissão de átomos introduzidos sob a forma de íons metálicos ( $\text{Cr}^{3+}$ , Vd, etc) e de terras raras ( $\text{Nd}^{3+}$ , Sm, etc) em uma matriz sólida isolante de cristal ou de vidro. Devido ao aparecimento de deslocamentos atômicos no cristal, a rede cristalina aceita uma pequena quantidade de átomos dopantes introduzidos, da ordem de  $10^{19}$  átomos/cm<sup>3</sup>, mas suficientes para fornecer potências elevadas. Os representantes mais expressivos deste grupo são o laser de rubi, de  $\text{Nd}^{3+}$ :YAG e o de vidro dopado com neodímio.

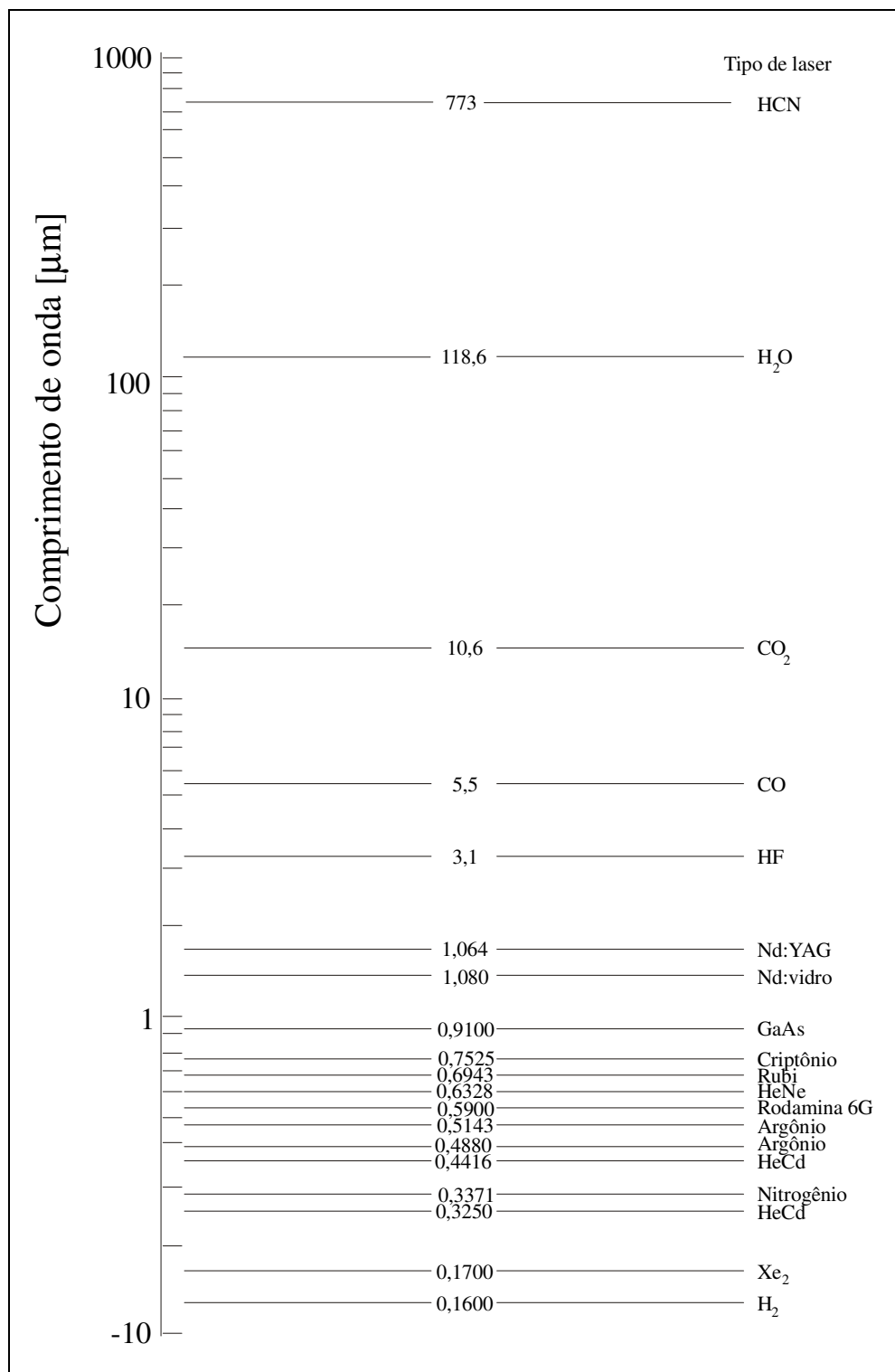
Os lasers de corantes operam com um meio ativo contendo um corante orgânico diluído em um solvente líquido, retirando energia da radiação emitida por outras fontes ópticas (lâmpadas flash ou lasers), dependendo essencialmente das características da fonte óptica de bombeamento. Corantes orgânicos complexos, como a rodamina e a fluoresceína dissódica dissolvidas em solução de álcool, são alguns exemplos deste tipo de lasers.

Nos lasers semicondutores, a radiação é emitida no interior de uma junção p-n em um diodo de tipo semiconductor. O condutor do tipo 'p' tem deficiência de elétrons livres em sua estrutura cristalina, provocando um excesso de vacâncias carregadas positivamente. Em contrapartida, um material semiconductor do tipo 'n' tem excesso de elétrons livres. Se duas placas, uma do tipo 'p' e outra do tipo 'n', são unidas, tem-se o que se denomina uma junção p-n. Através da aplicação de uma corrente elétrica nessa junção, obtêm-se pulsos de luz controlados pela variação da corrente

da fonte de energia. As faces do laser semicondutor são clivadas ao longo dos planos cristalinos para formar superfícies reflexivas paralelas que agem como espelhos do mecanismo de retroalimentação.

Os lasers a gás constituem a maior parte utilizada na indústria e funcionam com base em uma excitação, geralmente de natureza elétrica, mas ocasionalmente também de natureza química, de meios atômicos neutros, ionizados ou moleculares, apresentando dois modos de funcionamento: contínuo e pulsado. Tanto do ponto de vista industrial quanto científico, o laser de dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ) é o mais importante dos lasers a gás. O laser de  $\text{CO}_2$  pode fornecer potências contínuas que vão de fração de watt até dezenas de kilowatts para aplicações em processamento de materiais, em um grande número de comprimentos de ondas contido na faixa de 9,6 a 10,6  $\mu\text{m}$ , devido às transições entre níveis rotacionais-vibracionais da molécula de  $\text{CO}_2$ .

Como observado no caso do laser de  $\text{Nd}^{3+}:\text{YAG}$ , o comprimento de onda de cada tipo de laser depende das propriedades de seu meio ativo. A Figura 2.11 mostra os comprimentos de onda dos principais lasers, contidos entre a região ultravioleta e a de microondas.



**Figura 2.11** - Comprimentos de onda operacionais dos principais tipos de laser

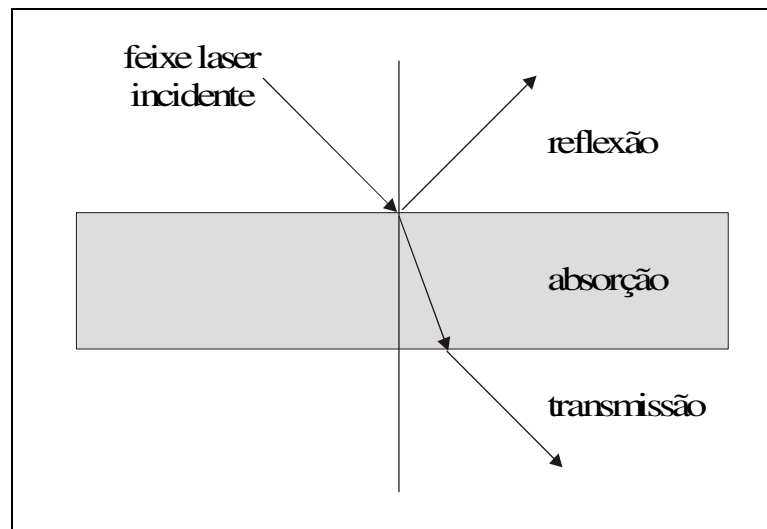
*[Laser Institute of America, 1985]*

## 2.7 – Interação da radiação laser com a matéria

A capacidade de um laser produzir pulsos intensos de radiação proporciona várias aplicações no tratamento de materiais envolvendo aquecimento, fusão e vaporização. A compreensão de como o feixe laser interage com a matéria é essencial para o ajuste adequado dos parâmetros de operação do laser, de acordo com cada tipo de processamento, para promover as propriedades finais do material desejadas.

A interação da luz com a matéria (reflexão, absorção e transmissão) tem sido assunto de estudos antes mesmo da invenção do laser. Inicialmente, o objetivo das pesquisas era caracterizar os materiais para finalidades ópticas na faixa do espectro visível. Posteriormente, percebeu-se que as propriedades ópticas eram a chave da estrutura eletrônica dos sólidos. Para ambos os propósitos, as constantes ópticas eram determinadas a partir de uma superfície limpa e lisa (baixa rugosidade) e à temperatura ambiente [Dausinger, 1993]. Essas constantes atualmente são de acesso fácil na literatura. Entretanto, no ambiente industrial, quanto mais as condições estão aquém das apontadas, por exemplo superfícies rugosas e oxidadas, menor é a densidade de informações disponível sobre essas constantes ópticas.

Quando a radiação laser atinge a superfície do material, parte da radiação atravessa a peça (transparente ou semi-transparente), outra parte é absorvida e uma terceira é refletida (Figura 2.12), sendo que a absorvida é responsável pelo aquecimento da superfície. Existem vários regimes a serem considerados, conforme a duração da radiação e a densidade de potência depositada: se o modo de operação do laser é pulsado, a transferência de calor por condução térmica na matéria é pequena para períodos pequenos de pulsos, mas ela se torna essencial em lasers de pulsos longos e em lasers de emissão contínua.



**Figura 2.12** - Reflexão, absorção e transmissão de um feixe laser que incide num substrato  
[Rubahn, 1999]

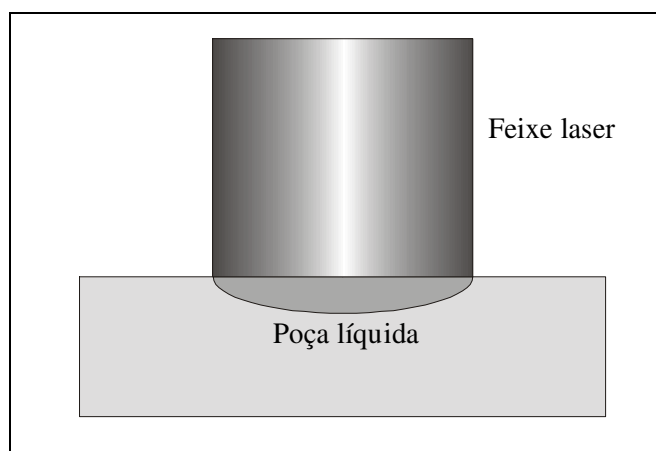
O efeito do aquecimento devido à absorção da energia emitida pelos feixes de alta densidade de potência ( $10^{10} \text{ W/m}^2$ ) ocorre de forma bem rápida, provocando quase que imediatamente a elevação da temperatura superficial para níveis acima da temperatura de fusão. Com exceção do processo a laser de solda e de usinagem (furação e corte), a vaporização consiste num fenômeno indesejável, principalmente nos processos de tratamento superficiais, pelo surgimento de um plasma que bloqueia a incidência do feixe laser. Os parâmetros operacionais do laser que evitam a formação deste plasma se restringem a uma pequena faixa de valores.

## 2.8 - O efeito do calor no substrato

A propagação do calor no material é regida por suas propriedades termofísicas, como condutividade térmica ( $k$ ), calor específico ( $c$ ) e densidade ( $\rho$ ). A taxa de aquecimento é diretamente proporcional à condutividade térmica e inversamente ao produto ( $\rho.c$ ). Esta relação é denominada difusividade térmica ( $\alpha$ ):

$$\alpha = \frac{k}{\rho.c} \quad . \quad (2.6)$$

Fisicamente, a difusividade térmica traduz o quão rápido o material recebe e transmite a energia térmica. Neste sentido, materiais com altos valores de difusividade térmica permitem uma maior profundidade de poça líquida (Figura 2.13) com gradientes térmicos menores evitando o surgimento de trincas. A difusividade térmica das ligas é geralmente menor que a do solvente da liga e aços inoxidáveis e algumas ligas de níquel apresentam baixos valores de difusividade térmica.



**Figura 2.13** - Seção transversal do substrato indicando a poça líquida [adaptado de Ready, 1978].

Baixos valores de difusividade térmica significam que o calor tem dificuldade em avançar para o interior do material. Em contrapartida, altos valores de difusividade térmica causam uma rápida remoção de calor da superfície, o que pode reduzir a quantidade de material fundido. Para compensar esses efeitos, os parâmetros do laser, densidade de potência e o tempo de interação do laser, devem ser otimizados para se encontrar a melhor relação de valores destes dois parâmetros. Por exemplo, no processo de solda a laser do cobre, utilizam-se alta densidade de potência e um pulso de duração curta. Em materiais que possuem baixa difusividade térmica como o aço inoxidável, devem ser utilizados densidades de potência menores e pulsos de maior duração para que haja maior penetração do calor.

Outro aspecto que se refere à otimização dos parâmetros de operação do laser encontra-se em determinar seus valores, em que se evita o fenômeno da vaporização durante o processo de fusão. O acoplamento adequado entre os valores do par densidade de potência e tempo de interação é restrito, abrangendo uma estreita faixa permitida. Valores excessivos de densidade de potência ocasionam a vaporização da superfície antes mesmo que seja produzida uma quantidade significativa de poça líquida.

A Equação 3.4 indica o tempo ( $t_e$ ) necessário para que a superfície atinja a temperatura de ebulição [Ready, 1978]:

$$t_e = \frac{\pi \cdot k \cdot \rho \cdot c}{4 \cdot F^2} (T_e - T_0)^2, \quad (2.7)$$

onde:

$F$  = densidade de potência absorvida [ $\text{W}/\text{m}^2$ ];

$T_e$  = temperatura de ebulição [K];

$T_0$  = temperatura ambiente [K].

A Tabela 1 indica valores de tempo de ebulição para vários metais a partir de uma densidade de potência absorvida de  $10^9$  a  $10^{11} \text{ W}/\text{m}^2$ .



**Tabela 1** - Tempo necessário para se alcançar a temperatura de ebulição [Ready, 1978]

Metal	Densidade de potência absorvida [W/m <sup>2</sup> ]		
	10 <sup>9</sup>	10 <sup>10</sup>	10 <sup>11</sup>
Chumbo	118 μs	1,18 μs	12,0 ns
Zinco	128 μs	1,28 μs	13,0 ns
Magnésio	245 μs	2,45 μs	24,5 ns
Titânio	319 μs	3,19 μs	31,9 ns
Cromo	1,54 ms	15,40 μs	154,0 ns
Níquel	1,84 ms	18,40 μs	184,0 ns
Ferro	1,86 ms	18,60 μs	186,0 ns
Alumínio	3,67 ms	36,70 μs	367,0 ns
Molibdênio	5,56 ms	55,60 μs	556,0 ns
Cobre	8,26 ms	82,60 μs	826,0 ns
Tungstênio	10,46 ms	104,60 μs	1046,0 ns

O tempo para se atingir a temperatura de vaporização é freqüentemente uma fração da duração do pulso dos lasers que operam no modo pulsado normal. No equilíbrio, ou seja, no regime permanente, a velocidade que a superfície vaporiza é dada por [Ready, 1978]:

$$V_v = \frac{F}{\rho [L_v + c(T_e - T_0)]} , \quad (2.8)$$

onde

$L_v$  = calor latente de vaporização [J/kg]

Experimentos efetuados com alumínio utilizando um laser de CO<sub>2</sub> liberando pulsos de 1.10<sup>10</sup> a 2.10<sup>10</sup> W/m<sup>2</sup> durante 5 ms, mostraram a formação de uma nuvem incandescente estendendo-se acima da superfície do metal, e propagando-se para o laser em direção a zona com menor densidade de potência. Para evitar a formação desse plasma, substitui-se o ar ambiente por

um gás inerte como o argônio, o hélio ou uma mistura de ambos, que é mais difícil de ser ionizada.

## 2.9 – Absorção da radiação laser

Um dos principais parâmetros que alimentam a simulação numérica é a refletividade da superfície da peça, ou ainda, a quantidade de energia que a superfície está absorvendo. A absorção é um fator dado em porcentagem que deve ser multiplicado ao termo de densidade de potência (“I”) da Equação 2.5. Neste sentido, uma pequena variação no valor da absorção, ou seja, alguns pontos percentuais influem intensamente sobre a evolução térmica da simulação.

A literatura apresenta um volume considerável de trabalhos mostrando abordagens diferenciadas na determinação da absorção dos materiais. O modelo teórico desenvolvido por Drude [Arnold, 1984; Dausinger, 1993; Qiu, 1995; Ujihara, 1972] baseia-se no fato de que a energia absorvida pelos elétrons é transmitida através de colisões ao longo da rede cristalina do material. Entretanto, a falta de dados sobre propriedades ópticas e a complexa teoria baseada em elétrons têm afastado sua aplicação em engenharia. Uma expressão empírica desenvolvida por Bramson [Bramson, 1968] (Equação 2.9) estima a absorção a partir do comprimento de onda do feixe laser e da resistividade elétrica do material. Entretanto, a equação de Bramson não considera alguns aspectos que fortemente influenciam a absorção, como os graus de rugosidade e de oxidação da superfície:

$$A_b = 0,365 \cdot \sqrt{\frac{\epsilon}{\lambda}} - 0,0667 \cdot \frac{\epsilon}{\lambda} - 0,006 \cdot \sqrt[3]{\frac{\epsilon}{\lambda}}, \quad (2.9)$$

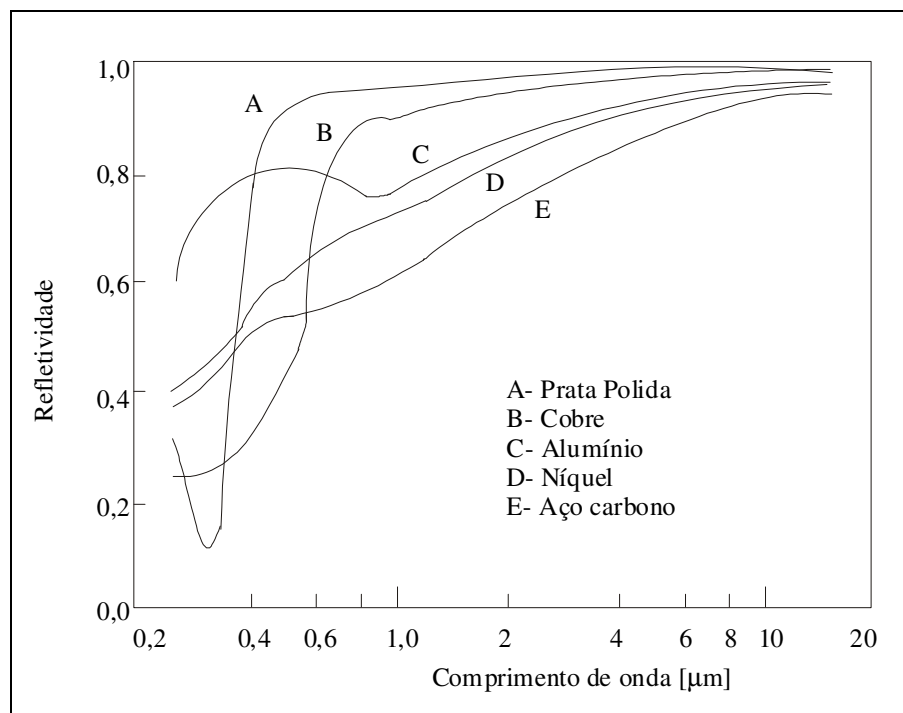
onde:

$A_b$  = coeficiente de absorção do metal;

$\epsilon$  = resistividade elétrica do metal [ $\Omega \cdot m$ ];

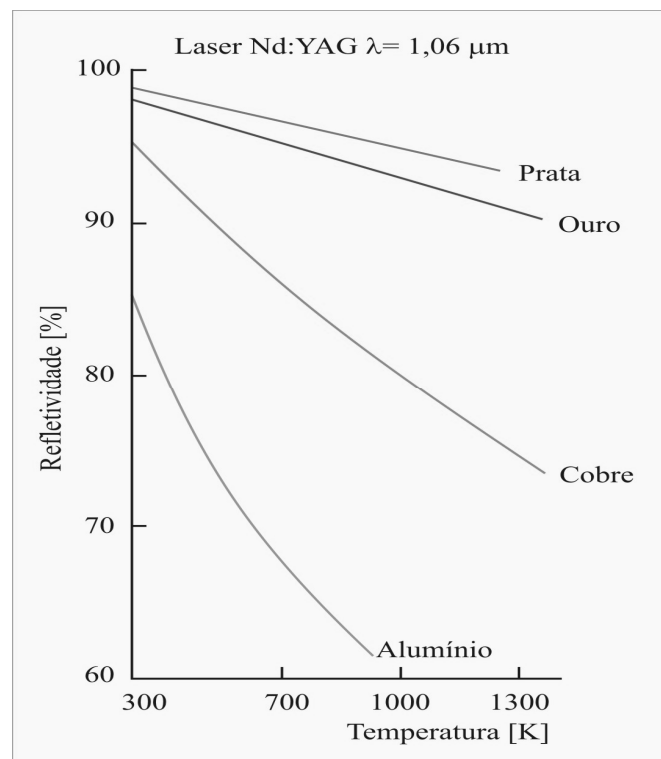
$\lambda$  = comprimento de onda do feixe laser [m].

A Figura 2.14 mostra valores de refletividade para vários comprimentos de onda em condição de superfície polida. O valor da refletividade é dependente de uma série de fatores como acabamento superficial, estado de oxidação da superfície, temperatura da superfície, comprimento de onda do laser e orientação relativa do campo elétrico da onda laser com o plano de incidência. Metais como o alumínio e a prata possuem alta refletividade em toda extensão do espectro visível, dando a aparência branca a esses metais. Ligas ferrosas têm tipicamente refletividade baixa em todo o espectro devido a sua coloração escura em relação aos demais metais. A refletividade de todos os metais torna-se mais elevada no espectro do infravermelho. Em comprimentos de onda maiores do que  $5\mu\text{m}$ , quase todos os metais apresentam refletividade maior do que 90% e são dependentes da condutividade elétrica. Metais com condutividades elétricas maiores possuem refletividades altas no espectro infravermelho. No infravermelho, o fato de a refletividade atingir valores próximos à unidade tenderia a desqualificar os lasers que operam neste espectro. Entretanto, os valores indicados aplicam-se apenas a superfícies metálicas limpas e no vácuo. Na maioria das aplicações laser, é preciso considerar o estado de oxidação ou de contaminação da superfície, o que altera bastante os dados anteriores.



**Figura 2.14** - Refletividade de alguns metais em função do comprimento de onda [adaptado de Ready, 1978].

A rugosidade superficial também pode aumentar a absorção devido às múltiplas reflexões causadas pelas reflexões laterais das microcavidades existentes na superfície. Entretanto, se a rugosidade da superfície for menor que o comprimento de onda do feixe laser, a onda irá se comportar como se estivesse encontrando uma superfície plana e as reflexões múltiplas não ocorrerão [Haag, 1996]. Ujihara [Ujihara, 1976], utilizando um laser de Nd:YAG fez diversos ensaios em alguns metais, com superfície preparada por jateamento de areia, para determinar o valor da refletividade em função da temperatura (Figura 2.15). Nota-se que com o aumento de temperatura a refletividade diminui para todos os metais estudados.



**Figura 2.15** – Influência do aumento da temperatura sobre o comportamento da absorção da radiação do laser de comprimento de onda  $\lambda=1,06 \mu\text{m}$  [adaptado de Ujihara, 1972]

## **Capítulo 3**

### **Metodologia numérica**

#### **3.1- Introdução**

A manufatura de produtos acabados e semi-acabados, bem como as novas tecnologias envolvidas nos processos de fabricação, requer em cada vez mais desenvolvimentos no que diz respeito à modelagem matemática e à utilização de métodos numéricos computacionais para o planejamento das etapas de manufatura. Nesse contexto, o método dos elementos finitos (MEF) por meio do programa genérico ANSYS é utilizado neste trabalho para analisar as dimensões da região afetada pelo tratamento superficial a laser em uma liga Al-Fe, objetivando controlar os parâmetros operacionais do equipamento laser para se obter as dimensões desejadas.

A modelagem de tratamentos superficiais utilizando laser como fonte de calor, empregando o MEF, é trabalhosa devido à complexidade dos fenômenos físicos envolvidos, principalmente quando ocorre a refusão superficial. Sendo assim, é cada vez maior a utilização de programas computacionais genéricos como o ANSYS para realização das simulações numéricas.

Neste capítulo são apresentados o modelo geométrico utilizado para a simulação numérica, a resolução numérica feita pelo programa ANSYS, as propriedades da liga utilizada, a apresentação da sub-rotina criada como incremento ao programa ANSYS, bem como as comparações iniciais de aferição da resolução via ANSYS com resultados da literatura.

### 3.2 – Simulação numérica computacional

No presente trabalho é realizada a simulação numérica dos campos térmicos da amostra tratada por refusão superficial a laser, para determinação da profundidade e da largura da poça fundida com a passagem do laser. Para tanto, é introduzida uma sub-rotina no programa ANSYS com o objetivo de aplicar uma distribuição de energia gaussiana, pois esta é a forma característica do laser utilizado nos ensaios experimentais.

A solução de problemas pelo MEF realizada pelo ANSYS calcula as temperaturas nodais para cada elemento. O programa considera os três modos de transferência de calor: condução, convecção e radiação, e a equação de balanço de calor é a base da análise térmica obtida pelo princípio de conservação de energia. Na sua forma diferencial, para um volume de controle genérico, esta equação assume a forma:

$$\rho c_p \left( \frac{\partial T}{\partial t} + \{v\}^T \cdot \{L\} T \right) + \{L\}^T \cdot \{q\} = \ddot{q} \quad (3.1)$$

onde:  $\rho$  é a densidade do material,  $c_p$  é o calor específico,  $T$  é a temperatura e  $t$  é o tempo.

$\{L\}$  é o vetor operador que pode ser escrito na forma  $\left\{ \frac{\partial}{\partial X}, \frac{\partial}{\partial Y}, \frac{\partial}{\partial Z} \right\}$ ,  $\{v\}$  é o vetor velocidade de transporte de calor que pode ser escrito da forma  $\{V_x, V_y, V_z\}$ ,  $\{q\}$  é o vetor fluxo de calor e  $\ddot{q}$  é a taxa de geração de calor [ANSYS Theory Reference, 1998].

A Lei de Fourier relaciona o vetor fluxo de calor com o operador gradiente térmico como é mostrado na equação 3.2

$$\{q\} = [D] \{L\} T, \quad (3.2)$$

onde  $[D]$  é a matriz condutibilidade que pode ser escrita da forma:

$$[D] = \begin{bmatrix} k_x & 0 & 0 \\ 0 & k_y & 0 \\ 0 & 0 & k_z \end{bmatrix} \quad (3.3)$$

em que  $k_x$ ,  $k_y$  e  $k_z$  representam a condutibilidade do material nas direções  $x$ ,  $y$  e  $z$  respectivamente.

Combinando as equações 3.1 e 3.2 e expandido para a forma diferencial mais conhecida tem-se:

$$\rho c_p \left( \frac{\partial T}{\partial t} + V_x \frac{\partial T}{\partial x} + V_y \frac{\partial T}{\partial y} + V_z \frac{\partial T}{\partial z} \right) = \dot{q} + \frac{\partial}{\partial x} \left( k_x \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( k_y \frac{\partial T}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( k_z \frac{\partial T}{\partial z} \right) \quad (3.4)$$

Além de dois modos de transferência de calor, condução e convecção (radiação não é considerada), o modelo leva em consideração a geração de calor causada pela liberação do calor latente durante a transformação de fase que ocorre no processo de fusão do material. Para analisar essa transformação de fase é utilizado o método da entalpia [Swaminathan e Voller, 1992], sendo necessária a definição da entalpia do material como função da sua temperatura. A entalpia é definida por:

$$H = \int \rho c_p(T) dT. \quad (3.5)$$

Os valores das propriedades termofísicas da liga são considerados dependentes da temperatura durante a solução do problema. O programa ANSYS calcula primeiro a temperatura dos pontos de integração de cada elemento e determina a propriedade correspondente durante a formulação das matrizes dos elementos.

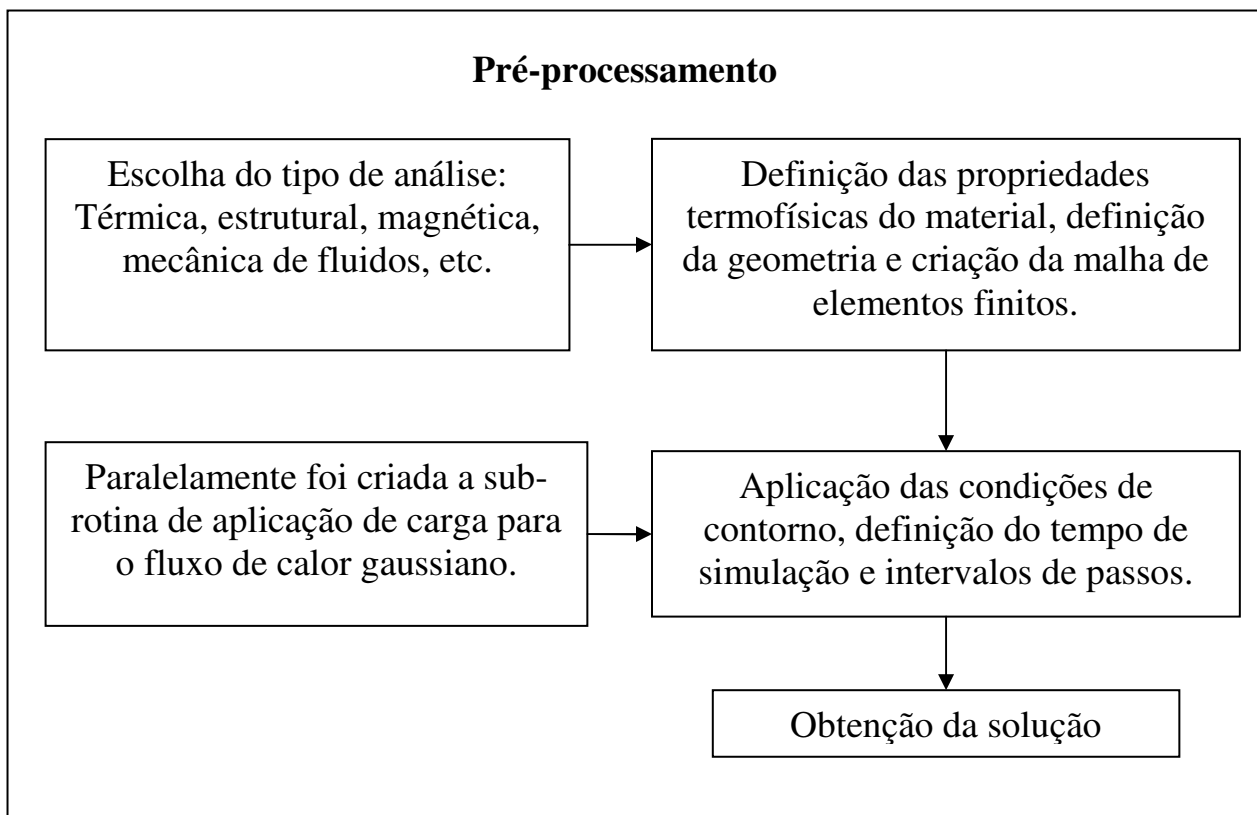
A utilização do ANSYS para resolução da simulação engloba três passos distintos: construção do modelo, aplicação das condições iniciais e de contorno e obtenção da solução, sendo os dois primeiros passos dentro do pré-processamento e o último dentro do pós-

processamento. As Figuras 3.1 e 3.2 mostram o fluxograma dos passos seguidos no programa ANSYS.

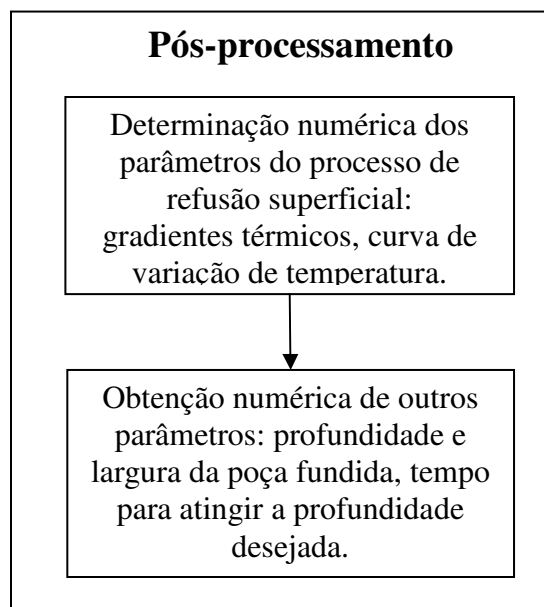
O pré-processamento engloba a escolha do tipo de análise, tipo de elemento a ser utilizado, propriedades termofísicas do material estudado, definição da geometria que melhor representa o sistema em questão e a aplicação das condições de contorno. Então, é definido o tempo de interação e os intervalos de passo durante a simulação obtendo-se a solução. Nesta etapa é também inserida a sub-rotina de aplicação do fluxo de calor gaussiano.

Após a obtenção da solução vem a etapa de pós-processamento, onde são verificados os resultados para um determinado instante ou intervalo de tempo do sistema. É possível determinar a distribuição de temperaturas a cada instante no sistema por intervalos de temperaturas em função da posição da amostra escolhida. Também é possível determinar a variação de temperatura em função do tempo para cada ponto da malha, o que possibilita uma ampla manipulação de resultados pelo usuário.



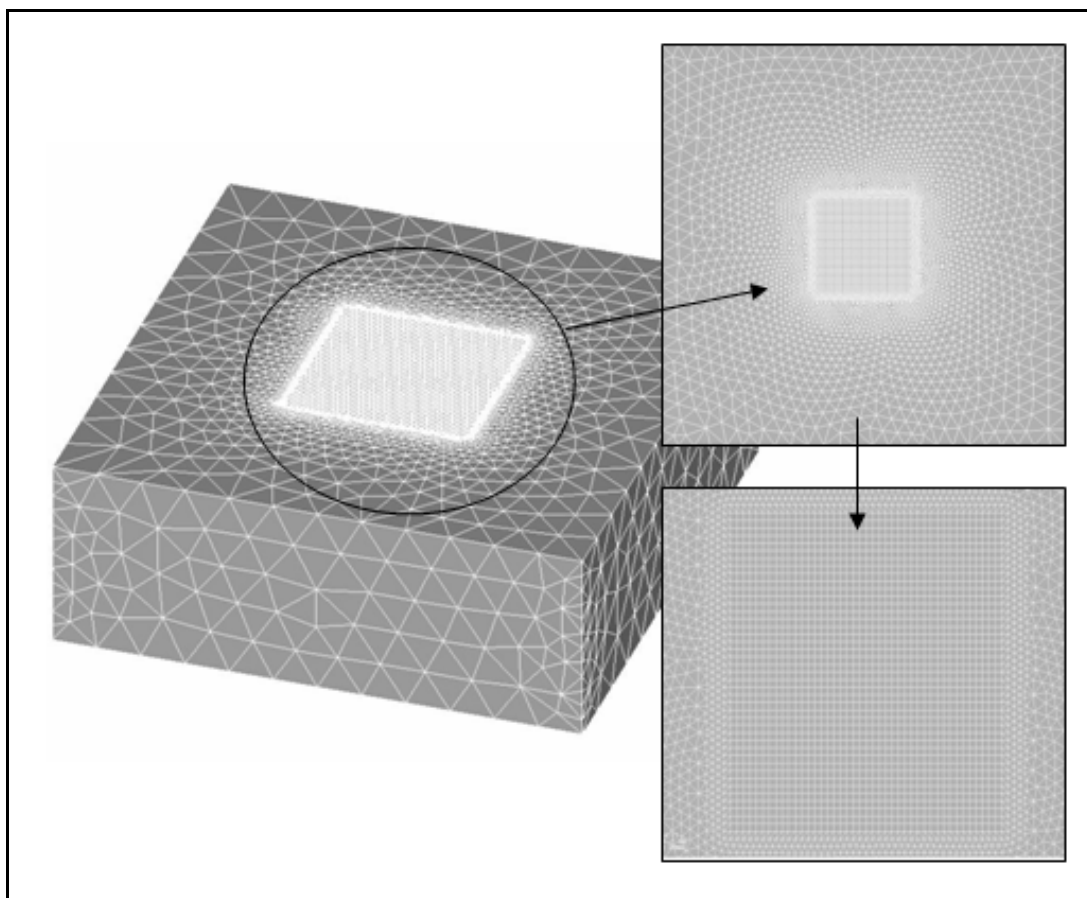


**Figura 3.1.-**Fluxograma da etapa de pré-processamento no programa ANSYS.



**Figura 3.2-** Fluxograma da etapa de pós-processamento no programa ANSYS.

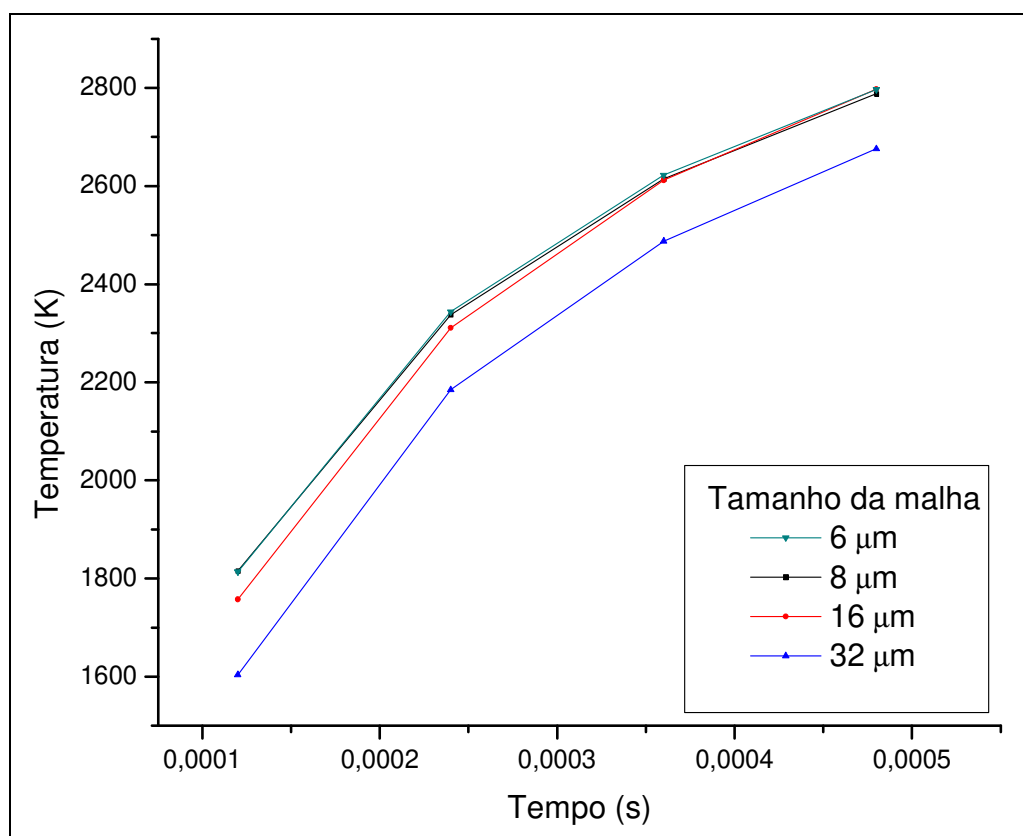
A Figura 3.3 mostra a malha tridimensional de elementos finitos gerada utilizando o software ANSYS. O elemento utilizado foi o SOLID70, que possui características de análise termofísica apropriada para o estudo. Nota-se que a região central na superfície por onde o laser passa apresenta uma malha mais refinada, enquanto que o restante do modelo apresenta uma malha menos refinada com a finalidade de diminuir o esforço computacional e o tempo de simulação. A região central apresenta uma malha formada de elementos cúbicos de 15  $\mu\text{m}$  de aresta e a malha externa é formada por elementos tetraédricos progressivos devido a melhor adaptação à geometria.



**Figura 3.3** – Representação da malha tridimensional de elementos finitos gerada pelo software ANSYS *[obtida pelo software ANSYS]*.

Com o objetivo de analisar o efeito do refinamento de malha na região central do modelo sobre o resultado da simulação, foram realizadas simulações de perfil térmico utilizando malhas de 32, 16, 8 e 6  $\mu\text{m}$ . Os parâmetros de simulação são os mesmos utilizados por Hsu *[Hsu, 1980]*

para a refusão superficial de alumínio: densidade linear de potência de  $4,76 \cdot 10^5$  W/m e simulação interrompida quando o centro do feixe atingisse a temperatura de vaporização. A Figura 3.4 mostra a evolução térmica utilizando as diferentes malhas, notando-se que, quando o tamanho da malha diminui de 32 para 16  $\mu\text{m}$ , a diferença é considerável, enquanto que, de 16 para 8  $\mu\text{m}$ , e de 8 para 6  $\mu\text{m}$ , esta diferença torna-se desprezível. Logo, optou-se por uma malha de 15  $\mu\text{m}$ , que se encontra dentro desta faixa que vai de 6 a 16  $\mu\text{m}$ , objetivando uma diminuição de esforço computacional.



**Figura 3.4** – Evolução da temperatura em função do tempo para um ponto no centro da poça localizado na superfície tratada com diferentes malhas.

### 3.3- Condições de contorno

Em face da indisponibilidade de aparelhos de instrumentação que respondam de forma mais rápida e devido à precisão necessária na avaliação da massa fundida, optou-se pelo uso de valores

do coeficiente de absorção na superfície para a liga a partir de estudos encontrados na literatura [Ujihara, 1981]. O gráfico indicado na Figura 2.15 do Capítulo (2) apresenta a variação da refletividade para a superfície do alumínio puro. Por ser a liga Al-1,5%Fe uma liga diluída, a refletividade do alumínio puro pode ser considerada para efeito de simulação. Como o tratamento superficial atinge temperaturas acima de 1000 K rapidamente, considerou-se para efeito de simulação uma absorção de 37% da radiação do laser sobre a superfície do modelo como condição de contorno. A temperatura inicial admitida foi a temperatura ambiente de 298.15 K.

Os efeitos convectivos nas paredes externas do modelo são desconsiderados admitindo-se um sólido semi-infinito, enquanto que o efeito convectivo devido a fusão do material foi considerado aplicando o fator multiplicativo denominado  $K_{ef}$  proposto na literatura [Apps, 1963] para a condutividade acima da temperatura *liquidus*. Nos processos de refusão superficial a laser, já foi mencionado que a medição da temperatura por meio de termopares é uma tarefa nada trivial. Também de complexidade considerável é a determinação experimental do campo de velocidade dentro da poça fundida. O aumento artificial da transferência de calor no líquido caracterizado por  $K_{ef}$ , é um modo de se levar em conta a energia térmica transferida devido à turbulência induzida dentro da poça líquida. A aplicação de tal procedimento foi relatada na literatura para o caso de soldagem [Apps, 1963] e lingotamento contínuo de aços [Davies, 1984].

As propriedades utilizadas na simulação como calor específico, densidade, condutividade e entalpia são consideradas dependentes da temperatura e são indicadas na Tabela 2.

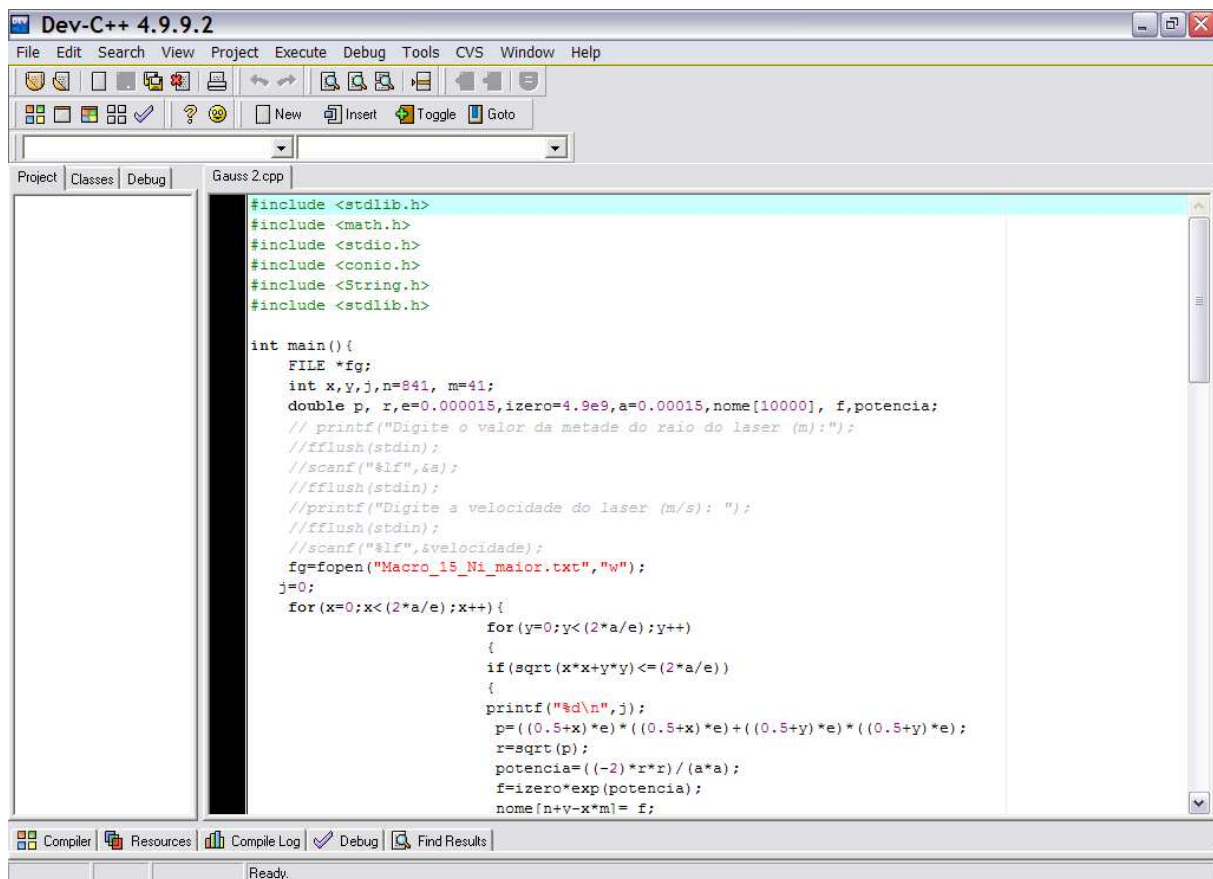
**Tabela 2** - Propriedades termofísicas utilizadas para uma liga Al-1,5%Fe [Goulart, 2009]

Propriedades	Símbolo/Unidade	Al-1,5%Fe
Condutividade térmica	$K_s [W.m^{-1}.K^{-1}]$	219,2
	$K_L$	91,2
Calor específico	$c_s [J.kg^{-1}.K^{-1}]$	1247
	$c_L$	1166
Densidade	$\rho_s [kg.m^{-3}]$	2620
	$\rho_L$	2450
Calor latente de fusão	$L [J.kg^{-1}]$	387000
Temperatura <i>liquidus</i>	$T_{Liq} [^{\circ}C]$	653,4

### 3.4 - Implementação de rotina no software ANSYS para simulação do processo de refusão superficial a laser

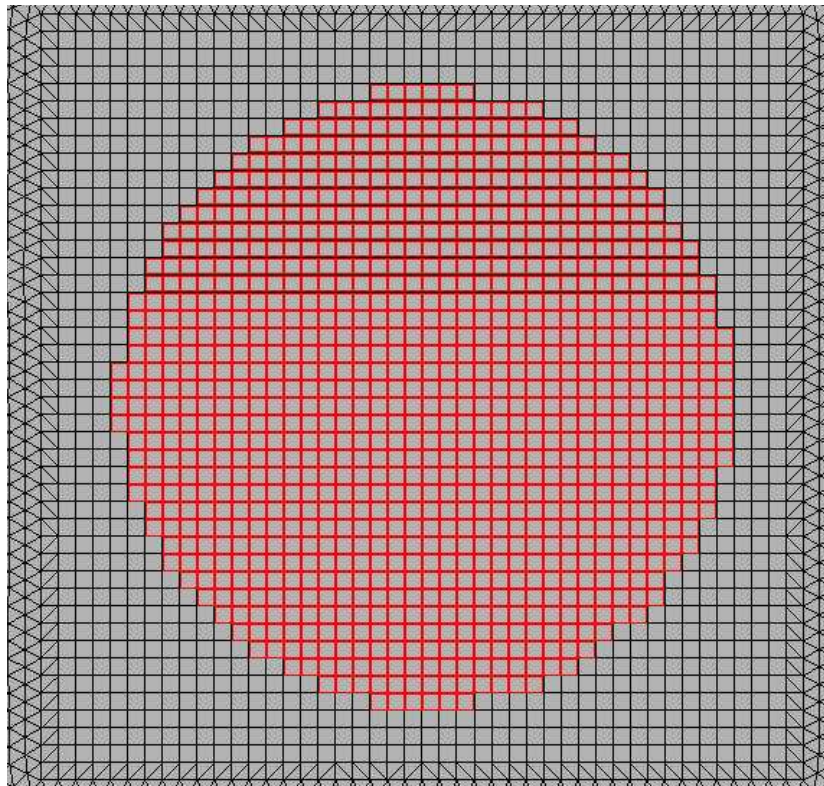
A linguagem de programação do ANSYS é chamada de APDL, *ANSYS Parametric Design Language*, e permite otimizar a utilização de comandos ou macros do ANSYS ou mesmo a criação de sub-rotinas de simulação.

A simulação do processo de refusão superficial a laser no software ANSYS não é um trabalho simples e nem está pré-disposto para o usuário do programa. É necessário implementar uma rotina por meio de macros, como citado anteriormente. Para isso, utilizou-se um compilador de linguagem de programação C++ disposto abertamente na internet chamado Bloodshed DEV-C++. A interface do software de compilação é mostrada na Figura 3.5.



**Figura 3.5-** Interface do programa DEV-C++ compilador de linguagem C++

Foi criado um programa em linguagem C++ permitindo a geração de blocos de notas que depois são inseridos no software ANSYS. Isso se deu mediante a necessidade de aplicação do fluxo de calor gaussiano sobre a superfície da amostra, pois para cada elemento na região desta superfície é necessária uma carga de valor diferente, dependendo da posição que se encontra a partir do centro do feixe laser. A Figura 3.6 mostra a região circular de elementos onde a carga é aplicada.



**Figura 3.6-** Aplicação de fluxo de calor sobre os elementos na superfície do modelo.

### **3.5 - Aferição do modelo computacional**

A validação da simulação numérica computacional faz-se necessária para assegurar que o modelo matemático traduza de forma confiável o fenômeno da interação radiação laser/ matéria. Uma vez validado o modelo matemático, a aplicação da ferramenta computacional será utilizada na comparação com ensaios experimentais próprios, permitindo a otimização do processo de tratamento superficial a laser.

A sequência de comparações inicia-se entre o modelo bidimensional pelo método de diferenças finitas proposto por (*Hsu, 1980*) e o modelo tridimensional pelo método dos elementos finitos desenvolvido no software ANSYS, tanto para o fluxo de calor do feixe laser com distribuição uniforme quanto para o fluxo de calor com distribuição gaussiana, apresentado nas Figuras 3.7 e 3.8 respectivamente. As isothermas mostradas nas Figuras 3.7 e 3.8 foram obtidas

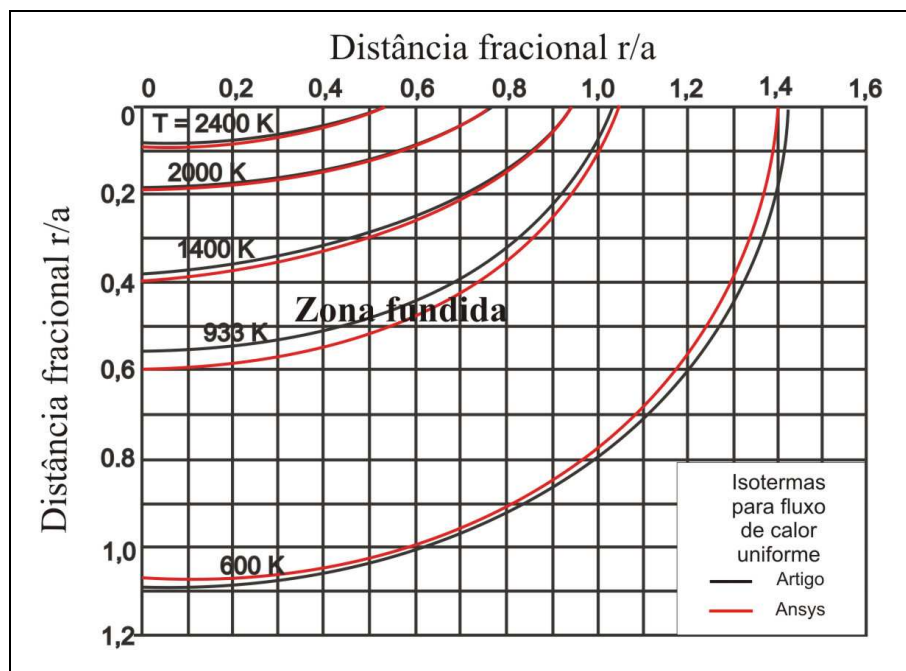
para o instante em que o centro da poça líquida atingiu a temperatura de ebulição. A densidade linear de energia laser utilizada foi de  $4.76 \times 10^5$  W/m. As propriedades utilizadas nas simulações estão apresentadas na Tabela 3.2.

**Tabela 3** - Propriedades termofísicas utilizadas para o alumínio puro (*Hsu, 1980*)

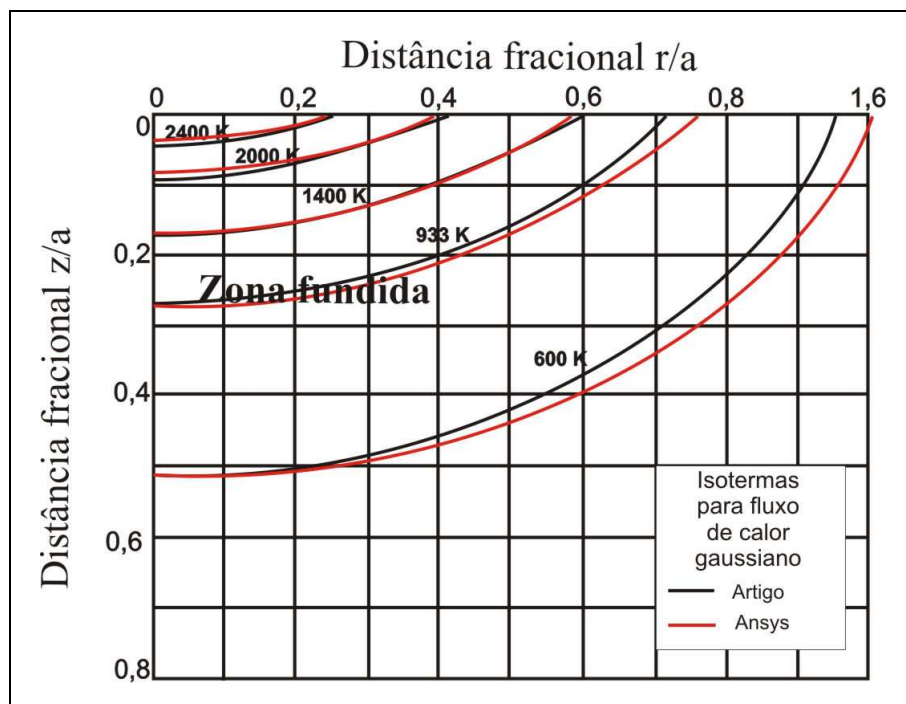
Propriedades	Símbolo/Unidade	Al Puro
Condutividade térmica	$K_s$ [W.m <sup>-1</sup> .K <sup>-1</sup> ]	221,6
	$K_L$	91,9
Calor específico	$c_s$ [J.kg <sup>-1</sup> .K <sup>-1</sup> ]	1255
	$c_L$	1175
Densidade	$\rho_s$ [kg.m <sup>-3</sup> ]	2559
	$\rho_L$	2389
Calor latente de fusão	$L$ [J.kg <sup>-1</sup> ]	383000
Temperatura de fusão	$T_F$ [°C]	660

A simulação para o feixe com distribuição uniforme de fluxo de calor é feita aplicando-se o mesmo valor de carga para o fluxo de calor em todos os elementos da superfície, como mostrado anteriormente na Figura 3.6. A aplicação dessa carga dá-se em toda uma região circular de elementos sobre a superfície da amostra.





**Figura 3.7** – Comparação entre o modelo bidimensional, segundo Hsu [adaptado de Hsu,1980], e a simulação via ANSYS com radiação laser de distribuição uniforme.

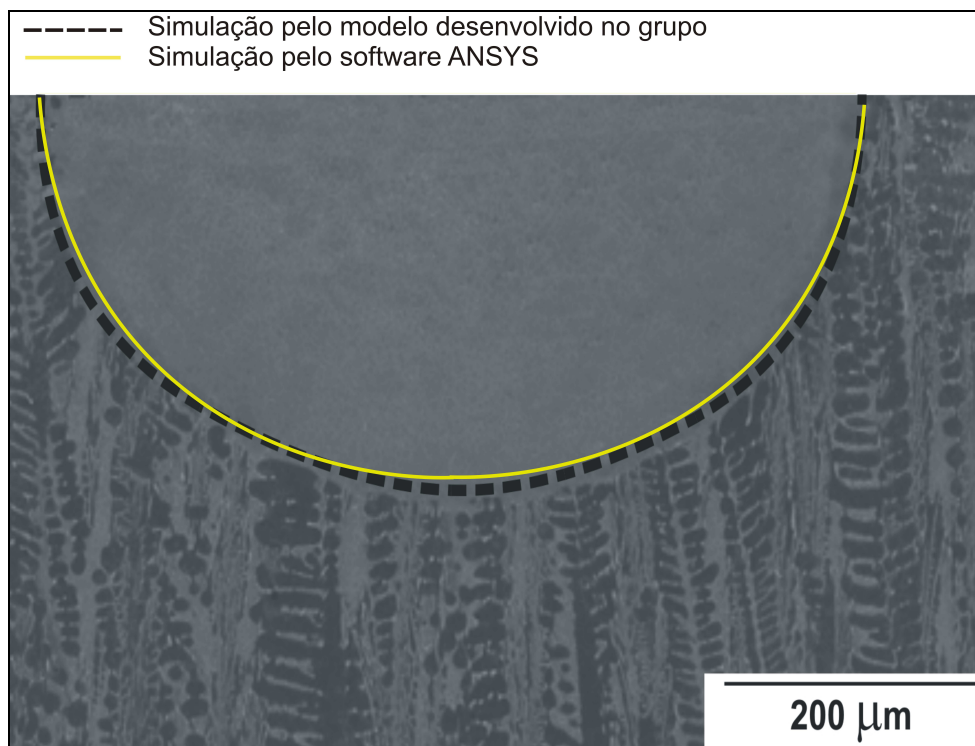


**Figura 3.8** – Comparação entre o modelo bidimensional, segundo Hsu [adaptado de Hsu,1980], e a simulação via ANSYS com radiação laser de distribuição gaussiana

Como aferição adicional ao modelo computacional desenvolvido em ANSYS, foi feita uma comparação da simulação ANSYS com a simulação realizada para a liga Al-5%Ni, pelo do modelo bidimensional desenvolvido no Grupo de Pesquisas em Solidificação do DEMA-UNICAMP [Cheung, 2003], devidamente comparadas com resultado experimental de refusão a laser realizado em trabalho anterior [Canté, 2009]. A Figura 3.9 mostra a isoterma *liquidus* para a velocidade de 800 mm/s, potência do feixe de 1 kW e laser operando no foco. O feixe laser possui a forma de distribuição gaussiana e comprimento de onda de 10,6  $\mu\text{m}$  (laser de  $\text{CO}_2$ ). O coeficiente de absorção na superfície do material é de 15%, característico para superfície de alumínio puro jateada com areia e tratada com laser de  $\text{CO}_2$ , segundo Ujihara [Ujihara, 1972]. O valor de  $K_{\text{ef}}$  utilizado para a simulação no ANSYS é de 3,2, isto é, há um aumento de 3,2 no valor da condutividade térmica no líquido para se levar em conta os efeitos convectivos. O modelo bidimensional determina um  $K_{\text{ef}}$  de 2,8 para o ajuste da poça fundida teórica com a experimental. A diferença entre os valores de  $K_{\text{ef}}$  obtidos pelo ANSYS e pelo modelo bidimensional deve-se à diferença entre os métodos utilizados: método dos elementos finitos (ANSYS) e método das diferenças finitas (modelo bidimensional), além de que o modelo desenvolvido no ANSYS é tridimensional. As propriedades termofísicas da liga Al-5%Ni utilizadas na simulação são apresentadas na Tabela 4.

**Tabela 4** - Propriedades termofísicas utilizadas para a liga Al-5%Ni [Canté, 2009].

Propriedades	Símbolo/Unidade	Al-5%Ni
Condutividade térmica	$K_s$ [ $\text{W.m}^{-1}.\text{K}^{-1}$ ]	111
	$K_L$	65
Calor específico	$c_s$ [ $\text{J.kg}^{-1}.\text{K}^{-1}$ ]	1336
	$c_L$	1147
Densidade	$\rho_s$ [ $\text{kg.m}^{-3}$ ]	2991
	$\rho_L$	2644
Calor latente de fusão	$L$ [ $\text{J.kg}^{-1}$ ]	372000
Temperatura <i>liquidus</i>	$T_{\text{Liq}}$ [ $^{\circ}\text{C}$ ]	646



**Figura 3.9** – Comparação das delimitações teóricas de poça fundida previstas pelo ANSYS e por um modelo bidimensional [Cheung, 2003] em relação à delimitação experimental

## Capítulo 4

### Metodologia experimental

#### 4.1 – Introdução

A literatura apresenta poucos trabalhos referentes à associação entre simulação numérica computacional do tratamento superficial a laser e experimentos para sua aferição. O que se encontra, em maior número no âmbito experimental, são publicações relacionadas à análise da microestrutura resultante da variação de parâmetros operacionais do laser, como a velocidade de deslocamento e a potência do feixe.

Esta presença reduzida de publicações com validação experimental das simulações numéricas tem suas justificativas como [Sola, 1997]: área tratada reduzida (0,2 - 5 mm), altos gradientes de temperatura, altas taxas tanto de aquecimento quanto de resfriamento e a dinâmica do processo ocorrendo de forma rápida.

Como o processo de refusão a laser ocorre em altas velocidades, a necessidade de se especificar termopares adequados, assim como equipamentos apropriados para registrar a evolução térmica do processo, é fundamental para o acompanhamento preciso do ensaio. Os registradores térmicos tradicionais utilizados no Laboratório de Solidificação do Departamento de Engenharia de Materiais da Faculdade de Engenharia Mecânica da Unicamp captam temperaturas em intervalos mínimos de 1 segundo, o que o torna inadequado para o processo de

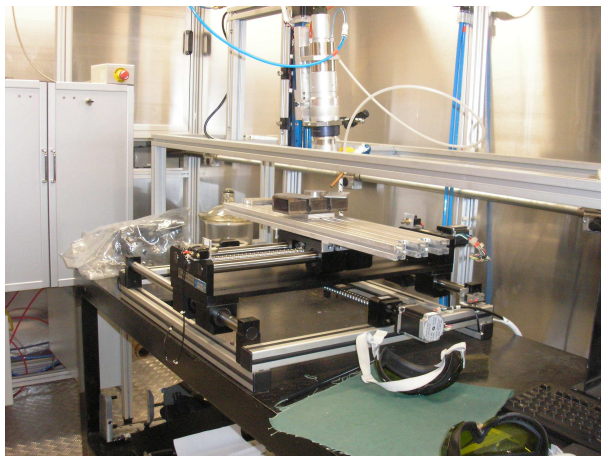
refusão a laser que se completa em menores intervalos de tempo. Uma solução alternativa consiste em trabalhar com densidades de potência reduzidas e tempos de interação laser/substrato prolongados, da ordem de segundos, atentando-se para que a combinação destes dois fatores não provoque a vaporização do metal (perda de massa). Entretanto, a simulação desta situação causa o aumento nos tempos de computação.

A metodologia de aferição do modelo matemático de refusão superficial a laser pelo confronto de perfis térmicos simulado/experimental mostra-se inadequada no presente trabalho. A primeira razão deve-se à inexistência no mercado brasileiro de um registrador térmico sensível o suficiente para detectar temperaturas em intervalos de tempo reduzidos (ordem de milisegundos). O sincronismo entre o início da atuação do feixe laser sobre a superfície da peça e o início do registro da história térmica necessita ser preciso, pois a diferença de alguns milisegundos incorre em mudanças significativas em relação ao campo térmico simulado, tornando o confronto teórico/experimental inviável. Não se sabe da existência de algum dispositivo de instrumentação que possa ser acoplado a uma máquina laser de modo a garantir tal sincronismo requerido. Neste sentido, o confronto de perfis térmicos teórico/experimental não é realizado, restando o confronto entre dimensões da região tratada e as microestruturas previstas pelo modelo e a resultante do ensaio experimental.

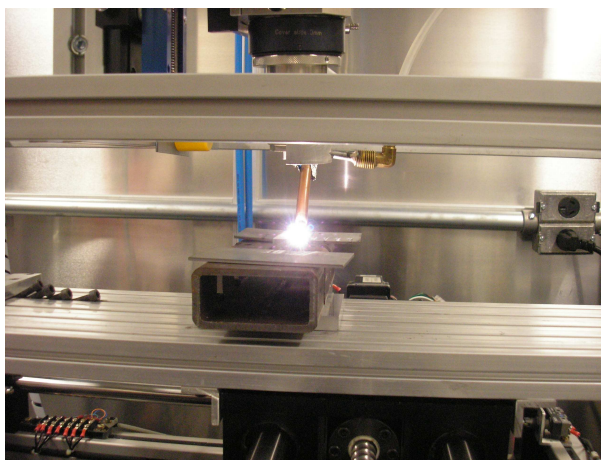
#### **4.2 - Descrição da máquina laser utilizada nos ensaios**

O equipamento laser utilizado nos ensaios de tratamento superficial é um laser a fibra dopada com Itérbio (*Yb - fiber laser*), bombeado por diodos, emitindo radiação no comprimento de onda de 1070 nm, com 2000 W de potência média. O laser tem uma fibra primária de 50  $\mu\text{m}$  de diâmetro, acoplada a uma fibra secundária (de processo) com 100 micrometros de diâmetro. Com o sistema óptico instalado, o diâmetro do feixe focalizado é de aproximadamente 100  $\mu\text{m}$ . A cabeça do laser está integrada a uma mesa de coordenadas CNC (Computer Numerical Control) de 3 eixos, com velocidade de processo de até 200 mm/s, área útil de processo de 450 mm X 450 mm. A cabeça de processamento permite a utilização de diferentes gases de proteção: N<sub>2</sub>, O<sub>2</sub>, Ar e He. O aparelho laser (Figura 4.1) encontra-se instalado no Instituto de Estudos Avançados do DCTA-ITA, em São José dos Campos - SP. A Figura 4.2 apresenta o feixe laser durante um dos

processos de tratamento sobre uma amostra de Al-Fe. Todos os ensaios realizados neste trabalho foram com o modo de trabalho contínuo do feixe.



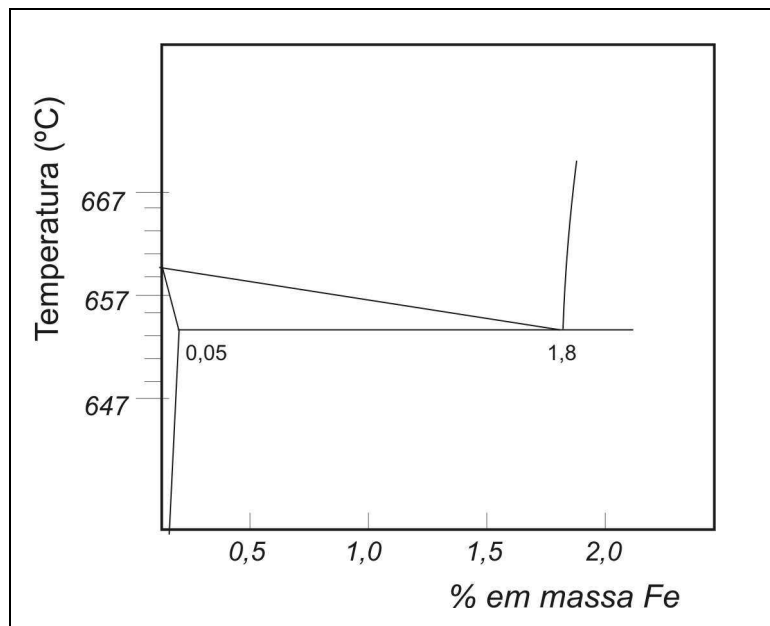
**Figura 4.1** – Vista geral da máquina laser (*Yb –fiber laser*) [cortesia IEAv/DCTA].



**Figura 4.2** – Processo de tratamento superficial da liga Al-Fe [cortesia IEAv/DCTA].

### **4.3 - Preparação de amostras para o ensaio experimental**

Para a elaboração da liga Al-1,5%Fe (diagrama de equilíbrio parcial do sistema Al-Fe mostrado na Figura 4.3, obtido pelo software *Thermo Calc- Foundation of Computacional Thermo Dynamics, Suden*) foram utilizadas matérias-primas consideradas comercialmente puras, sendo os resultados das análises químicas do alumínio e do ferro são apresentados na Tabela 5.



**Figura 4.3** – Diagrama de equilíbrio parcial Al-Fe.

**Tabela 5** - Análise química dos materiais utilizados na preparação da liga Al-Fe, obtido em espectrômetro de fluorescência de raios X.

Metal	Composição Química [% em massa]					
	Al	Fe	Ni	Si	P	Cu
Al	Balanço	0,09	0,03	0,06	-	0,06
Fe	-	Balanço	0,01	0,01	-	0,01

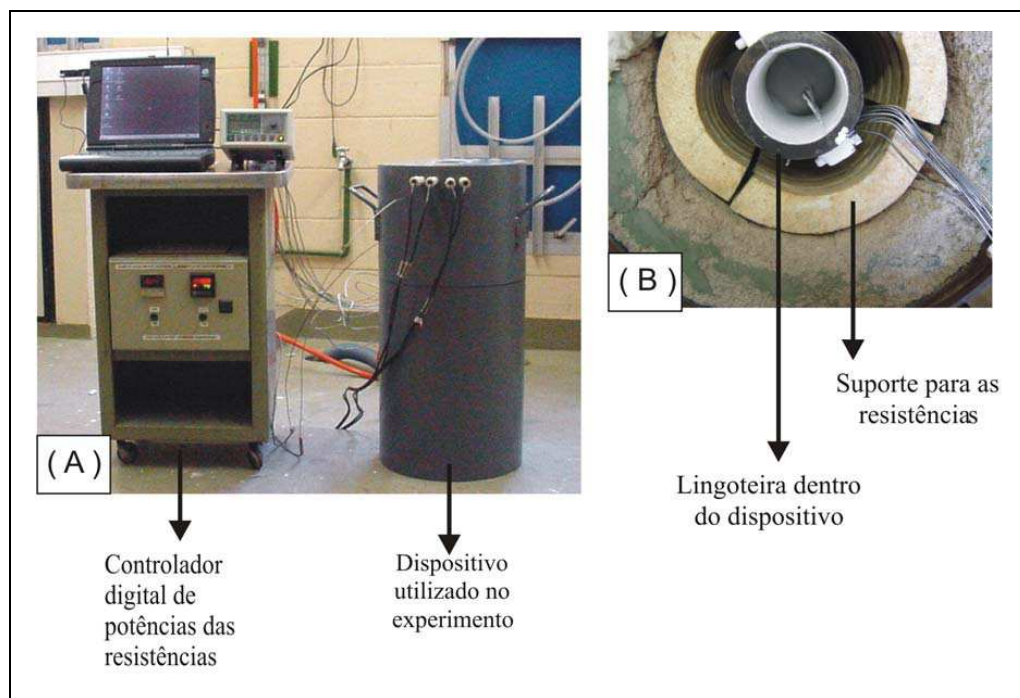
A seguir, são descritas as etapas sequenciais para a obtenção da liga:

- pesagem dos materiais (Al e Fe) para a composição da liga;
- revestimento do cadinho de carbetto de silício com suspensão à base de alumina;
- revestimento da lingoteira com suspensão a base de alumina, montagem da chapa molde na lingoteira;
- vedação das emendas da lingoteira interna e externamente, bem como junção com a chapa molde com suspensão de alumina;

- secar o conjunto em mufla para eliminar umidade;
- fusão da massa de alumínio em forno mufla de resistência;
- adição do ferro puro, na forma de cavacos, previamente preparados por usinagem e isentos de óleo de corte;
- agitação do banho, retorno ao forno;
- manutenção no forno por aproximadamente uma hora;
- verificação por agitação se todos os cavacos foram dissolvidos;
- homogeneização do metal líquido e obtenção de amostra para análise química;
- vazamento na lingoteira, já montada no dispositivo de solidificação ascendente;
- isolamento do topo da lingoteira com o auxílio de isolante para evitar perda de calor;
- inicialização do fornecimento de potência ao dispositivo de solidificação para reaquecimento da liga, desligando a potência quando a temperatura ultrapassar 20°C acima da temperatura de início do experimento;
- quando a temperatura da liga começar a diminuir e chegar a 10°C acima da temperatura de início de experimento, ligar o sistema de aquisição de dados;
- acionamento da refrigeração por água quando a temperatura do metal atingir a temperatura de início de ensaio;
- manutenção da refrigeração até o metal ficar sólido e não mais passível a transformações estruturais;
- retirada da lingoteira do dispositivo de solidificação e desmoldagem do lingote.

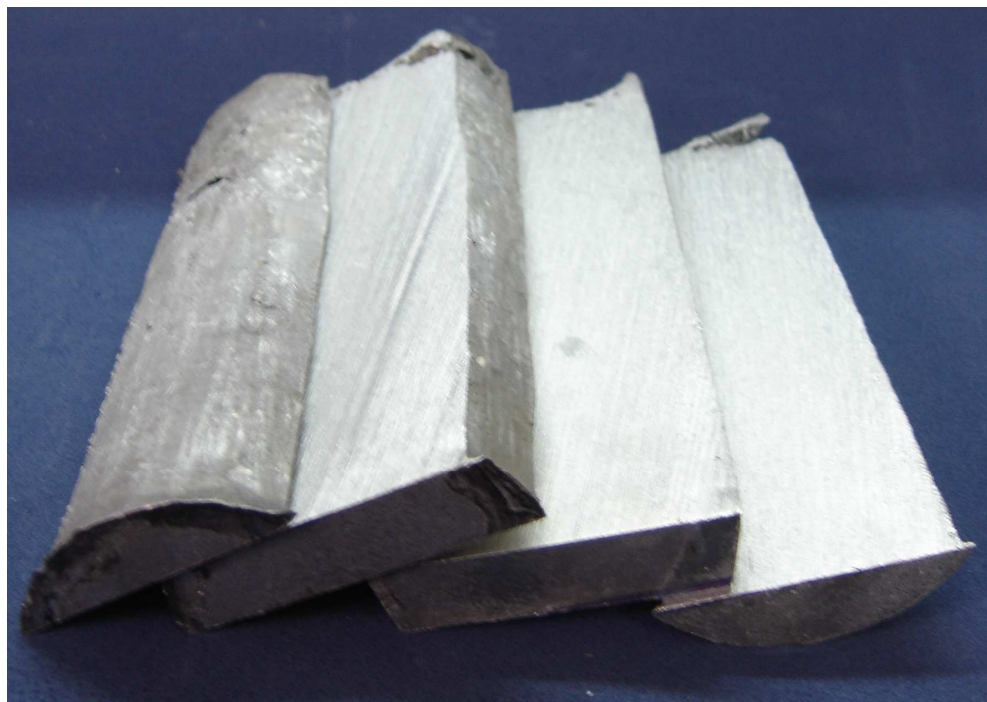
A Figura 4.4 mostra o aparato experimental utilizado para preparação da liga, sendo (a) o registrador de temperaturas juntamente com o dispositivo de solidificação e (b) a lingoteira dentro do dispositivo.





**Figura 4.4** – Aparato experimental: a) registrador e dispositivo de solidificação e b) lingoteira dentro do dispositivo.

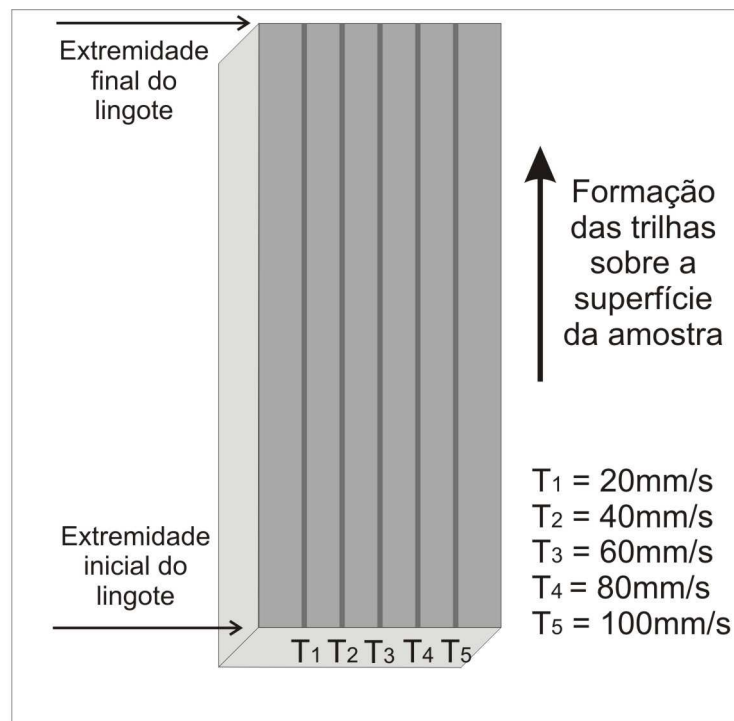
Após todo o procedimento citado, os lingotes foram seccionados longitudinalmente, conforme mostrado na Figura 4.5 para retirada de amostra de dimensões aproximadas de 13x5x1,8 cm. As amostras foram fresadas para que a superfície a ser tratada pelo laser ficasse perfeitamente paralela à base de apoio. Uma lixa de grana 1200 foi utilizada para dar acabamento e retirar as imperfeições da superfície a ser tratada. Em seguida, essa superfície lixada foi jateada com areia para dar rugosidade, aumentando o coeficiente de absorção da energia do laser.



**Figura 4.5** – Corte longitudinal do lingote para obtenção das amostras para ensaios experimentais.

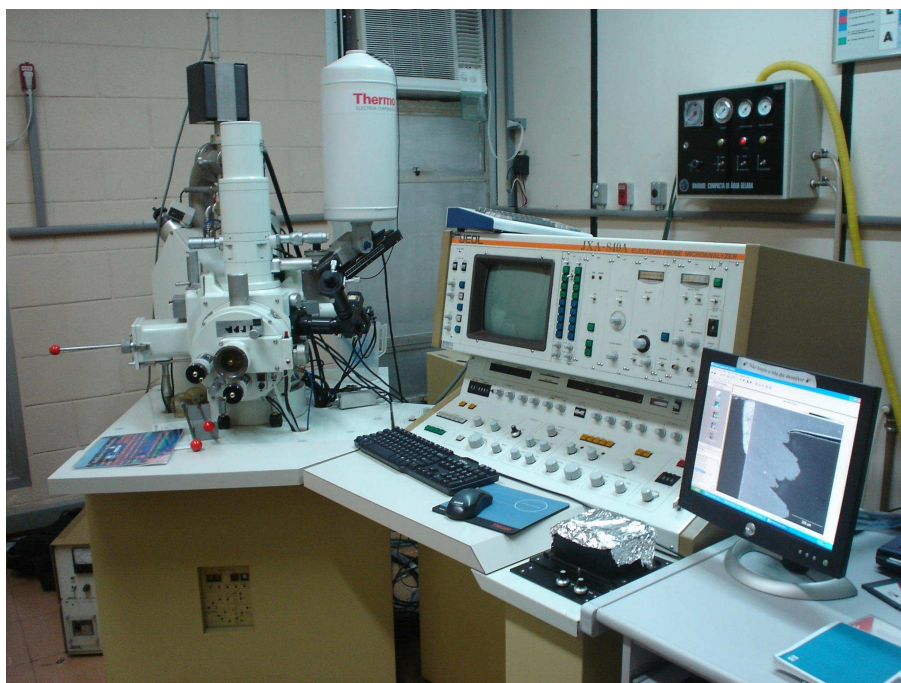
#### **4.4 – Ensaios de tratamento superficial em liga Al-1,5%Fe**

O tratamento superficial de refusão consistiu em deslocar o feixe laser sobre a superfície de amostras da liga Al-1,5%Fe retiradas de lingotes solidificados unidirecionalmente até a completa fusão do material a uma determinada profundidade a partir da superfície. O ensaio foi feito em uma amostra cuja superfície foi submetida previamente a um acabamento por jateamento de areia. As trilhas na superfície foram realizadas nas condições do feixe do laser no foco com 300W de potência e velocidades entre 20 e 100 mm/s e também o feixe laser deslocado 3 mm acima do foco com potência de 600 W e velocidades variando de 20 mm/s a 100 mm/s. A Figura 4.6 mostra um esquema da amostra para o tratamento superficial.



**Figura 4.6** – Representação esquemática das trilhas processadas a laser em uma amostra de Al-1,5%Fe para potência de 600 W defocada e velocidades de 20 a 100 mm/s.

As amostras tratadas a laser foram cortadas e embutidas para observação das microestruturas nas secções transversais à direção de deslocamento do feixe laser. As superfícies das amostras foram submetidas às sequências de lixas (100, 200, 400, 600, 800 e 1200 mesh). Posteriormente foi realizado o polimento utilizando pasta de diamante (granulometrias 6  $\mu\text{m}$ , 1  $\mu\text{m}$ , 0,25  $\mu\text{m}$ ). As amostras da liga Al-1,5%Fe foram atacadas quimicamente com uma solução de HF a 0,5% por 75 s e as microestruturas reveladas foram observadas em microscópio eletrônico de varredura (marca Jeol – Figura 4.7). O reagente de Keller foi outro ataque químico experimentado, mas que não conseguiu evidenciar um contraste microestrutural adequado. As microestruturas reveladas mostram a delimitação da poça fundida nas amostras. As delimitações foram confrontadas com as obtidas por simulação numérica. Com o objetivo de verificar a eficiência dos tratamentos a laser realizados sob o ponto de vista de aumento de dureza, as amostras foram submetidas a ensaios de microdureza Vickers sob carga de 10 gf na poça fundida, enquanto que, no substrato não tratado, a carga foi de 100 gf.

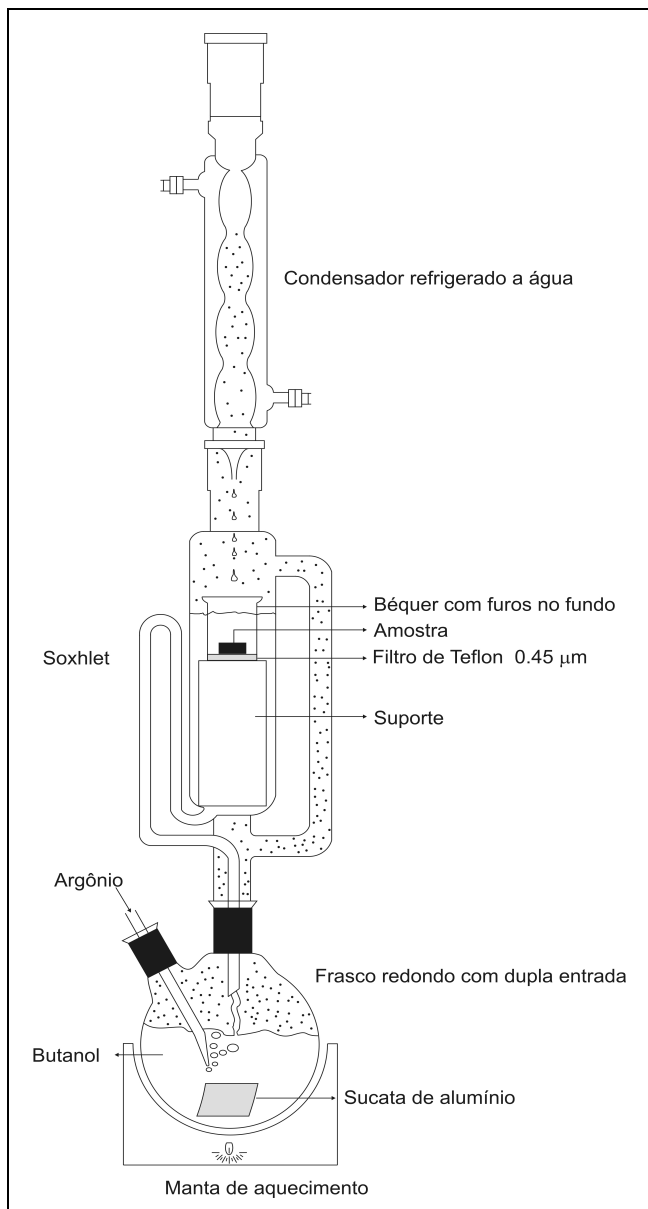


**Figura 4.7 – Microscópio Eletrônico de Varredura (MEV) Jeol**

#### **4.5 – Ensaios para visualização de intermetálicos**

Para a visualização dos intermetálicos tipicamente presentes em ligas Al-Fe, foi utilizada uma variação do método de dissolução de amostras em ligas de alumínio proposto por Simensen [Simensen, 1984]. Neste método, a matriz composta pela fase pobre em soluto é dissolvida, evidenciando o intermetálico.

Foi montado um equipamento em vidro Pyrex (Figura 4.8) constituído por um balão de destilação de fundo chato com junta 24/40 e volume 500 mL, um tubo extrator Soxhlet com juntas para balão 24/40 e condensador 55/50 com volume 500 mL, condensador grande com junta 55/50 para Soxhlet e cadinho de Gouche forma baixa capacidade (30 mL) com placa porosa com porosidade média de 10 a 15  $\mu\text{m}$ , sendo o diâmetro do disco sinterizado de 25 mm. A amostra da liga de Al-Fe com massa entre 3 a 5 g foi parcialmente dissolvida em 1-butanol (álcool butílico p.a) sob atmosfera de argônio. Após dissolução, o butanol e os compostos butoxilados de alumínio foram filtrados em um filtro de Teflon com diâmetro de poro 0,45  $\mu\text{m}$ , com o auxílio de uma bomba de vácuo.



**Figura 4.8** - Dispositivo utilizado para dissolução de alumínio em 1-butanol – esquema e foto

Os passos para a dissolução da matriz de alumínio são:

1. Destilar por 2 vezes o 1-butanol sob atmosfera de argônio para eliminar a água eventualmente presente no butanol. Nessa fase não é necessário colocar o sistema de filtragem. O sistema de destilação funciona de modo contínuo, pois quando o nível do butanol condensado atinge o topo do sifão do soxhlet, acontece o sifonamento e o butanol retorna ao vaso inferior. A

bi-distilação é fundamental, pois caso contrário, devido à presença de água no butanol, haverá a formação de uma grande quantidade de compostos butoxilados, o que proporcionará imagens dos intermetálicos de baixa qualidade;

2. Desligar o fluxo de argônio, o condensador e o sistema de aquecimento;
3. Inserir a unidade de filtração no dispositivo;
4. Iniciar o sopro de argônio dentro do dispositivo;
5. Ligar a água de refrigeração do condensador;
6. Ligar a manta de aquecimento. A destilação inicia-se lentamente a 117°C;
7. O alumínio começa a ser dissolvido lentamente pela reação com o butanol;
8. Prosseguir com a dissolução até que a altura da amostra seja reduzida a 1/3 da altura inicial. Nessa fase é importante controlar a velocidade da reação de dissolução que vai aumentando com o tempo, ligando-se e desligando-se o aquecimento, para que não haja excesso de agitação devido à liberação de hidrogênio e com isto evitar a quebra das estruturas dos intermetálicos;
9. Parar o processo de dissolução;
10. Remover o cadinho com a amostra e o filtro do dispositivo;
11. Filtrar a solução residual com o auxílio de uma bomba de vácuo;
12. Cuidadosamente extrair a amostra parcialmente dissolvida e a membrana de filtro, a fim de levá-las para análise no MEV.

## Capítulo 5

### Resultados Numéricos, Experimentais e Discussões

#### 5.1 – Considerações iniciais

Os resultados das simulações numéricas são comparados com os resultados dos ensaios experimentais da região refundida superficialmente a laser para a liga Al-1,5%Fe. As amostras processadas em diferentes velocidades de tratamento atingem diferentes dimensões de poças fundidas, e são comparadas com resultados obtidos pelas simulações.

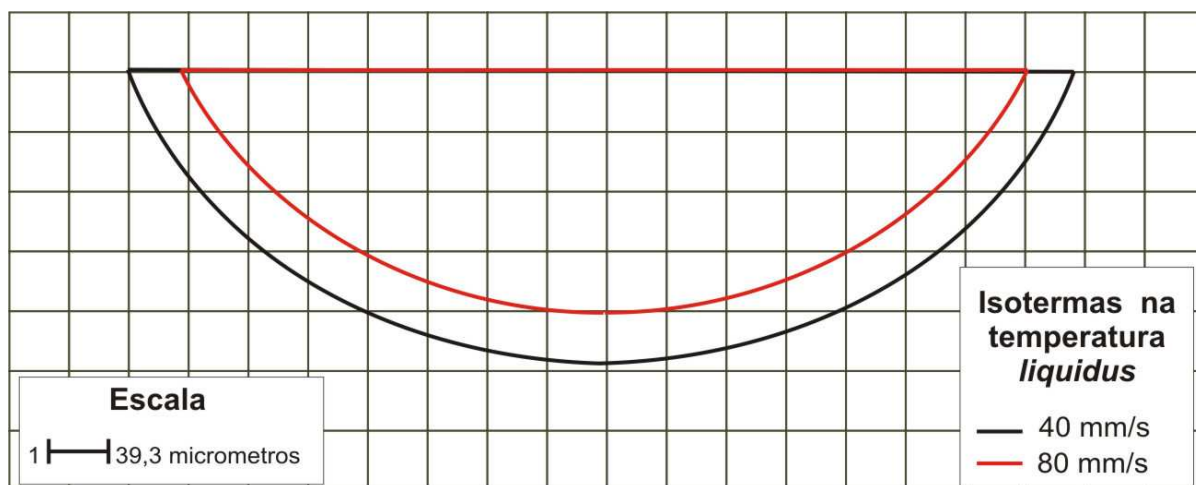
São apresentados resultados experimentais referentes à variação microestrutural na zona tratada e não tratada e seus efeitos sobre as propriedades mecânicas, como limite de resistência à tração, limite de escoamento, alongamento específico e dureza.

#### 5.2 – Resultados numéricos

Um parâmetro importante de entrada do modelo matemático é a absorção de energia proveniente do feixe laser pela superfície da amostra. Dados experimentais sobre coeficientes de absorção de ligas metálicas são raros na literatura, além deste fator ser influenciado fortemente pelo acabamento superficial. A partir do gráfico da refletividade do alumínio puro, proposto por [Ujihara, 1971], é utilizado um coeficiente de absorção para a liga Al-1,5%Fe no valor de 37% de absorção nas simulações numéricas realizadas. A Figura 5.1 mostra a delimitação da isoterma *liquidus* pela simulação numérica no ANSYS para as velocidades de deslocamento do feixe laser



de 40 e 80 mm/s, ambas com potência do feixe de 600 W e com o laser operando 3 mm acima do foco.

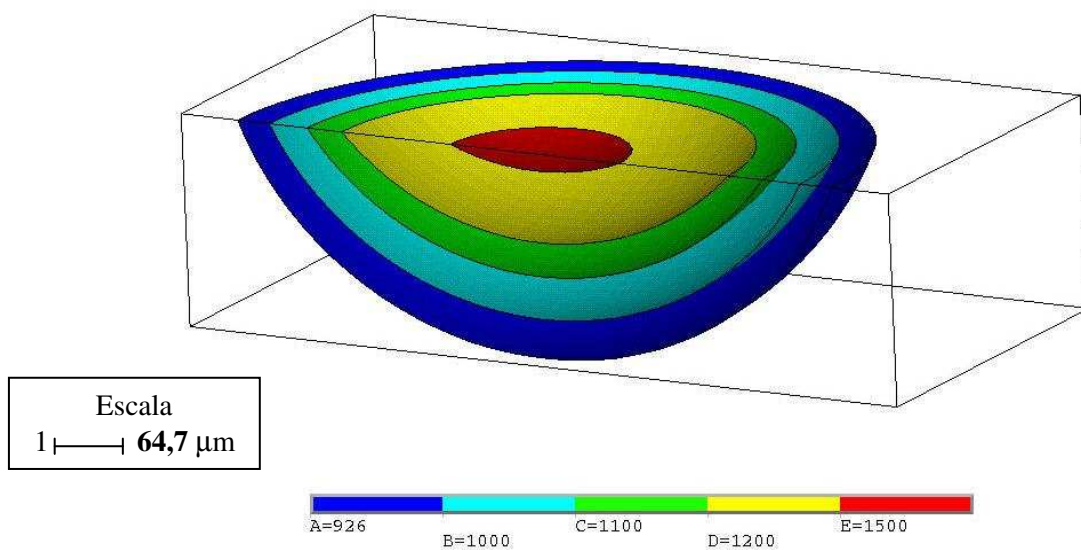


**Figura 5.1** – Comparação entre isotermas *liquidus* simuladas para  $P = 600\text{W}$  com laser operando defocado a velocidades de 40 e 80 mm/s.

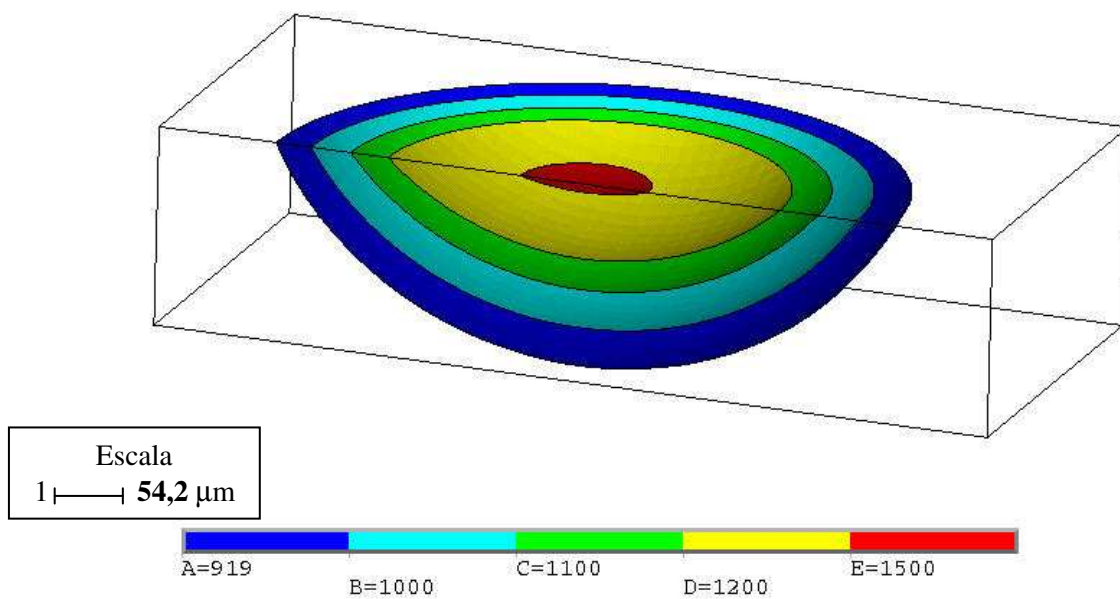
Observa-se, na Figura 5.1, que as dimensões da zona fundida (largura e profundidade da poça) referente à velocidade de 80 mm/s são menores do que para a velocidade de 40 mm/s, fato justificado pelo maior tempo de interação do laser com a superfície no caso de menor velocidade.

As Figuras 5.2 e 5.3 mostram algumas isotermas espaciais em forma de camadas geradas pelo programa computacional ANSYS. A influência da velocidade de deslocamento do feixe é observada nas isotermas, onde fica evidente que há maior aquecimento do material para a menor velocidade de deslocamento do feixe.



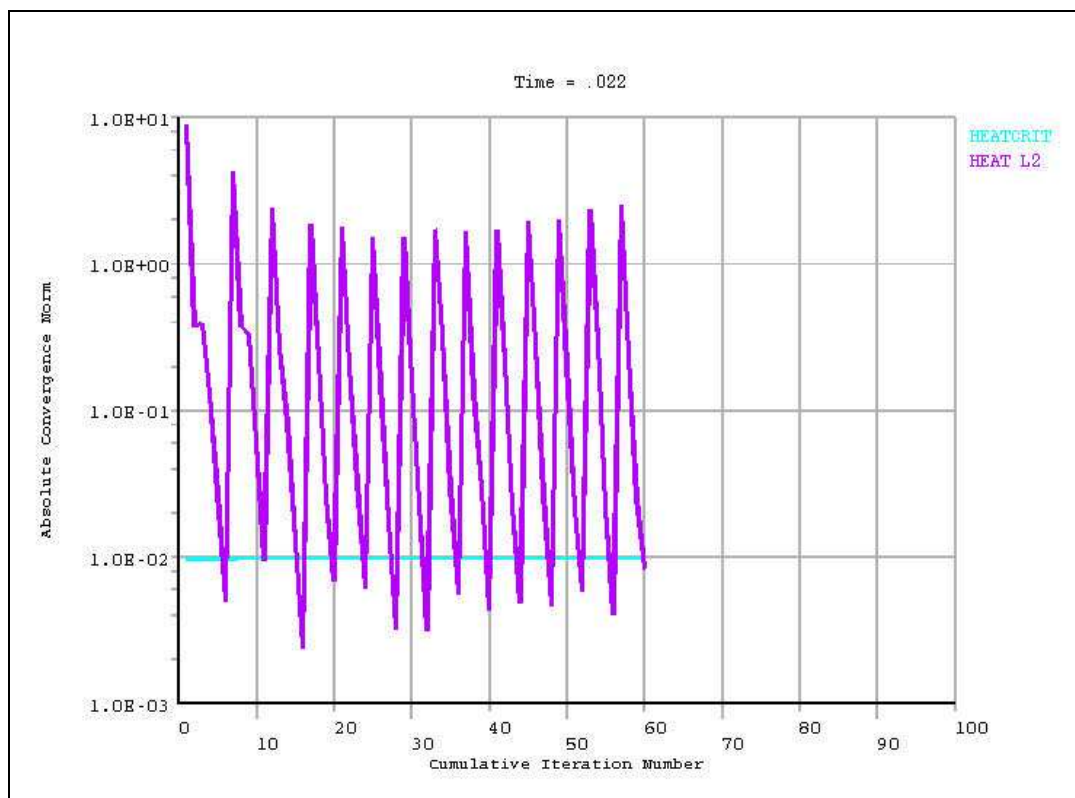


**Figura 5.2** – Isotermas espaciais para velocidade de 40 mm/s e potência de 600 W no instante que o laser pára de agir sobre a amostra. Os números apresentados na barra colorida são valores de isothermas em K.



**Figura 5.3** – Isotermas espaciais para velocidade de 80 mm/s e potência de 600 W no instante que o laser pára de agir sobre a amostra. Os números apresentados na barra colorida são valores de isothermas em K.

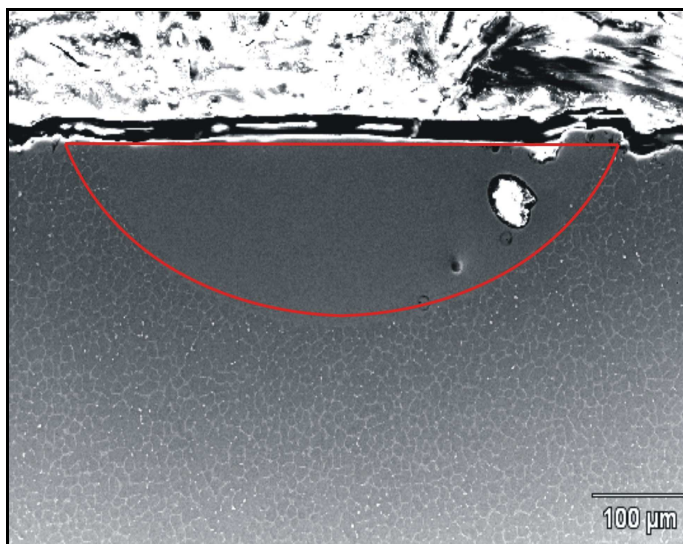
A Figura 5.4 mostra o gráfico de convergência da resolução do método numérico. É observada a estabilidade do modelo pela variação contínua dos pulsos com amplitudes regulares. Quando a amplitude aumenta em relação ao número de iterações, a simulação não converge e parâmetros como tamanho da malha espacial e temporal necessitam ser revistos.



**Figura 5.4** – Gráfico de convergência para simulação via ANSYS

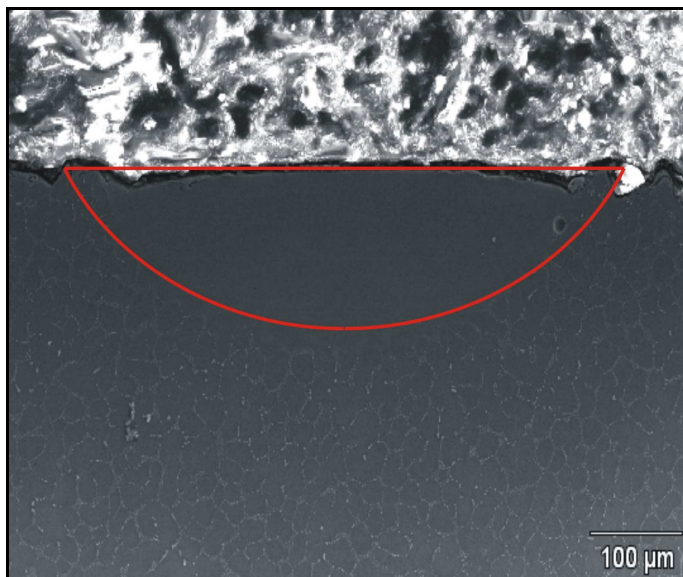
São mostradas, nas Figuras 5.5 e 5.6, para o caso das velocidades de deslocamento do feixe de 40 e 80 mm/s, a delimitação das poças fundidas ajustadas às suas micrografias, utilizando-se para o ajuste, respectivamente, valores de  $K_{ef}$  de 2,7 e 2,5. A velocidade de 40 mm/s proporcionou maior tempo de interação do laser com e, portanto, um efeito convectivo 8% maior em relação ao caso com velocidade de 80 mm/s.

— Previsão da zona fundida pela simulação em ANSYS



**Figura 5.5** – Sobreposição entre a zona fundida simulada e a micrografia obtida por MEV para o laser operando à velocidade de 40 mm/s.

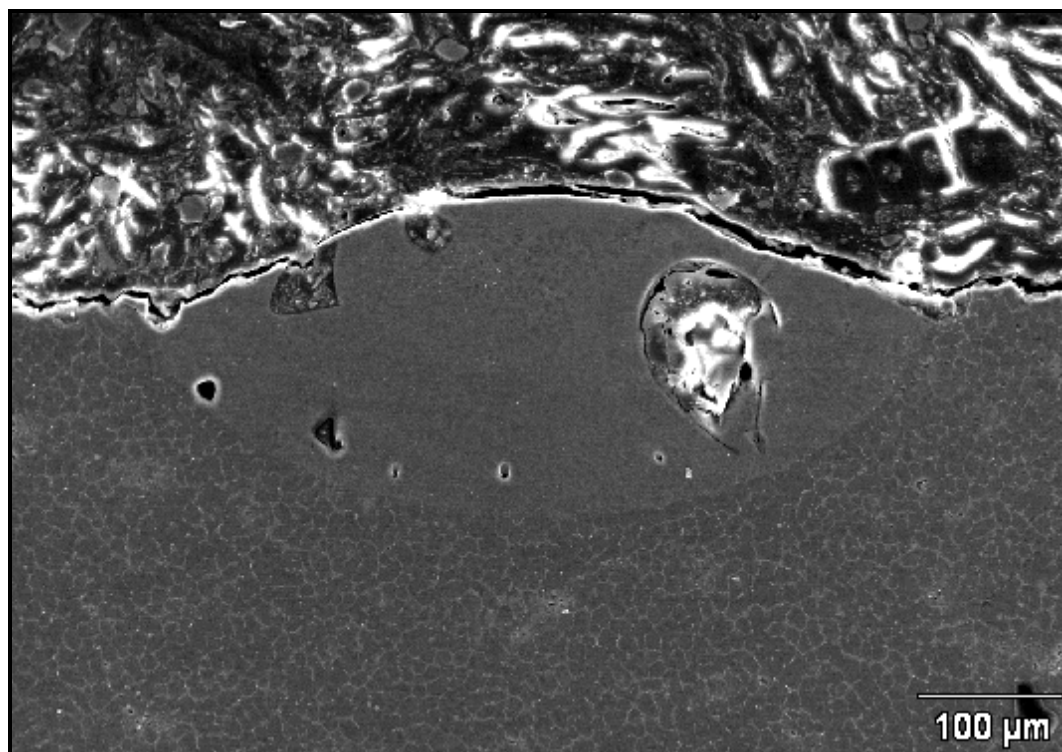
— Previsão da zona fundida pela simulação em ANSYS



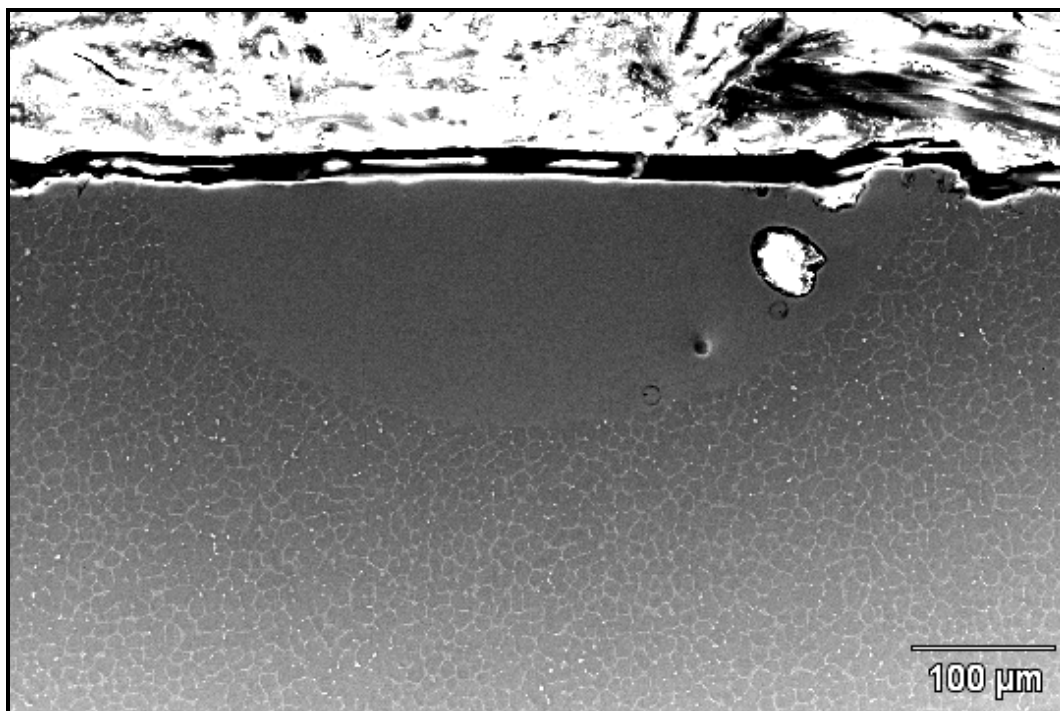
**Figura 5.6** – Sobreposição entre a zona fundida simulada e a micrografia obtida por MEV para o laser operando à velocidade de 80 mm/s.

### 5.3 – Resultados experimentais

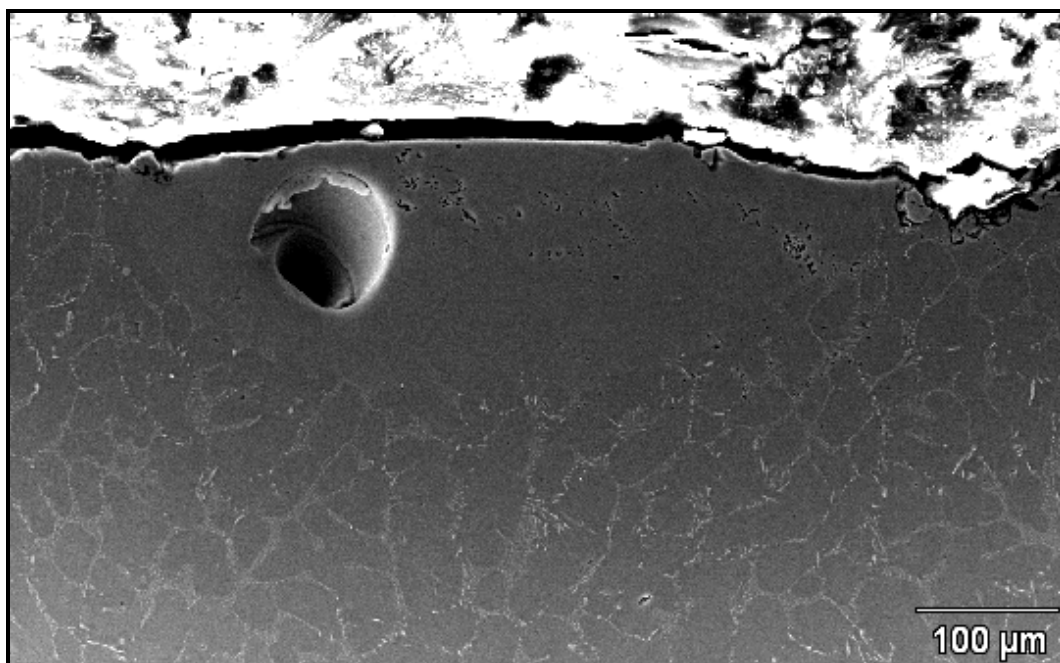
Inicialmente, os parâmetros analisados nos ensaios experimentais foram profundidade e largura da zona fundida. As Figuras 5.7 até 5.11 mostram as micrografias obtidas para as velocidades de deslocamento do feixe laser de 20, 40, 60, 80 e 100 mm/s, respectivamente. Para todas as amostras o feixe operou defocado a 3 mm acima do foco e com potência do feixe laser de 600 W. Nota-se que, na velocidade mais baixa de 20 mm/s (Figura 5.7), há um abaulamento na superfície da zona tratada devido ao tempo de interação excessivo sobre a superfície da amostra, ocasionando uma maior turbulência do metal líquido. Para velocidades maiores isso não ocorre.



**Figura 5.7** - Zona fundida para velocidade de 20 mm/s.

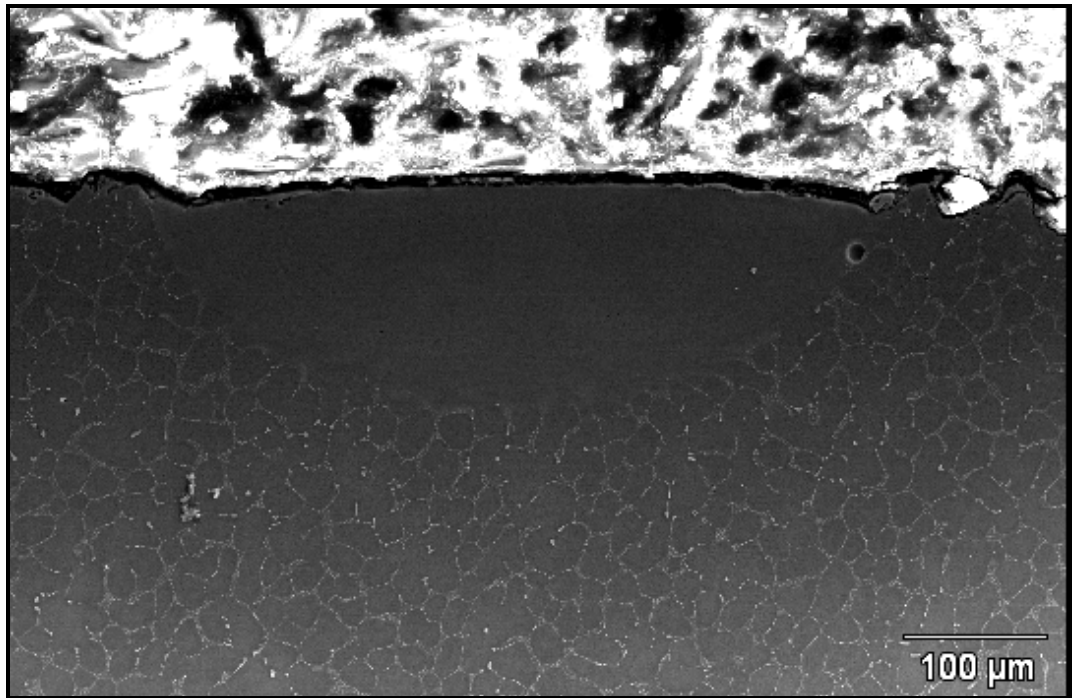


**Figura 5.8** - Zona fundida para velocidade de 40 mm/s.

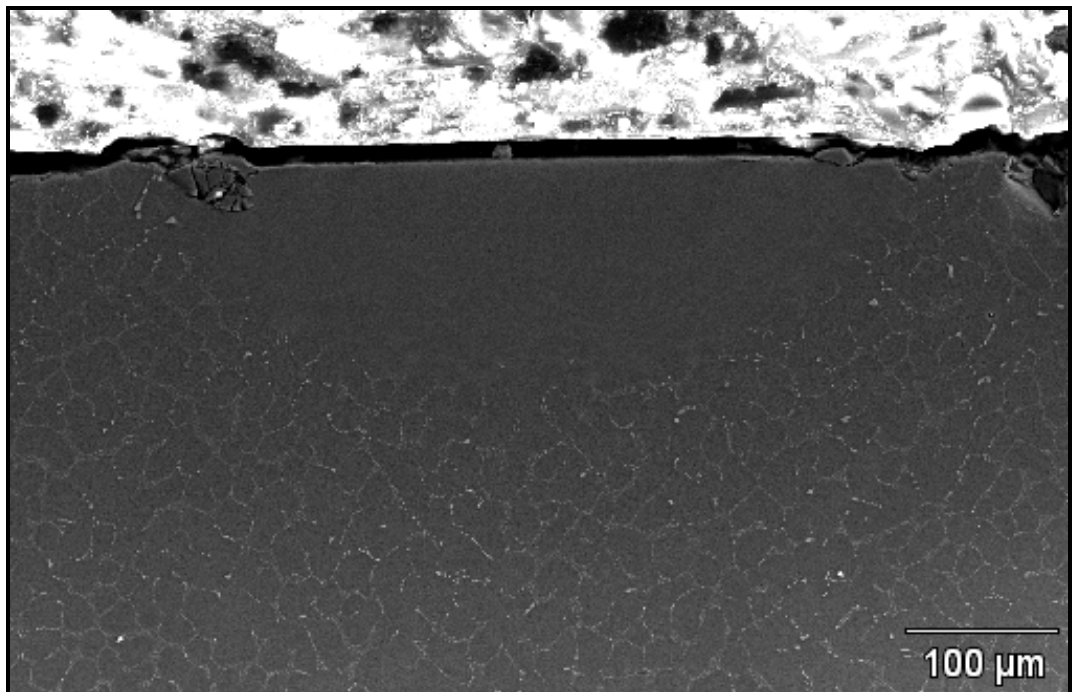


**Figura 5.9** - Zona fundida para velocidade de 60 mm/s.



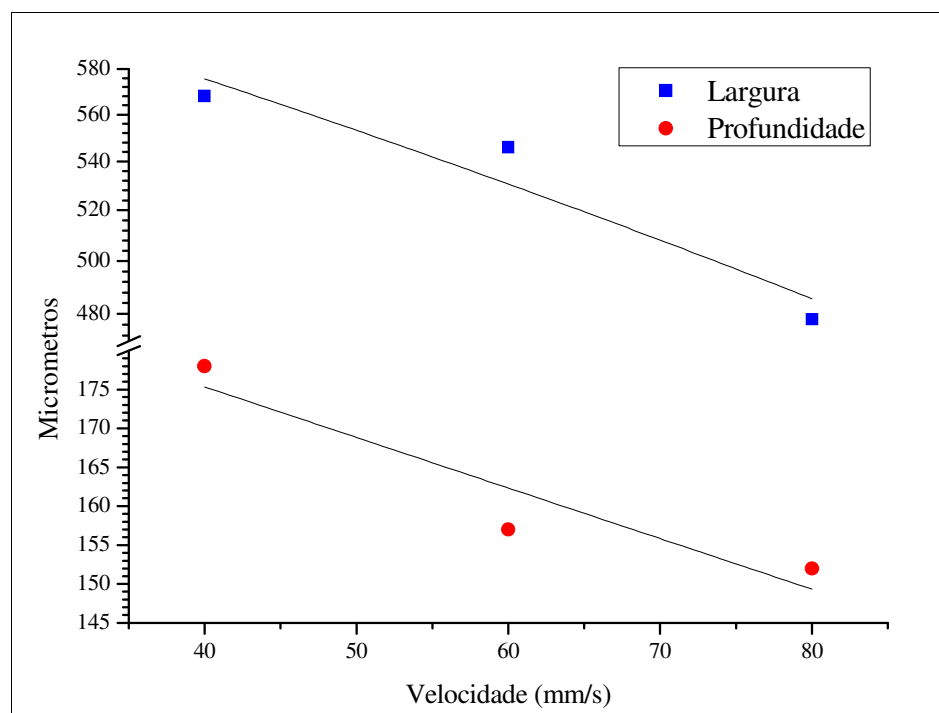


**Figura 5.10** - Zona fundida para velocidade de 80 mm/s.



**Figura 5.11**- Zona fundida para velocidade de 100 mm/s.

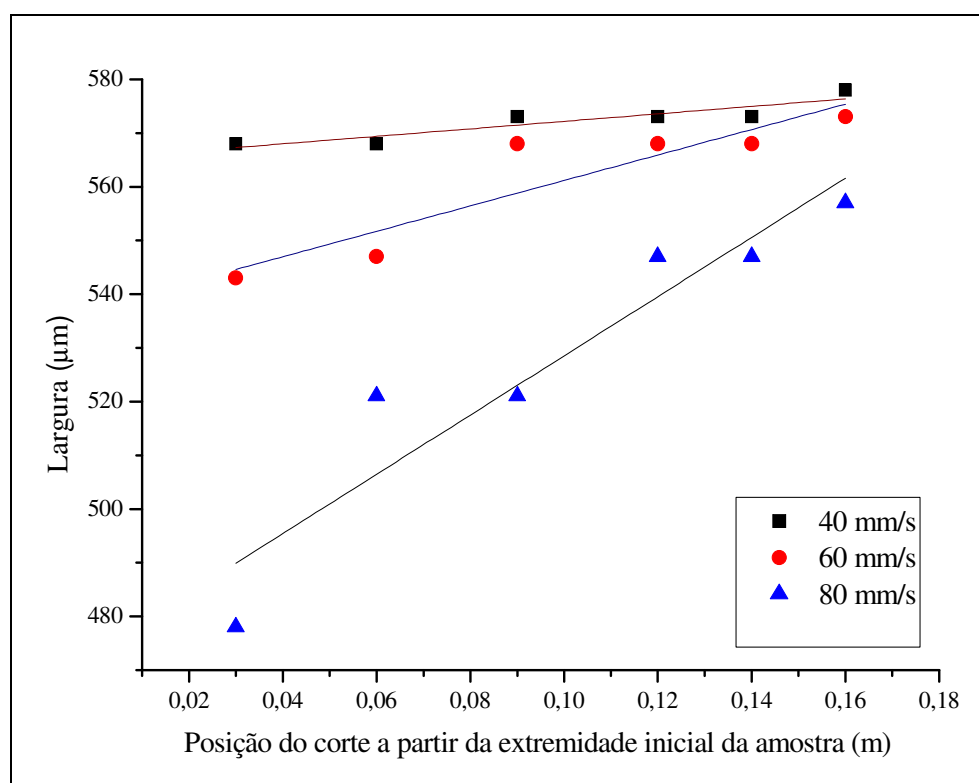
A partir dos resultados experimentais é estabelecida uma correlação entre as dimensões da zona tratada e os parâmetros operacionais do laser. A Figura 5.12 mostra esta correlação, indicando a diminuição da profundidade e largura da zona fundida com o aumento da velocidade de deslocamento do feixe. Isso se deve ao menor tempo de interação entre a radiação laser com a superfície da amostra, previamente indicado pela simulação computacional (Figura 5.1).



**Figura 5.12** – Correlação entre profundidade/velocidade e largura/velocidade para a liga Al-1,5%Fe com potência do laser  $P = 600$  W.

Para uma análise da influência do comprimento da amostra sobre os parâmetros da zona fundida (esquema mostrado na figura 4.6 do capítulo 4), o tratamento a laser foi feito em amostras de lingotes cortados longitudinalmente obtendo-se o maior comprimento possível, de 130 mm aproximadamente. A partir da extremidade inicial da amostra foram feitos 12 cortes com 20 mm de distância entre si. Observou-se que para pontos mais distantes (Figura 5.13), em relação à borda de início do tratamento, a largura da zona tratada aumentava, devido ao calor difundido à frente do deslocamento do feixe laser. Para velocidades de deslocamento laser mais baixas (40 e 60 mm/s) este efeito é pequeno se comparado com velocidades maiores. Para velocidades menores (maior tempo de interação) há um maior tempo para que haja a difusão de

calor à frente do feixe laser e pode ser considerado que a quantidade de calor absorvida pelo substrato ocorre numa taxa próxima à quantidade de calor difundida à frente do feixe laser. Já para o caso de altas velocidades (80 mm/s) é justamente o contrário. Isto é, não há tempo para que o calor se difunda para o interior do substrato e, portanto, esta parcela contribui, juntamente com parcela de calor quando o feixe laser passa, para o aumento da dimensão da poça. Vê-se que, para tratamentos onde seja essencial a manutenção de maior regularidade na largura da poça, a velocidade de 40mm/s é a única indicada.

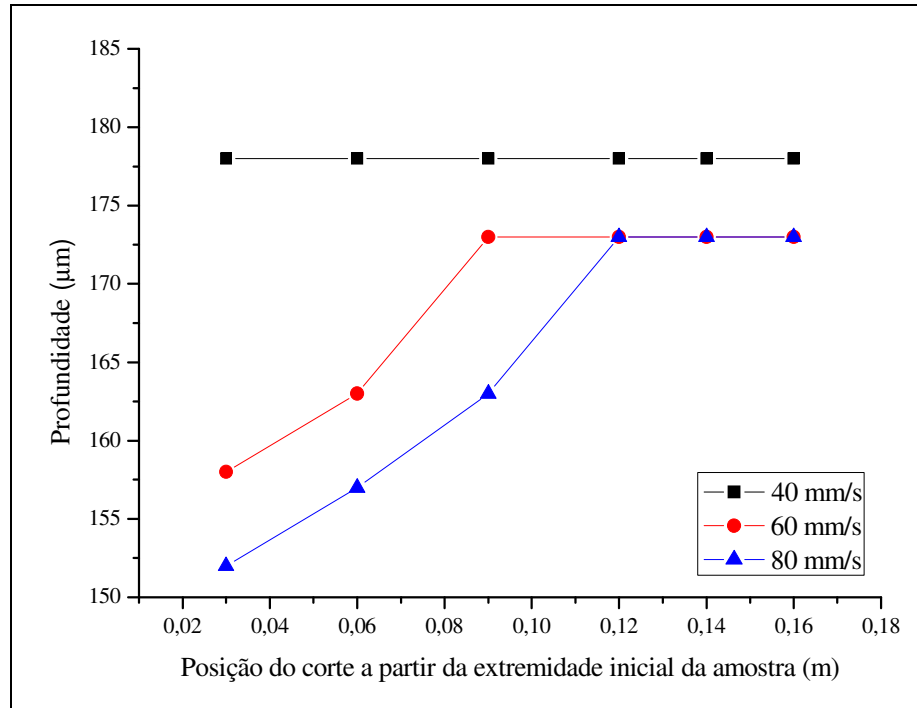


**Figura 5.13** – Correlação largura/posição para a liga Al-1,5%Fe com potência do laser  $P = 600W$  e com velocidades de 40, 60 e 80 mm/s.

Para a profundidade observou-se que, para pontos mais distantes do início do tratamento, essa dimensão aumentava e estabilizava após um certo ponto, no caso das velocidades maiores 60 e 80 mm/s, e era estável para o caso de velocidade menor, a de 40mm/s. Os resultados são apresentados na Figura 5.14. Em relação à análise anterior feita para a variação da largura da poça, a análise em relação à profundidade é semelhante, mas difere num aspecto: considerando-se que uma maior quantidade de energia é aplicada na região central do feixe, devido ao seu formato

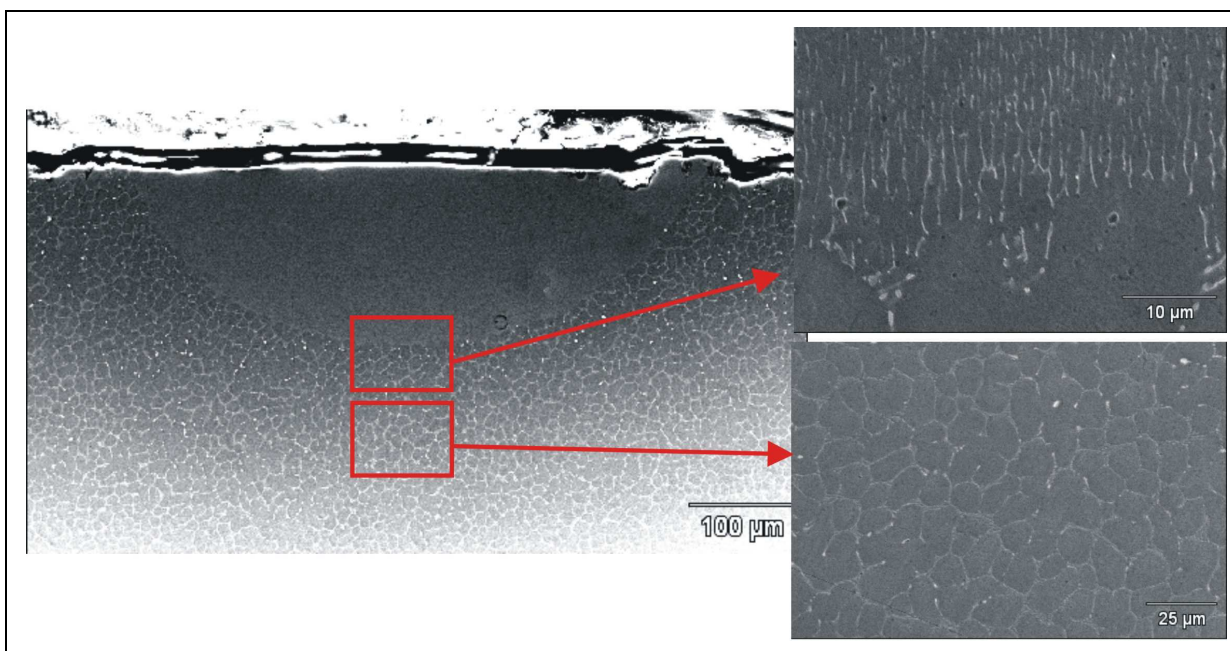


gaussiano, é alcançado um comportamento de regime permanente com relação à profundidade, mais rapidamente em comparação à largura, e que provavelmente apareceria se a amostra tratada fosse mais comprida.



**Figura 5.14** – Curvas profundidade/posição para a liga Al-1,5%Fe com potência do laser  $P = 600 \text{ W}$  com feixe operado a 40, 60 e 80 mm/s.

A micrografia das amostras revela uma estrutura de morfologia completamente celular e refino da microestrutura na região fundida. Devido ao fato de o substrato estar agindo como um molde de contato térmico perfeito, pois é composto do mesmo material da região fundida, e estar à temperatura ambiente, a resolidificação que se segue se dá a altas taxas de resfriamento, o que explica esse refino. A Figura 5.15 mostra esse refino em ampliações da região tratada e não tratada.



**Figura 5.15** – Ampliações da zona tratada e não tratada.

A medida dos espaçamentos celulares foi realizada nas duas regiões mostrando um refino de 10 vezes aproximadamente no tamanho da célula dentro da zona tratada, em relação ao substrato. Para a zona não tratada, a média do espaçamento foi de 13  $\mu\text{m}$ , variando de 12,4  $\mu\text{m}$  a 14,3  $\mu\text{m}$ , enquanto que, na zona tratada, a média foi de 1,4  $\mu\text{m}$ , variando de 1,03  $\mu\text{m}$  a 1,8  $\mu\text{m}$ .

O refino da microestrutura reflete diretamente nas propriedades mecânicas do material. Ensaio próprio de microdureza Vickers na poça fundida determinaram um valor médio de 58HV, enquanto que o substrato teve o valor médio de dureza de 32HV.

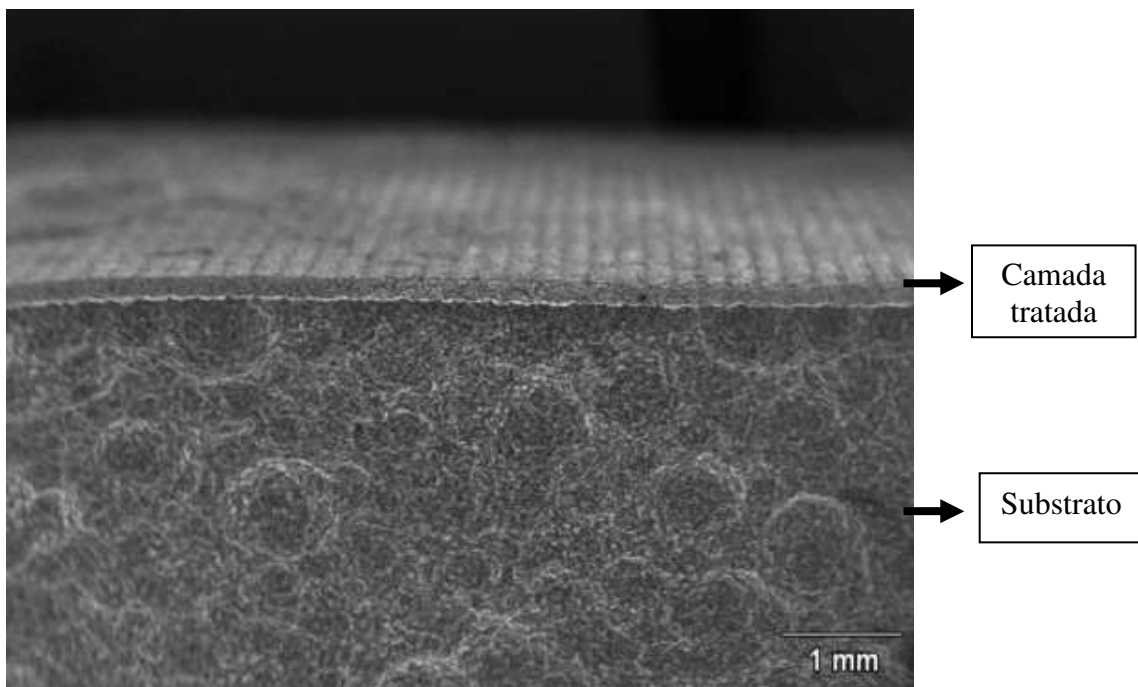
Para a estimativa do limite de resistência à tração, limite de escoamento e alongamento específico, utilizaram-se as equações experimentais, indicadas na Tabela 6, propostas por Goulart e colaboradores para ligas hipoeutéticas Al-Fe [Goulart *et al*, 2009]. Nota-se que há um aumento considerável em todas estas propriedades, apresentadas na Tabela 6, que pode ser justificado pelo grau de refino da microestrutura induzido pelo tratamento laser e uma redistribuição mais homogênea das partículas de intermetálicos no interior da poça fundida.

**Tabela 6** – Propriedades mecânicas para a zona tratada e não tratada para a liga Al-1,5%Fe.

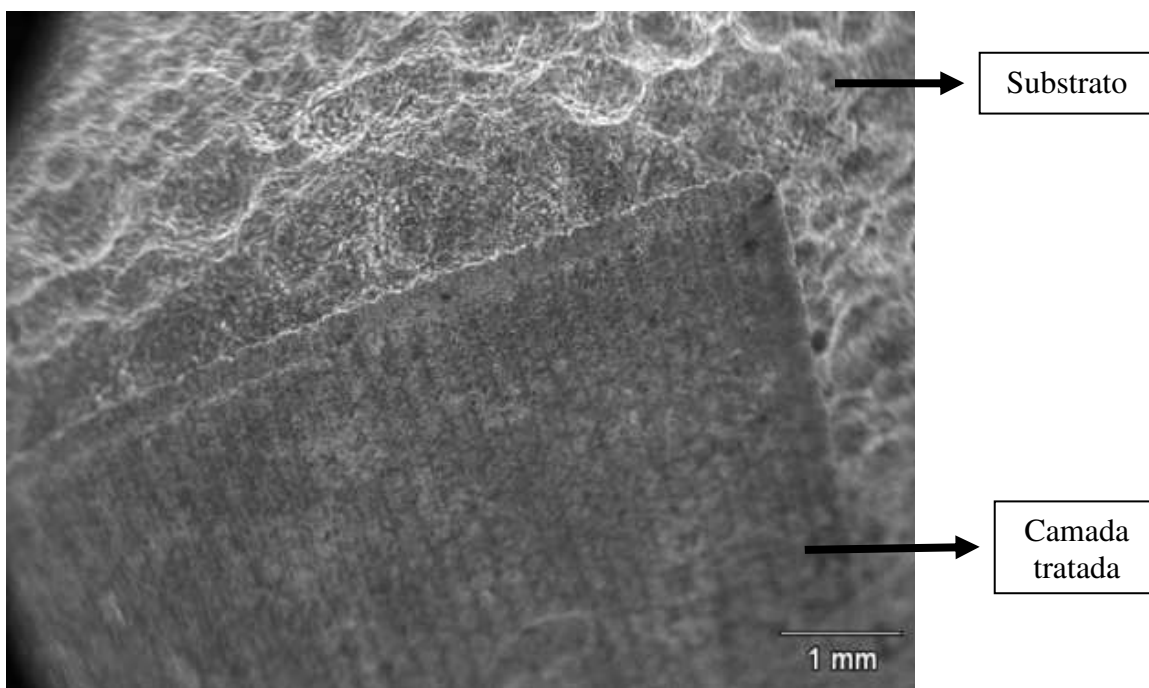
	Dureza (HV)	LRT (MPa) $\sigma_u = 62,8 + 98,3 \lambda^{-0,5}$	LE (MPa) $\sigma_y = 43,8 + 21,3 \lambda^{-0,5}$	AE (%) $\delta = 18 + 20 \lambda^{-0,5}$
Zona não tratada	32	90,06	49,70	23,50
Zona tratada	58	145,80	61,80	34,90

### 5.3.1 – Visualização dos intermetálicos

Aplicando a metodologia descrita no Capítulo (4) sobre a dissolução parcial de amostras de ligas de alumínio, foram obtidas as imagens das Figuras 5.16 a 5.20, por MEV. Para se realizar a dissolução parcial das amostras de Al-1,5%Fe, tratou-se toda a superfície a laser com sobreposição de tratamento em 50% em cada trilha, com objetivo de se obter duas camadas com microestruturas distintas. A Figura 5.16 mostra um corte transversal e a Figura 5.17 uma vista superior da amostra após o processo de dissolução parcial. Observa-se que houve um processo corrosivo mais acentuado no substrato do que na camada tratada, o que evidencia uma melhora na resistência à corrosão devido ao tratamento de refusão superficial a laser.



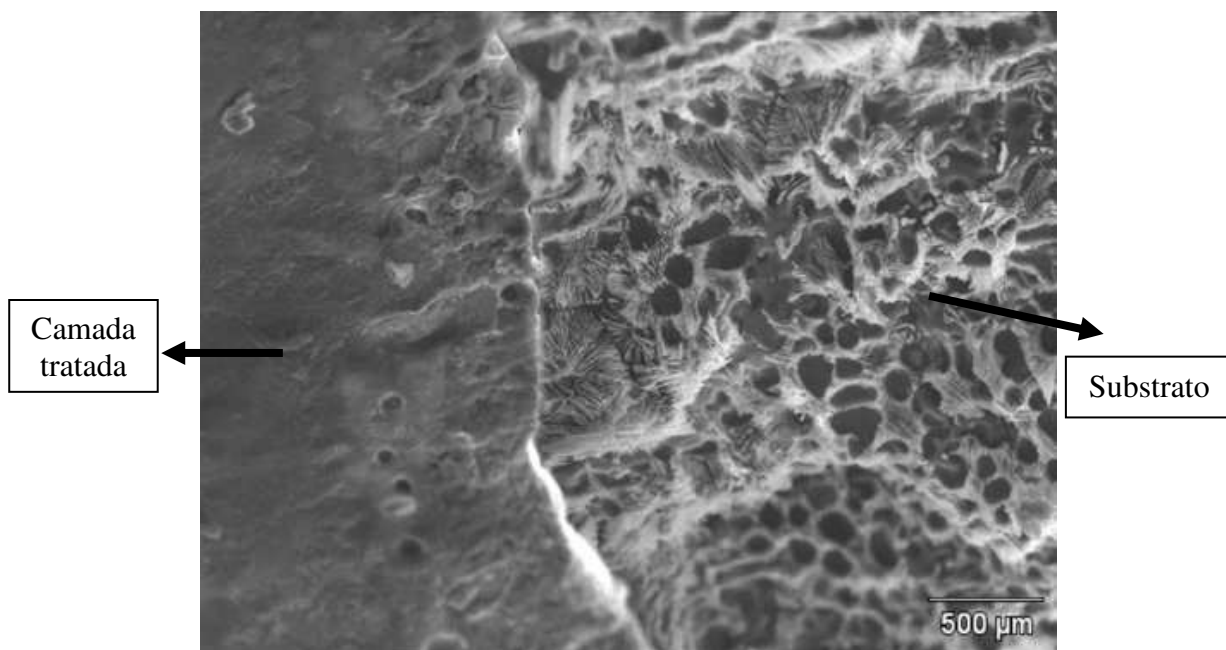
**Figura 5.16** – Corte transversal da amostra após o processo de dissolução parcial em butanol.



**Figura 5.17** – Vista superior da amostra após o processo de dissolução parcial em butanol.

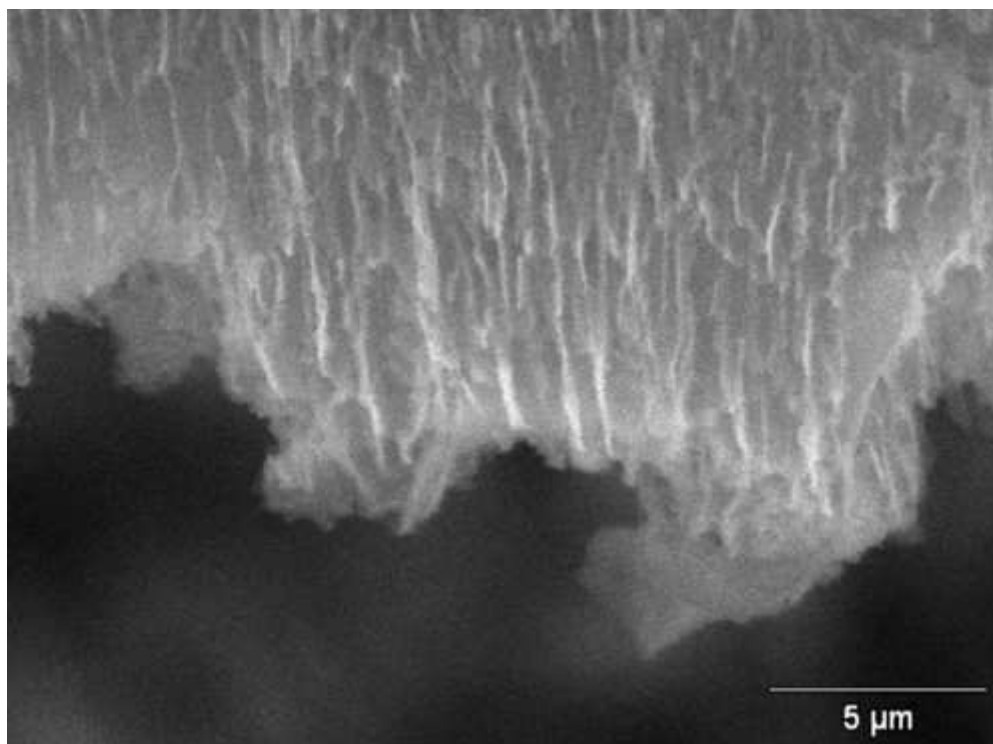
Uma ampliação mostrada na Figura 5.18 indica que a camada tratada a laser, localizada num primeiro plano, praticamente não sofreu corrosão, enquanto que o substrato, localizado no

segundo plano (fundo) perdeu uma quantidade de massa via dissolução por causa da reação com o butanol. Observa-se que, no substrato, a fase rica em alumínio foi dissolvida, evidenciando os intermetálicos de Al-Fe.

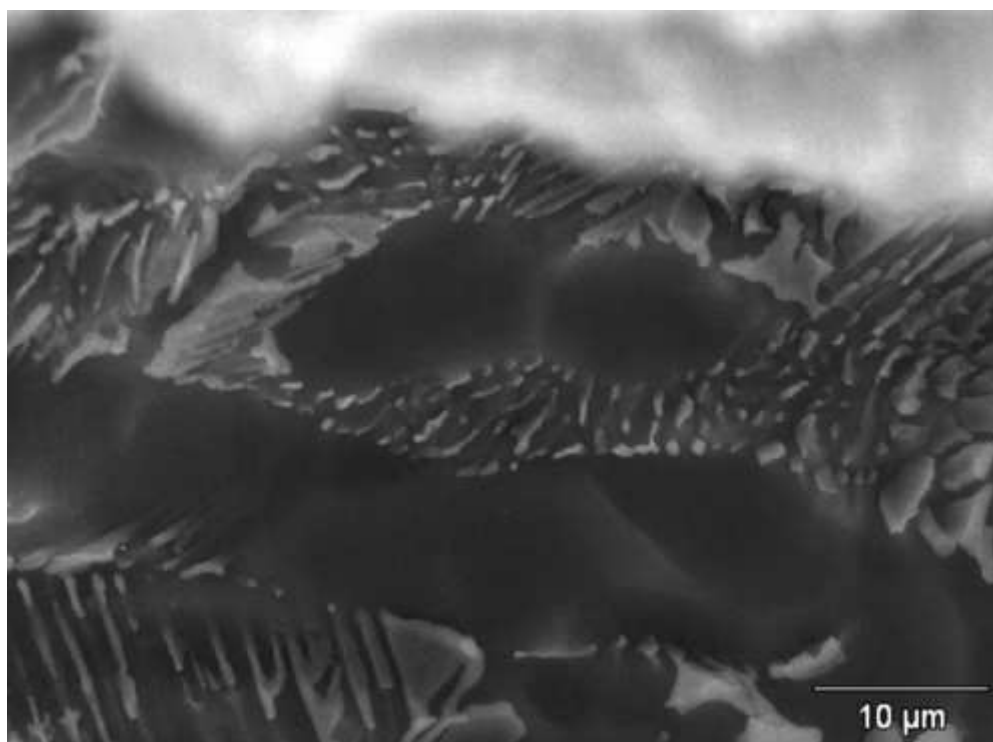


**Figura 5.18** – Ampliação da região de interface substrato/camada tratada a laser após o processo de dissolução parcial.

As Figuras 5.19 e 5.20 mostram os formatos diferentes de intermetálicos do substrato e da camada refundida. Observa-se que os intermetálicos se distribuem de forma mais homogênea na camada tratada a laser em relação ao substrato, podendo-se concluir que isto favorece uma melhoria nas propriedades mecânicas e na resistência à corrosão.



**Figura 5.19** – Visualização dos intermetálicos na camada refundida a laser.



**Figura 5.20** – Visualização dos intermetálicos no substrato.

## **Capítulo 6**

### **Conclusões e Sugestões para Trabalhos Futuros**

#### **6.1 – Conclusões**

Os resultados obtidos a partir das simulações numéricas aplicadas ao processo de tratamento superficial por refusão a laser, bem como os ensaios experimentais realizados em amostras de uma liga Al 1,5%Fe, permitem que sejam extraídas as seguintes conclusões:

- 1- A introdução de sub-rotinas ao programa computacional ANSYS no sentido de torná-lo aplicável à análise numérica do processo de refusão a laser, mostra-se eficiente, o que evidencia a viabilidade de sua aplicação para esse tipo de simulação.
- 2- A análise numérica computacional desenvolvida no trabalho está devidamente comparada com resultados experimentais e mostra-se confiável na simulação de parâmetros dimensionais da zona tratada por refusão superficial a laser (largura e profundidade da poça líquida) em função de parâmetros de operação do equipamento laser, tais como potência e velocidade de deslocamento do feixe laser.
- 3- Nas condições experimentais examinadas, os resultados relativos às dimensões da região tratada a laser de amostras de liga Al-1.5%Fe evidenciou-se que para conseguir-se uniformidade de largura e profundidade da poça ao longo do comprimento da amostra a

velocidade de deslocamento do feixe laser não deve ser maior que 40 mm/s. Por outro lado, verifica-se que, para velocidades de 20 mm/s, a turbulência de caráter convectivo induzido pelo maior tempo de interação laser/amostra não permite a estabilização da superfície da poça líquida.

- 4- A análise da microestrutura das amostras no substrato e na região tratada das amostras de liga Al-1,5%Fe evidencia que, em ambos os casos, a morfologia observada é completamente celular. A grande diferença revela-se no grau de refino da microestrutura da região refundida a laser, cujo espaçamento celular médio é cerca de 10 vezes menor do que o determinado no substrato (de 13  $\mu\text{m}$  para 1,4  $\mu\text{m}$ ).
- 5- Os ensaios experimentais em amostras da liga Al-1,5%Fe comprovam a eficácia do tratamento superficial a laser com relação ao aumento das propriedades mecânicas da região tratada em relação ao substrato. Medidas experimentais apontam valor médio de 58 HV na região tratada enquanto que o substrato apresentam valor médio de dureza de 32 HV. Estimativas de limite de resistência à tração e limite de escoamento na região tratada indicaram, respectivamente, aumentos de 60% e de 24 % em relação aos valores do substrato.
- 6- Os ensaios de dissolução parcial de amostras da liga Al-1,5%Fe com butanol para evidenciar as partículas de intermetálico Al-Fe, mostram através da análise qualitativa das microestruturas obtidas que na região tratada a resistência à corrosão, revela-se maior do que a observada no substrato, dando indicações do potencial do tratamento superficial por refusão a laser no aumento da resistência à corrosão de ligas Al-Fe.

## **6.2 – Sugestões para trabalhos futuros**

Em face aos resultados obtidos nesse trabalho e das conclusões formuladas, o autor sugere os seguintes tópicos para pesquisas futuras:



- 1- Realizar ensaios experimentais para recobrimento completo da superfície do material, com simulação numérica e determinação experimental de parâmetros adequados de operação do feixe laser, analisando os efeitos da sobreposição parcial de cada trilha;
- 2- Realizar uma análise completa do processo após a refusão superficial a laser de ligas Al-Fe, isto é, a consequente solidificação, determinando variáveis térmicas de solidificação como taxa de resfriamento, velocidade de deslocamento da isoterma *liquidus* e gradiente térmico.
- 3- Realizar ensaios de corrosão na camada refundida superficialmente a laser de ligas Al-Fe para avaliações qualitativas e quantitativas de potencial de resistência à corrosão da região tratada;
- 4- Identificar o tipo de intermetálico formado no tratamento de refusão superficial a laser de ligas Al-Fe.

## Referências bibliográficas

### Artigos

APPS, R. L., MILNER, D. R.. A note on the behavior of liquid metal under the arc. **British Welding Journal**, pp. 348-350, 1963.

ALLEN, C.M.; O'REILLY, K.A.Q.; CANTOR, B.; EVANS, P.V.. Intermetallic Phase Selection in 1XXX Al Alloys, **Progress in Materials Science**, vol. 43, pp. 89-170, 1998.

ARNOLD, G. S. Absorptivity of several metals at 10,6  $\mu\text{m}$ : empirical expressions for the temperature dependence computed from Drude theory. **Applied Optics**, v. 23, n. 9, pp. 1434-1436, 1984.

BASU, B. & DATE, A. W.. Numerical study of steady state and transient laser melting problems - I. Characteristics of flow field and heat transfer. **International Journal Heat Mass Transfer**, v. 33, n. 6, pp. 1149-1163, 1990.

BASU, B. & DATE, A. W. Rapid solidification following laser melting of pure metals – I. Study of flow field and role of convection. **International Journal Heat Mass Transfer**, v. 35, n. 5, pp. 1049-1058, 1992.

BELGACEM, H.; HUSSEY, B. W. & GUPTA, A. Temperature distribution during heating using a high repetition rate pulsed laser. **Journal of Applied Physics**, v. 69, n. 5, pp. 2871-2876, 1991.

BERGMANN, H. W. et al. Industrial applications of surface treatments with high power lasers. **Materials Science Forum**, v. 163-165, pp. 377-404, 1994.

CHEUNG, N., CRUZ, K.S., CANTÉ, M.V., SPINELLI, J.E., IERARD, M.C.F., GARCIA, A. Numerical and experimental analysis of rapidly solidified laser remelted Al 5wt pct Ni surfaces, (2009). (a publicar).

CHEUNG, N., PINTO, M. A., IERARDI, M. C. F., GARCIA, A. Aplicação da modelagem matemática no processo de tratamento superficial de refusão a laser em aços **In: Congresso em Ciência de Materiais do Mercosul**, Joinville – SC. pp. 669-678. CD-ROM, 2002

CHEUNG, N., PINTO, M. A., IERARDI, M. C. F., GARCIA, A. Development and experimental validation of a numerical thermal model for the evaluation of the depth of laser treated zone in the laser transformation hardening process. **Materials Science Forum**, 2002 A.

CHEUNG, N., PINTO, M. A., IERARDI, M. C. F., GARCIA, A. Tratamento superficial de refusão a laser em aços: modelagem matemática e análise experimental. **In: XV Congresso da Sociedade Ibero-Americana de Electroquímica**, Évora-Portugal, CD-ROM, 2002 B.

CLINE H. E. & ANTHONY, T. R. Heat treating and melting material with a scanning laser or electron beam. **Journal of Applied Physics**, v. 48, n. 9, pp. 3895-3900, 1977.

DAMBORENEA, J.. Surface modification of metals by high power lasers. **Surface & Coatings Technology**. N. 100-101, pp. 377-382, 1998.

DAUSINGER, F & SHEN, J.. Energy coupling efficiency in laser surface treatment. **ISIJ International**, v. 33, n. 9, pp. 925-933, 1993.

DAVIS, M. et al. Heat hardening of metal surfaces with a scanning laser beam. **Applied Physics**, v.19, pp.1981-1997, 1986.

DAVIES, G. J., Laki, R. S.; Saucedo, I. G., Shin, Y. K.. Heat transfer models and their application to continuous casting. **Perspectives in Metallurgical Development**, University of Sheffield, Sheffield, p. 123-130, 1984.

DEMOL VAN OTTERLOO, J. L.; BAGNOLI, D. & HOSSON, J. TH. M.. Enhanced mechanical properties of laser treated Al-Cu alloys: a microstructural analysis. **Acta Metallurgica**, v: 43, n. 7, pp. 2649-2656, 1995.

FESTA, R.; MANCA, O. & NASO, V.. Simplified thermal models in laser and electron beam surface hardening. **International Journal Heat Mass Transfer**, v. 33, n. 11, pp. 2511-2518, 1990.

FRENK, A. et al. In-situ technique for measuring the absorption during laser surface remelting. **Metallurgical Transactions B**, v. 22, pp. 139-141, 1991.

GILL, S. C.; ZIMMERMAN, M. & KURZ, W. Laser resolidification of the Al-Al<sub>2</sub>Cu eutetic: the coupled zone. **Acta Metallurgica et Materialia**, v. 40, n. 11, pp. 2895-2906, 1992.

GILL, S. C. & KURZ, W. Rapidly solidified Al-Cu alloys - II. calculation of the microstructure selection map. **Acta Metallurgica et Materialia**, v.43, n.1, pp.139-151, 1995.

GOULART, P.R., CRUZ, K.S., SPINELLI, J.E., FERREIRA, I.L., CHEUNG, N., GARCIA, A.. Cellular Growth During Transient Directional Solidification of Hypoeutectic Al-Fe Alloys. **Journal of Alloys and Compounds**, v. 470, pp.589-599, 2009(A).

GOULART, P.R., LAZARINE ,V.R., LEAL, C. V., SPINELLI, J.E., CHEUNG, N., GARCIA, A.. Investigation of Intermetallics in Hypoeutectic Al-Fe Alloys by Dissolution of the Al Matrix Intermetallics, **Journal of Alloys and Compounds** v. 17, pp. 753-761, 2009(B).

GOULART, P.R., SPINELLI, J.E., FERREIRA, I.L., GARCIA, A.. The effects of Cell Spacing and Distribution of Intermetallic fibers on the Mechanical Properties of Hypoeutectic Al-Fe Alloys. **Materials Chemistry and Physics**, em publicação, 2009(C).

GREMAUD, M. et al. The microstructure of rapidly solidified Al-Fe alloys subjected to laser surface treatment. **Acta Metallurgica et Materialia**, v.38, n.12, pp.2587-2599, 1990.

GREMAUD, M. et. al. Banding phenomena in Al-Fe alloys subjected to laser surface treatment. **Acta Metallurgica et Materialia**, v.39, n.7, pp.1431-1443, 1991.

GU, B. et al. Three dimensional numerical model for laser transformation hardening of metals. **Materials Science and Technology**, v.10, pp.425-430, may 1994.

GUO, W. & KAR, A. Interfacial instability and microstructural growth due to rapid solidification in laser processing. **Acta Materialia**, v. 46, n. 10, pp. 3485-3490, 1998.

HAAG, M. et al. CO<sub>2</sub> laser light absorption characteristics of metal powders. **Journal of Applied Physics**, v. 79, n. 8, pp. 3835-3841, 1996.

HEGGE, H. J. & DE HOSON, J. T. M.. Solidification structures during laser treatments. **Scripta Metallurgica et Materialia**, v.24, n.3, pp.593-598, 1990.

HOULE, E. A. & HINSBERG, W. D.. Stochastic simulation of heat flow with application to laser-solid interactions. **Applied Physics A**, v. 66, pp. 143-151, 1998.

HSU, S. C. et al. Rapid melting and solidification of a surface due to a stationary heat flux. **Metallurgical Transactions B**, v. 11B, pp. 29-38, 1980.

HSU, S. C. et al. Rapid melting and solidification of a surface due to a moving heat flux. **Metallurgical Transactions B**, v.12B, pp.33-45, Mar. 1981.

HU, C. & BAKER, T. N.. Prediction of laser transformation hardening depth using a line source model. **Acta Metallurgica et Materialia**, v.43, n.9, pp.3563-3569, 1995.

HUNTINGTON, C. A. & EAGAR, T. W.. Laser welding of aluminum and aluminum alloys. **Welding Research Supplement**, pp. 105-107, 1983.

ION, J. C. et al. Diagrams for laser materials processing. **Acta Metallurgica et Materialia**, v.40, n.7, pp.1539-1551, 1992.

JUNCHANG, L. et al.. Quick approximate calculation on the transient temperature field of laser heat treatment. **Chinese Journal of Lasers**, v. B6, n. 3, pp. 280-288, 1997.

KOU, S.; HSU, C. & MEHRABIAN, R.. Rapid Melting and Solidification of a Surface Due to a Stationary Heat Flux. **Metallurgical Transactions**, v. 11B, pp. 29-38, 1980.

KOU, S.; HSU, C. & MEHRABIAN, R. Rapid Melting and Solidification of a Surface Due to a Moving Heat Flux. **Metallurgical Transactions**, v. 12B, pp. 33-45, 1981.

MAIER, C. et al. Calculation of the temperature profile for laser treatment of metallic samples. Materials. **Science and Engineering A**, v. 150, pp.271-280, pp. 1992.

MOHANTY, P. S. & MAZUNDER, J. Solidification behavior and microstructural evolution during laser beam-metal interaction. **Metallurgical and Materials Transactions B**, v. 29, pp. 1269-1279, 1998.

MONDOLFO, L.F.. Aluminum Alloys Structure and Properties, **Butterworth & Co (Publishers) Ltd.** London, England, 1976.

MONSON, P. J. E. & STEEN, W. M. Comparison of laser hardfacing with conventional processes. **Surface Engineering**, v.6, n.3, pp.185-193, 1990.

MULLIS, A. M. Rapid solidification and a finite velocity for the propagation of heat. **Materials Science and Engineering**, v.226-228A, pp.28-32, 1997.

MUNITZ, A.. Microstructure of rapidly solidified laser-molten Al-4,5 Wt Pct Cu surfaces, **Metallurgical Transactions B**, v: 16, pp.149-161, 1985.

NOORDHUIS, J. & HOSSON, J. T. M.. Microstructure and Mechanical Properties of a Laser Treated Al Alloy, **Acta Metallurgical et Materialia**, V. 41, pp. 1989-1998, 1993.

O'SHEA, D. C. et al. Introduction to lasers and their applications. **Addison-Wesley Publishing Company**, 1976.

PELLETIER, J. M. et al. Solidification Microstructures Induced by Laser Surface Alloying: Influence of the Substrate, **Materials Science and Engineering**, A134, pp. 1283-1287, 1991.

PICASSO, M. & HOADLEY, A. F. A.. Finite element simulation of laser surface treatments including convection in the melt pool, **International Journal of Numerical Methods in Heat and Fluid Flow**, v. 4, pp. 61-83, 1994.

QIU, T. Q. et al. Characteristics of radiation absorption in metallic particles. **Transactions of the ASME**, v. 117, pp. 340-345, 1995.

SANDERS, D. J.. Temperature distributions produced by scanning Gaussian laser beams. **Applied Optics**, v. 23, n. 1, pp. 30-35, 1984.

SEKHAR, J. A. & MEHRABIAN, R.. Heat Flow Model for Surface Melting and Solidification of an Alloy. **Metallurgical Transactions**, v. 14A, pp. 1169-1177, 1983.

SILVA, E. M. R. et al. Absorption of Nd:YAG laser beam by metallic alloys. **Journal of Materials Science Letters**, v. 19, pp. 2095-2097, 2000.

SIMENSEN, C.J., FARTUM, P., ANDERSEN, A., FRESENIUS, Z.; **Anal. Chem.** 319 286–292, 1984.

SOLA, X. et al. Monitoring of melting and solid state phase transformation induced by pulsed laser action on pure zirconium. **Applied Surface Science**, v. 109-110, pp. 106-112, 1997.

STEEN, P. H. et al. Depth of melt-pool and heat-affected zone in laser surface treatments. **Metallurgical and Materials Transactions A**, v.25A, pp.427-435, Feb. 1994.

SWAMINATHAN, C.R., VOLLER, V.R.. A general enthalpy method for modeling for modeling solidification processes, **Metallurgical Transaction B**, v 23, p. 651-664, 1992.

TRAFFORD, D. N. H. et al. Laser treatment of gray iron. **Metals Technology**, v.10, pp.69-77, Feb. 1983.

UJIHARA, K. Reflectivity of metals at high temperatures. **Journal of Applied Physics**, v. 43, n. 5, pp. 2376-2383, 1972.

VILAR, R. et al. Laser surface treatment of tools steels. **Optical and Quantum Electronics**, v.27, pp.1273-1289, 1995.

### **Livros**

**Ansys Manual Guide**, 8 ed, New York: SAS IP, Inc., Cap. 1: Ansys thermal analysis guide, Cap. 6: Ansys theory reference, 1998.

BRAMSON, M.. **Infrared radiation: a handbook for applications**. Plenum Press, 1968.



CALLISTER JR., W. D.. **Materials Science and Engineering: An Introduction**, 3<sup>rd</sup>. Edition, , New York: John Wiley & Sons, 1994.

CHARSCHAN, S. S.. **Lasers in Industry**. New York: Van Nostrand Reinhold Company, 1972.

CRAFER, R. C. & OAKLEY, P. J. **Laser processing in manufacturing**. Chapman & Hall, 1993.

GARCIA, A.. SPIM, J. A. & SANTOS, C. A. **Ensaio dos Materiais**. Rio de Janeiro: Livros Técnicos e Científicos S. A., 2000.

GARCIA, A.. **Solidificação: Fundamentos e Aplicações** Campinas: Editora da Unicamp, 2007.

GRIGORYANTS, A. G.. **Basics of laser materials processing**. Moscow: Mir Publishers, 1994.

Laser Institute of America. **Fundamentals of lasers - professional advancement course**. Toledo, Ohio, 1985.

MAILLET, H.. **O laser**. São Paulo Editora Manole, 1987.

PEHLKE, R. D. et al. **Summary of thermal properties for casting alloys and mold materials**., Michigan: University of Michigan 1982.

READY, J. F.. **Industrial applications of lasers**. New York: Academic Press, 1978.

RUBAHN, H. G.. **Laser applications in surface science and technology**. Chichester: John Wiley & Sons, 1999.

STEEN, W. M.. **Laser material processing**. London: Springer-Verlag, 1996.

WHITE M.. **Rivalidades produtivas: disputas e brigas que impulsionaram a ciência e a tecnologia.** Rio de Janeiro: Record, 2003.

## **Teses**

Cheung, Noé. **Simulação numérica de tratamento por refusão a laser: Interação radiação laser-matéria e solidificação.** Faculdade de Engenharia Mecânica, Universidade Estadual de Campinas, 2003, Tese (Doutorado).

Ducatti, Suzimara Rossilho de Andrade. **Simulação numérica do processo de solidificação de placas finas com redução da espessura com o núcleo líquido.** Faculdade de Engenharia Mecânica, Universidade Estadual de Campinas, 2003, Tese (Doutorado).

Garcia, Amauri. **Desenvolvimento e verificação experimental de um modelo matemático para a análise da solidificação unidirecional de metais,** Universidade Estadual de Campinas, 1978. Tese (Doutorado).