

ESTE EXEMPLAR CORRESPONDE A REDAÇÃO FINAL
TESE DEFENDIDA POR Fabiano Rogério
Rossini E APROVADA PE
COMISSÃO JULGADORA EM 27/07/02.
Maria Clara Filippini Ierardi
ORIENTADOR

UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS
FACULDADE DE ENGENHARIA MECÂNICA

Soldas em Chapas Grossas de Aço Baixo Carbono
Utilizando Laser de CO₂

Autor : **Fabiano Rogério Rossini**
Orientador: **Prof^a. Dr^a. Maria Clara Filippini Ierardi**

11/02

UNICAMP
BIBLIOTECA CENTRAL

UNICAMP
BIBLIOTECA CENTRAL
SEÇÃO CIRCULANTE

**UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS
FACULDADE DE ENGENHARIA MECÂNICA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA DE MATERIAIS**

**Soldas em Chapas Grossas de Aço Baixo Carbono
Utilizando Laser de CO₂**

Autor : Fabiano Rogério Rossini

Orientador: Prof^a. Dr^a. Maria Clara Filippini Ierardi

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 obtenção do título de Mestre em Engenharia Mecânica.

Campinas, 2002
S.P. - Brasil

97820000

UNIDADE 30
Nº CHAMADA T/UNICAMP
R736s
V _____ EX _____
TOMBO BCI 50437
PROC 16-837102
C _____ D' _____
PREÇO R\$11,00
DATA 2010/8/02
Nº CPD _____

CM00172189-3

BIB ID 252293

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

R736s Rossini, Fabiano Rogério
 Soldas em chapas grossas de aço baixo carbono
 utilizando laser de CO2 / Fabiano Rogério Rossini.--
 Campinas, SP: [s.n.], 2002.

 Orientador: Maria Clara Filippini Ierardi.
 Dissertação (mestrado) - Universidade Estadual de
 Campinas, Faculdade de Engenharia Mecânica.

 1. Solda e soldagem. 2. Laser - industria. 3. Chapas
 de aço. 4. Metais - processos de solidificação rápida. I.
 Ierardi, Maria Clara Filippini. II. Universidade Estadual
 de Campinas. Faculdade de Engenharia Mecânica III.
 Título.

**UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS
FACULDADE DE ENGENHARIA MECÂNICA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA DE MATERIAIS**

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO

**Soldas em Chapas Grossas de Aço Baixo Carbono
Utilizando laser de CO₂**

Autor : **Fabiano Rogério Rossini**

Orientador: **Prof.^a. Dr.^a. Maria Clara Filippini Ierardi**



**Prof.^a. Dr.^a. Maria Clara Filippini Ierardi, Presidente
FEM / UNICAMP**



**Prof. Dr. Amauri Garcia
FEM / UNICAMP**



**Prof.^a. Dr.^a. Margarita Ballester
IF / UNICAMP**

Campinas, 27 de Fevereiro de 2002

Agradecimentos

Gostaria de expressar meus mais sinceros agradecimentos:

Ao Prof.^a. Dr.^a. Maria Clara pela perseverança, orientação, discussões e apoio irrestrito durante todo o decorrer do trabalho e da minha formação acadêmica.

À UNICAMP e seu corpo técnico/administrativo, pela infra-estrutura cedida e consideração na parte experimental, ressaltando a imensa ajuda dos técnicos e funcionários Rita Buso Jacon, Fábio Gatamorta, José Luiz Lisboa, Sérgio Gomes, Claudomiro Alves, Daniel Pisoni, Maria do Carmo e demais funcionários e colegas de trabalho, que de forma direta ou indireta, contribuíram na realização desse trabalho.

Aos companheiros de trabalho (DEMA/FEM/UNICAMP), Maria Aparecida e Elaine e outros, que compartilharam as dificuldades iniciais, contribuindo nas discussões técnicas e no desenvolvimento de trabalhos.

À CAPES, pela bolsa de estudos e auxílio financeiro concedidos, bem como pela confiança depositada na realização do trabalho.

Aos amigos componentes da república Kzona (Alexandre, André, Carlos Alexandre, Fabiano, Frederico, Gabriel, Gustavo, Hugo, José Eduardo, Tiago, Márcio, Margarida e Nilda), morada confortável e alegre, na qual convivo momentos divertidos e agradáveis, aprendendo a conviver e viver.

Aos meus pais Pedro Brás Rossini (*In Memoriam*) e Maria Eliza Zeviani Rossini, a minha noiva Mônica por tudo e, à Deus, pela onipresença percebida em todos os momentos.

Obrigado.

“Em nossa vida aprendemos a arte de pensar com clareza.” (o autor)

RESUMO

ROSSINI, Fabiano Rogério, Soldas em Chapas Grossas de Aço Baixo Carbono Utilizando Laser de CO₂, Campinas: Faculdade de Engenharia Mecânica, Universidade Estadual de Campinas, 2002, Dissertação de Mestrado.

A tecnologia de soldagem laser evoluiu de forma positiva em todo o mundo, como um processo de elevado potencial nas indústrias. A soldagem a laser é uma ferramenta poderosa na fabricação de peças complexas, constituídas de materiais de mesma ou diferentes espessuras, além da possibilidade de união de materiais diversos. As velocidades atingidas e o confinamento de energia depositada pelo feixe no material base são as principais vantagens do processo. Este método apresenta, quando comparado com outros métodos, facilidade de controle e posicionamento do feixe, ausência de atmosfera controlada, além de produtos com melhores propriedades mecânicas devido à obtenção de uma microestrutura mais refinada e homogênea. O trabalho apresenta uma análise da soldagem a laser em chapas grossas de aço baixo carbono, onde se analisa a dureza no material base, na zona termicamente afetada e no cordão de solda em duas direções, como também a microestrutura da região soldada, em relação aos parâmetros operacionais e também a caracterização e quantificação de defeitos na solda de acordo com uma norma específica para soldagem a laser. A dureza no cordão apresentou valores maiores que no material base, mantendo-se constante na profundidade. A microestrutura resultante no cordão soldado apresentou-se grosseira e direcional no sentido de extração de calor, tendo a zona termicamente afetada dimensões mínimas com refino dos grãos quando comparados ao material base.

Palavras Chaves: Solda, laser, CO₂, chapas grossas, microestrutura, aço baixo carbono.

ABSTRACT

ROSSINI, Fabiano Rogério, Low Carbon Steel Plate Welding Using a CO₂ Laser Equipment. Campinas: Faculdade de Engenharia Mecânica, Universidade Estadual de Campinas, 2002, Dissertation (Master).

The laser welding technology has shown evolution in the whole world, like a potential process in modern industry. Laser welding is an efficient tool for manufacturing complex components, which are composed by different materials and thickness. The process speed and the beam energy focusing are the main advantages in this process. When compared with other methods, this new technology presents ease beam control and positioning, no need of an inert atmosphere, besides products with better mechanical properties due to homogenous and refined microstructure. The present work presents a study of laser welding in low carbon steel plate, analyzing the superficial hardness of base material, thermal affected zone and weld, all of them both in the transversal section and through the weld depth, as well as microstructure regarding operational parameters. The weld hardness is higher than the hardness of material base, and constant along the depth. The resulting weld microstructure is coarse and aligned with heat flow. The heat affected zone has small dimensions with refined grains when compared to the base material.

Keywords: weld, laser, CO₂, plate, microstructure, low carbon steel.

Índice

Capítulo 1 Introdução	01
1.1. Considerações Iniciais	01
1.2. Objetivos	02
Capítulo 2 Laser: Fundamentos e Princípios Básicos	03
2.1. Introdução	03
2.2. Fundamentos e Princípios Básicos	05
2.2.1. Distribuição da Intensidade de Energia	07
2.2.2. Modos de Operação dos Lasers	09
2.3. Tipos de Lasers	10
2.3.2. Lasers de Gases	11
2.3.3. Os Principais Lasers no Espectro Eletromagnético	15
2.4. O Laser de Nd:YAG <i>versus</i> laser de CO ₂	17
2.5. Direcionamento do Feixe Laser	19
Capítulo 3 Processos de Soldagem	21
3.1. Processos de Soldagem	21
3.2. Comparação entre os Processos de Soldagem	25
3.2.1. Vantagens e Limitações	27
3.3. Características Físicas da Soldagem por Laser	30
3.3.1. Gases de Proteção e Supressão de Plasma	31
3.3.2. Parâmetros de Processo	35
3.4. Capacidade de Soldagem por Laser nos Materiais	40

3.5. Soldagem a Laser e suas aplicações industriais	43
Capítulo 4 Análise Experimental	53
4.1. Materiais	54
4.2. Soldagem	54
4.3. Parâmetros do Processo	55
4.4. Avaliação da Qualidade das Soldas Efetuadas	58
4.5. Análise da Dureza	60
4.6. Técnicas de Análise Metalográfica	61
Capítulo 5 Resultados e Discussões	63
5.1. Análise Microestrutural	63
5.2. Avaliação da qualidade das soldas	75
5.3. Dureza	78
Capítulo 6 Conclusões	85
6.1. Propostas para Trabalhos Futuros	86
<i>Referências Bibliográficas</i>	87

Lista de Figuras

Capítulo 2

Figura 2.1. Esquema básico de três níveis de operação de um laser. O metaestável E_2 está mais densamente povoado que o estado fundamental E_1 [Halliday, 1995].

Figura 2.2. Elementos que compõem um laser.

Figura 2.3. Perfil de intensidade e distribuição de energia para os modos de ordem mais baixa, TEM_{00} , TEM_{01}^* , TEM_{10} .

Figura 2.4. Forma de produção de potência e energia em alguns modos de operação.

Figura 2.5. Os elementos de um laser a gás hélio-neônio.

Figura 2.6. Estrutura padrão de um laser hélio cádmio [Harry, 1974].

Figura 2.7. Modos normais de vibração da molécula de CO_2 : a) simétrico, b) torção, c) assimétrico [Charschan, 1972].

Figura 2.8. Parte do espectro eletromagnético, representando o comprimento de onda no qual vários tipos de lasers operam [Ierardi, 1999].

Figura 2.9. Ilustração do direcionamento do feixe de laser em equipamento de laser de CO_2 [Dawes, 1992].

Capítulo 3

Figura 3.1. Evolução dos processos de soldagem ao longo dos anos [Vicentin, 1999].

Figura 3.2. Classificação dos processos de soldagem a partir da natureza da união.

Figura 3.3. Comparação entre velocidade e profundidade de soldagem para lasers de CO₂ e Nd:YAG de 3kW de potência [Dulley, 1999].

Figura 3.4. Comparação da profundidade de soldagem do laser de Nd:YAG e do laser CO₂ com igual capacidade do laser, como função da velocidade de soldagem [Seyffarth, 2000].

Figure 3.5. O efeito da supressão de plasma no aspecto da solda e a profundidade de soldagem numa chapa de 12 mm, com diferentes velocidades de soldagem.

Figure 3.6. Geometria do banho de fusão em função da posição do foco [Seyffarth, 2000].

Figura 3.7. Diagrama que demonstra os parâmetros que afetam a qualidade da solda laser.

Figura 3.8. Potência do laser de CO₂ como função da velocidade de soldagem para diferentes espessuras de chapas de aço [Duley, 1998].

Figura 3.9 Calculo do diâmetro focal e da profundidade de foco [Chryssolouris, 1991]..

Figura 3.10. Tipos de solda [Meinders, 2000].

Figura 3.11. Falhas na solda e no material [Meinders, 2000].

Figura 3.12. Solda a laser em escapamento automotivo [Irving, 2000].

Figura 3.13. Solda a laser em aço galvanizado, com técnica de duplo feixe [Pezzutti, 2000].

Figura 3.14. Classificação da depressão da piscina de solda [Holbert, 2000].

Figura 3.15. Imagem de topo do equipamento de vídeo [Holbert, 2000].

Capítulo 4

Figura 4.1. (a) representação esquemática das dimensões das amostras, (b) sentido de laminação e da solda.

Figura 4.2. Ilustração do sistema de soldagem laser, detalhando o cabeçote, a injeção de gás de proteção e o deslocamento do feixe.

Figura 4.3. Representação esquemática do posicionamento das amostras: a) sem desalinhamento, e ângulos do feixe laser de -5° e $+5^\circ$, b), c), d) com desalinhamento de 2 mm e o feixe foi focado em diferentes posições na superfície.

Figura 4.4. Representação esquemática da posição onde foram efetuadas medidas de dureza a) Seção transversal das amostras, b) Ao longo da profundidade do cordão, c) Regiões analisadas ao longo das juntas soldadas.

Figura 4.5. Ilustração do posicionamento para aquisição das imagens micrográficas.

Capítulo 5

Figura 5.1. Macroestruturas das amostras soldadas (aumento 10x).

Figura 5.2. Microestruturas em várias regiões da amostra 1.

Figura 5.3. Microestruturas em várias regiões da amostra 2.

Figura 5.4. Microestruturas em várias regiões da amostra 3.

Figura 5.5. Microestruturas em várias regiões da amostra 4.

Figura 5.6. Microestruturas em várias regiões da amostra 5.

Figura 5.7. Microestruturas em várias regiões da amostra 6.

Figura 5.8. Microestruturas em várias regiões da amostra 7.

Figura 5.9. Microestruturas em várias regiões da amostra 8.

Figura 5.10. Comportamento da dureza ao longo da profundidade e da posição transversal das amostras 1 e 2 [Rossini, 2000].

Figura 5.11. Comportamento da dureza ao longo da profundidade e da posição transversal das amostras 3 e 4

Figura 5.12. Comportamento da dureza ao longo da profundidade e da posição transversal da amostra 5

Figura 5.13. Comportamento da dureza ao longo da profundidade e da posição transversal das amostras 7 e 8

Lista de Tabelas

Capítulo 2

Tabela 2.1. Cronologia do Laser *[Seyffarth, 2000]*.

Tabela 2.2. O laser no processamento de materiais *[Seyffarth, 2000]*.

Tabela 2.3. Potência dos Lasers.

Capítulo 3

Tabela 3.1. Características e aplicações de processos de soldagem.

Tabela 3.2. Comparação entre soldagem a laser e outros processos de soldagem.

Capítulo 4

Tabela 4.1. Análise química média do material base *[Fonte: IPT,CT]*.

Tabela 4.2. Parâmetros utilizados para soldagem a laser das chapas.

Tabela 4.3. Resumo do conteúdo da norma EM ISO 13919-1, que permite analisar qualitativamente a soldagem de aços por laser, para qualidade de solda B.

Tabela 4.4. Parâmetros ópticos empregados na aquisição das imagens.

Capítulo 5

Tabela 5.1. Resultados da aplicação da norma EM ISO 13919-1 nas soldas efetuadas a laser.

Tabela 5.2. Valores de dureza média e máxima da amostra.

Nomenclatura

Letras Latinas

H – Intensidade do campo elétrico	[Hz]
r – Raio	[m]
P – Potência	[J/s, W]
E – Energia	[J]
t – Tempo	[s]
A – Área	[m ²]
f – Distância focal	[m]
td – Tempo de interação (Dwell time)	[s]
b – profundidade de foco	[mm]

Letras Gregas

ω – raio do feixe	[mm]
λ – comprimento de onda	[μm]
ν – frequência de vibração	[cm ⁻¹]

Abreviações

CO₂ – Dióxido de carbono

TEM – Modo transversal eletromagnético

YAG – Yttrium Aluminium Garnet

TIG – Tungsten inert gas

MIG – Metal inert gas

MAG – Metal arc gas

ARBL – Alta resistência baixa liga

IST – Instituto Superior Técnico

IPT/SP – Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo

CT – Centro tecnológico da UNICAMP

ZTA – Zona termicamente afetada

ZF – Zona fundida

Capítulo 1

Introdução

1.1. Considerações Iniciais

Os lasers de CO₂ são atualmente utilizados como fonte de calor para tarefas como soldagem, corte, perfuração, tratamento superficial, efetuadas em materiais diversos tais como: metais, cerâmicos, plásticos, madeiras. Já se encontram fontes de laser de CO₂ com potência de 40 kW ou superiores, sendo que a utilização de lasers ou sistemas a base de laser tem trazido maior eficiência em muitos processos produtivos, permitindo a realização de processos inviáveis por qualquer outro método.

Na área de tratamentos superficiais, tanto com ou sem deposição de materiais, tem-se demonstrado a vantagem do uso dos lasers resultante do resfriamento rápido da zona aquecida após processamento, produzindo uma estrutura refinada, com carbonetos finamente distribuídos ou fases precipitadas fora do equilíbrio, conduzindo à durezas superiores às obtidas por processos convencionais [Ierardi, 1999; Azzolini, 1999; Souza, 2001]. Com relação aos processos de soldagem, uma das vantagens a ser destacada relaciona-se ao fato da pequena zona afetada pelo calor. Em trabalho recente, [Vicentin, 1999] apresenta os resultados obtidos na soldagem a laser de chapas finas de aço para a indústria automobilística, com destaque para ensaios de estampabilidade satisfatórios na região soldada.

Considerando o número de aplicações já estabelecidas no mundo e, ao mesmo tempo, o

número de projetos que podem ser baseados em novas aplicações, parece indiscutível que a tecnologia laser desempenhe um papel de destaque em muitos procedimentos de pesquisa e aplicações industriais. Atualmente equipamentos baseados em laser vêm sendo aplicados a processos de soldagem e são encontrados com frequência nas linhas de produção da maioria das indústrias automobilísticas e em outros setores como a indústria naval, equipamentos pesados e aeroespacial, onde produtividade e a qualidade são fatores de diferenciação mercadológica e tecnológica. Decorre daí que a manufatura assistida por laser vem apresentando crescimento importante na medida em que processos tradicionais estão sendo revistos sob a ótica de novos conceitos econômicos, alta qualidade, minimização de custos e maximização de velocidades de trabalho e produtividade. Foi levantada a questão, se a utilização da técnica laser nas indústrias em geral seria uma realidade próxima, uma visão ou um ideal. Esta técnica não utiliza material de adição na solda e é um processo quimicamente limpo. A qualidade da solda depende de ajustes dos parâmetros, como: potência, velocidade de deslocamento e posição do feixe.

1.2. Objetivos

Tendo em vista a importância do emprego da tecnologia laser para a soldagem de chapas grossas de aço baixo carbono para a indústria, e a partir de amostras soldadas com diferentes parâmetros, definiu-se como objetivos do presente trabalho:

- ① Revisão crítica e atualizada da literatura no que diz respeito aos processos de soldagem, e em particular a tecnologia de soldagem a laser;
- ② Avaliação da qualidade da solda executada com diferentes parâmetros em chapas grossas de aço baixo carbono com espessura de 10 mm;
- ③ Execução de ensaios mecânicos para a determinação da dureza, nas seguintes regiões: material base, zona termicamente afetada (ZTA) e cordão de solda (zona fundida ZF);
- ④ Ensaios para a determinação metalográfica da macro e microestrutura resultante nas diversas amostras soldadas;
- ⑤ Caracterização da qualidade metalúrgica da solda segundo norma específica EN ISO 13919-1.

Capítulo 2

Laser: Fundamentos e Princípios Básicos

2.1. Introdução

O laser faz parte da vida científica, há algumas décadas exercendo fascínio sobre os cientistas, que chegaram a prever o futuro brilhante reservado para este equipamento. Com o passar do tempo e o avanço das pesquisas científicas, o laser vem se confirmando como uma poderosa ferramenta de extraordinárias propriedades de radiação, tendo ocupação em uma série de aplicações nos mais diversos campos, com pesquisas voltadas sobre a otimização da distribuição de energia do feixe e as estruturas internas das fontes. O LASER é uma palavra criada artificialmente (acrônimo) e compõe-se das letras iniciais das palavras “*Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation*”. Traduzindo para o português significa: Amplificação da luz por emissão estimulada de radiação. No sentido oposto da maioria das invenções, o laser não se baseia na capacidade de aproveitamento de um processo conhecido proveniente da natureza, ele é um resultado da capacidade de invenção dos seres humanos.

Atualmente o feixe laser pode ultrapassar 10^7 W/mm^2 , apresentando densidades de potência elevadas e facilidade de operação, tendo várias aplicações industriais, como o corte, a solda, o tratamento superficial (com ou sem fusão), além do emprego na limpeza de obras de arte, delicadas cirurgias, entre outras. Este feixe produzido é pouco divergente e altamente colimado: se o feixe for projetado da Terra para a Lua (no qual a distância média é de 386.000km), formaria um círculo com somente 3 km de diâmetro. Outra propriedade do feixe laser de fundamental

importância é que todas as ondas que compõem o feixe possuem o mesmo comprimento e estão em fase, sendo o mesmo coerente [Machado, 1996].

Após mais de trinta anos de pesquisa e desenvolvimento, o laser encontrou uma multiplicidade de aplicações na técnica de medição, na medicina, no processamento de materiais, e em muitas outras áreas. A cronologia do desenvolvimento do laser, com visão voltada ao processamento de materiais e as várias possibilidades da aplicação são mostradas respectivamente nas Tabelas 2.1 e 2.2.

Tabela 2.1. Cronologia do laser [Seyffarth, 2000].

1917	Teoria da emissão estimulada, de Albert Eistein
1960	Primeiro laser apto a funcionar, de T.H. Maiman
A partir de 1963	Aplicação no processamento de materiais (laser pulsado de corpo sólido)
1968	Primeiro laser de CO ₂ , de trabalho contínuo -processamento de material -cortar -soldar -tratamento superficiais -refinar -revestir -e outros
1969	Primeiro sistema de corte a laser CO ₂ , de comando numérico

Tabela 2.2. O laser no processamento de materiais [Seyffarth, 2000].

Corte a laser	Solda a laser	Tratamento superficial a laser	Marcação	furação	Processos especiais
Corte por sublimação (evaporação)	Soldagem por condução térmica	Têmpera por fases fixas	Marcar	Furar	Curvar
Corte autógeno (fusão)	Soldagem profunda	Refino			Sinterizar
		Produção de ligas			Estereolitografia
		Recobrimento			

2.2. Fundamentos e Princípios Básicos

De um modo geral, o laser é uma fonte de radiação eletromagnética na qual um fóton emitido por um átomo excitado é levado a colidir com outros átomos ainda excitados, criando com isto outros fótons e aumentando assim a amplitude do campo eletromagnético original. Portanto, é preciso dispor de um grande número de átomos excitados passíveis de serem estimulados.

Para que um laser possa funcionar, devem ser satisfeitas, simultaneamente, três condições fundamentais:

- em primeiro lugar, é necessário dispor de um meio ativo, ou seja, de uma população de átomos, moléculas ou íons que emitam radiação no espectro. O meio ativo pode ser constituído de material sólido, líquido, gasoso ou semicondutor, que possui uma estrutura apropriada de níveis de energia discretos que se excitam facilmente e possuem a capacidade de armazenar a energia recebida do exterior. Os níveis de energia mais baixos são os mais povoados, ao contrário dos níveis de energia superiores. O comprimento de onda emitido pelo laser é função da energia dos níveis em que os elétrons são estimulados;

- em segundo lugar, para que haja luz laser é preciso que os elétrons passem de um nível superior de energia para um nível inferior. Para que ele se torne mais freqüente, é preciso inverter a população, povoar os níveis de energia superiores em detrimento dos níveis mais baixos. A Figura 2.1 mostra esquematicamente como se pode estabelecer uma inversão de população no material do laser, de modo a provocar a sua ação. Inicia-se o processo com os átomos do material, essencialmente, no estado fundamental E_1 . A seguir, se fornece energia ao sistema pelo processo de bombeamento, que transforma o meio ativo em meio amplificador de radiação. Esse bombeamento pode ser óptico (aplicados a materiais cristalinos, vítreos, líquidos, gasosos ou plásticos), eletrônico (descargas elétricas, feixe de elétrons) ou por injeção de uma corrente intensa (nos lasers a semicondutor). Do estado E_3 , muitos átomos decaem rápido e espontaneamente para o estado E_2 , que deve ser um estado metaestável para que o material possa operar como um laser; isto é, o estado E_2 deve ter uma vida média relativamente longa

comparada à emissão espontânea. Se as condições estiverem corretas, o estado E_2 poderá se tornar mais densamente povoado que o estado E_1 e tem-se a inversão da população. Então, um fóton que possui energia apropriada pode desencadear uma alavanca de eventos de emissão estimulada, do estado E_2 , produz assim a luz do laser. Isto quer dizer que a luz é gerada pela realimentação da própria luz, ou seja, na presença de um fóton, um determinado meio produz outros fótons, sob certas condições;

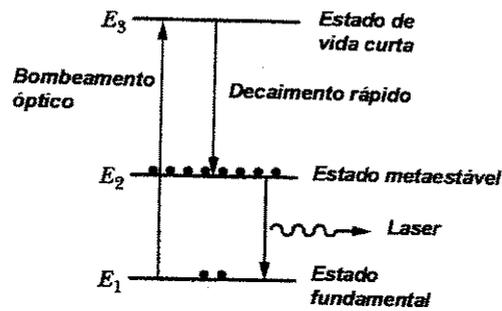


Figura 2.1. Esquema básico de três níveis de operação de um laser. O estado metaestável E_2 está mais densamente povoado que o estado fundamental E_1 [Halliday, 1995].

- finalmente, na terceira condição para que um laser possa funcionar, é indispensável dispor de uma cavidade óptica para que o sistema composto por esta reação óptica e pelo meio ativo seja a rede de uma oscilação laser. Quando são alinhados espelhos em paralelo a esse meio estimulado, as ondas eletromagnéticas que se deslocam no sentido do espelho são refletidas de volta ao meio, provocando assim um alinhamento de ondas e resultando numa realimentação nesse sentido. Após centenas de reflexões, todos os fótons estarão alinhados no sentido do eixo dos espelhos. A Figura 2.2 reúne todas as condições e os elementos necessários para o funcionamento do laser.

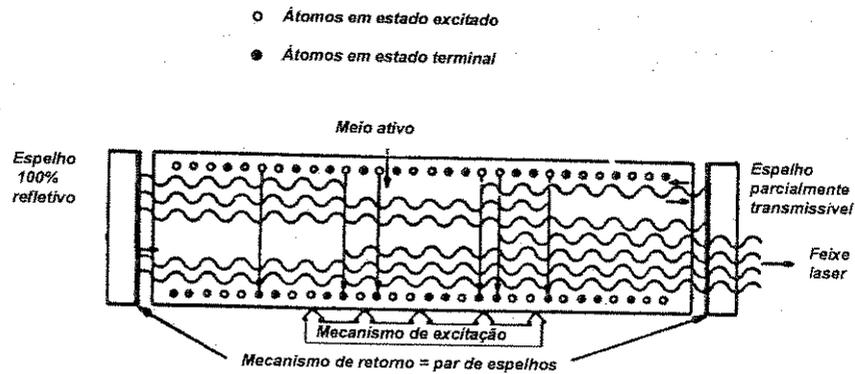


Figura 2.2. Elementos que compõem um laser.

2.2.1. Distribuição da Intensidade de Energia

A distribuição espacial de energia no feixe laser, gerada ao longo da cavidade ressonante, é denominada Modo Transversal Eletromagnético TEM (iniciais do inglês “*Transverse Electromagnetic Mode*” ou também conhecido como “*Transverse Excitation Mode*”) [Machado, 1996]. O TEM é consequência do forte campo eletromagnético formado pela oscilação da energia no interior da cavidade ressonante podendo assumir diferentes formas. A radiação que deixa a cavidade ressonante apresenta distribuição temporal e espacial da forma *Gaussiana*. O modo de distribuição dessa energia é caracterizado por dois subscritos à sigla TEM, os quais indicam o número de vales entre regiões de concentração da mesma. A ordem destes modos depende da configuração utilizada na cavidade ressonante. De uma maneira geral, modos de ordem mais baixa de simetria circular são preferidos na maioria dos equipamentos comerciais, por apresentar uma melhor distribuição de energia no feixe laser.

Os Modos Transversais Eletromagnéticos TEM, que possuem os campos elétricos e magnéticos perpendiculares entre si, com simetria circular de ordem mais baixa, são denominados como TEM_{00} , TEM_{01} e TEM_{10} . Para estes modos, o perfil de intensidade do feixe em função da distância do centro do feixe até o decaimento para periferia, representa a distribuição radial da intensidade de energia confinada no feixe, podendo ser melhor observado na da Figura 2.3. Para cada modo, ocorre uma distribuição de intensidade diferente ao longo do feixe laser. Uma distribuição espacial não uniforme de intensidade pode alterar a definição do tamanho do feixe e afetar as propriedades de focalização.

O modo TEM_{00} , também chamado modo fundamental, possui a maior quantidade de energia contida no seu centro e decai para periferia (ou seja, a distribuição da energia do feixe na direção ortogonal à sua propagação possui distribuição *Gaussiana*), sendo este modo preferido em aplicações que exijam que a área do material atingida pelo feixe laser seja a menor possível. Para uma determinada potência, esse modo produz a máxima densidade de energia com o feixe da melhor qualidade possível. Quando as aplicações que exigem que a área do material atingida pelo feixe seja maior, pode-se considerar o feixe, ou operando no modo TEM_{00} “desfocado”, ou utilizam-se os modos TEM_{01} ou TEM_{10} . A vantagem dos modos TEM_{01} ou TEM_{10} sobre o modo fundamental é que a distribuição de energia na área do feixe é mais uniforme, se considerado um corte transversal no feixe laser. A obtenção de um dos modos TEM_{01} ou TEM_{10} em geral é difícil, uma vez que as frequências de oscilação destes modos são muito próximas, havendo a alteração dinâmica de um modo para outro.

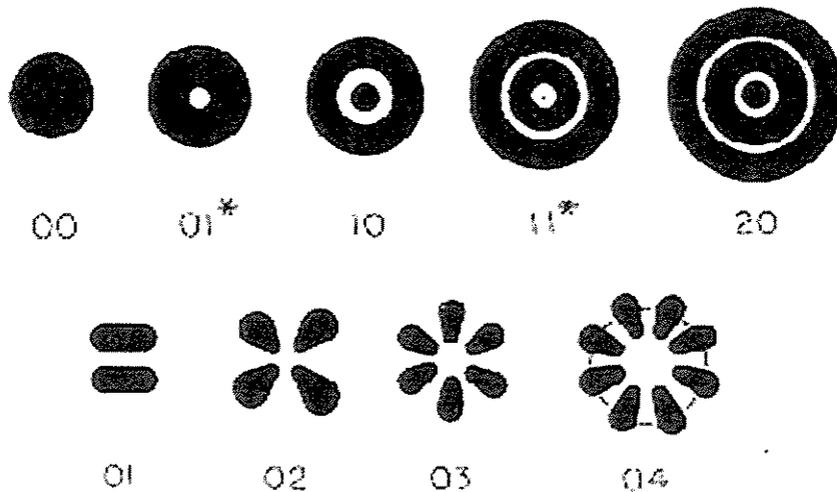


Figura 2.3. Perfil de intensidade e distribuição radial de energia para os modos de ordem mais baixa, TEM_{00} , TEM_{01}^* e TEM_{10} .

Levando em consideração que a grande maioria das fontes laser fornecem uma configuração do feixe no modo fundamental TEM_{00} , portanto distribuição Gaussiana de energia, foi analisada a trajetória do feixe, operando neste modo, a partir da saída da cavidade ressonante [Roessler, 1986]. A distribuição radial da intensidade do feixe para o modo fundamental (Gaussiana), pode ser obtida na Equação 2.1, da seguinte forma:

$$H(r) = H(0)e^{-\frac{r^2}{a^2}} \quad (2.1)$$

A intensidade máxima $H(0)$, ocorre para o centro do feixe Gaussiano, onde a concentração de energia é maior. Para uma distância $(r = a)$, a intensidade resultante é e^{-1} ou 36,8% do valor de pico da intensidade, e para cálculos com uma distância $r = a\sqrt{2}$, a intensidade é e^{-2} ou 13,5%. Portanto, nota-se que, para $\frac{r}{\omega} = 1$, sendo $\omega = a\sqrt{2}$, a intensidade relativa $H(r)/H(0) = 0.135$, ou 86,5% da energia, está contida em um diâmetro 2ω .

2.2.2. Modos de Operação dos Lasers

Os lasers são operados em um dos seguintes modos de operação: a) emissão contínua (cw – *continuous wave*), b) pulsado normal, c) desencadeado ou destravo (*Q-switched*) e, d) modos acoplados (*mode locked*). A Figura 2.4 descreve a forma de produção de potência e energia sobre alguns desses modos de operação. Na operação cw, como o nome implica, um feixe contínuo de potência constante é emitido pela cavidade do laser (Figura 2.4a). A operação pulsada é caracterizada pelo bombeamento pulsado e a emissão de pulsos de energia relativamente alta para taxas de repetição a partir de 1 Hz até valores superiores a 1 kHz. As larguras de pulsos, normalmente nanosegundos (ns) até alguns milissegundos (ms), as taxas de repetição e a energia total por pulso varia dependendo do tipo de sistema particular empregado. A Figura 2.4b mostra a produção de um feixe do laser onde a potência P_1 é considerada constante para quase toda a duração do pulso. Deve-se notar que pulsos de alta potência e de curta duração podem ser gerados usando sistemas como *Q-switched*. A potência alcançada neste pulso de curta duração excede a potência atingida durante a operação cw ou pulsada (Figura 2.4c), e o modo *Q-switched* implica no uso de um armazenador de energia dentro da cavidade no intervalo de tempo entre um pulso e outro, de modo que a geração de um pulso de energia mais alta é possível dentro de um período de tempo mais curto [Charschan, 1972].

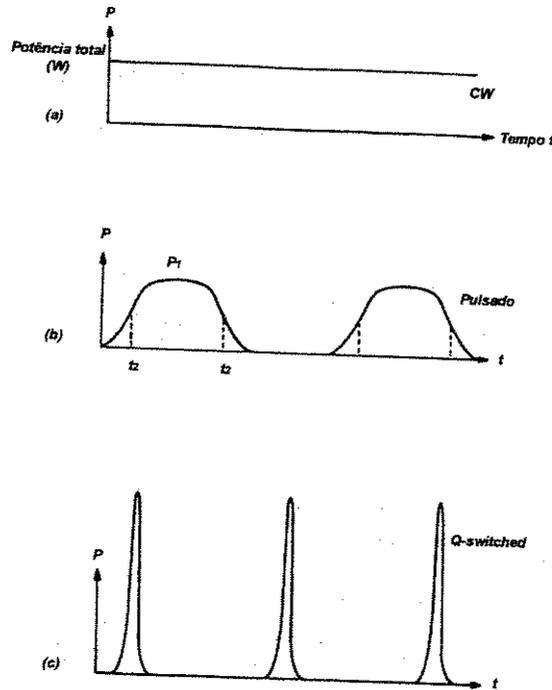


Figura 2.4. Forma de produção de potência e energia em alguns modos de operação.

2.3. Tipos de Lasers

Existem vários tipos de lasers, entretanto tem-se alguns que são mais comuns e conhecidos. Os pontos comuns a todos estes representantes de uma mesma família são as propriedades de radiação e de coerência espacial e temporal, cujas conseqüências já foram abordadas nestas primeiras noções. Há lasers contínuos que emitem frações de miliwatts, e outros que enviam dezenas de kilowatts. Os lasers pulsados podem chegar a terawatts (10^{12} watts) [Chester, 1988]. Os rendimentos energéticos são sempre muito baixos, da ordem de 1% em casos favoráveis, salvo exceções muito raras; e entre estas, se destaca o laser de CO_2 , com um rendimento superior da ordem de 10% [Machado, 1996].

2.3.1. Lasers de Sólidos

Entre os lasers de estado sólido, o rubi desempenha papel de ancestral, e é pouquíssimo empregado. Seu comprimento de onda de emissão é $\lambda = 0,6494 \mu\text{m}$, na parte vermelha do

espectro. Ele só funciona em regime pulsado com energias emitidas por pulsos de alguns joules a algumas dezenas de *joules*. Os lasers de neodímio, tanto com matriz de vidro como de YAG (*Yttrium Aluminium Garnet*), são praticamente os únicos representantes atuais dos lasers de estado sólido. Seu comprimento de emissão é de $\lambda = 1,06 \mu m$ na região do infravermelho do espectro. Os YAG podem funcionar no modo contínuo ou em pulsos. As potências emitidas em contínuo podem ultrapassar 100 watts.

2.3.2. Lasers de Gases

No âmbito dos lasers de estado gasoso, dispomos ainda de três tipos de lasers: iônico, atômico e molecular.

Laser atômico (HeNe):

O laser atômico tem como maior destaque o laser hélio neônio (HeNe), o mais antigo e mais difundido dos lasers à gás. Foi nos Laboratórios Bell que o pesquisador Javan, em 1961, apresentou o primeiro laser de gás fornecendo uma luz coerente contínua. O gás é uma mistura de hélio e neônio colocados em um tubo. No laser de Javan, a inversão de população dos átomos de hélio faz-se por meio de uma descarga elétrica. Isto significa que a energia necessária à excitação de átomo não é fornecida por um fóton incidente, mas resulta da colisão com um átomo de hélio excitado. A Figura 2.5 mostra esquematicamente a construção do laser de HeNe que se encontra comumente em laboratórios universitários. Compõem-se de um tubo de descarga de vidro ou quartzo que é preenchido com uma mistura de 80%-20% dos gases nobres hélio e neônio; o gás emissor de luz é o neônio [Souza, 1990].

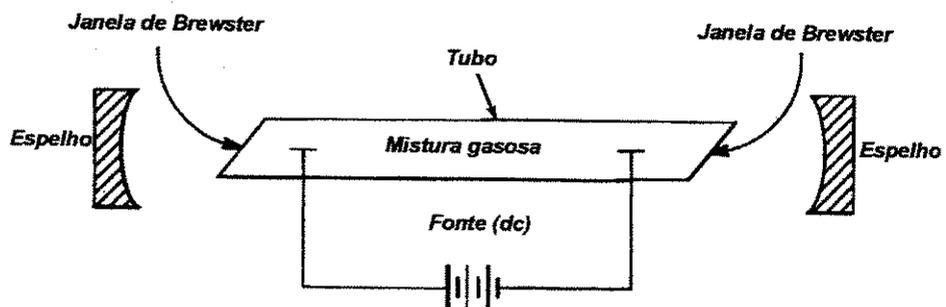


Figura 2.5. Os elementos de um laser a gás hélio-neônio [Halliday, 1990].

Muito mais deve ser feito antes de se obter um forte feixe de luz laser. A maioria dos fótons produzidos inicialmente por emissão estimulada no tubo de descarga da Figura 2.5 não se propaga paralelamente ao eixo do tubo e é rapidamente freada pelas paredes. Porém, os fótons da emissão estimulada que “são” paralelos ao eixo, podem ser forçados a moverem-se várias vezes para frente e para trás, ao longo do tubo, por reflexões sucessivas nos espelhos. Uma reação em cadeia se desenvolve rapidamente na direção do eixo, proporcionando o paralelismo que é inerente à luz do laser. Os espelhos são côncavos, com os focos quase no centro do tubo. As janelas que fecham as extremidades do tubo de descarga são inclinadas com o ângulo de *Brewster*, para minimizar a perda de luz por reflexão. Isto significa que a luz refletida, sob este ângulo, é totalmente polarizada com seu plano de vibração perpendicular com seu plano de incidência.

Laser iônico (HeCd):

Os lasers iônicos (a gás ionizado) são os que utilizam gases nobres (exceto neônio) e vapores metálicos (HeCd). O laser de hélio cádmio é também um laser iônico porque se utiliza do estado ionizado do gás cádmio. O laser de HeCd é o mais representativo dos lasers em que a emissão estimulada ocorre entre níveis ionizados por um vapor metálico, ao passo que o bombeamento é efetuado por transferência colisional com um gás de elevado potencial de ionização, geralmente o hélio. A vantagem do laser de HeCd está em sua capacidade de emissão contínua no azul ($\lambda = 0,4416 \mu m$), e principalmente no ultravioleta ($\lambda = 0,325 \mu m$). A concepção simples e o funcionamento contínuo, sem fluído de resfriamento, nos comprimentos de onda curtos no azul e no ultravioleta, garantem ao laser de HeCd um papel equivalente ao que desempenha o laser de HeNe no vermelho.

A construção do laser de HeCd é mostrada na Figura 2.6 e é semelhante ao laser de HeNe, exceto pela adição de um evaporador e um condensador. Quando ocorre uma descarga contínua em uma mistura binária contendo hélio e um vapor metálico com baixo potencial de ionização, como o cádmio, produz-se um fenômeno denominado cataforese, onde o vapor metálico (íons Cd) é transportado para o cátodo. Por isso, os vapores metálicos corrosivos são confinados a uma região do tubo afastada das superfícies ópticas.

Para uma distribuição uniforme de tais íons, átomos de cádmio são continuamente evaporados no tubo por uma fonte situada próximo ao anodo. Com efeito, antes de atingirem o catodo, os átomos se condensam, impedindo que se depositem sobre as janelas de *Brewster* nas extremidades do tubo.

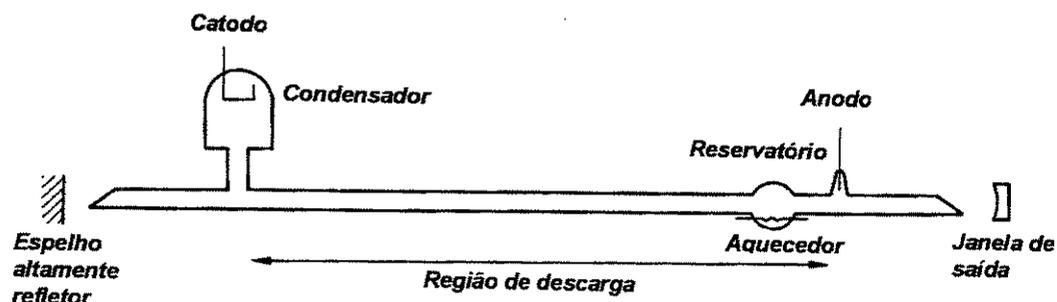


Figura 2.6. Estrutura padrão de um laser de hélio cádmio [Harry, 1974].

Lasers moleculares (CO₂):

Os lasers moleculares são um pouco diferentes dos dois anteriores; neste caso, para que haja luz emitida, é necessário “quebrarmos” a molécula do gás. O mais importante deles é o laser de CO₂ (dióxido de carbono), no qual as transições entre os níveis vibracionais rotacionais podem produzir grandes potências, tanto operando no modo contínuo como pulsado, características estas que o distingue de outros tipos de lasers.

Em comparação com átomos e íons, a estrutura do nível energético das moléculas é bem complexa e origina-se a partir de três fontes: movimentos eletrônicos, movimentos vibracionais e movimentos rotacionais. Exatamente como nos átomos individuais, elétrons em moléculas podem ser excitados em níveis de energia mais elevados. Independente do estado eletrônico, os núcleos atômicos são mantidos juntos pelas forças de ligação molecular, e devem vibrar em torno da sua posição de equilíbrio, determinando a elevação dos níveis de energias vibracionais. A separação de energia entre os níveis vibracionais do mesmo estado de energia geralmente corresponde a uma frequência na faixa central do infravermelho, onde cada um dos níveis eletrônico largamente espaçado deve ser dividido em muitos subníveis vibracionais. De acordo com a Figura 2.7, os três modos possíveis de vibração na molécula de CO₂ são os modos de vibração simétrico, de vibração de torção e de vibração assimétrico [Charschan, 1972].

No modo de vibração simétrico, os dois átomos de oxigênio vibram no eixo internuclear de maneira simétrica com frequência ν_1 , enquanto que o átomo de carbono permanece estacionário de acordo com a Figura 2.7a.

No modo de vibração de torção, os três átomos vibram em um plano com frequência ν_2 . Este modo é duplamente degenerado, pois o mesmo pode representar a vibração dos átomos no plano da folha ou perpendicular a Figura 2.7b.

No modo de vibração assimétrico, de frequência ν_3 , os átomos de oxigênio se movem em um mesmo sentido, e o de carbono em sentido contrário de acordo com a Figura 2.7c.

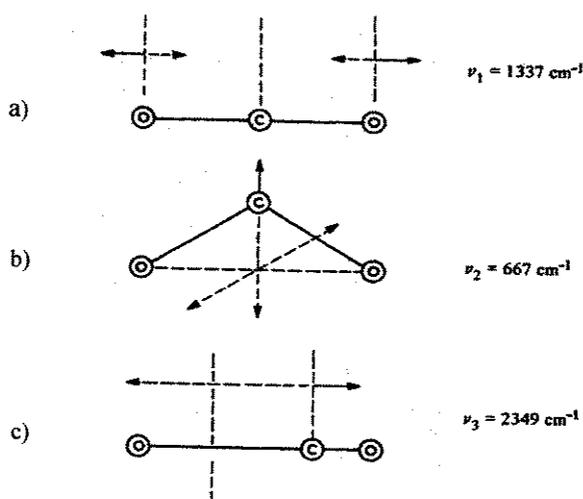


Figura 2.7. Modos normais de vibração da molécula de CO_2 : a) simétrico, b) torção, c) assimétrico [Charschan, 1972].

Finalmente, uma molécula em algum nível eletrônico vibracional pode sofrer rotação sobre vários eixos no espaço. Este movimento rotacional, devido às leis da mecânica quântica, deve conduzir a um espaçamento fechado, níveis de energias discretos, e deve subdividir cada nível vibracional em uma série de níveis cujas separações de energia correspondem a frequência extrema do infravermelho.

Quando uma descarga de gás é estabelecida, moléculas de CO_2 são excitadas dentro de níveis eletrônicos mais elevados, a partir de onde, elas começam a decair para o nível laser superior. Taxas de relaxação favoráveis permitem o estabelecimento da inversão de população

entre níveis, produzindo a emissão de fótons com comprimento de onda $\lambda = 10,6\mu\text{m}$. A presença de outros gases na descarga, tal como azoto N_2 e He, faz aumentar a potência total e eficiência do laser. Um processo eficiente que causa a inversão de população é a colisão entre uma molécula de N_2 e uma de CO_2 . A molécula de N_2 é levada ao estado mais excitado e a partir daí, na colisão, ocorre uma transferência de energia por ressonância. Este processo de colisão é altamente eficiente, devido ao longo tempo de vida do estado excitado do N_2 e a pequena diferença dos níveis excitados do N_2 e do CO_2 . Já a eficiência das moléculas de He está associada ao mecanismo de relaxação das moléculas de CO_2 por meio de colisões com outras moléculas. A introdução de moléculas de He na mistura gasosa tem por objetivo favorecer a inversão de população do estado de nível inferior, o que é extremamente importante, visto que o tempo de vida deste estado é demasiadamente grande e a colisão das moléculas de CO_2 com átomos de He diminuem os tempos de relaxação deste estado.

Os lasers de CO_2 comercialmente disponíveis emitem algumas centenas de watts de potência contínua, ou alguns kilowatts de pico de potência no modo pulsado. O tempo de vida relativamente longo do nível laser superior permite a operação *Q-switched*, no qual picos de potência da ordem de centenas de kilowatts podem ser alcançados. Como o infravermelho é absorvido por vidros e fibras de quartzo, o feixe do laser de CO_2 é transportado por meio da reflexão em espelhos de aço polido no interior de braços articulados. Frequentemente, o laser de CO_2 atua com outro de baixa potência, que lhe serve de guia. O mais usado é o de HeNe, através do qual pode-se localizar mais facilmente o foco do feixe de potência [Maillet, 1987].

O laser de CO_2 é consideravelmente mais barato do que os lasers que operam na região espectral do ultravioleta (Argônio, HeCd, etc.).

2.3.3. Os Principais Lasers no Espectro Eletromagnético

A faixa útil do espectro eletromagnético, no qual emitem a maioria dos lasers, estende-se do infravermelho médio ($10\mu\text{m}$) ao ultravioleta próximo (200nm). Os lasers podem ser construídos empregando uma variedade de diferentes materiais, cada qual tem seu comprimento de onda característico. O comprimento de onda do laser é determinado pelas propriedades do meio ativo e como mostra a Figura 2.8, até certo ponto, pelo modo que o meio é excitado. Convém destacar mais particularmente:

- laser de gás carbônico CO_2 ($\lambda = 10,6\mu m$), laser molecular que emite em regime contínuo ou em pulsos;
- laser de fluoreto de hidrogênio HF ($\lambda = 3,1\mu m$), laser químico que funciona em regime contínuo ou pulsado;
- laser de neodímio Nd situado no infravermelho próximo ($\lambda = 1,06\mu m$). É um laser de isolante dopado que funciona essencialmente em regime pulsado: a matriz isolante pode ser cristalina (YAG) ou vítrea (vidro dopado);
- laser de rubi ($\lambda = 0,6943\mu m$), laser de isolante dopado que funciona em pulsos no visível (vermelho);
- laser de hélio neônio $HeNe$, laser de gás que emite em contínuo no vermelho a ($\lambda = 0,6328\mu m$);
- laser de argônio, laser de gás ionizado que funciona em regime contínuo em várias raias visíveis, sendo que as duas raias mais intensas situam-se em ($\lambda = 0,5143\mu m$) no azul e ($\lambda = 0,4880\mu m$) no verde;
- laser de hélio cádmio $HeCd$, laser de vapor metálico que emite em ($\lambda = 0,4416\mu m$) no azul e em ($\lambda = 0,3520\mu m$) no ultravioleta;
- lasers excímeros, novo conceito de lasers moleculares pulsados ultravioleta, cujo representante mais comum é o laser a exciplexo de cloreto de xenônio $XeCl$, que emite em ($\lambda = 0,3080\mu m$).

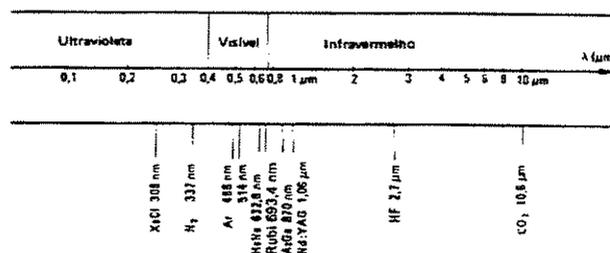


Figura 2.8. Parte do espectro eletromagnético, representando o comprimento de onda no qual vários tipos de lasers operam [Herardi, 1999].

2.4. O laser de Nd:YAG versus laser de CO₂

Recentemente, as altas potências dos lasers (maiores que 3kW no modo contínuo) poderiam ser obtidas somente com os lasers de CO₂. Como resultado, esses tipos de lasers conquistaram o mercado para aplicações industriais que requerem potências nesta faixa [Duley, 1999]. Com o rápido desenvolvimento da tecnologia do laser, tornou-se possível encontrar lasers de Nd:YAG com potências acima de 4kW no modo contínuo, então os sistemas laser de CO₂ e YAG podem ser diretamente comparados em muitas aplicações práticas. A questão de qual laser (ou sistema laser) por ser utilizado depende da aplicação.

No caso da soldagem a laser, as vantagens do Nd:YAG são:

- capacidade de ser aplicado em materiais refletivos;
- condução do feixe por fibra óptica;
- aumento da eficácia do processo, quando comparado com a mesma potência do laser de CO₂.

Porém, o laser de CO₂ tem outras vantagens:

- alta eficiência elétrica;
- baixo custo operacional;
- fácil aumento de potência para lasers moleculares, por exemplo, 45kW.

O intenso desenvolvimento de laser tem ajudado na construção de lasers de maior aplicabilidade e economia [Ready, 1978]. O desenvolvimento de laser de CO₂ pulsados, de laser de CO₂ e Nd:YAG de alta potência, e laser de Nd:YAG *Q-switched* podem mudar o panorama do custo operacional dos lasers em relação aos métodos convencionais dos diferentes tipos de lasers.

As propriedades listadas na Tabela 2.3 são um indicativo da disponibilidade comercial e das potências que esses lasers alcançam.

Tabela 2.3. Potência dos lasers.

Laser	Comprimento de onda (μm)	Operação	Potência (W)	Aplicação
CO ₂	10,6	Contínuo	100 a 1000	Solda
CO ₂	10,6	Pulsado	10 ⁷ (média)	Solda e furação
Nd:YAG	1,06	Contínuo	Acima de 1000	Solda
Nd:YAG	1,06	Pulsado	10 ⁴ pico	Fabricação de componentes
Rubi	0,6943	pulsado	10 ⁵ pico	Solda e furação

Os mecanismos de interação e as aplicações variam de acordo com o tipo de operação. Nota-se que nem toda propriedade indicada pode ser obtida simultaneamente. Operações com altos picos de potência podem envolver um sacrifício da taxa de repetição do pulso ou do comprimento do pulso (com isso levando a não ter boa qualidade dos cordões de solda).

O laser de CO₂ e o laser de Nd:YAG, em seus vários modos de operação oferecem a melhor economia e a maior versatilidade, sendo que ambos têm sido cuidadosamente desenvolvidos e são duráveis o bastante para o uso de alta produção.

Lasers de Nd:YAG com potências médias de saída na faixa de aproximadamente 100W até 1kW estão comercialmente disponíveis [Dawes, 1992] e máquinas com potências muito altas, de 4 a 6 kW, estão sendo desenvolvidas.

Os lasers gasosos que são usados para soldagem, principalmente o laser de CO₂ com comprimento de onda de (10,6μm), tem provado ser os mais eficientes e os que produzem potências mais elevadas. Os lasers de CO₂ estão disponíveis comercialmente com potências de saída de 0,5kW até 25kW.

Devido ao progresso no desenvolvimento de laser de CO₂ de alta potência, máquinas na faixa de 2kW até 5kW são freqüentemente empregadas em um amplo número de processos de soldagem.

Um laser de 2kW poderá alcançar uma profundidade de soldagem de 3mm para uma velocidade de 1m/minuto em aço, ao passo que um laser de 5kW e 10kW podem alcançar facilmente 7mm e 15mm respectivamente com a mesma velocidade.

2.4. Direcionamento do Feixe Laser

Talvez a mais importante característica do laser de Nd:YAG é que o comprimento de onda ($1,06\mu\text{m}$) de seu feixe pode ser conduzido por meio de um cabo de fibra óptica. Este aspecto faz do laser de Nd:YAG extremamente atrativo para altas velocidades de soldagem na produção e automação.

A radiação do laser de CO_2 pode ser transmitida exclusivamente através de lentes e espelhos para o local de processamento. É desvantajoso o fato de que os sistemas rígidos de espelhos são consideravelmente menos flexíveis e de manuseio mais difícil que as fibras condutoras de luz, que podem ser utilizadas diretamente nos braços dos robôs. A Figura 2.9 mostra uma representação esquemática de um dispositivo de movimentação do feixe de laser em 4 direções, além do movimento da mesa.

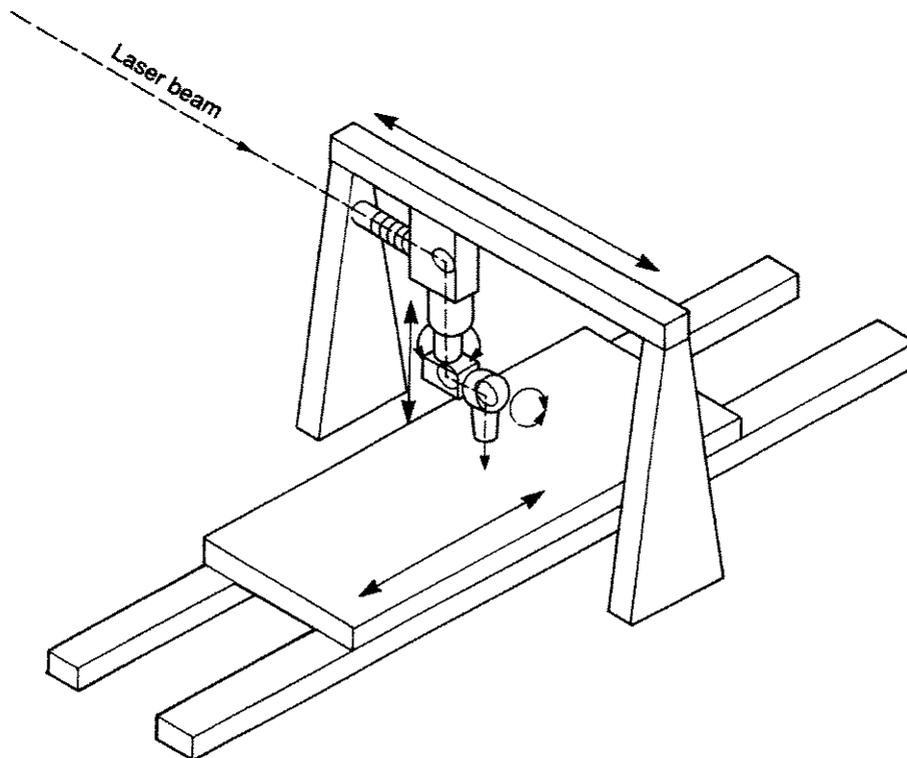


Figura 2.9. Ilustração do direcionamento do feixe de laser em equipamento de laser de CO_2
[Dawes, 1992].

Capítulo 3

Processos de Soldagem

3.1. Processos de soldagem

Denomina-se soldagem todo processo de união entre duas partes metálicas ou não, usando uma fonte de energia, com ou sem adição de calor [Wainer, 1992]. Soldar é operar de forma a obter continuidade metálica entre as peças a serem unidas, garantindo que haja uniformidade na união [Lopes, 1993]. A soldagem, enquanto processo de união de elementos estruturais na produção e fabricação de componentes metálicos, data de tempos ancestrais, porém é após a II Guerra Mundial que sofre um desenvolvimento significativo com a introdução da soldagem por fusão, permitindo obter componentes de grandes dimensões e geometrias complexas, com boas características mecânicas. Contudo, os problemas metalúrgicos apresentados por este tipo de soldagem, especialmente para aços, incentivaram o desenvolvimento de novos processos de soldagem e de novos materiais com melhores características de soldabilidade [Lopes, 1993]. A Figura 3.1 mostra a evolução dos processos de soldagem ao longo dos anos.

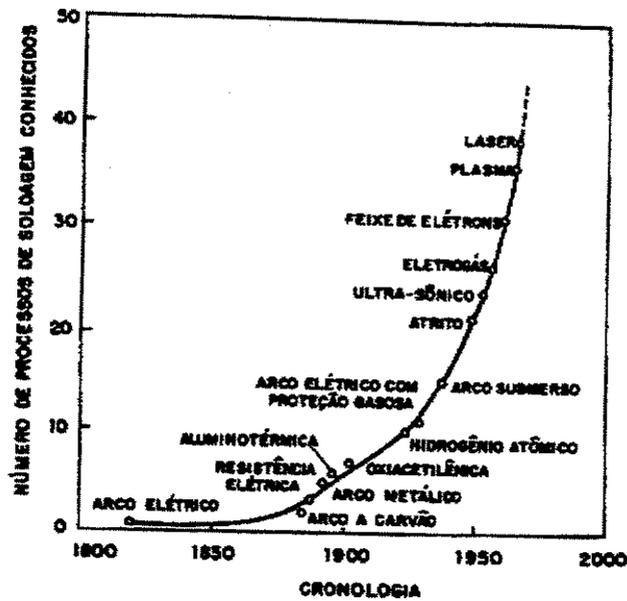


Figura 3.1. Evolução dos processos de soldagem ao longo dos anos [Vicentin,1999].

Os processos de soldagem que recebem calor de uma fonte externa são usualmente identificados com o tipo de fonte empregada. A Figura 3.2 apresenta a classificação dos processos de soldagem de acordo com a natureza da união, partindo da distinção entre soldagem no estado sólido e por fusão [Wainer, 1992].

A primeira envolve fenômenos de difusão e pode ser conseguida em fase sólida ou entre uma fase sólida e uma líquida, ou ainda, consiste em estabelecer a ligação atômica metálica, como acontece na soldagem por ultra-som e na soldagem por pressão a frio.

A segunda envolve a cristalização comum, que resulta da solidificação da zona fundida, onde essa zona inicia a solidificação sobre os grãos do material base sólido, desenvolvendo-se apenas aqueles que possuem uma orientação cristalina mais favorável relativamente às direções de escoamento de calor, sendo esta a situação mais comum que se observa em todos os processos de soldagem por fusão [Lopes, 1993].

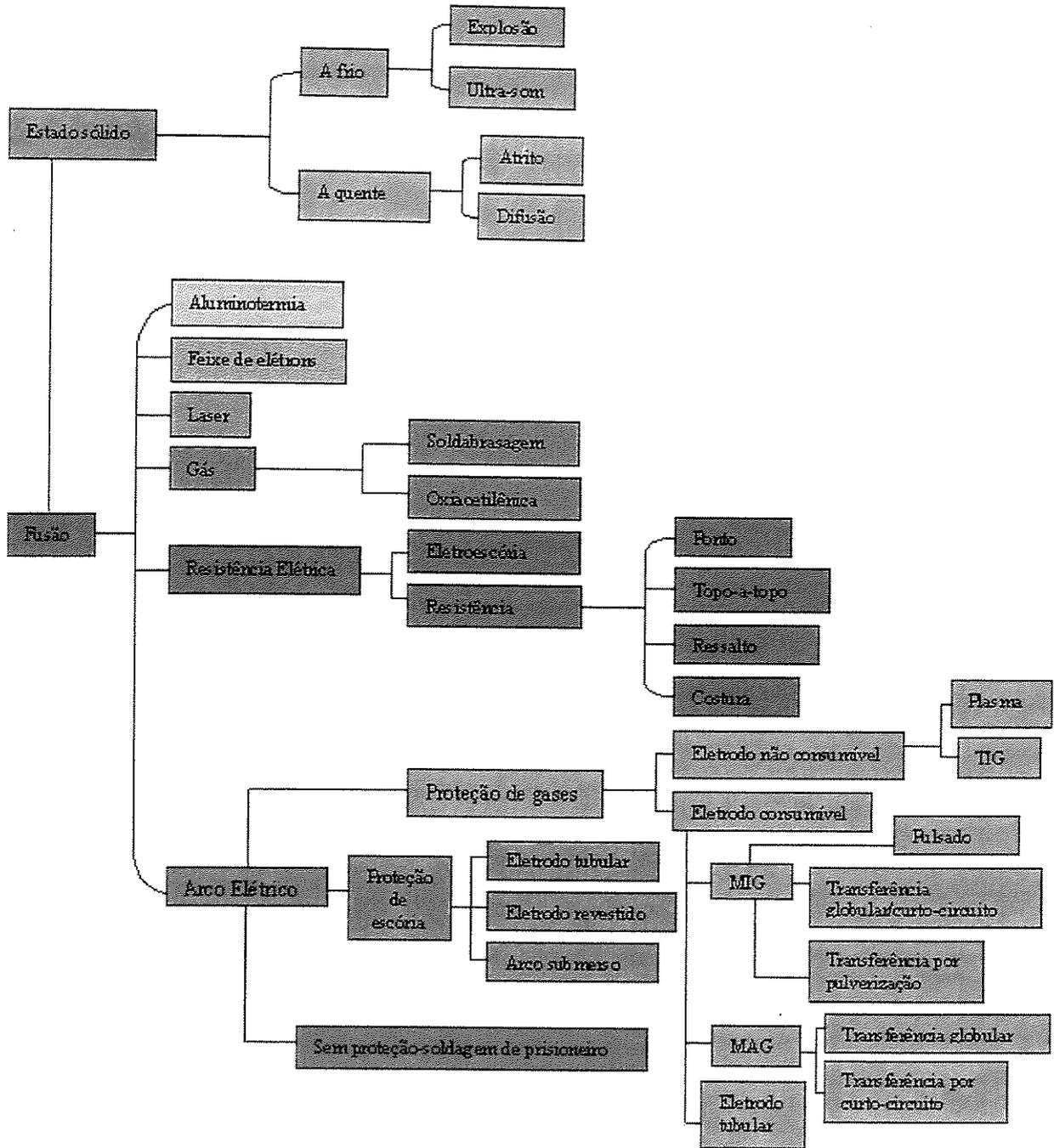


Figura 3.2. Classificação dos processos de soldagem a partir da natureza da união.

Muitos processos de soldagem requerem a aplicação de calor, pressão ou ambas, para produzir uma apropriada ligação entre as partes a serem soldadas. Os processos de soldagem podem ser classificados pelo tipo de fonte de energia, as quais podem ser classificadas em:

- fonte mecânica: o calor é gerado por atrito ou por ondas de choque, ou ainda por deformação plástica do material;
- fonte química: o calor é gerado por reações químicas exotérmicas como, por exemplo, a queima de um combustível (chama) ou a reação de oxidação do alumínio;
- fonte elétrica: o calor é gerado pela passagem de corrente elétrica ou com a formação de um arco elétrico, sendo que no primeiro caso, o aquecimento é realizado por efeito Joule e no segundo caso, por meio do potencial de ionização, corrente e outros parâmetros de soldagem;
- fonte radiante: o calor é gerado por radiação eletromagnética (laser).

Vários processos físicos são envolvidos com o processo de soldagem, incluindo calor, eletricidade, magnetismo, luz e som. Os processos de soldagem devem seguir os seguintes requisitos [Wainer, 1992]:

- gerar uma quantidade de energia capaz de unir dois materiais, similares ou não;
- remover as contaminações das superfícies a serem unidas;
- evitar que o ar atmosférico contamine a região durante a soldagem;
- propiciar o controle da metalurgia de soldagem, para que a solda alcance as propriedades desejadas, sejam elas físicas, químicas ou mecânicas.

Todos os processos de soldagem requerem alguma forma de energia. Para muitos processos, a fonte de calor energética fornece o calor necessário para a soldagem. Entretanto existem processos que não utilizam o calor, e requerem alguma forma de energia para produzir a ligação. O processo de soldagem abordado neste trabalho é a soldagem a laser [Welding Handbook] que utiliza de fonte de energia localizada. As duas fontes de energia localizada na soldagem são o laser e o feixe de elétrons, os quais são feixes focalizados e que operam de acordo com as leis da óptica. O alto grau de pureza espectral e a baixa divergência da radiação laser permitem focalizar o feixe em áreas extremamente precisas, resultando em densidades de potência maiores que 10^3 W/mm^2 .

3.2. Comparação entre os processos de soldagem

Dentre os processos de soldagem convencionais, a soldagem a laser se destaca encontrando um ativo campo de aplicação. A principal característica do laser utilizada para soldagem de materiais é a sua capacidade de dirigir uma considerável quantidade de energia sobre uma superfície muito pequena. Graças a sua coerência que se manifesta por uma propagação monocromática acompanhada de uma colimação quase perfeita, os feixes lasers podem ser focalizados por meio de lentes ou de espelhos, sobre escalas espaciais muito pequenas. Em seguida, a fração absorvida dessa energia eletromagnética é rapidamente convertida em energia térmica no próprio interior do material. Conforme as características do material e o período de interação entre esse material e o feixe, pode-se provocar uma transformação termomecânica do material em um tempo muito curto [Maillet, 1987].

Cada processo de soldagem tem suas vantagens e limitações, onde o adequado balanço dessas características determinará suas aplicações típicas, A Tabela 3.1 mostra as vantagens e inconvenientes dos processos e algumas aplicações. A Tabela 3.2 mostra algumas outras vantagens entre a soldagem a laser e outros processos de soldagem.

Tabela 3.1. Características e aplicações de processos de soldagem.

Processo	Vantagens	Desvantagens	Emprego
SOLDAGEM NO ESTADO SÓLIDO	Ausência de metal fundido na união. Pouca influência nas propriedades mecânicas do material base.	Geometria restrita de juntas Equipamentos robustos, fixos e caros.	
Soldagem por explosão	Juntas com excelentes propriedades. Baixo custo para certas aplicações. Adequado para juntas de metais dissimilares. Independente de energia elétrica.	Limitado às juntas sobrepostas. Perigo pelo uso de explosivos.	Chapa caldeada. Juntas de transição. Soldagem de tubos.
Soldagem por atrito	Juntas com excelentes propriedades. Adequado para juntas de metais dissimilares. Necessita de pouca energia elétrica.	Limitado às juntas de topo. Necessita de acabamento final após a soldagem (usinagem)	Soldagem de tubos. Soldagem com peças de geometria cilíndrica.

<p>SOLDAGEM POR FUSÃO</p> <p>Soldagem por resistência</p> <p>Soldagem oxi-acetilênica</p> <p>Soldagem com arco</p>	<p>Versatilidade no projeto da junta e na montagem.</p> <p>Custo reduzido da maioria dos processos de soldagem.</p> <p>Propriedades mecânicas adequadas na união.</p> <p>Muitas uniões podem ser examinadas com ensaios não-destrutivos.</p> <p>Não exige mão-de-obra de grande habilidade.</p> <p>Pouco tratamento antes e após a soldagem.</p> <p>Processo barato.</p> <p>Equipamento portátil.</p>	<p>Presença de metal fundido.</p> <p>Apresenta zona afetada pelo calor.</p> <p>Obriga a tratamentos térmicos.</p> <p>Geometria limitada da junta.</p> <p>Dificuldades com ensaios não-destrutivos</p> <p>Equipamentos não portáteis.</p> <p>Distorções na estrutura.</p> <p>Calor pouco concentrado durante a soldagem</p>	<p>Soldagem de tubos com costura.</p> <p>Carcaça de automóvel.</p> <p>Reparos.</p> <p>Manutenção e brasagem.</p>
<p>a) Eletrodo revestido</p> <p>b) Arco submerso</p> <p>c) TIG</p> <p>d) MIG gás inerte</p> <p>e) MAG-CO₂ com transferência por pulverização.</p> <p>f) MAG-CO₂ com transferência por curto-circuito.</p>	<p>Grande versatilidade no projeto da junta e na posição de soldagem.</p> <p>Baixo custo.</p> <p>Uniões com excelentes propriedades.</p> <p>Não exige grandes ajustes de estrutura (posição).</p> <p>Processo automático.</p> <p>Alta taxa de deposição.</p> <p>Grande versatilidade manual ou automática, tipo de junta, posição de soldagem.</p> <p>Soldas com elevada qualidade.</p> <p>Adequado para metais ferrosos e não-ferrosos.</p> <p>Solda com alta qualidade para a maioria das ligas.</p> <p>Alta taxa de deposição.</p> <p>Processo semi ou totalmente automatizado.</p> <p>Elevada penetração.</p> <p>Alta taxa de deposição.</p> <p>Baixo custo dos gases.</p> <p>Processo semi-automático.</p> <p>Todas as posições de soldagem.</p> <p>Boa qualidade de solda.</p> <p>Baixo custo dos gases.</p> <p>Usado em chapas finas de aço (1-4 mm).</p> <p>Tolerância com mau posicionamento da junta.</p>	<p>Mão-de-obra habilidosa.</p> <p>Frequente mudança de eletrodos.</p> <p>Na soldagem com várias camadas é necessário remover a escória em cada passe.</p> <p>Somente na posição plana ou horizontal.</p> <p>Restrito aos aços.</p> <p>Cuidado no posicionamento da junta.</p> <p>Elevado custo de consumíveis.</p> <p>Mão-de-obra habilidosa.</p> <p>Soldagem com várias camadas em solda topo com espessura acima de 5 mm.</p> <p>Custo elevado do gás inerte.</p> <p>Mão-de-obra habilidosa.</p> <p>Cuidado com o posicionamento da junta.</p> <p>Posição plana.</p> <p>Somente para aços carbono e de baixa liga com espessura de 6 mm.</p> <p>Cuidado com o posicionamento da junta.</p> <p>Somente para aços-carbono e de baixa liga.</p> <p>Ocorrência de falta de fusão com soldador sem prática.</p>	<p>Processo mais usado na fabricação e na manutenção.</p> <p>Solda de topo ou ângulo com mais de 1m de comprimento e 5 a 50 mm de espessura.</p> <p>Passe de raiz em aços ligados</p> <p>Usado em união de não-ferrosos e inoxidáveis.</p> <p>Usado em aços inoxidáveis e ligas não-ferrosas.</p> <p>Usado para aços-carbono e de baixa liga.</p> <p>Para grandes produções e soldas de boa qualidade.</p> <p>Fabricação de equipamentos com chapa fina.</p> <p>Passe de raiz em chapa grossas.</p>

g) MIG pulsado.	Processo semi-automático. Todas as posições de soldagem. Aplicado à maioria das ligas e espessuras. Qualidade de solda muito boa.	Equipamento complexo. Custo moderado do processo.	Usado principalmente em soldagem de aço-carbono, inox e não-ferrosos.
h) Soldagem por plasma	Soldagem automática com alta velocidade. Grande variedade de metais e ligas. Espessuras de 0,5 a 6 mm.	Elevado custo do equipamento. Posição plana da soldagem. Bom alinhamento da junta. Junta usinada.	Soldagem de metais com espessura muito fina, para MIG e muito grossa para TIG.
Soldagem por eletroescória	Soldagem automática com alta velocidade. Alta taxa de deposição. Usado em aço-carbono e de baixa liga com espessura acima de 50 mm.	Posição vertical de soldagem. Solda e ZAT com estruturas grosseiras, exigindo tratamento térmico após a soldagem. Cuidado na montagem da estrutura	Soldagem de chapas grossas de aço.
Soldagem por feixe de elétrons	Elevada penetração. Solda com excelente qualidade. Distorção mínima.	Custo muito alto do equipamento. Dimensões das peças limitadas ao tamanho da câmara de vácuo. Projeto de câmara de vácuo local.	Uso restrito devido ao tamanho do câmara. Ligas especiais.
Soldagem por laser	Verificar Tabela 3.3.	Verificar Tabela 3.3.	Usinagem de furos.

Tabela 3.2. Comparação entre soldagem a laser e outros processos de soldagem.

Parâmetros	FL	FE	MIG	MAG	SR
Pequena zona termicamente afetada	+	+	-	-	0
Altas velocidades de soldagem	+	+	-	+	-
Soldagem em atmosfera pressurizada	+	-	+	+	+
Soldagem metais refletivos	-	+	+	+	+
Processo automatizado	+	-	+	0	+
Custo de capital	-	-	+	+	+
Custo operacional	0	0	+	+	+

+ vantagem; - desvantagem; 0 neutro; FL feixe laser; FE feixe de elétrons; MIG soldagem feita por fluxo de gás inerte; MAG soldagem feita por fluxo de gás ativo; SR soldagem por resistência.

3.2.1. Vantagens e Limitações

Em relação aos processos de soldagem convencionais, podemos citar como principais vantagens e desvantagens da soldagem a laser:

Vantagens:

- a) processo produz pouca distorção térmica em virtude desse apresentar um feixe focalizado e com alta densidade de energia afetando uma pequena área, produzindo um cordão de solda fino e uma estreita ZTA (Zona Termicamente Afetada);
- b) altas velocidades de produção;
- c) as soldas apresentam geralmente alta qualidade, no caso de aços, alta conformabilidade;
- d) os sistemas de laser apresentam grandes capacidades de programação, versatilidade e posicionamento, principalmente no caso do Nd:YAG, sendo esses muitas vezes acoplados a sistemas robóticos, permitindo o processamento de peças com geometrias complexas;
- e) o processo laser não é poluente.

Desvantagens:

- a) o custo para investimento no equipamento é geralmente alto, além de que o sistema possui itens consumíveis, tais como: gás de proteção, lentes para o laser CO₂ e lentes especiais de proteção para o laser Nd:YAG;
- b) limitação de profundidade de penetração da solda, particularmente para o caso do alumínio sendo que os lasers de Nd:YAG permite soldas com profundidade de 2 a 6 mm e para o caso do laser CO₂ até no máximo 6 mm;
- c) por se tratar de um processo que envolve a transformação de fase sólido-líquido em materiais, o processo de soldagem a laser também apresenta problemas similares aos processos convencionais, como a sensibilidade à formação de trincas, principalmente para o caso do alumínio;
- d) devido ao feixe laser ser altamente focado, implicando em pequena região irradiada, o processo não tolera diferenças maiores que 10% da espessura dos materiais que serão soldados;
- e) o risco de acidentes está no processo e danos aos olhos podem resultar da exposição a algum tipo de feixe, sendo então necessário o uso de equipamentos de proteção individual e isolamento da área de trabalho. É necessário também um operador treinado e experiente.

De acordo com a Figura 3.3 a representação dos dados de soldagem em chapas finas de um aço baixo carbono (aço doce), obtidos com potência do laser de 3kW mostra que a melhor penetração da solda é obtida com soldagem a laser de YAG. Convém salientar que para velocidades próximas de 2m/minuto a profundidade de penetração com aplicação do laser de YAG e laser de CO₂ serão de 4mm [Duley, 1999]. Para espessuras próximas de 2mm, a soldagem a laser YAG é 50% mais rápida que a soldagem a laser CO₂. A qualidade da solda para aço baixo carbono é similar para os dois sistemas laser.

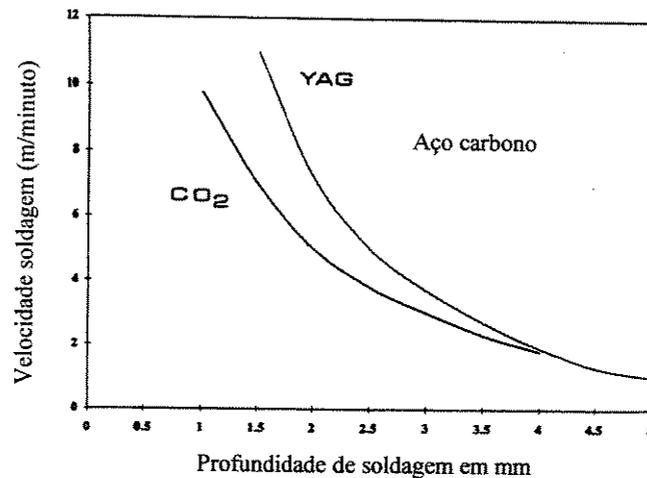


Figura 3.3. Comparação entre velocidade e profundidade de soldagem para lasers de CO₂ e Nd:YAG de 3 kW de potência [Dulley, 1999].

Segundo Seyffarth [Seyffarth, 2000], a importância do laser de Nd:YAG crescerá futuramente em virtude de massas mais reduzidas, das melhores condições de acoplamento, e do grau de absorção mais elevado em decorrência do menor comprimento de onda. A Figura 3.4 mostra as vantagens do laser de Nd:YAG em relação ao laser de CO₂ em função da profundidade de soldagem e a velocidade de soldagem, ambos com mesma potência.

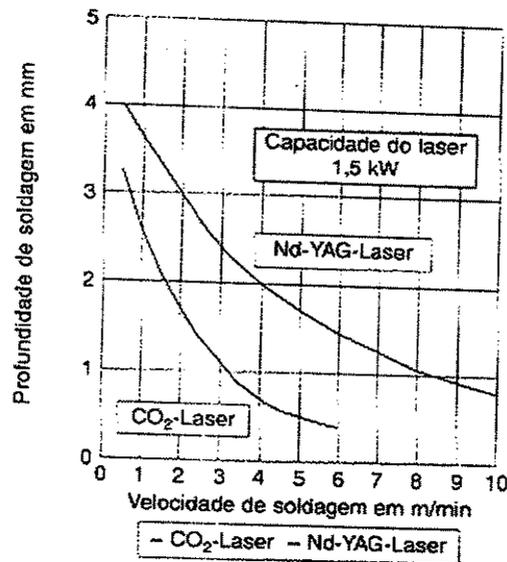


Figura 3.4. Comparação da profundidade de soldagem do laser Nd:YAG e do laser CO₂ com igual capacidade do laser, como função da velocidade de soldagem [Seyffarth, 2000].

Muitos lasers de CO₂ são utilizados em tarefas como soldagem, corte, perfuração, tratamento de superfície, marcação e furação, efetuadas em substâncias diversas tais como metais, cerâmica, plásticos, madeiras, tecidos e couros. Na maioria dos casos as fontes de laser de CO₂ possuem potência de 200W e superiores, sendo que a utilização de lasers ou sistema a base de laser, tem trazido maior eficiência em muitos processos produtivos, além de permitir a realização de processos inviáveis por qualquer outro método. Se considerarmos o número de aplicações já estabelecidas no mundo e, ao mesmo tempo, o número de projetos que podem ser baseados em novas aplicações, parece indiscutível que a tecnologia do laser de CO₂ será chamada para desempenhar um papel de destaque em muitos procedimentos de pesquisa e de aplicações industriais.

3.3. Características físicas da soldagem por laser

Entre as principais características físicas do processo de soldagem a laser, destacam-se:

- a superfície polida dos metais reflete em torno de 90% da radiação depositada pelo laser de CO₂, no caso de incidência vertical;
- a reflexão é tanto maior, quanto mais elevada for a condutibilidade elétrica do material [Seyffarth, 2000];
- se uma densidade característica de fluxo de potência é ultrapassada, forma-se um canal de vapor (efeito de soldagem profunda). A ocorrência do efeito de soldagem profunda pode ser identificada pela formação de um plasma induzido de laser (fenômeno luminoso azulado);
- está ligado à ocorrência do efeito de soldagem profunda, um aumento repentino da absorção de radiação e do grau de atuação;
- com a utilização de parâmetros inadequados do processo, o plasma pode blindar a peça a ser trabalhada contra a radiação laser e, deste modo, reduzir o acoplamento de energia;
- esta blindagem de plasma pode ser reduzida, ou até mesmo evitada, por meio de gases de processamento.

3.3.1. Gases de proteção e supressão de plasma

A utilização de gases de proteção apresenta dois aspectos importantes:

- proteger o cordão de solda e a superfície de metal fundido da oxidação, evitando a porosidade e a formação de inclusões de óxidos, que deterioram a qualidade da solda;
- proteger a transmissão do feixe de laser, minimizando o espalhamento do feixe causado por vapores e gases na região externa do cordão de solda, melhorando com isto a profundidade de penetração.

O primeiro caso, pode ser alcançado com vários tipos de gases, porém, no segundo, tem-se maior dificuldade, já que durante o processo de soldas metálicas, o vapor expelido na região da solda absorve parte da energia do laser, ionizando-se e formando uma nuvem de plasma na superfície do cordão. Essa nuvem de plasma absorve ou reflete parte da energia do feixe laser, resultando numa difusão geral de potência antes do feixe atingir a superfície, reduzindo a profundidade de penetração e contribuindo para o espalhamento do feixe laser [Dawes, 1992].

Os gases mais comuns utilizados para proteção no sistema laser são Argônio, CO₂, Hélio e Nitrogênio (livre de O₂) [Crafer, 1993]. Estes gases têm efeitos diferentes quando utilizados em lasers de CO₂ e Nd:YAG.

O laser de Nd:YAG, devido ao comprimento de onda e o modo pulsado de operação, limita a formação do plasma, isto porque a região da solda é fundida em um curto espaço de tempo, não causando a formação de óxidos que possam ser absorvidos durante o processo de solidificação. No entanto, quando se utiliza modo contínuo ou sobreposição do feixe, algum óxido pode-se formar, necessitando de um gás de proteção para assegurar a qualidade da solda. Argônio e nitrogênio são utilizados para equipamentos com potência de até 300 W, lembrando que o nitrogênio pode causar fragilização em alguns tipos de aços (formação de nitretos). Acima de 300 W, utiliza-se uma mistura de gases tais como 20% CO₂ + 80% argônio ou argônio +1-2% oxigênio.

Na soldagem utilizando laser de CO₂, a perda de penetração devido à formação de plasma é predominante quando se utiliza gás incorreto ou empregam-se combinações de alta potência e baixa velocidade do feixe, usualmente menor que 1 m/min.

Em velocidades baixas, utiliza-se uma proteção com gás composto, formada de um campo principal e de um jato especial de supressão de plasma. Quando a velocidade de soldagem é acima de 1 m/min, o controle eficiente do plasma é alcançado utilizando-se uma proteção simples e selecionando o tipo de gás. Dentre os principais gases disponíveis temos [Chung, 1999]:

Hélio(He):

É o mais comum e o melhor gás de proteção utilizado para soldas a laser de CO₂, pois apresenta elevado potencial de ionização, o que implica que ele pode absorver mais energia, evitando assim a formação de plasma. Além disso, para uma dada condição de soldagem, penetração profunda de solda pode ser atingida. Por ser mais leve que o ar, o hélio não se acumula na zona de soldagem por muito tempo, e se espalha. É recomendado na soldagem de materiais como aços inoxidáveis, ligas a base de titânio e de zircônio, onde a qualidade da solda será drasticamente degradada pela oxidação.

Quando comparado com outros gases, o hélio apresenta um custo 2,5 vezes maior que o argônio e 10 vezes mais que o CO₂ e nitrogênio.

Nitrogênio(N₂):

Apresenta características similares às do hélio em termos de prevenção da formação de plasma, porém, atenção especial deve ser tomada para soldagem de certos tipos de aços do ponto de vista da qualidade de solda, podendo causar fragilização por nitretos. Assim, deve ser tratado com precaução se considerado para realização de soldas cujos altos índices de qualidade e confiabilidade são requeridos. Para o caso da indústria automobilística, é o gás mais comumente utilizado, substituindo o argônio devido à redução de custos. O nitrogênio é utilizado para soldas menores que 4 mm, sendo que para soldagens acima disso e materiais que apresentam problemas de fragilização por nitrogênio, recomenda-se o gás hélio.

Dióxido de carbono (CO₂):

Não é recomendável para soldas a laser de CO₂ operando no modo de onda contínua, devido ao fato do CO₂ reagir muito rapidamente com o feixe de laser, causando a formação de uma indesejável nuvem de plasma extremamente brilhante e densa, que pode refletir a luz do laser de volta à focagem óptica, danificando-a. Pode ocorrer também uma rápida perda de penetração em um comprimento de cordão de solda muito pequeno. Estudos têm mostrado que a utilização do gás CO₂ operando no modo pulsado apresenta boas características dos cordões de solda [Dawes, 1993].

Argônio(Ar):

É extremamente bom como gás de proteção para a prevenção de oxidação, não reagindo com o material. No entanto, favorece a formação de uma nuvem de plasma tão rapidamente como no caso do CO₂, mas não tem a mesma eficiência do hélio e do nitrogênio. Quando usado com o laser de CO₂ no modo contínuo e sob certas circunstâncias onde o gás não é extraído da zona da solda, esse gás não escapa tão rapidamente da zona da solda devido ao fato desse ser mais pesado que o ar, estagnando e formando uma nuvem de plasma densa, a aproximadamente 100 mm do início do cordão de solda, o que resulta numa repentina perda de profundidade de penetração da solda. Como gás de proteção para soldas com laser contínuo, ele só é recomendado quando pode ser retirado da região da solda por gravidade ou por algum modo de extração, ou quando a formação da nuvem de plasma não é problema, como no caso da soldagem de chapas de espessura fina.

Mistura de gases:

Para soldagem de chapas de aço de alta resistência e baixa liga (ARBL) recomenda-se o uso de misturas de hélio-argônio, hélio-nitrogênio, argônio-oxigênio. Para as misturas de hélio-nitrogênio utiliza-se porcentagens de 30 a 50 % de nitrogênio, sendo recomendadas para casos onde a formação da nuvem de plasma não é desejada. Para os demais casos, pode-se utilizar misturas hélio-argônio e argônio-oxigênio. O efeito da supressão de plasma é mostrado na Figura 3.5 onde as seções foram soldadas com e sem supressão de plasma, em uma chapa de 12 mm, com potência de 7,4 kW e com velocidades de soldagem que vão de 0,5 ate 1,25 m/minuto.

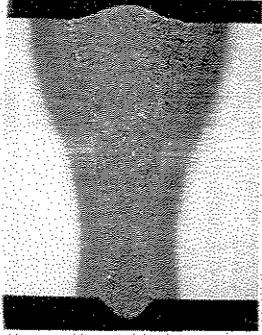
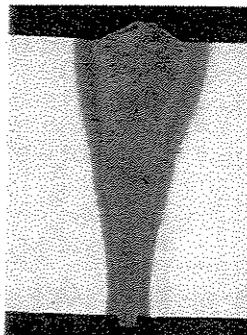
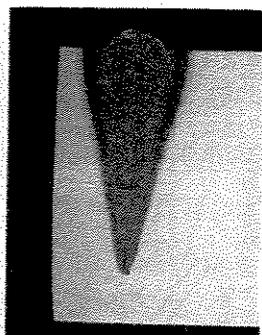
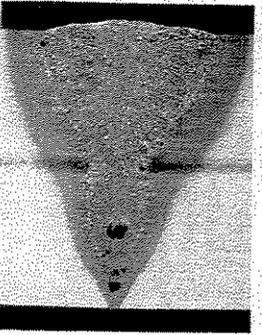
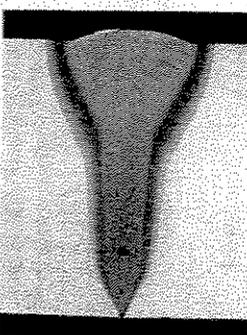
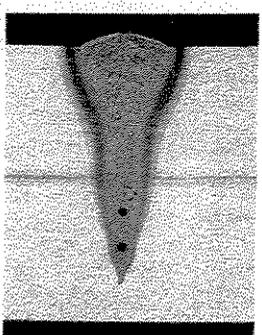
Potência laser 7.4 kW	Velocidade de soldagem			
	0,5 m/minuto	0,75 m/minuto	0,9 m/minuto	1,25 m/minuto
Com supressão de plasma (He) 20 l/min.				
Sem supressão de plasma (He)				

Figura 3.5. O efeito da supressão de plasma no aspecto da solda e a profundidade de soldagem numa chapa de 12 mm, com diferentes velocidades de soldagem [Dawes, 1992].

3.3.2. Parâmetros do processo

Os principais parâmetros de soldagem a laser são:

- potência do raio laser no local da peça a ser trabalhada;
- diâmetro do raio laser focalizado (diâmetro do foco);
- profundidade de foco (distância focal);
- velocidade de soldagem;
- posicionamento do foco em relação à peça a ser trabalhada (Figura 3.6);
- gás de proteção.

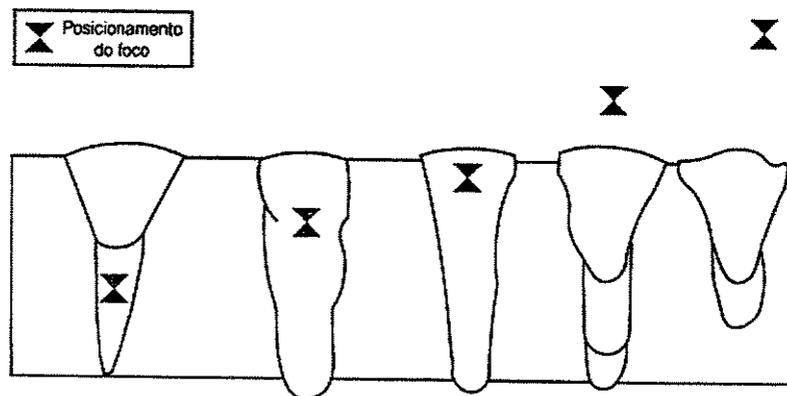


Figura 3.6. Geometria do banho de fusão em função da posição do foco [Seyffarth, 2000].

Outros importantes parâmetros a serem considerados no processo, podem ser agrupados no diagrama da Figura 3.7 [Tzeng, 2000], que demonstra vários fatores que afetam a qualidade da soldagem.

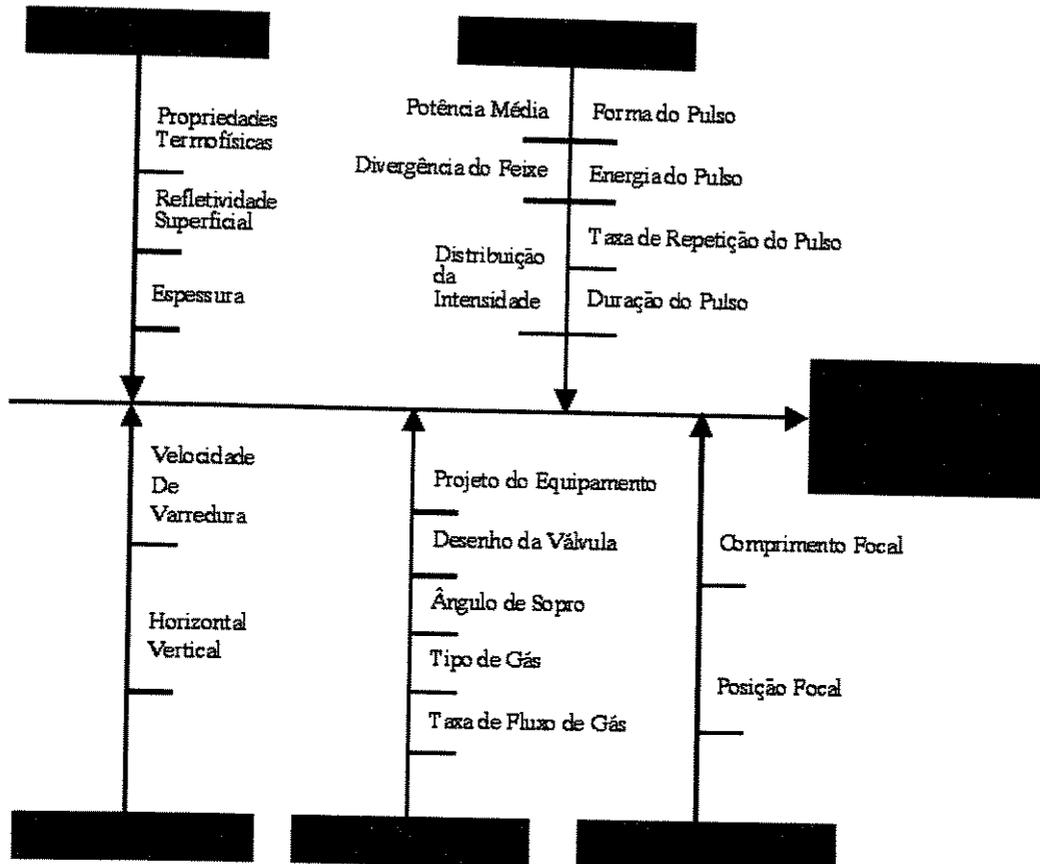


Figura 3.7. Diagrama que demonstra os parâmetros que afetam a qualidade da solda laser.

3.3.2.1. Parâmetros da soldagem a laser e seus efeitos

A forma e a profundidade da solda são determinadas pela maneira na qual a energia no processo de soldagem é aplicada na junta. Para o processo de soldagem, a energia depositada pelo feixe laser é controlada pela combinação dos seguintes parâmetros [Dawes, 1992]: focalização do feixe laser (“spot size”), “keyhole”, potência do laser e velocidade de soldagem.

Outras considerações práticas incluem, o modo espacial, o modo temporal, o comprimento de onda e a refletividade [Chryssolouris, 1991]. A otimização desses parâmetros define as condições de soldagem [Duley, 1998]. Em muitos casos, esta determinação envolve o

seccionamento da solda para medir a profundidade e a forma da solda, juntamente com as propriedades metalúrgicas e microestruturais.

Potência laser:

A potência de saída [Dawes, 1992] é a característica básica de um laser. Em geral, alta potência contínua é obtida com lasers de CO₂, enquanto que o Nd:YAG fornece altos picos de potência para operações pulsadas. A quantidade de potência laser requerida é determinada pela característica das propriedades térmicas e ópticas do material [Chryssolouris, 1991].

A quantidade de energia para fundir e vaporizar o material inclui calor específico, calor latente e calor de vaporização. Por outro lado, outras propriedades como difusividade e condutividade térmicas são importantes porque determinam a energia transmitida nas vizinhanças do material durante o processamento. As propriedades ópticas do material afetam a superfície onde o feixe laser é incidido. Das propriedades ópticas dos materiais, o coeficiente de absorção de um material tem uma ampla influência na potência do laser requerida. A absorção do material determina a fração de energia irradiada pelo laser que é absorvida pelo material. O restante da energia do feixe laser é refletida para o meio ambiente. Então a potência laser deve ser ajustada de tal forma que a quantidade de energia para alcançar a taxa de processamento desejado seja atingida.

O valor do coeficiente de absorção pode variar dependendo do comprimento de onda do feixe laser irradiado na superfície, da rugosidade da superfície, da temperatura e da fase do material. A faixa operacional do sistema de soldagem laser é o primeiro parâmetro definido por meio da relação entre a potência laser e a velocidade de soldagem para um dado material e uma profundidade de penetração específica. Curvas relacionando velocidade de processamento e potências de trabalho para várias espessuras foram levantadas empiricamente, a partir de dados experimentais. Um exemplo de tal relação para soldagem de aço baixo carbono com laser de CO₂ é mostrado na Figura 3.8 [Duley, 1998]. Estas curvas especificam uma faixa de condições que geralmente conduz a soldagens aceitáveis.

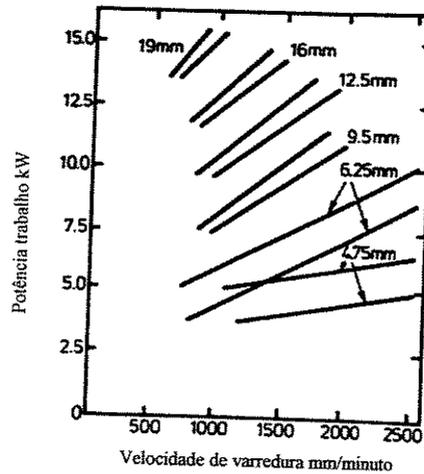


Figura 3.8. Potência do laser de CO₂ como função da velocidade de soldagem para diferentes espessuras de chapas de aço. [Duley, 1998]

Densidade de potência:

No laser em operação a relação entre a potência de saída P e a energia do feixe laser E é dependente do tempo de interação (“dwell time”) t_d , dado por $P = \frac{E}{t_d}$ medido em joules por segundo [Siegman, 1973].

A densidade de potência dP (Intensidade) é igual à potência (energia por unidade de tempo por unidade de área A transmitida na direção normal à onda de propagação):

$$dP = \frac{P}{A} = \frac{P}{\pi \omega^2} \tag{3.1}$$

onde ω é determinado pela equação:

$$\omega = \frac{\lambda f}{\pi \omega_L} \tag{3.2}$$

Para o cálculo da densidade de potência em W/cm^2 é necessário que se conheça os parâmetros do laser (diâmetro do feixe e a potência do laser), sendo ω o raio do feixe, ω_L o raio da lente, f é a distância focal e λ o comprimento de onda.

Comprimento de onda:

O comprimento de onda é a característica de comprimento espacial associado com um ciclo de vibração para um fóton no feixe laser. A cavidade do laser deve ser apropriadamente desenhada para produzir o correto comprimento de onda [Chryssolouris,1991].

A seleção dos acessórios ópticos tais como lentes, espelhos, polarizadores e janelas também depende do comprimento de onda do feixe laser. A absorção dos materiais pode ser altamente dependente do comprimento de onda do feixe laser e, devido a isso, deve-se escolher certos lasers que serão mais apropriados para o processamento dos materiais.

Diâmetro do feixe “spot size”:

Para se obter densidades de potência altas o bastante para fundir ou vaporizar qualquer material é importante focalizar o feixe laser [Duley,1998; Chryssolouris,1991]. O máximo de densidade de potência é obtido no ponto focal da lente, onde o feixe converge para o menor diâmetro (Figura 3.9); e a localização deste diâmetro mínimo é chamada de diâmetro focal.

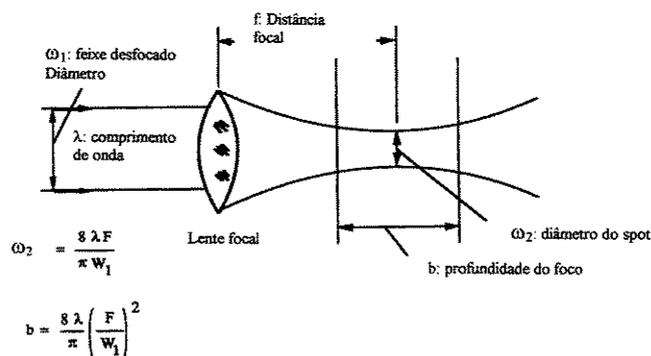


Figura 3.9. Cálculo do diâmetro focal e da profundidade de foco [Chryssolouris, 1991].

Densidades de potência da ordem de 10^6 Watts/cm² podem ser obtidas em função do pequeno diâmetro focal. Vários fatores influenciam o diâmetro focal. Por exemplo, o diâmetro focal é diretamente relacionado com a qualidade do feixe, que pode ser quantificado pela divergência do feixe. Um feixe laser com pequena divergência pode ser focalizado em um

diâmetro menor do que um feixe com alta divergência. E também, o diâmetro focal é influenciado pela difração do feixe laser com a lente, e finalmente, o diâmetro do feixe laser em relação ao modo TEM afeta o diâmetro focal [Dawes,1992].

3.4. Capacidade de soldagem por laser nos materiais

A soldagem de metais e de ligas com auxílio do feixe laser é caracterizada por:

- aquecimento rápido (>100000 K/s);
- uma reduzida região termicamente afetada;
- um curto ciclo de temperatura, combinado com uma alta velocidade de resfriamento.

A capacidade de um material para a soldagem é determinada essencialmente por sua composição química. Além disto, são significativas na soldagem a laser as características físicas, como o comportamento de absorção das superfícies metálicas, condutibilidade térmica dos diversos materiais metálicos, a temperatura de fusão e de evaporação [Seyffarth, 2000].

A seguir, será descrito o comportamento de alguns grupos de materiais metálicos, levando em consideração as características técnicas de processamento da soldagem a laser.

Cobre: em geral, a soldagem a laser de CO_2 não é recomendada. O cobre é um excelente refletor da luz do laser para o comprimento de onda do laser de CO_2 que é de $10,6 \mu m$, os espelhos de cobre altamente polidos são usados nos lasers de CO_2 para transmitir a luz do laser dentro do próprio laser e entre o laser e as estações de trabalho. Sendo recomendado o uso somente para lasers de Nd:YAG.

Ferro fundido: ferro fundido nodular pode ser soldado usando um arame de preenchimento para evitar trincas na solda.

Ligas a base de níquel e ligas de alto níquel (*hastelloy, inconel, monel, waspaloy*): algumas dessas ligas soldam extremamente bem, produzindo muitas qualidades diferentes de solda. No entanto, os materiais produzidos devem ser avaliados, respeitando-se as propriedades da solda,

neste caso é necessário um material de adição para melhorar.

Aços: dentro desta classe de material descreveremos alguns elementos importantes.

-Oxigênio: é um elemento que é usado para fabricar o aço, porém se sua quantidade ultrapassa 100 ppm, (chapas finas principalmente) pode ocasionar porosidades e eventualmente trincas. Por outro lado com menor quantidade de oxigênio, é possível obter uma qualidade de solda mais consistente.

-Carbono: é usado para aumentar a dureza e a resistência, no qual o nível de carbono depende da aplicação do aço. Assim como o nível de carbono aumenta, aumentam também os problemas, afetando a qualidade da solda. Os aços baixo carbono, os quais tem níveis de carbono na ordem de 0,1% produzem boa qualidade de solda. Um estreito cordão de solda produzido com laser em aço baixo carbono é altamente duro. Isto acontece porque a alta velocidade de soldagem causa altas taxas de resfriamento, resultando endurecimento localizado (tratamento térmico). Nos aços onde a taxa de carbono é aumentada além de 0,1 %, a rápida taxa de resfriamento produz uma microestrutura martensítica, uma fase frágil, que causa uma redução na tenacidade e ductilidade. A alta dureza da martensita pode causar uma trinca no resfriamento, tanto no metal soldado quanto na ZTA. Esta trinca se propaga durante os estágios posteriores ou após o resfriamento. Além do carbono, outros elementos influenciam a dureza após o resfriamento, como Mn, Cr, Cu, Mb, V.

-Enxofre e Fósforo: estão presentes nos aços como elementos residuais do processo de fabricação, e seus níveis são controlados de acordo com a aplicação e o tipo de aço, pequenas quantidades desses elementos podem promover sérias trincas na solidificação da solda. Para juntas soldadas com baixa resistência mecânica recomenda-se até 0,04% de Fósforo e Enxofre, e para juntas soldadas com alta resistência mecânica recomenda-se até 0,02%, representativamente para se evitar trincas na solda.

Aços baixo carbono – boa qualidade da solda, pode ser alcançada mantendo-se os níveis de enxofre e fósforo em níveis baixos.

Aços médio e alto carbono – soldável, mas precauções especiais são necessárias para assegurar propriedades aceitáveis da solda.

Aços ligados – soldas a laser tem sido realizadas em várias tubulações e estruturas de aços com a obtenção de resultados satisfatórios. Porém devido à rápida taxa de resfriamento a solda pode apresentar alta dureza o que provoca problemas quanto à porosidade, trincas e defeitos de qualidade.

Aço inoxidável austenítico: boa qualidade da solda pode ser alcançada em vários graus. Os aços inox austeníticos tem uma condutividade térmica em torno de 33% do aço carbono e uma absorção superior da luz do laser. Conseqüentemente uma maior profundidade de penetração de solda pode ser alcançada em relação ao aço carbono para uma dada condição de solda. Uma das razões da fácil soldagem dos aços austeníticos é a baixa condutividade térmica e a alta velocidade de soldagem, as quais não permitem que danos metalúrgicos ocorram, diminuindo a resistência à corrosão da solda. Outra vantagem do uso da solda laser nestes aços é a baixa distorção do cordão produzida pela baixa entrada de calor e pela configuração geométrica da solda laser.

Aço inoxidável ferrítico: em muitos casos, implica na tenacidade da junta e na resistência à corrosão. A redução da tenacidade é devida em parte pela formação de grãos grandes na ZTA e a formação de martensita a qual ocorre nos níveis de alto carbono. A baixa entrada de calor da soldagem a laser, entretanto reduz o nível de crescimento dos grãos na ZTA quando comparado com a alta entrada de calor das técnicas de soldagem. No entanto, a ZTA pode ter um aumento na dureza devido à alta taxa de resfriamento.

Aço inoxidável martensítico: esses aços produzem soldas de qualidade inferior aos aços ferríticos e austeníticos. O alto nível de carbono produz uma ZTA e soldas muito duras devido à formação de martensita. Se o aço tiver teor de carbono acima de 0,1%, então um material de preenchimento de aço inox austenítico deve ser usado para melhorar a tenacidade da solda e evitar trincas na mesma. Entretanto, isso não irá reduzir a fragilidade na ZTA, sendo que essa variável pode ser minimizada utilizando um pré-aquecimento das chapas em temperaturas próximas de 350 C, e revenindo o junta soldada em temperaturas na faixa de 650-750 C.

Titânio: boa qualidade da solda com estrutura de grãos finos pode ser alcançada. Mas a limpeza do material antes da solda e o gás de proteção na poça de soldagem são essenciais para uma alta qualidade.

Alumínio: em razão da alta capacidade de reflexão da superfície e da boa condutibilidade térmica

do alumínio, uma boa condição para a soldagem somente é possível com uma densidade de potência suficientemente alta do feixe laser. O alumínio puro assim como os grupos de liga Al-Si e Al-Cu apresentam geralmente uma boa condição de soldagem. Com teores mais elevados de magnésio e zinco, ocorre a formação de poros na costura de solda. Uma cobertura negra para aumentar a absorção do laser tem sido utilizada, mas não vem sendo praticada, pois pode contaminar a solda.

3.5. Soldagem a laser e suas aplicações industriais

Tailored Blanks:

Tailored Blanks é uma técnica onde as chapas planas são soldadas antes do processo de conformação. A combinação de diferentes materiais, espessuras e recobrimento permitem a soldagem de juntas para se estampar os painéis de carros. A principal vantagem do uso de *Tailored Blanks* é ter características específicas em partes particulares a fim de reduzir peso e custos. As partes dos *Blanks* podem ser formadas de um material mais fino com um mais espesso, ou mais forte, para aumentar a dureza ou resistência localizada, podendo ainda ser formadas com outros tipos de materiais. Também partes dos *Blanks* podem ser feitas com aço galvanizado para aumentar a resistência à corrosão enquanto outras seções são feitas com aço carbono.

Comercialmente, os lasers de CO₂ e Nd:YAG são aplicados em *Tailored Blanks* e, estão ganhando espaço e destaque em aplicações na indústria automobilística. Essa tecnologia permite aos carros, uma significativa redução de peso. O feixe produzido pelo laser de Nd:YAG apresenta a vantagem de poder ser transportado através de fibra ótica até a parte a ser soldada. Em particular o uso do laser Nd:YAG associado à fibras óticas proporciona ao sistema grande acessibilidade em aplicações específicas, onde o cabeçote pode ser posicionado em todos os pontos da estrutura. Mesmo assim a solda por resistência é a mais utilizada pela indústria. Porém existe uma mudança da solda por resistência para a solda a laser. Até hoje, essa substituição tecnológica tem sido muito lenta, mas a tecnologia da soldagem a laser vem sendo estudada impulsionando mudanças no sistema de produção da indústria automobilística. O centro de pesquisa ‘*Research and Development Department, Lamb Technicon*’ realizou estudos

comparando os custos da solda a laser e da solda por resistência na produção das linhas de montagem. Sendo que os resultados indicaram que a solda a laser é a mais barata das duas tecnologias.

Quando a Ford adquiriu a Volvo, que vem sendo líder em soldagem a laser 3-D em estruturas por 14 anos, a Ford englobou a experiência da Volvo para trazer o avançado sistemas de solda a laser 3-D em suas plantas. Outro caso citado é a aquisição da *Chrysler* pela *Daimler Benz*, esperando-se com isso, um significativo aumento no uso de solda a laser 3-D nas estruturas dos automóveis. Como exemplo do potencial da soldagem a laser, na soldagem por resistência com robótica aplicada a produção está entre 15 a 20 soldas por minuto, ou 1 a cada 3 segundos, uma vez que a *Daimler Chrysler*, está soldando a laser com uma taxa de 5 soldas por segundo.

Outra aplicação emergente do laser na tecnologia *Tailored Blanks* está no uso tubos hidrodeformados como parte do corpo da estrutura dos veículos. O laser é usado no corte de furos nos tubos e na solda para prender o suporte dos tubos.

Há pouco tempo, havia milhões de carros rodando baseados em um único estilo. Porém, com o avanço das técnicas de soldagem, os estilos dos desenhos para automóveis sofreram uma rápida mudança com a aplicação do laser, que vem mostrando sinais de melhoria na reestilização de novos modelos.

G E Fanuc Automation, NA Inc, Cincinnati, Ohio, investigou as vantagens do uso do laser blanking ao invés de matriz de blanking. Quando apropriado, o laser blanking pode resultar na eliminação de custos das matrizes de blanks. Em adição, está tecnologia reduz os fragmentos de engenharia, ou seja, reduz o desperdício de material e não aumenta os custos nos blanks.

Algumas indústrias automobilísticas, como, por exemplo, a Audi, estão desenvolvendo pesquisas para produção de veículos utilizando esta tecnologia, como no caso do Audi A8 inteiramente de alumínio, e o Audi TT com a estrutura de alumínio, trabalhando em conjunto de pesquisa da Holanda (*Nedcar*) e da Alemanha (*Fraunhofer Institutfer Laser Technik*).

Para o caso de aços, a planta da Opel na Alemanha introduziu o processo de soldagem a laser na linha de produção da estrutura do veículo Astra. As razões para tal procedimento são explicadas em função da alta qualidade da solda final (não requerendo processos adicionais como o lixamento ou esmerilhamento), alta taxa de produção com grande reprodutibilidade nas

operações (quatro estruturas por minuto).

O uso de *Tailored Blanks* oferece várias outras vantagens com respeito ao produto, processo e projeto:

- a) melhoramento das tolerâncias, sendo que as partes diferentes do produto, são soldadas antes da operação de deformação usando o processo de soldagem contínua;
- b) o aumento da deformabilidade: maior controle da energia de absorção potencial durante colisões;
- c) redução da quantidade de refugos durante a produção de *Tailored Blanks* irregulares, onde peças pequenas de materiais com forma irregular utilizam melhores materiais;
- d) redução do número de partes para serem unidas, com a otimização dos projetos;
- e) redução da pressão de embutimento incluindo matrizes e instalações;
- f) diminuição de pessoal e custos de produção;

Somada a estas vantagens, a técnica de *Tailored Blanks* contribuir para o desenvolvimento dos projetos dos carros, resultando na redução do consumo de combustível, sendo isto muito importante no que diz respeito à gestão ambiente. Citando as desvantagens do *Tailored Blanks*, a ZTA pode ter influencia negativa na deformação do blank devido ao desenvolvimento de estruturas martensíticas. *Tailored Blanks* estão aumentando o uso na produção de produtos automobilísticos onde as vantagens se sobressaem às desvantagens. Alguns exemplos de componentes de carros feitos por *Tailored Blanks*:

- travessa de ambos os lados das portas;
- painéis internos das portas;
- painéis longitudinais;
- painéis cruzados;
- painéis de assoalhos;
- rodas;
- painéis internos.

A característica crítica do *Tailored Blanks* é a redução da deformação devido ao processo de soldagem, quando comparado com a deformação de materiais base. Há também a necessidade de entender a influência no processo de solda e na localização da solda na deformação e no movimento da linha de solda durante o processo de deformação. As informações a respeito destes tópicos foram obtidas usando simulações numéricas pelo método de Elementos Finitos [Meinders, 2000].

Para criar um *Tailored Blanks*, duas ou mais chapas são soldadas. Isto pode ser feito pelos vários processos de soldagem, como a por resistência e por laser (Figura 3.10). A sobreposição das partes a serem unidas será aproximadamente uma a duas vezes a média da espessura da chapa no processo.

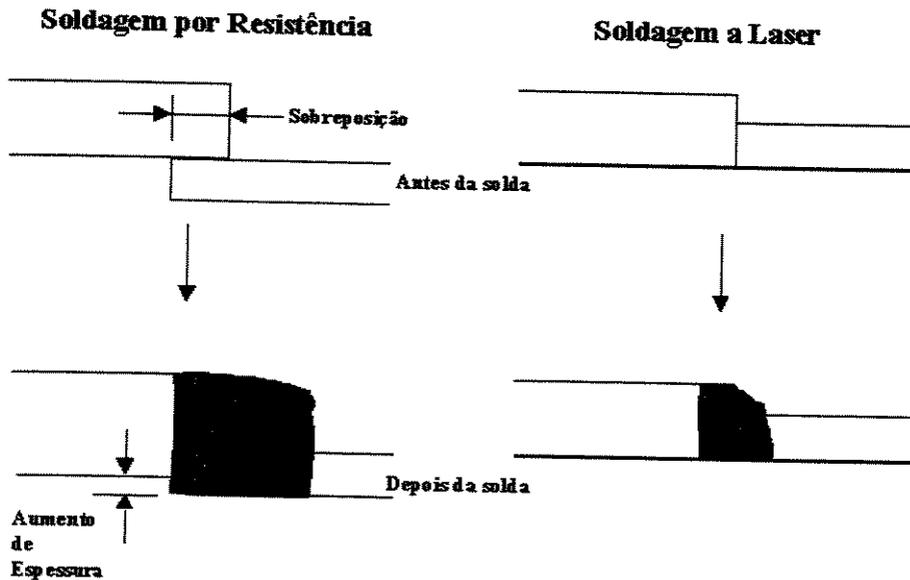


Figura 3.10. Tipos de solda [Meinders, 2000].

Ambos os tipos de soldas tem suas características próprias. No processo por resistência a largura da solda incluindo a ZTA está entre 10-15 mm, e a largura da solda a laser incluindo a ZTA é de 1-2 mm. A fração de volume de martensita na solda a laser é grande devido às altas taxas de resfriamento. Devido as menores taxas de resfriamento na solda por resistência, menos martensita é formada, e conseqüentemente a solda tem menor dureza. Como resultado a solda por resistência pode ter uma melhor deformação que a solda a laser.

A desvantagem na solda por resistência está principalmente na maior espessura do cordão da solda em contraste com o pequeno cordão da soldagem a laser. Além do mais a solda por resistência em *Tailor Blanks* não poderá ser usada em partes visíveis dos veículos. A vantagem da baixa porcentagem de martensita para solda por resistência foi eliminada pela maior espessura do cordão. Para aplicações especiais, a solda por resistência deve ter o auxílio de refrigeração, que reduz a deformabilidade da solda consideravelmente devido ao aumento da dureza (aproximadamente 20%).

Dois tipos de falhas podem ocorrer durante a deformação de *Tailored Blanks*: as falhas iniciadas na solda e falhas iniciadas no material base mais fraco, conforme representado esquematicamente na Figura 3.11.

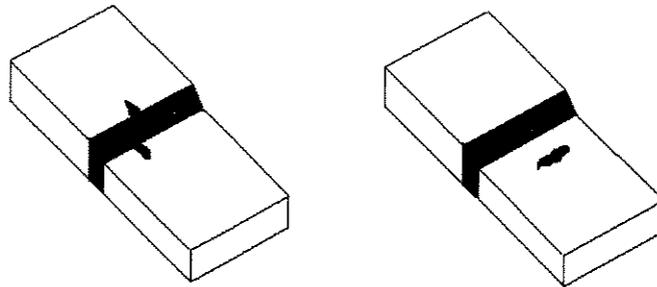


Figura 3.11. Falhas na solda e no material [Meinders, 2000].

Um tipo de falha é causado pelo tensionamento paralelo a linha de solda devido à baixa ductilidade resultante do cordão, sendo que a deformabilidade na direção paralela depende das propriedades da solda. Outro tipo de falha ocorre pelo tensionamento do *Tailor Blanks* perpendicular, onde as forças atuam perpendicularmente à linha de solda. A deformação será localizada no material base fino desde que a solda tenha uma maior resistência que o material base e, portanto, a deformação nesta direção dependerá das propriedades do material base fino.

Para aplicar a alta qualidade de produtos *Tailored Blanks* na indústria automotiva é importante entender o comportamento da deformabilidade durante a estampabilidade. Os tipos de falhas para a tecnologia *Tailored Blanks* que foram investigados são: a influência do processo de solda, a localização da solda na deformação e o movimento da linha de solda [Meinders, 2000], concluindo-se que a quantidade de trinca que se move em direção ao material forte é a medida

para a localização da deformação no material base fraco. Este movimento da trinca depende da resistência e da localização do material base, e não do tipo de solda e da largura da solda. A utilização de ferramentas numéricas computacionais, tais como o método de Elementos Finitos, contribui para a investigação do comportamento do *Tailored Blanks* e a sua manufatura [Meinders, 2000].

Sistema de escapamento do carro fabricado a laser:

Na produção, o laser de CO₂ está direcionado para as várias posições de trabalho com ajuda de mais de um espelho direcionável. Na *Daimler Chrysler*, um laser de 5 kW CO₂ produz uma nova geração de escapamentos (Figura 3.12), com um aumento na produção de 30% em relação às técnicas convencionais. O material aplicado é o aço inox ferrítico, ou o alumínio revestido, tendo os componentes espessuras variando entre 0,8 e 1,2 mm.

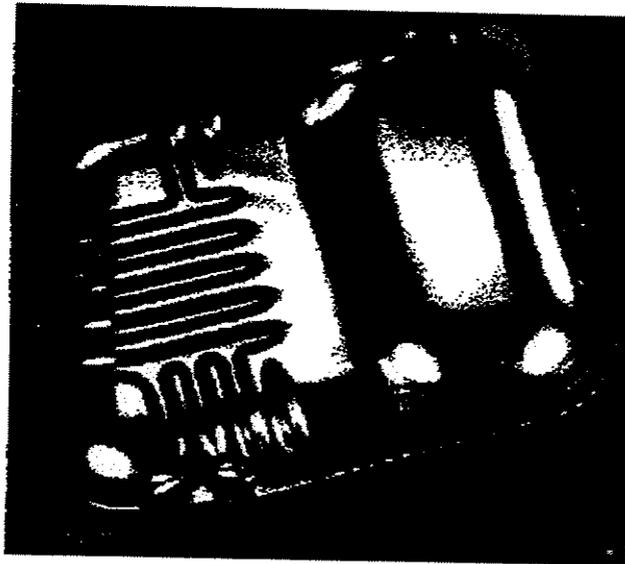


Figura 3.12. Solda a Laser em escapamento automotivo [Irving, 2000]

Manufatura de Tubos:

Na soldagem a laser em tubos de transmissão, o diâmetro de desfocagem do laser aumenta com a razão da potência. Um laser de 25kW tem feixes entre 45 e 70 mm de diâmetro. Como a potência aumenta, aumenta também a perda de calor nos espelhos, então é necessário o desenvolvimento de um sistema apropriado de refrigeração. A necessidade do uso de espelhos, a

variação da largura do diâmetro do feixe para alta potência do laser de CO₂, e as geometrias complexas dificultam a realização das soldas. Entretanto, o sistema ainda está em fase de testes [Blackman, 2000].

Uma companhia francesa desenvolveu a produção em série de um sistema de soldagem baseado em um laser de 12kW, que está sendo testado. O sistema é usado para fazer 6 soldas de 0,5 km com seções de 25,4cm por 12,7 cm em um tubo. Com metal de adição, o processo tolera uma raiz com abertura máxima de 0,5mm e um desalinhamento de 2mm. O equipamento é portátil e seu designer pode ser instalado em diferentes tubos.

Laser de Feixe Duplo:

O *Edison Welding Institute (EWI)* tem investigado o uso do duplo feixe de laser para soldagem há aproximadamente dois anos. Esta tecnologia divide um único feixe laser em dois, com espaçamento desejado entre eles. A intensidade do laser de feixe duplo é de 3 kW, os dois feixes são orientados para soldar juntas baseado na sua aplicação. Estudos em EWI têm mostrado um melhoramento na qualidade da solda com alumínio, aços alto carbono e aços galvanizados (Figura 3.13). Aços galvanizados têm tido sucesso na soldagem com essa tecnologia de junta sobreposta, configuração sem raiz e com uma pequena ou não existência de porosidade na solda. O sucesso da soldagem do alumínio e de aços de alta deformação com duplo feixe laser, têm uma posição vantajosa para o futuro dos projetos de veículos de peso leve.

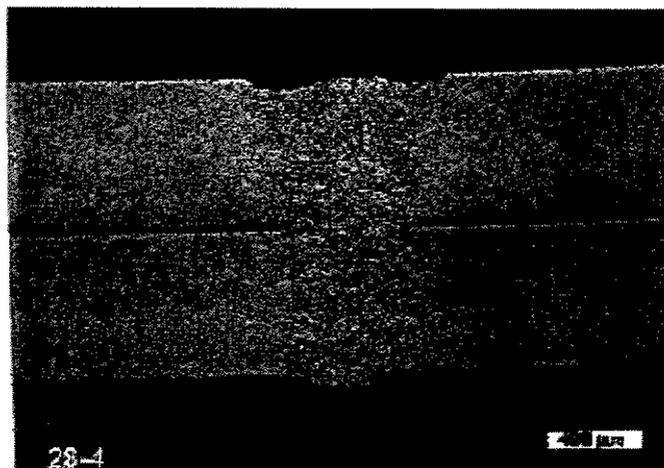


Figura 3.13. Solda a Laser em aço galvanizado, com técnica de duplo feixe [Pezzutti, 2000].

Soldagem com Profundidade e soldagem rasa:

Uma importante característica do laser CO₂ é a facilidade de se variar a densidade de potência na superfície do material (variando o foco do feixe e a potência). A focagem é muito pequena, com isto a alta densidade de potência no spot leva à formação de uma cavidade de vapor profunda, com uma estreita solda chamada de “*key hole*”. A alta velocidade de varredura e a baixa distorção térmica, associada com a soldagem no modo “*key hole*”, são as vantagens importantes desse processo quando comparado aos outros processos em determinadas aplicações. A condução rasa da solda laser, gera menor densidade de potência, o que é vantajoso para aplicações na superfície, pois a mínima penetração é desejada. Existe o modo de soldagem rasa e a solda com penetração em profundidade, esses modos são determinados pela densidade de potência na superfície do material, velocidade de varredura, propriedades do material base e pelo gás de proteção.

O monitoramento do processo e o controle servem para assegurar as propriedades da penetração da solda. É atualmente impossível fazer a medição da soldagem a laser e de sua profundidade de penetração. Essas medições são dificultadas por causa do pequeno tamanho do cordão de solda e pelo ambiente agressivo (fumaça, alta temperatura). É necessário o desenvolvimento de técnicas de monitoramento do processo de soldagem a laser, para ter maior controle do processo obtendo melhorias. Holbert [Holbert, 2000] analisou, em tempo real, a poça de solda no modo “*key hole*” para se determinar alguma informação a respeito da penetração (Figura 3.14).

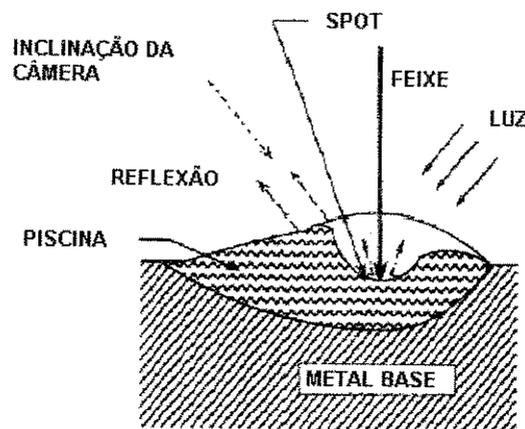


Figura 3.14. Características da depressão da piscina de solda [Holbert, 2000].

Algumas técnicas fornecem medidas diretas durante o processo da penetração da solda laser (como raio-X ou ultra-sônico), o que viabiliza o uso industrial. Há trabalhos direcionados para as análises acústicas, emissões ópticas e emissões da carga de plasma para uma câmera de vídeo na região da poça de solda. Direciona-se um laser pulsado de nitrogênio, que está sincronizado em uma câmera CCD (*Charged Coupled Devide*), para iluminar a área da solda para as imagens em vídeo. Uma estreita banda de filtro é usada com a câmera para permitir que somente a luz do laser de nitrogênio (337 nm) seja recebida por ela. A eliminação do efeito de plasma intensivo não será inteiramente aceita pelo laser de nitrogênio, porém o modo “*key hole*” estará claramente visível. Outro sistema de monitoramento usa laser contínuo de argônio (488 nm) para iluminação, este método foi usado por Holbert [Holbert, 2000] para a medição topográfica da superfície, com observações na penetração rasa da soldagem laser. O sistema de vídeo foi usado para determinar as configurações das características de penetração da solda em aços na junta sobreposta, utilizando um laser de CO₂. Esse sistema tinha duas câmeras CCD que proporcionavam imagens do topo e do fundo da solda (Figura 3.15).

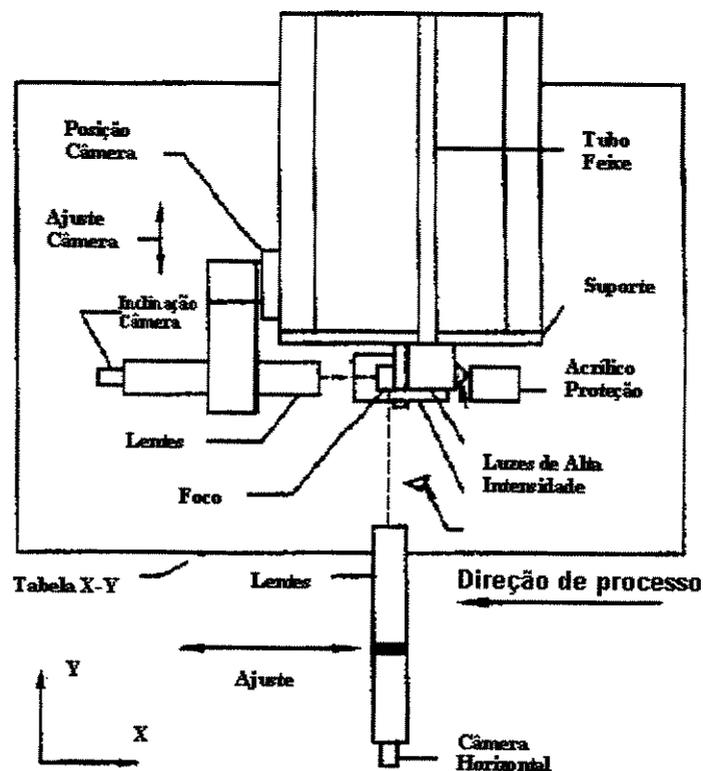


Figura 3.15. Imagem de topo do equipamento de vídeo [Holbert, 2000].

Capítulo 4

Análise experimental

O equipamento utilizado para a soldagem das chapas foi um laser de CO₂ contínuo com potência nominal de 15000 W, localizado no Instituto Superior Técnico (IST) em Lisboa, Portugal, junto ao Departamento de Engenharia de Materiais, no Laboratório de Tratamento de Superfícies, coordenado pelo Professor Doutor Rui Vilar.

O trabalho experimental permitiu investigar o comportamento da soldagem a laser em chapas de aço baixo carbono com dimensões conforme esquema apresentado na Figura 4.1 a. A Figura 4.1 b ilustra a direção da solda em relação à direção da laminação das chapas.

A composição química média é mostrada na tabela 4.1, modificaram-se alguns parâmetros da soldagem como a velocidade de soldagem do equipamento, o ângulo do feixe laser e soldando materiais com desalinhamento vertical nas amostras conforme detalhado a seguir.

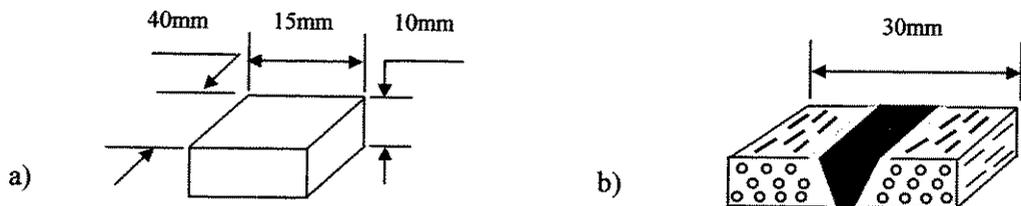


Figura 4.1. a) Representação esquemática das dimensões das amostras; b) Sentido de laminação e da solda.

4.1. Materiais

Utilizou-se para este trabalho chapas de aço baixo carbono utilizado nas indústrias em geral, com espessura de 10 mm, cuja composição química foi determinada por meio de análise semiquantitativa no equipamento Shimadzu, fluorescência de Raios-X, modelo XRF 1500 de 3 kW, com tempo de processo de 49 minutos, no módulo – sysmetal – slow do IPT (Instituto de Pesquisas e Tecnologia) e também no espectrômetro de fluorescência de Raios-X PHILIPS do CT (Centro de Tecnologia – UNICAMP), utilizando-se bancos de dados próprio. Para determinação da porcentagem de carbono, utilizou-se o ensaio de combustão direta, cujo equipamento foi o analisador de carbono e enxofre Leco CS 300, com um tempo de processo de 1 minuto, utilizando dois gramas de material e, como resultado, a média de quatro amostras, com um intervalo de confiança de 95%.

Tabela 4.1. Análise química média do material base [Fonte: IPT, CT].

C	Al	Si	Ni	Cr	S	Nb	Zr	P	Mn
0,031%	0,56%	0,41%	0,03%	0,03%	0,01%	0,01%	0,01%	0,01%	1,08%

4.2. Soldagem

Utilizou-se potência de 7500 W nas soldas e como neste tipo de processo existem problemas de fixação das chapas, pois nesta soldagem não existe a pressão dos eletrodos como na soldagem convencional, a preparação da junta assume um papel importante, tendo uma preparação especial quanto ao paralelismo das mesmas. Neste caso as amostras sofreram processo de usinagem e foram retificadas para garantirem um perfeito paralelismo.

O sistema de proteção gasosa tem como objetivo inibir e eliminar a formação de plasma durante a soldagem, possibilitando ao mesmo tempo a proteção do cordão nos dois lados da amostra. Foi utilizada uma vazão do gás de proteção hélio em torno de 30 litros/minuto na parte

superior da amostra, introduzido por meio de um bico injetor como mostrado na Figura 4.2 e 30 litros/minuto na parte inferior, usando uma mistura de hélio/ar. Nos sistemas de soldagem a laser geralmente utilizam-se taxas de gás de proteção, entre 25 e 30 l/minuto para o caso de He, sendo que estes valores são altos devido à baixa densidade deste gás.

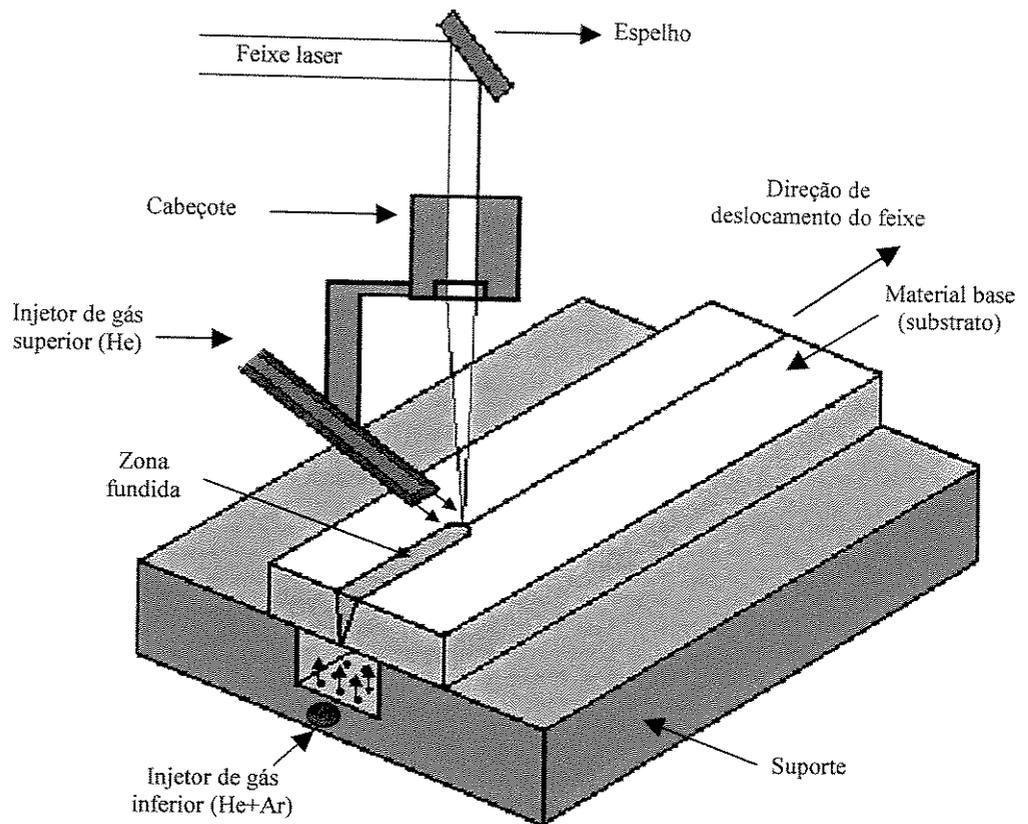


Figura 4.2. Ilustração do sistema de soldagem laser, detalhando o cabeçote, a injeção de gás de proteção e o deslocamento do feixe.

4.3. Parâmetros do processo

Na Tabela 4.2 estão apresentados os parâmetros utilizados para a realização dos ensaios da soldagem. A distancia focal da lente utilizada no laser foi de 127 mm o diâmetro do feixe laser foi de aproximadamente 0,3 mm no ponto de focalização. Relativamente à posição do ponto

focal, a soldagem a laser geralmente não é sensível à variações de posicionamento do ponto focal inferiores a 0,5 mm.

As amostras de 1 a 5 não tiveram desalinhamento vertical, sendo que nas amostras 4 e 5 o feixe laser foi focalizado e direcionado com um ângulo em relação à superfície, como representado na Figura 4.3a. As amostras 6, 7 e 8 tiveram um desalinhamento vertical em relação à linha de centro, com uma distância entre as placas de 2mm conforme ilustrado nas Figuras 4.3b, c e d.

Tabela 4.2. Parâmetros utilizados para soldagem a laser das chapas.

Amostra	Velocidade de soldagem (m/min)	Ângulo em relação a normal a superfície (°)	Diferença de nível entre as placas (mm)	Observações
1	0.70	0	0	-
2	0.65	0	0	-
3	0.75	0	0	-
4	0.70	-5	0	-
5	0.70	+5	0	-
6	0.70	0	2	Focado na superfície da chapa inferior
7	0.70	0	2	Foco entre as superfícies
8	0.70	0	2	Focado na superfície da chapa superior

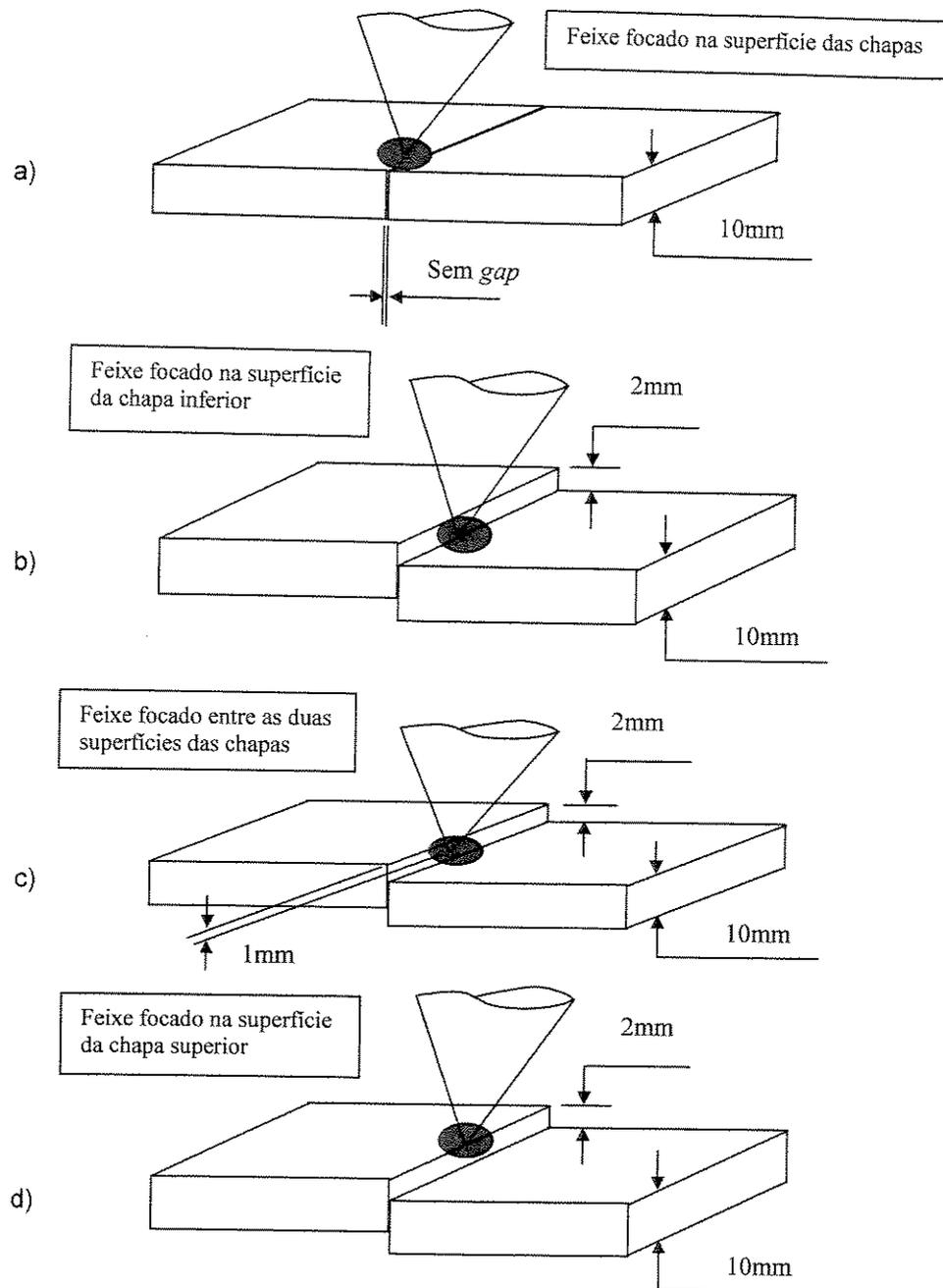


Figura 4.3. Representação esquemática do posicionamento das amostras: a) sem desalinhamento, e ângulos do feixe de -5° e $+5^\circ$; b), c) e d) desalinhamento de 2mm e o feixe foi focado em diferentes posições na superfície da chapa.

4.4. Avaliação da Qualidade das Soldas Efetuadas

Para avaliar a qualidade das soldas efetuadas realizaram-se ensaios metalográficos, segundo a norma para qualidade de juntas soldadas EM ISO 13919-1 [PEÇAS P., 1998]. A primeira parte da norma acima referida trata da soldagem de aços utilizando-se a tecnologia laser ou a tecnologia de feixe de elétrons, sendo válida para materiais cuja espessura está entre 0,5 mm até 12mm, no caso da soldagem a laser. Pretende-se com esta análise confirmar, ou não, os resultados da observação visual das soldas. No caso de se detectarem alguns dos problemas citados abaixo, alguns parâmetros devem ser corrigidos:

- problemas metalúrgicos;
- poros, fendas;
- defeitos geométricos.

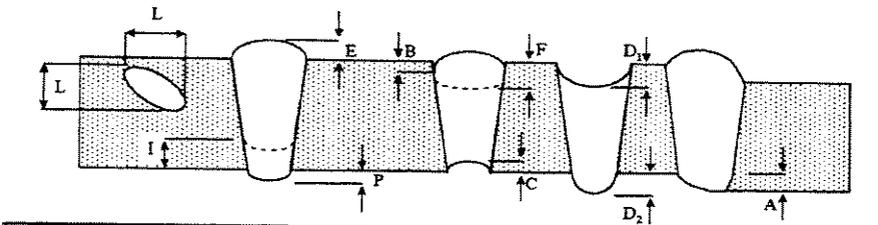
A utilização da norma citada acima é identificar numa análise rápida e com baixos custos a presença de defeitos geométricos ou metalúrgicos que inibam um bom desempenho das soldagens, evitando com isso, a realização de ensaios mais dispendiosos, como por exemplo, ensaios mecânicos. Esse tipo de soldagem possui características únicas em relação ao cordão de solda, surgindo com muito mais frequência alguns tipos de defeitos, quando comparados com outros processos de soldagem. A norma baseia-se na análise metalográfica, para identificar a presença de poros e/ou defeitos lineares internos, com ampliação macro, para se identificarem defeitos geométricos no cordão. Através da quantidade e dimensão dos defeitos apresentados em cada solda, a norma permite qualificar a soldagem em um dos quatro níveis:

- nível B: qualidade máxima;
- nível C: qualidade média;
- nível D: qualidade medíocre;
- nível E: inaceitável.

Na Tabela 4.3 estão indicados os defeitos identificados pela norma e em destaque o modo de medição. Os valores de aceitação não são absolutos, mas sim relativos à espessura. Nesta tabela, estão indicados os valores máximos admitidos para soldagens com qualidade B, visto ser essa a qualidade que se pretende atingir nas soldagens efetuadas.

A norma refere-se a cerca de 18 tipos de defeitos, os defeitos de 1 a 8 são identificados/quantificados através da análise metalográfica. Enquanto que os defeitos de 9 a 18 são quantificados a partir de uma imagem de macrográfica da região da solda.

Tabela 4.3. Resumo do conteúdo da norma EM ISO 13919-1, que permite analisar qualitativamente a soldagem de aços por laser, para qualidade de solda B.



Defeitos	Características das Imperfeições	Representação	Espessura 10mm
1	Fendas (maiores 1mm)	-	Não é permitida
2	Fendas de cratera	-	Não é permitida
3 e 4	Porosidade e defeitos lineares Taxa defeitos (f): $= (\Sigma \text{ áreas de defeitos}) / (\text{comprimento} \times \text{espessura})$	$L \leq$ $F \leq$	$0,3.t$ (t é a espessura) ou 2mm 0,7%
5 e 6	Cavitações em tubos e Inclusões	-	Não é aplicável
7 e 8	Falta de penetração	$I \leq$	0,15.t ou 1mm
9	Defeitos em solda de canto	-	Não é aplicável
10	Cantos cortados	$B \leq$	0,05.t ou 0,5mm
11	Excesso de metal no topo do cordão	$E \leq$	0,2mm + 0,15.t ou 5mm
12	Penetração excessiva	$P \leq$	0,2mm + 0,15.t ou 5mm
13	Desalinhamento	$A \leq$	0,1.t ou 2mm
14	Decaimento do banho	$D \leq$	$0,1.t +$ (espessura inferior do cordão) ou 0,2.t
15	Falta de material no topo	$F \leq$	0,1.t ou 0,5mm
16	Falta de material na raiz	$C \leq$	0,1.t ou 0,5mm
17 e 18	Juntas em T	-	Não é aplicável

4.5. Análise da Dureza

Após realizadas as soldas, as amostras foram cortadas, lixadas, polidas e atacadas com o reagente (NITAL 2%) por cerca de 1 minuto. Retirou-se a macroestrutura das amostras para definir claramente a zona fundida, a zona termicamente afetada e o material base na realização das medidas de dureza. Realizaram-se ensaios de dureza Vickers, norma NBR 6672 [Garcia, 2000] em todas as amostras, utilizando uma carga de 10 kgf (100 N) e exposição de aproximadamente 15 segundos com penetrador piramidal.

Foram realizadas medidas em dois sentidos: no sentido transversal ao cordão de solda, como demonstrado na Figura 4.4a, retirando-se 7 valores com um espaçamento entre as identificações de 3mm, e no sentido da profundidade do cordão de solda, como mostra a Figura 4.4b, retirando-se seqüência de 5 valores com espaçamento de 1,5 mm cada. Em cada amostra foram realizadas duas medidas de dureza em partes distantes entre si ao longo do eixo longitudinal das juntas soldadas Figura 4.4c.

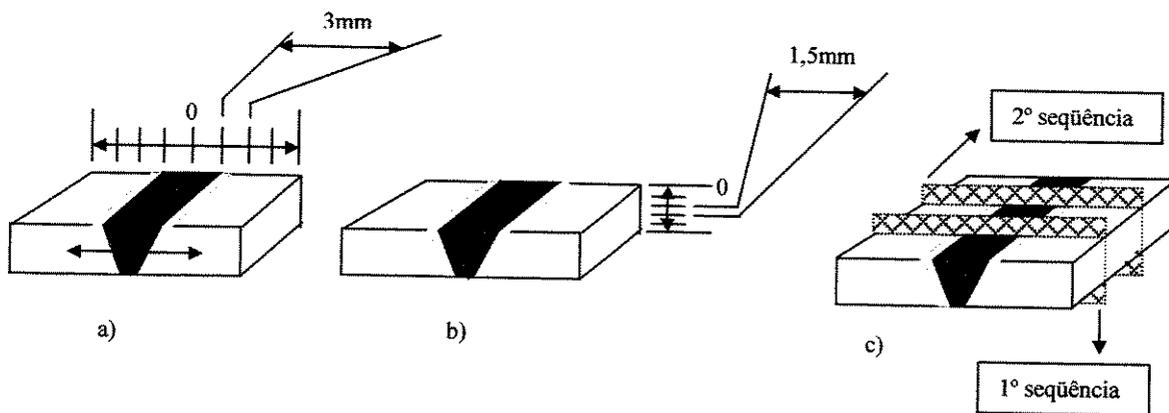


Figura 4.4. Representação esquemática da posição onde foram efetuadas medidas de dureza a) Seção transversal das amostras, b) Ao longo da profundidade do cordão. c) Regiões analisadas ao longo das juntas soldadas.

4.6. Técnicas de Análise Metalográfica

Após realizadas as medidas de dureza as amostras foram embutidas em baquelite e preparadas para as micrografias, onde foram lixadas com granulometria de: 200, 300, 400, 600, 1200 e posteriormente polidas em filtros com diamante em suspensão de 6 e 1 μm .

Foram analisadas as faces conforme destaque na Figura 4.5 e na Tabela 4.4, estão descritos os aumentos utilizados para aquisição das imagens. Nas micrografias foram observadas as regiões do cordão de solda, zona termicamente afetada e material base.

O ataque químico utilizado com a finalidade de revelar a microestrutura resultante foi uma solução aquosa com reagente químico específico (NITAL 2% - 2 ml de ácido nítrico e 98 ml de álcool etílico) por cerca de 1 minuto de ataque. Na Figura 4.5 está o posicionamento em que foi adquirida cada imagem.

Posteriormente para as análises metalográficas, foi utilizado um software de aquisição de imagens Q500MC Leica acoplado a um banco metalográfico óptico Neophot 32 – Carl Zeiss / Gena.

Tabela 4.4. Parâmetros ópticos empregados na aquisição das imagens.

Número da imagem (amostras)	Lentes	Aumento
1 (amostras 1 à 8)	8 x 12,5	100 X
2 (amostras 1 à 8)	8 x 12,5	100 X
3 (amostras 1 à 8)	8 x 12,5	100 X
4 (amostras 1 à 8)	8 x 12,5	100 X
5 (amostras 1 à 8)	10 x 3,2	32 X
6 (amostras 1 à 8)	8 x 3,2	25,6 X
7 (amostras 1 à 8)	8 x 3,2	25,6 X
8 (amostras 1 à 8)	8 x 25	200 X

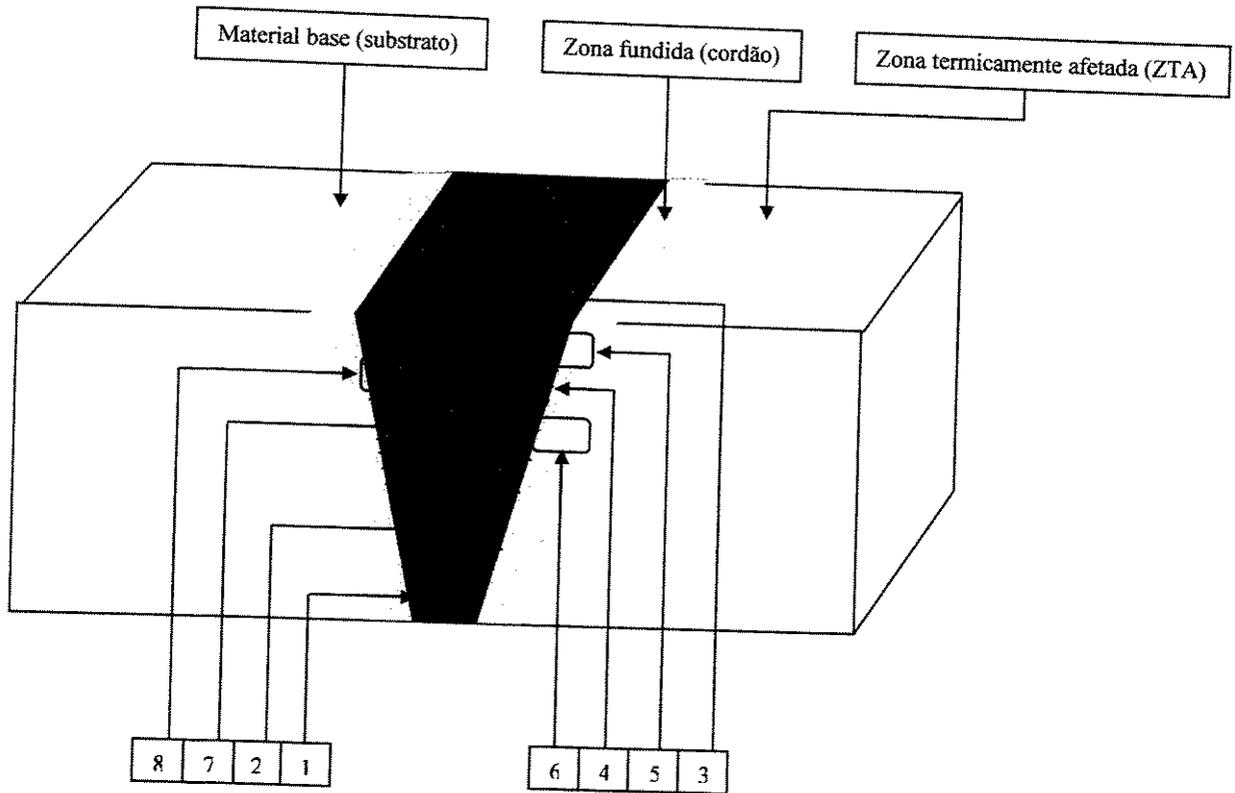


Figura 4.5. Ilustração do posicionamento para aquisição das imagens micrográficas.

Capítulo 5

Resultados e Discussões

Nas juntas soldadas, o objetivo foi determinar se os parâmetros utilizados foram satisfatórios segundo: suas microestruturas; a qualidade de soldagem de acordo com a norma EM ISO 13919-1, que permite classificar qualitativamente as soldas, e também em relação às durezas medidas nas soldas.

Utilizando os parâmetros apresentados na Tabela 4.2 (Capítulo 4), obteve-se cordões de solda com elevada qualidade, sendo que os mesmos não apresentam oxidação na superfície superior e nem na superfície inferior das amostras ao longo dos 40 mm de seu comprimento.

Estes fatos demonstram que o sistema de proteção gasosa foi eficiente na inibição do plasma e na proteção dos cordões. Porém a vazão de gás (He) foi alta, em torno de 30 l/minuto devido à baixa densidade do gás utilizado.

5.1 Análise Microestrutural

As análises microestruturais das amostras foram realizadas seguindo o padrão estabelecido na Figura 4.5 e com os aumentos citados na Tabela 4.4 (Capítulo 4). A Figura 5.1 mostra as macroestruturas das amostras soldadas, onde se pode observar três regiões distintas: material base, ZTA e cordão de solda (ZF zona fundida).

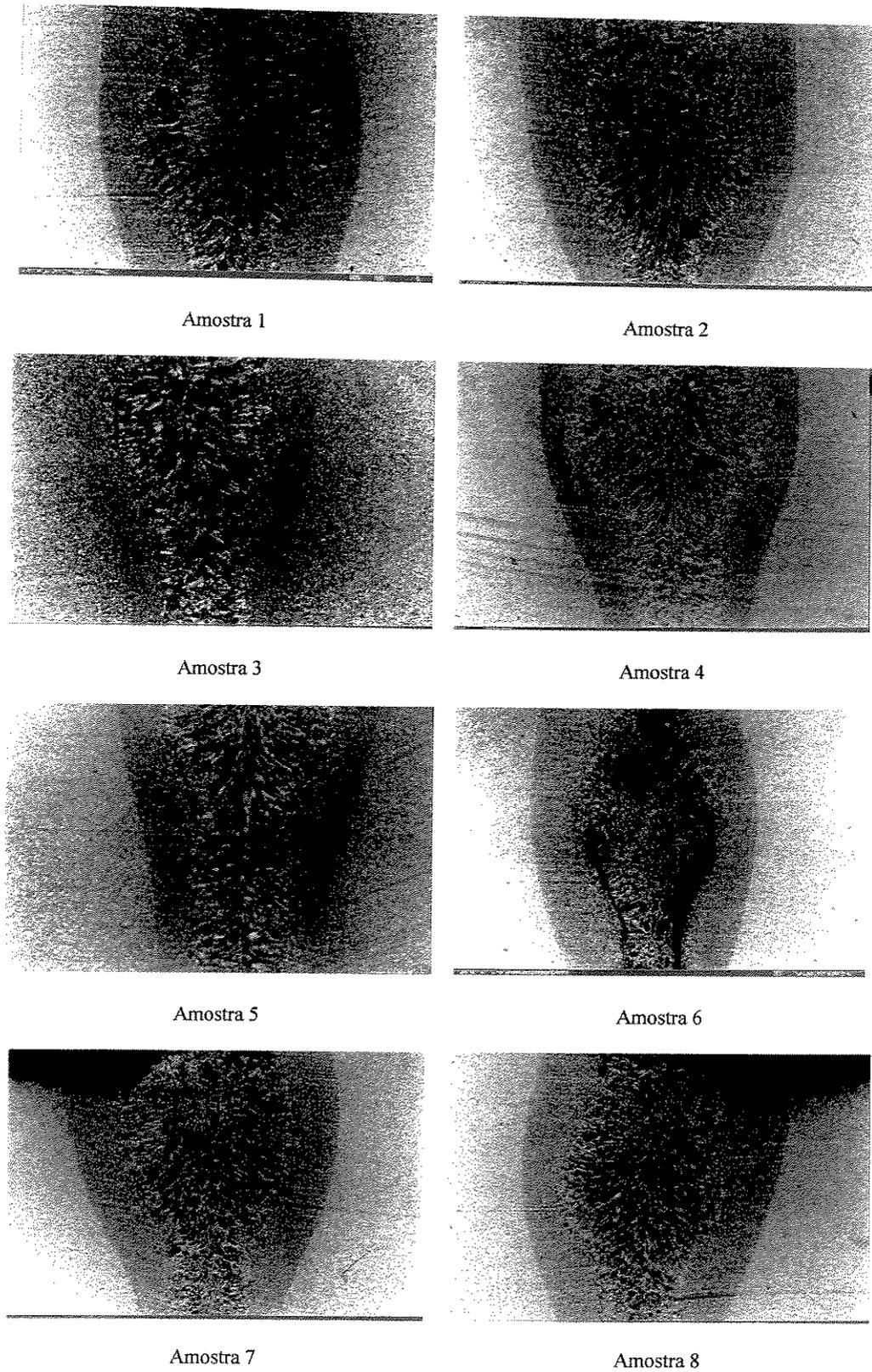


Figura 5.1. Macroestruturas das amostras soldadas (aumento 10x).

Conforme visto na Figura 5.1, as amostras 1, 4 e 5, com velocidade de 0,70 m/min apresentam uma macroestrutura mais homogênea com uma região de grãos colunares direcionados no sentido da extração de calor e uma região central equiaxial ao longo de toda a espessura do cordão, apresentando grãos cristalinos menores, ou seja, uma estrutura mais refinada na região central. Porém, existe uma pequena diferença em relação ao tamanho da zona fundida e essa diferença se deve ao posicionamento das chapas, que sofreram um pequeno desalinhamento durante o processo de soldagem. A inclinação do feixe em relação à peça para as amostras 4 e 5 (-5° e $+5^\circ$) não interferiu na profundidade de penetração da solda e na qualidade do cordão.

A amostra 2, com a menor velocidade de soldagem (0,65 m/min) mostra uma região próxima à superfície superior bastante heterogênea devido ao longo tempo de exposição do material ao feixe laser, o que favoreceu uma solidificação mais lenta. A partir da metade da espessura do cordão até a região próxima da superfície inferior, a estrutura é predominantemente equiaxial na região central do cordão e bem direcionada próxima a interface ZF/ZTA. Para o caso da amostra 3, com velocidade mais alta utilizada nesse estudo (0,75 m/min.), observa-se que o tempo de exposição material/feixe foi insuficiente para causar uma penetração satisfatória do cordão de solda e, conseqüentemente, a formação da estrutura equiaxial central no cordão ao longo de toda a espessura, sendo esta estrutura observada somente próxima à superfície superior da amostra.

Na amostra 6, observa-se uma pequena região com grãos equiaxiais bem no centro do cordão, porém, devido a alta energia empregada e a posição do foco, essa condição apresentou problemas de porosidades e a formação de um vazio na região correspondente ao encontro das frentes de solidificação, e que pode ter sido causado pelo aprisionamento de gases oriundos da superfície ou mesmo da evaporação do material base.

As amostras 7 e 8, apresentam uma pequena inclinação em relação a linha de centro do cordão de solda, devido aos desalinhamentos utilizados para a soldagem das chapas, onde as macroestruturas são bem definidas e homogêneas. Na amostra 7 nota-se que no lado da chapa com desalinhamento superior os grãos colunares se apresentam paralelos à superfície da chapa, enquanto que na chapa desalinhada abaixo, os grãos apresentam-se com direcionamento

inclinado (aproximadamente 45°) em virtude das condições de calor impostas por esse desalinhamento. A amostra 8 apresenta o mesmo comportamento porem para o sentido oposto devido à posição das chapas.

As Figuras 5.2 a 5.9 mostram detalhes em várias posições das amostras soldadas. A posição 1 corresponde a região próxima à superfície inferior das amostras, dentro da zona fundida (linha de centro da solda). A posição 2 encontra-se na região intermediária entre as superfícies superior e inferior, enquanto que a posição 3 está próxima a superfície superior. A posição 4 está próxima da interface ZF/ZTA e a posição 5 refere-se exatamente a interface ZF/ZTA, onde é observada a diferença entre as duas regiões. Na região 6, observa-se a ZF, a ZTA e o material base, onde nota-se a recristalização na região da ZTA. Na região 7 ve-se a estrutura típica resultante do ponto de encontro das frentes de solidificação e conseqüentemente, fechamento do poço líquido com formação de estruturas equiaxiais centrais. Na posição 8, nota-se a estrutura ferrítica acicular com os grãos colunares no sentido de extração de calor.

Posição n°

Posição n°

1

2

3

4

5

6

7

8

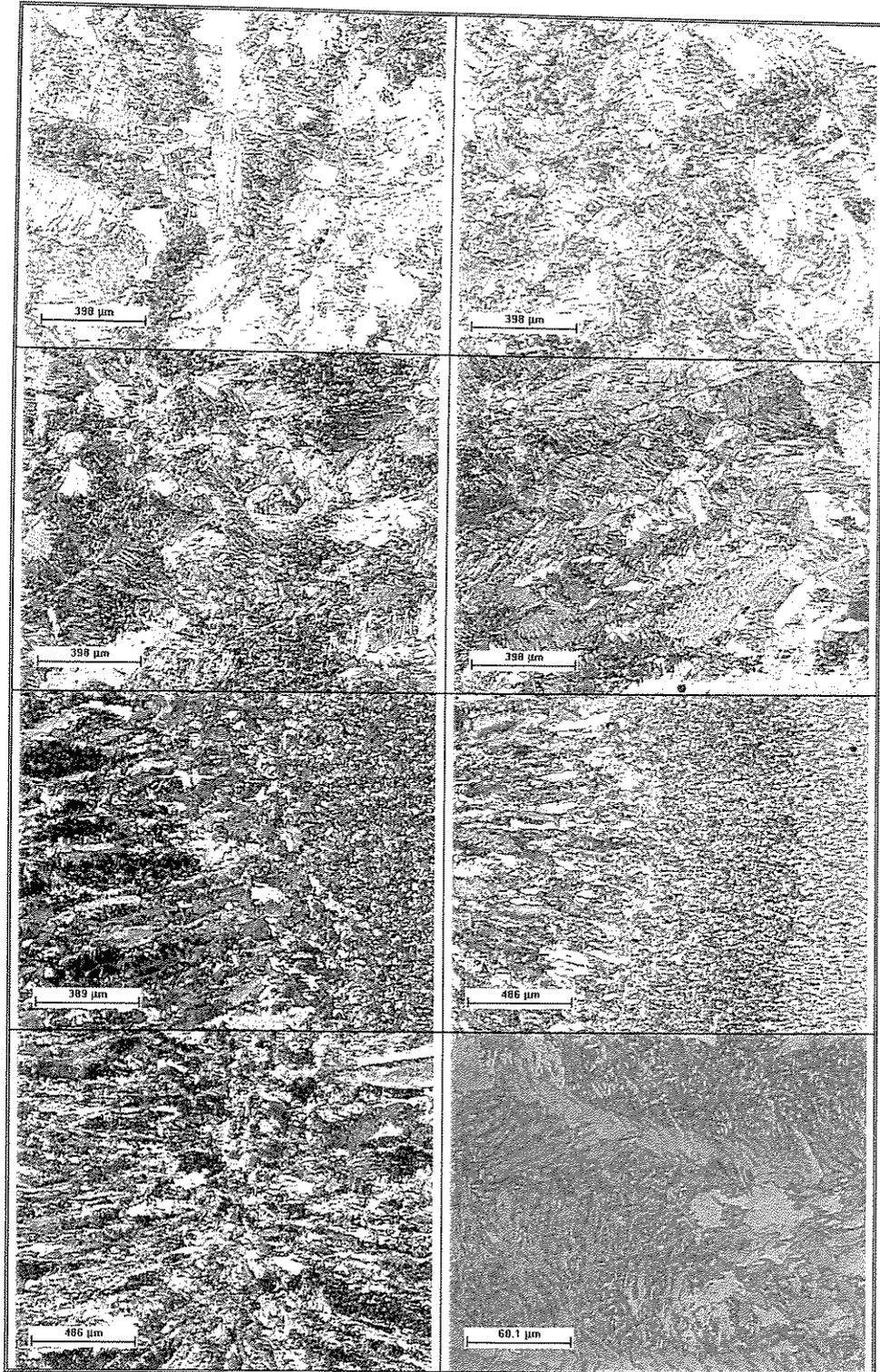


Figura 5.2. Microestrutura em várias regiões da amostra 1

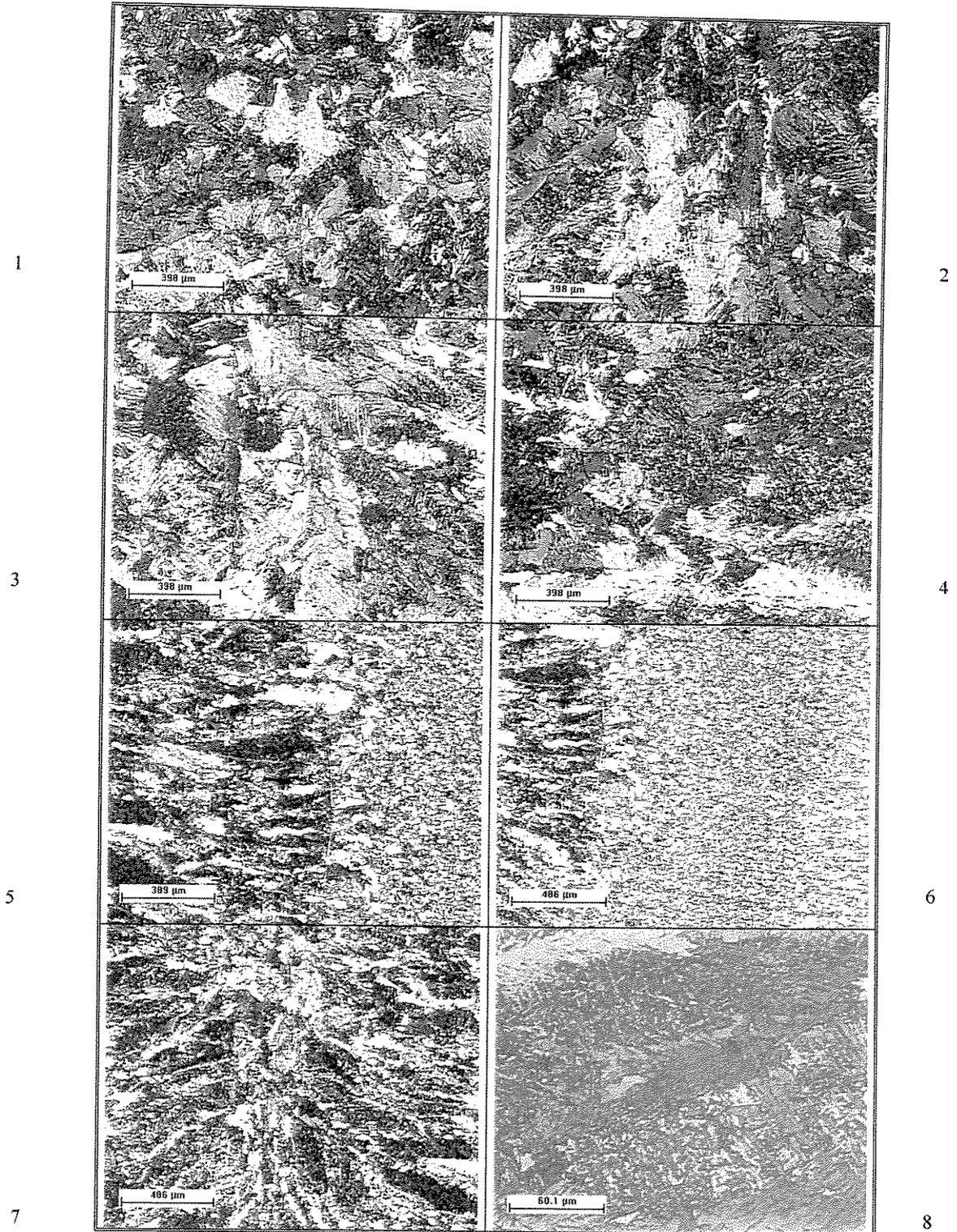


Figura 5.3. Microestrutura em várias regiões da amostra 2

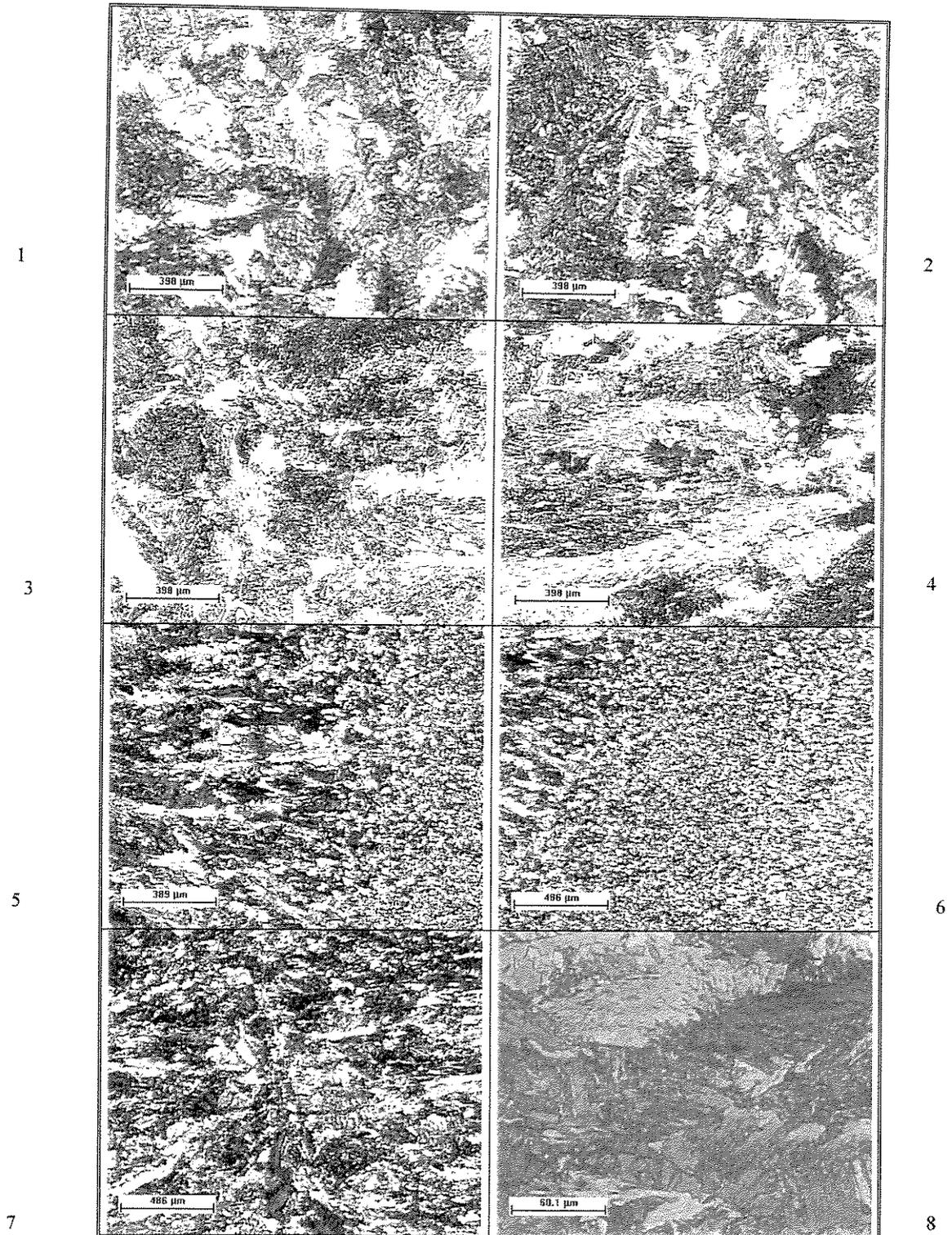


Figura 5.4. Microestrutura em várias regiões da amostra 3

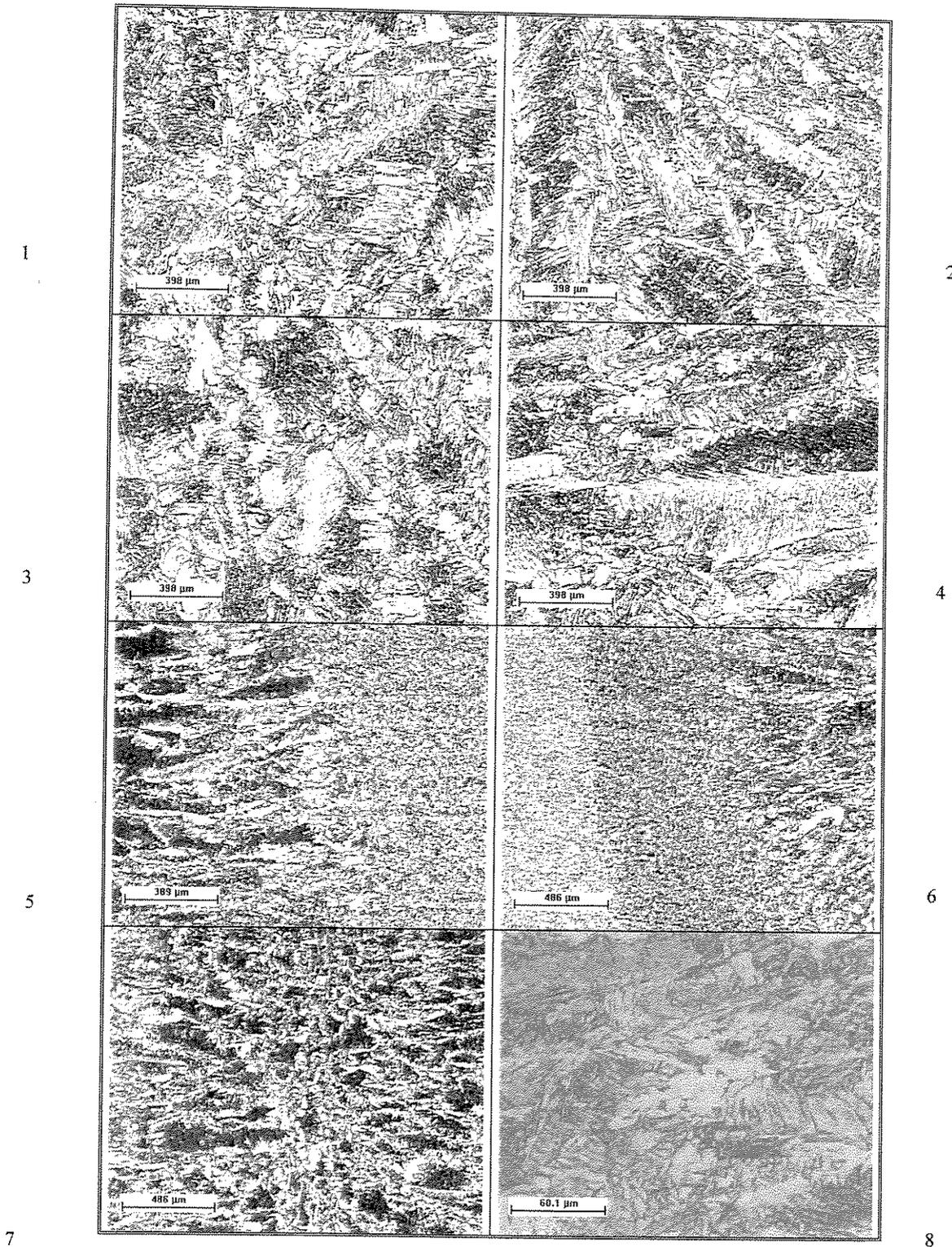


Figura 5.5. Microestrutura em várias regiões da amostra 4

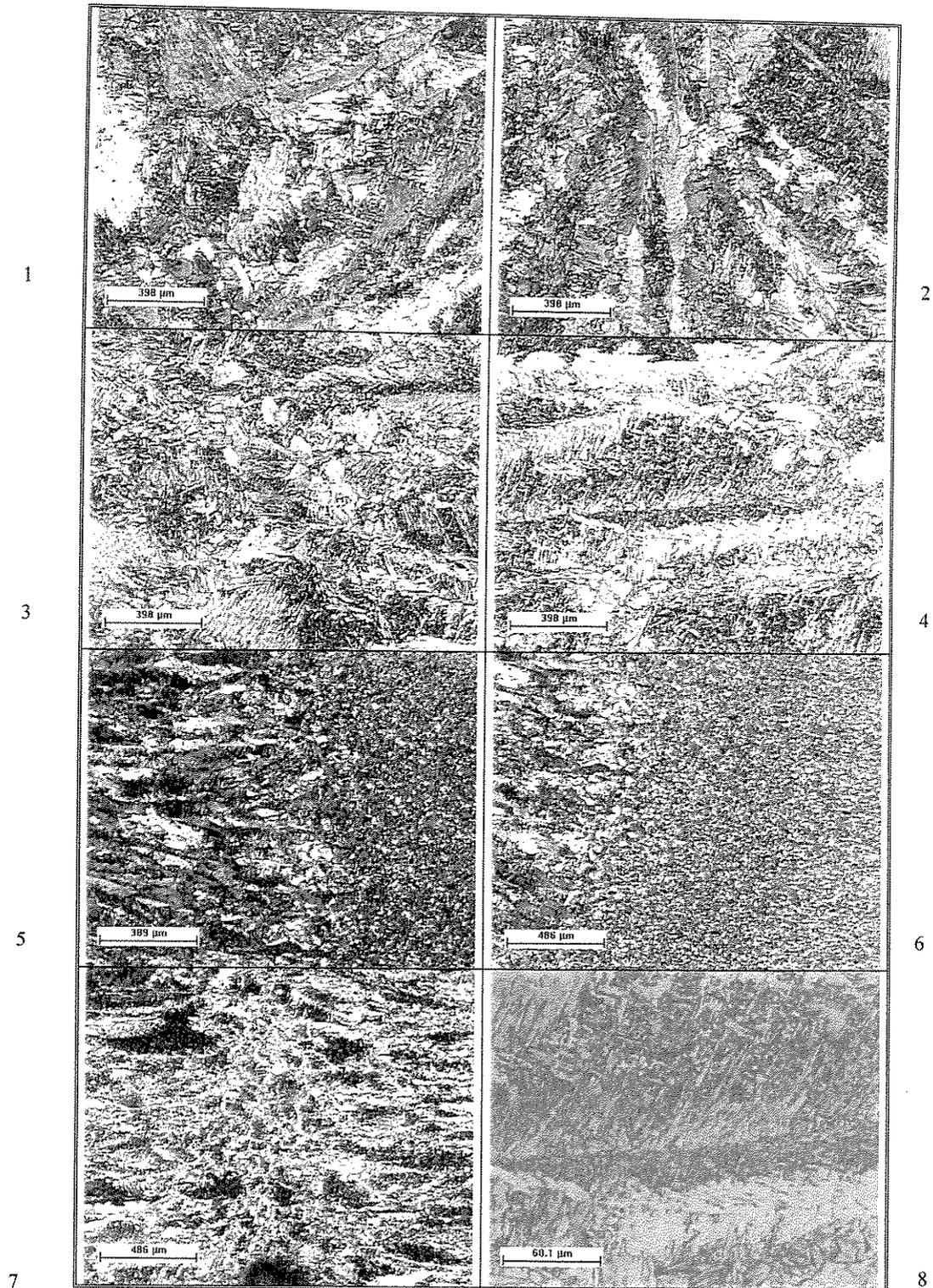


Figura 5.6. Microestrutura em várias regiões da amostra 5

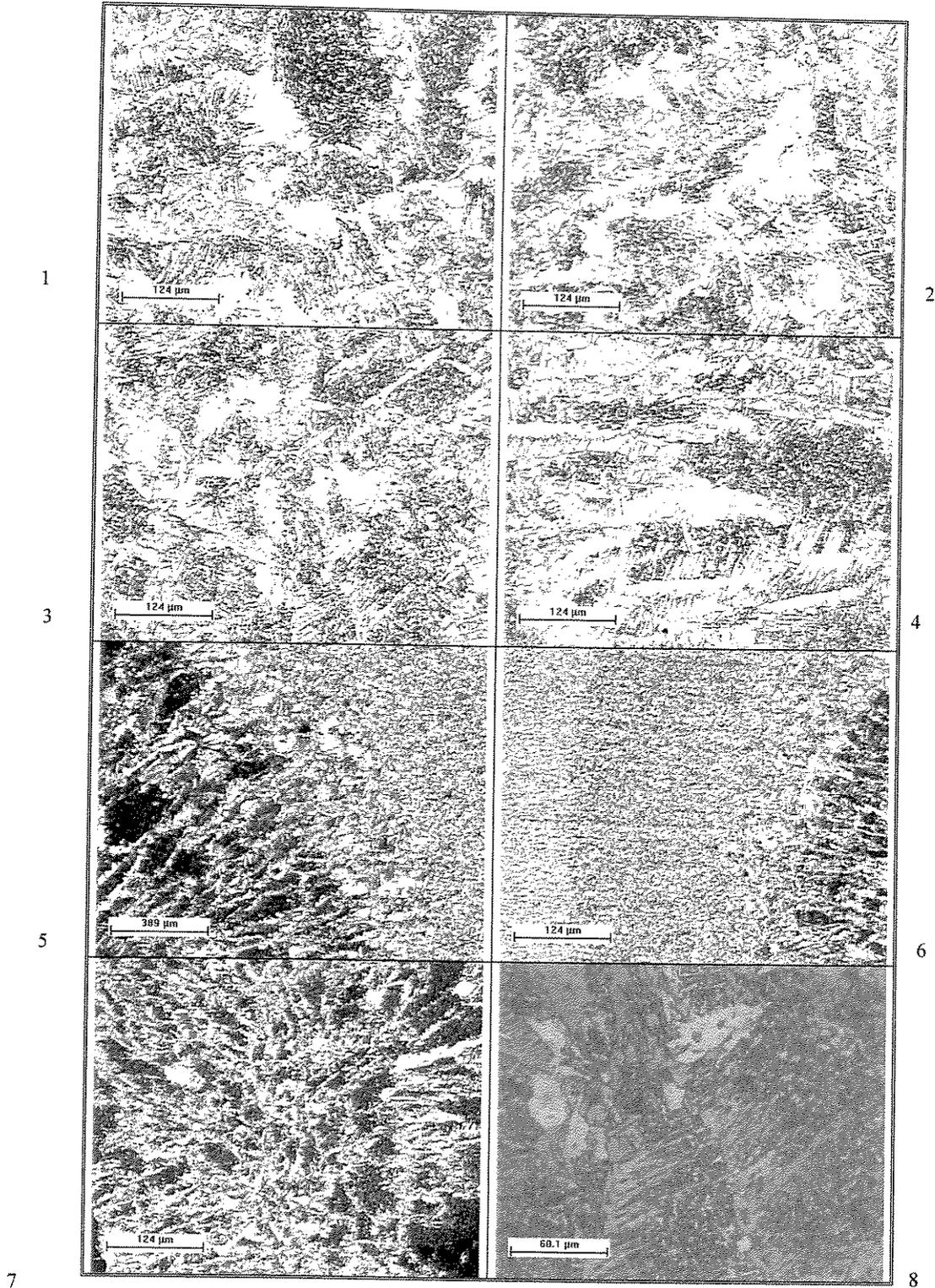


Figura 5.7. Microestrutura em várias regiões da amostra 6

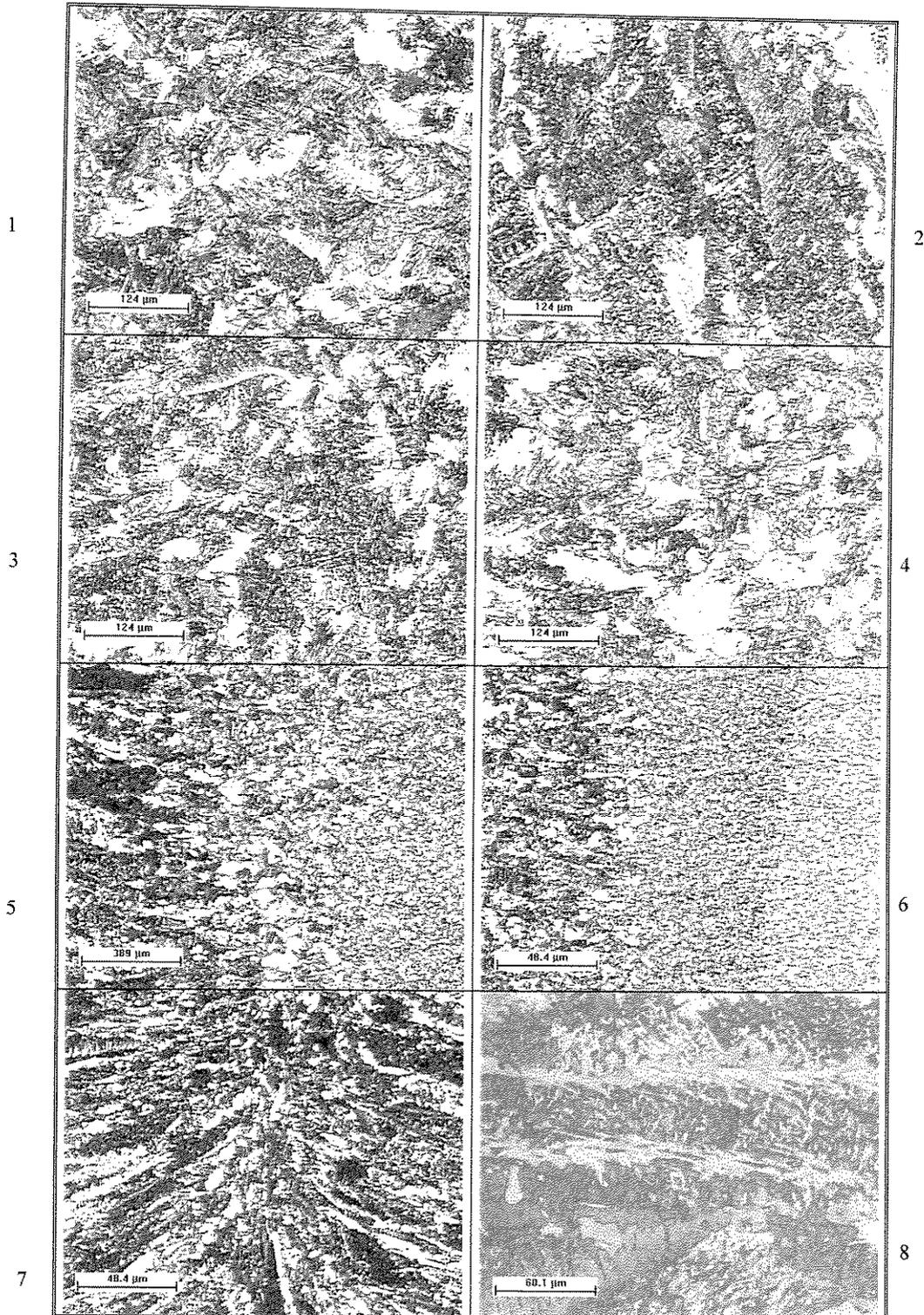


Figura 5.8. Microestrutura em várias regiões da amostra 7.

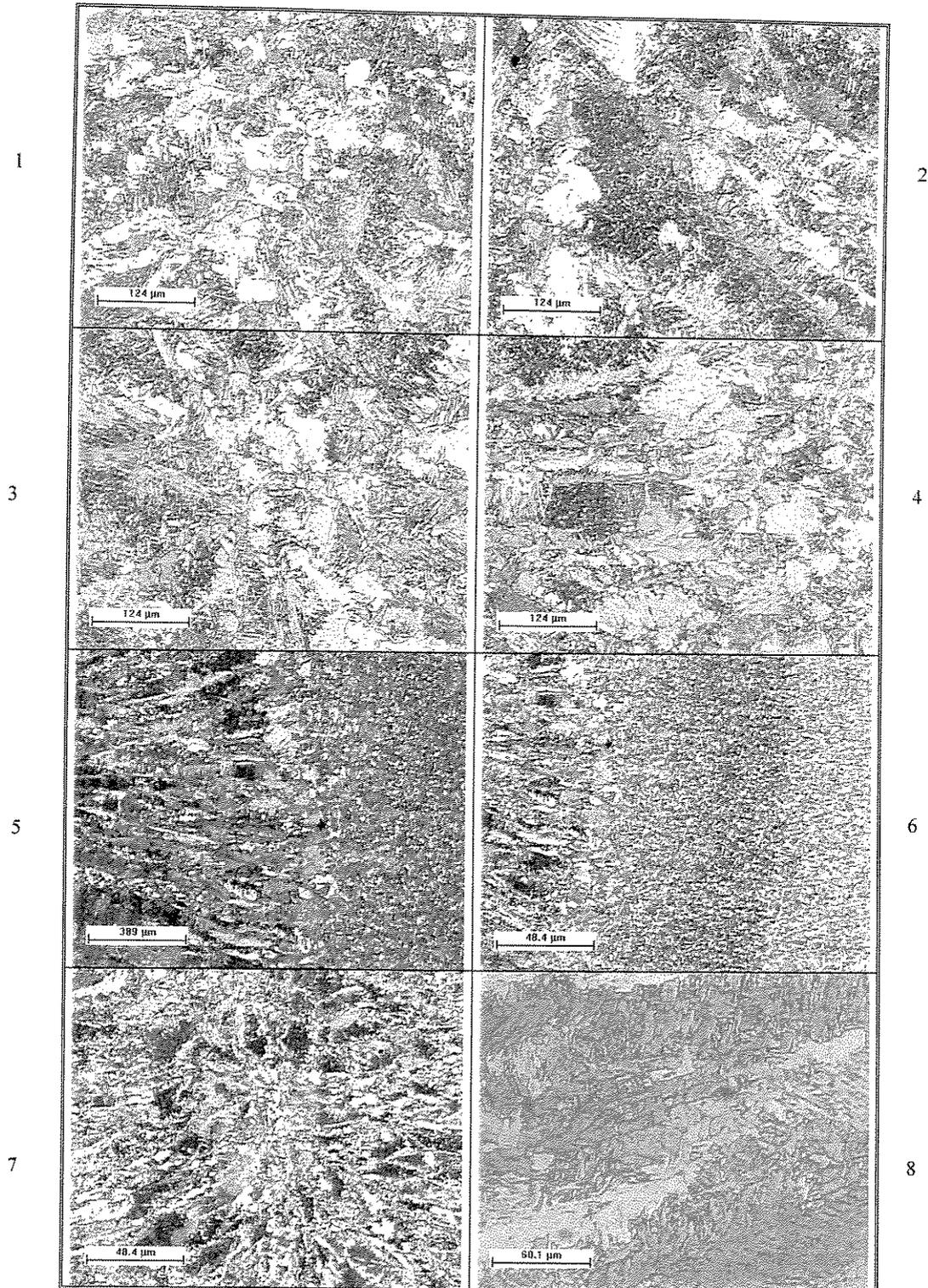


Figura 5.9. Microestrutura em várias regiões da amostra 8.

A microestrutura do material base é ferrita e na ZTA a microestrutura também é ferrítica, porem com uma estrutura mais refinada em relação ao tamanho dos grãos do material base devido ao rápido resfriamento e a rápida solidificação.

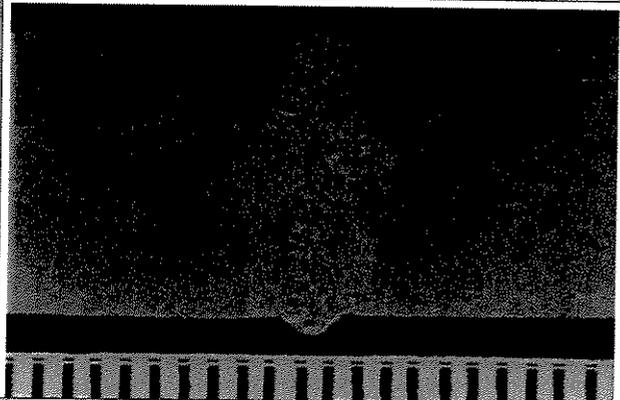
As características das soldas laser são microestruturas axiais em torno do feixe laser e altamente direcionais, devido à rápida solidificação do metal soldado e a alta taxa de resfriamento. Outra característica é uma estrutura dendrítica fina devido também às altas velocidades de soldagem e baixa transferência de calor [EL – Batahgy, 1997].

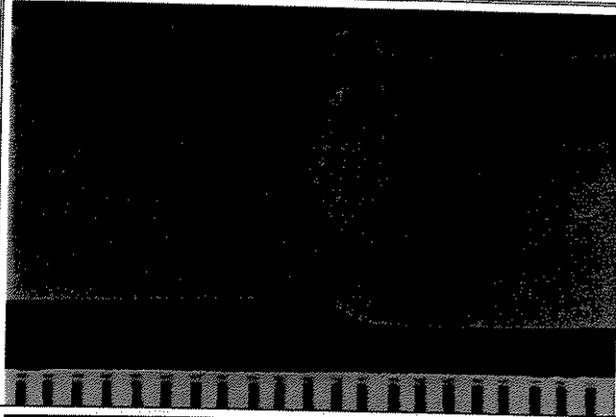
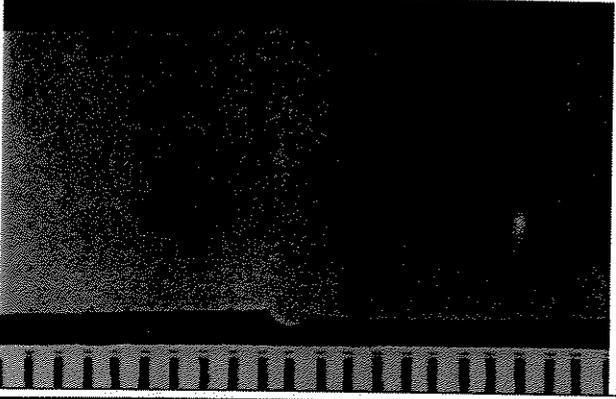
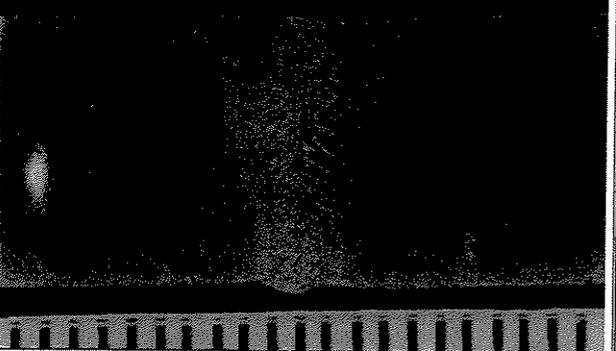
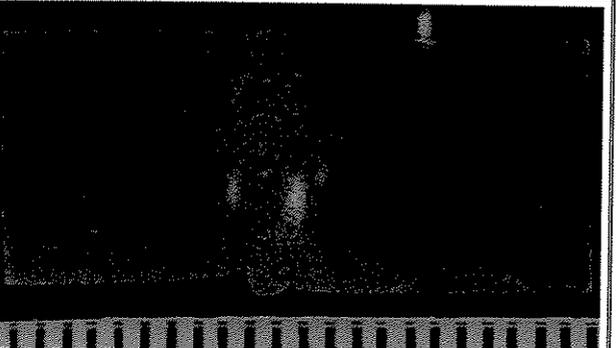
A ZTA da soldagem laser é extremamente pequena quando comparada à dos processos convencionais, com o material sofrendo recristalização [Padilha, 1996].

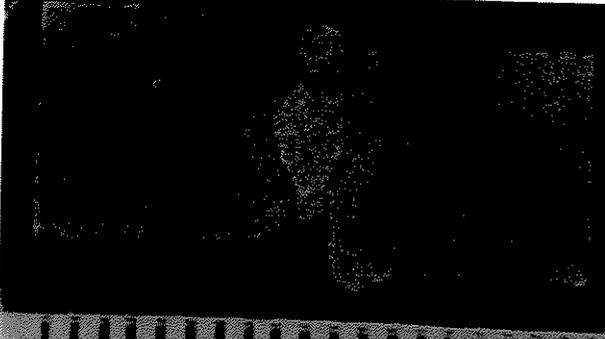
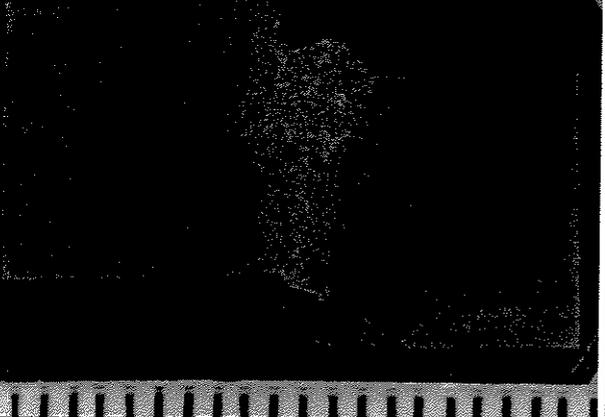
5.2. Avaliação da qualidade das soldas

A Tabela 5.1 apresenta os resultados da análise das macrografias das amostras soldadas segundo a norma EM ISO 13919-1 para aços com espessuras até 11mm.

Tabela 5.1. Resultados da aplicação da norma EM ISO 13919-1 nas soldas efetuadas a laser.

	<p style="text-align: center;">Qualidade: B</p> <p style="text-align: center;">Defeito: 3, 13</p> <p style="text-align: center;">Porosidade < 2mm</p> <p style="text-align: center;">Desalinhamento < 2mm</p> <p style="text-align: center;">Amostra 1</p>
---	---

	<p>Qualidade: B Defeito: 10, 13 Cantos cortados < 0,5mm Desalinhamento < 2mm Amostra 2</p>
	<p>Qualidade: B Defeito: 11, 13 Excesso de metal topo < 1,7mm Desalinhamento < 2mm Amostra 3</p>
	<p>Qualidade: B Defeito: 13, 14 Desalinhamento < 2mm Decaimento do banho < 2mm Amostra 4</p>
	<p>Qualidade: B Defeito: 3, 13 Porosidade < 2mm Desalinhamento < 2mm Amostra 5</p>

	<p>Qualidade: E Defeito: 1, 3, 7 Fendas (não permitido) Porosidade < 2mm Falta penetração > 2mm Amostra 6</p>
	<p>Qualidade: B Defeito: 3, 11 Porosidade < 2mm Excesso de metal topo < 1,7mm Amostra 7</p>
	<p>Qualidade: B Defeito: 3, 11 Porosidade < 2mm Excesso de metal topo < 1,7mm Amostra 8</p>

Os defeitos encontrados nas amostras e classificados pela norma, como pode ser visto na Tabela 5.1, estão dentro dos limites que a norma apresenta, menos os defeitos encontrados na amostra 6 que foi reprovada, e como a norma retrata deve ser revisado os parâmetros dessa amostra, provavelmente aumentando-se a velocidade de soldagem ou diminuindo-se a potência utilizada.

Em relação à porosidade encontrada nas amostras e descrita na norma, a porosidade ocorre quando bolhas de gás são travadas durante o processo de solidificação da solda, mas essas

porosidades estão dentro dos limites da norma. Porosidades pequenas, poros menores que 0,2 mm estão presentes na maioria das soldas e normalmente são cavidades esféricas [Dawes, 1992]. As densidades de porosidades encontradas nas amostras foram baixas e nos limites da norma: Amostras 1 e 8 (1) poro por cm^2 , amostras 2, 3, 4 (0), amostras 5 e 7 (2) e amostra 6 (4) poros por cm^2 .

5.3. Dureza

A amostra 6, conforme a análise pela norma EM ISO 13919-1, foi reprovada e, portanto, não foi submetida ao ensaio de dureza. Os gráficos das Figuras 5.10 até 5.13 apresentam os resultados de dureza Vickers nas direções ao longo da profundidade do cordão de solda e da seção transversal para as amostras 1 a 8, respectivamente.

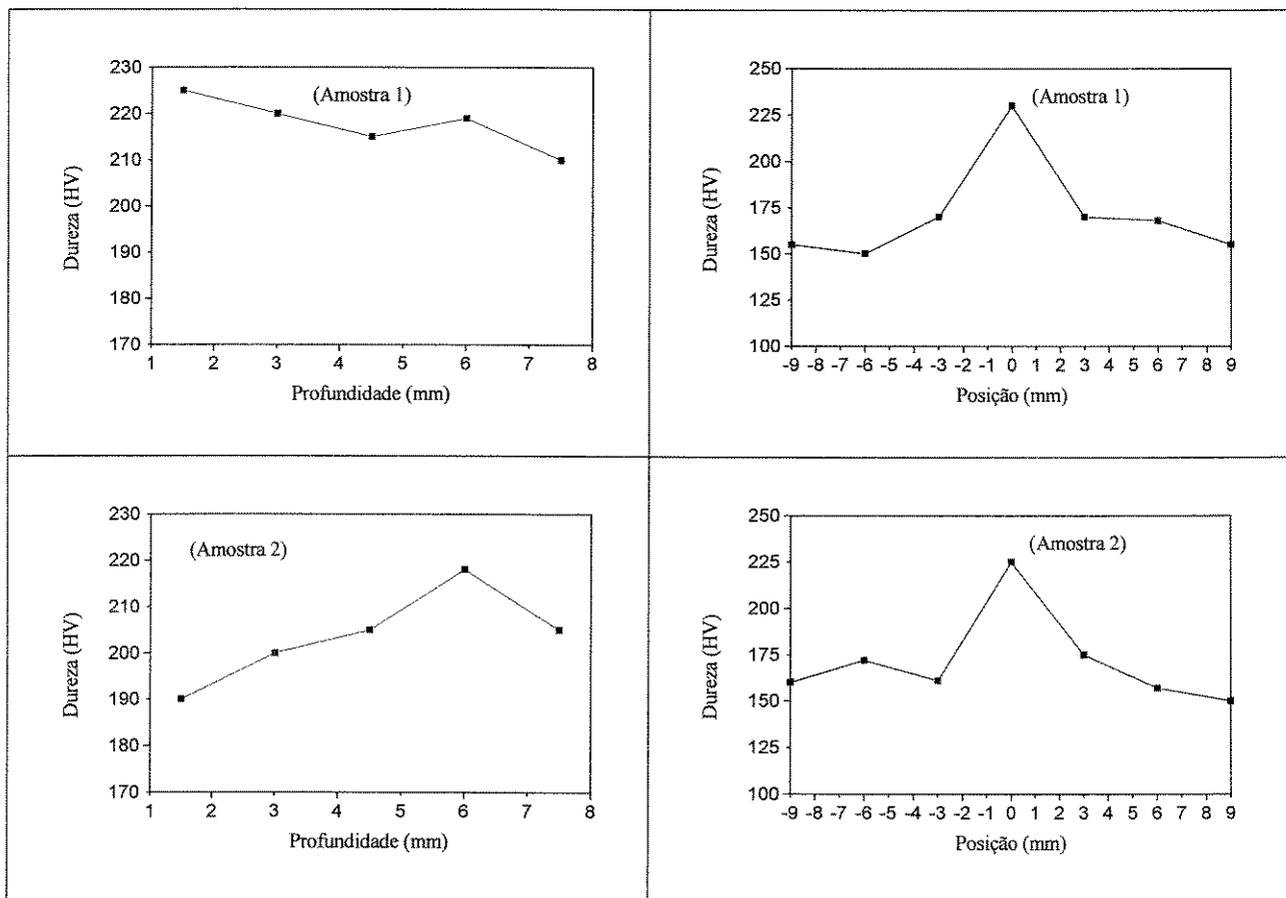


Figura 5.10. Comportamento da dureza ao longo da profundidade e da posição transversal das amostras 1 e 2 [Rossini, 2001].

Para a amostra 1, nota-se um comportamento homogêneo da dureza ao longo da profundidade do cordão, tendo valor máximo de 225 HV na região próxima da superfície em contato com o feixe laser, e valor mínimo de 210 HV na região próxima à superfície inferior, portanto uma variação de 15 HV. Em relação à dureza na seção transversal, observa-se valores de 160 HV para o material base, aumentando na ZTA até atingir o máximo de 225 HV no cordão de solda. Para a amostra 2, nota-se valores baixos na região próxima à superfície superior, faixa de 180-190 HV, seguido de um aumento até próximo da superfície inferior, tendo valor máximo 220 HV na superfície inferior. Em relação à dureza na seção transversal, observa-se valores de 160 HV para o material base, aumentando na ZTA até atingir o máximo de 235 HV no cordão de solda na região intermediária entre as superfícies.

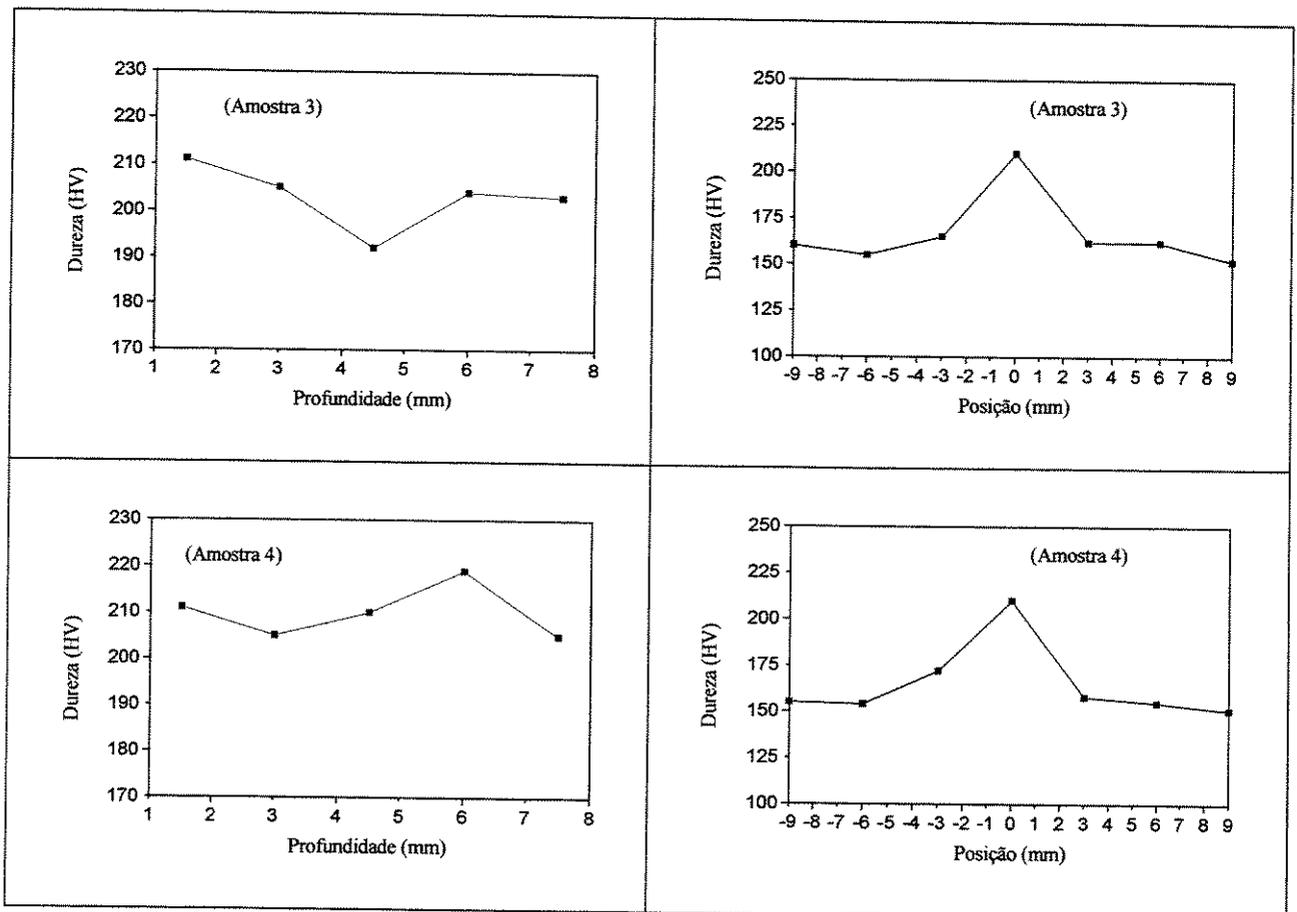


Figura 5.11. Comportamento da dureza ao longo da profundidade e da posição transversal das amostras 3 e 4.

Na amostra 3, a dureza ao longo da profundidade do cordão de solda tem valor máximo de 215 HV na região próxima a superfície em contato com o feixe, um valor intermediário que decai para 190 HV na região mediana do cordão de solda e um valor de 205 HV na região do cordão próxima à superfície inferior, portanto, uma variação de 25 HV. Na seção transversal, observam-se valores em torno de 160 HV para o material base, aumentando na ZTA até atingir o máximo de 210 HV no cordão de solda. Para a amostra 4, nota-se um comportamento homogêneo da dureza ao longo da profundidade do cordão, tendo valor máximo de 220 HV na região próxima da superfície inferior, e valor mínimo de 205 HV na região próxima à superfície em contato com o feixe (variação de 15 HV). A dureza na seção transversal, apresentou valores próximos de 160 HV para o material base, aumentando na ZTA até atingir o máximo de 210 HV no cordão de solda.

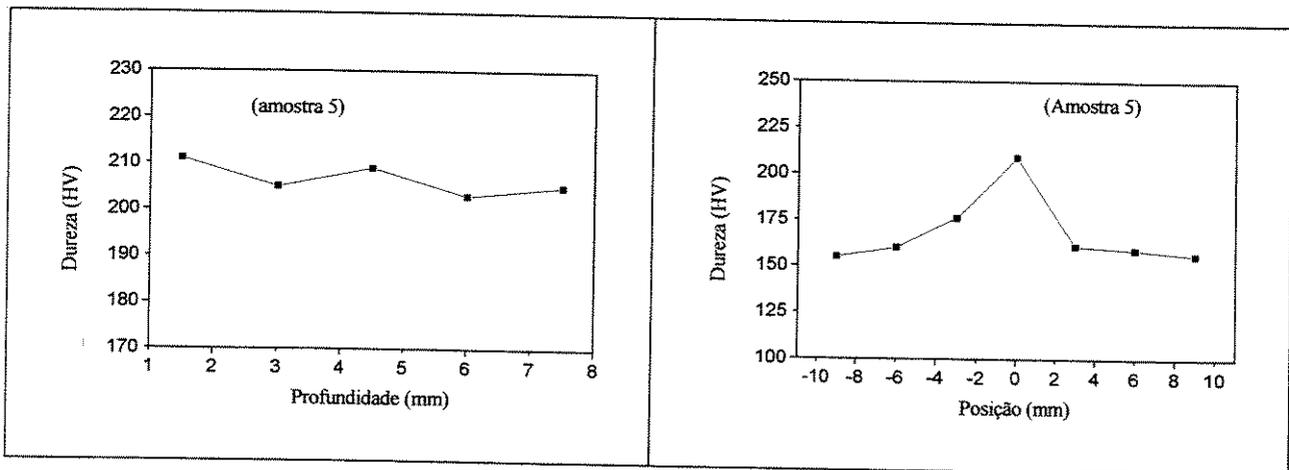


Figura 5.12. Comportamento da dureza ao longo da profundidade e da posição transversal da amostra 5.

A amostra 5, apresenta um comportamento homogêneo da dureza ao longo da profundidade do cordão, tendo valor máximo de 212 HV na região próxima da superfície superior, e valor mínimo de 205 HV na região próxima à superfície inferior, portanto uma variação de 7 HV. Em relação à dureza na seção transversal, observa-se valores de 160 HV para o material base, aumentando na ZTA até atingir o máximo de 215 HV no cordão de solda.

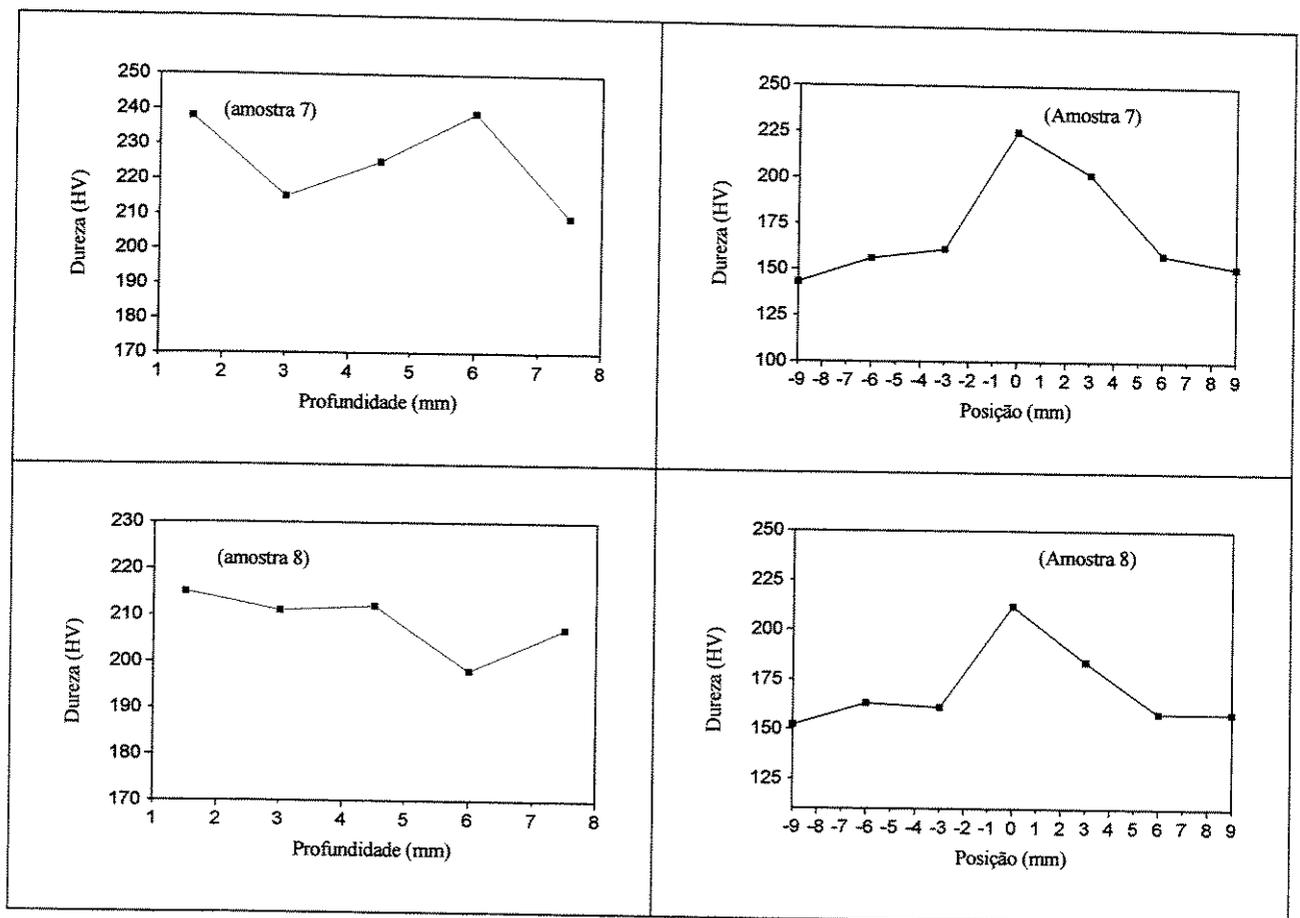


Figura 5.13. Comportamento da dureza ao longo da profundidade e da posição transversal das amostras 7 e 8.

Nas chapas grossas de aço baixo carbono, ocorreu um aumento da dureza partindo do material base até a ZF, o que concorda com os resultados apresentados por [Strychor, 1978] na soldagem a laser de chapas de aço baixo carbono (0,25%) com espessura de 12,5 mm obtendo valores máximos de 220 HV para a região central do cordão de solda.

A dureza no sentido da profundidade do cordão de solda na amostra 7 tem valor máximo de 240 HV na região próxima a superfície superior, um valor intermediário que decai para 215 HV na região mediana do cordão de solda e um valor de 210 HV na região do cordão próxima à superfície inferior (variação de 30 HV). Para a seção transversal, observam-se valores de dureza em torno de 147 HV para o material base, aumentando na ZTA até atingir o máximo de 225 HV no cordão de solda. Na amostra 8, a dureza do cordão de solda tem valor máximo de 215 HV na região próxima a superfície em contato com o feixe, um valor intermediário que decai para 200 HV na região mediana e um valor de 210 HV na região do cordão próxima à superfície inferior, (variação de 15 HV). Em relação à dureza na seção transversal, observam-se valores em torno de 155 HV para o material base, aumentando na ZTA até atingir o máximo de 215 HV no cordão de solda.

O comportamento das durezas, ao longo da profundidade do cordão de solda deve-se à variações nos parâmetros aplicados em cada amostra, onde algumas apresentam macroestruturas mais homogêneas, regiões com grãos colunares e regiões equiaxiais com microestruturas mais refinadas, como foi descrito anteriormente. A tabela 5.2. mostra os valores de dureza média da profundidade e de dureza máxima na seção transversal.

Tabela 5.2. Valores de dureza média e máxima da amostra.

Amostra	Valores médios na Profundidade	Variação	Valores médios na seção transversal
1	219 (HV)	15 (HV)	225 (HV)
2	205 (HV)	30 (HV)	235 (HV)
3	204 (HV)	19 (HV)	210 (HV)
4	210 (HV)	14 (HV)	210 (HV)
5	207 (HV)	8 (HV)	215 (HV)
6	194 (HV)	5 (HV)	200 (HV)
7	225 (HV)	30 (HV)	225 (HV)
8	209 (HV)	17 (HV)	215 (HV)

Em relação à dureza média no sentido da profundidade da amostra 1, esses valores são próximos do valor máximo, pois essa amostra apresentou estruturas bem homogêneas ao longo do cordão, com grãos bem alongados ao centro. Já a amostra 2, tem uma estrutura menos definida, com grãos alongados porém de menores tamanhos na região central, e grãos equiaxiais centrais maiores devido à velocidade menor, com isso sua dureza na profundidade é menor. Na posição transversal foi pego um ponto que apresentou grãos menos alongados. A amostra 3 apresenta uma estrutura heterogênea na região onde ocorreu o fechamento do poço líquido (próximo a superfície superior), devido a isso, as durezas medidas foram menores, pois analisou uma região um pouco abaixo do ponto final de solidificação, apresentando grãos maiores ainda que das outras amostras. As amostras 4 e 5 apresentam as mesmas características da amostra 1, com uma pequena diferença em relação ao poço líquido que está um pouco mais próximo da superfície, modificando um pouco os valores de dureza. Na amostra 6, os valores de dureza estão alterados devido a falta de preenchimento do metal líquido na poça de fusão, a estrutura apresenta-se desordenada em relação ao sentido de extração, formando várias estruturas heterogêneas nas regiões analisadas. As amostras 7 e 8 também apresentam resultados parecidos,

porém devido à diferença na posição do foco a poça de fusão, se apresentou um pouco mais próxima da superfície na amostra 8, tendo uma pequena diferença na posição em que foi retirada a dureza. Foi retirado apenas um valor de dureza em cada posição das amostras no sentido transversal e longitudinal, devido às pequenas dimensões das amostras.

Capítulo 6

Conclusões

Os resultados obtidos das amostras de soldagem a laser de chapas grossas aço de baixo carbono, permitem que sejam extraídas as seguintes conclusões:

1. O sistema de proteção gasosa inibe a formação de plasma, além de garantir a proteção da zona fundida em ambas às superfícies da amostra, possibilitando a realização de cordões de solda de elevada qualidade. O consumo de gás está dentro dos padrões utilizados.
2. A dimensão dos cordões de solda foi típica da soldagem laser, onde a zona termicamente afetada foi bastante estreita (em torno de 1 mm), apresentando refino da microestrutura.
3. Os vários parâmetros utilizados para a soldagem com laser de CO₂ garantiram uma elevada qualidade das soldas, como se comprova pela análise realizada de acordo com a norma EM ISO 13919-1, pela observação metalográfica e pelos valores da dureza obtidos.
4. As qualidades das amostras segundo a norma, foram: Amostras de 1 a 5, 7 e 8: qualidade B, Amostra 6: qualidade E. Como discutido anteriormente, na amostra 6 deve-se modificar a velocidade de soldagem ou diminuir a potência utilizada visando à melhoria da qualidade da solda.
5. Em relação à dureza, pode ser notada diferença nos valores, porém esses valores são pequenos. Além disso, essas diferenças se devem aos diferentes parâmetros utilizados e também ao equipamento para se obter os resultados, que não tinha movimentação x-y, dificultando o alinhamento das amostras.

6. A região da ZF (Zona Fundida) apresentou uma estrutura ferrítica acicular, com regiões equiaxiais na região central e grãos colunares direcionados ao sentido da extração de calor.

7. Com relação à influência dos parâmetros operacionais, pode-se concluir:

- Quanto à velocidade, melhores resultados de dureza e microestrutura foram para a amostra 1 (velocidade de 0.70 m/min);
- A inclinação do feixe não interferiu no resultado;
- Em relação ao desalinhamento, fica evidente que o resultado com o foco na superfície da chapa inferior não foi satisfatório (Amostra 6).

6.1. Propostas para trabalhos futuros

1. Investigar detalhadamente a modificação da taxa de gás de proteção (He) e determinar os efeitos em função dos parâmetros utilizados para a soldagem a laser;
2. Utilizar outros gases de proteção além do (He), todos tem diferenças e podem ser melhores aplicados com um conjunto de parâmetros diferentes para a soldagem de chapas grossas;
3. Desenvolver parâmetros para soldar chapas com espessuras diferentes;
4. Utilizar velocidade de varredura do feixe de 0,50 m/min. e comparar os resultados obtidos com os deste trabalho;
5. Realizar ensaios mecânicos para obter as propriedades da junta soldada.

Referências Bibliográficas

- Albright, C., Laser Welding, Machining and Materials Processing, Proceedings of the International Conference on Applications of Lasers and Electro-optics, ICALEO, 11-14 November, Califórnia, 1985.
- Azzolini, W. Jr, Ierardi, M. C., Garcia A., Vilar. R. , “Laser Cladding of a Martensitic Stainless Stees on a Tool Steel Substrate”, *Lasers In Engineering*, Vol. 9, pp. 229-235, 1999.
- Barnes, T. A., Pashby, I. R., Joining techniques for aluminium spaceframes used in automobiles Part I – solid and liquid phase welding. *Journal of Materials Processing Technology* vol. 99, p. 62-71,2000.
- Blackman, A., Dorling, D. V., Technology Advancements Push Pipeline Welding Productivity. *Welding Journal*. Vol.79, nº 8, 2000.
- Caldas, M., G., C., *Laser: Perspectivas Tecnológicas e de Mercado*. Ed. Promocet. São Paulo, 1986.
- Charschan, S. S.; “Lasers in Industry”, Van Nostrand Reinhold Company, USA, 1972.
- Chester, A., N., Letokhov, V., S., Martellucci, S. *Laser Science and Technology*. Ed.Plenum Publishing Corporation, New York, 1988.
- Costa, A. R., O Estágio Atual e as Perspectivas das Aplicações do Laser. Seminário Ibero Americano sobre Procesamiento de Materiales por Laser. 27 a 30 Abril 1999, Argentina, Buenos Aires, p 3-9.
- Crafer, R., C., Oakley, P., J. , *Laser Processing in Manufacturing*. Ed Chapman Hall, Great Britain, 1993.

- Chryssolouris, G., Laser Machinig Theory and Practice. Massachusetts Institute of Technology, Ed. Springer-Verlag, 1991.
- Dawes, C., Laser Welding. Ed. McGraw-Hill Book Company / Inc, 1992.
- Duley, W., W., Laser Welding. Ed. John Wiley and Sons, 1999.
- El-Batahgy, A., Effect of Laser Welding Parameters on Fusion Zone Shape and Solidification Structure of Austenitic Steels, Materials Letters, v. 32, pp 155-163, August, 1997.
- Garcia, A., Spin, J., A., Santos, C., A., Ensaio dos materiais. Livros Técnicos e Científicos Editora S/A. Rio de Janeiro, 2000.
- Halliday, D., Resnick, R., Fundamentos da Física. Ed. Livros Técnicos e Científicos Editora S.A, 1995.
- Heston, T. Remote Laser Beam Welding Shows Potencial in the Body shop. Welding Journal. Vol.79, nº 6, 2000.
- Holbert, R. K., Richardson, R. W., Farson, D. F., Albright, C. E., Image-Based Penetration Monitoring of CO₂ Laser Beam Welding. Welding Journal. Vol.79, nº 4, 2000.
- Ierardi, M. C. F. Tratamentos Superficiais por Refusão com Laser. Campinas: Faculdade de Engenharia, Universidade de Campinas, Livre Docência 1999.
- Irving, B. Carbon dioxide, YAG, Diodo-pumped and Hydrid lasers provide the auto industry with much to consider in its quest for lighter, stronger vehicles. Welding Journal. Vol.79, nº 6, 2000.
- Kaminol, I., P., Siegman, A., E., Laser Devices and Applications. Ed. IEEE Press, New York, 1973.
- Lopes, E.M.; Miranda, M.R.; Metalurgia da soldadura. Edições Técnicas do Instituto de Soldadura e Qualidade, Portugal, 1993.
- Machado, I. G. Livro Soldagem e Técnicas Conexas: Processos. Editora Palloti. Brasil, p. 288-296, 1996.
- Maillet, H. O laser Princípios e Técnicas de Aplicação. Editora Manole Ltda, 1987.

- Meinders, T., Berg, A. V. D, Huétink, J. Deep drawing simulations of Tailored Blanks and experimental verification. *Journal of Materials Processing Technology*. Vol. 103, p. 65-73, 2000.
- Miller, J., C. Laser Ablation-Principles and Applications. Ed. Springer-Verlag, Berlin, 1994.
- Munhoz, A. L. J. Cura Localizada de Resina Termosensível Utilizando o Laser de CO₂ como Fonte Seletiva de Calor. Campinas: Faculdade de Engenharia, Universidade de Campinas, Tese (Mestrado),1997.
- Padilha, A.,F., Siciliano, F., Jr.,Encruamento, Recristalização, Crescimento de Grão e Textura. Ed. Édile Serviços Gráficos e Editora Ltda. São Paulo, 1996.
- Peças, P., Gouveia, H., Quintino, L., Rasmussen, M., Olsen, F. O. Soldadura Laser de Subconjuntos para Estampagem (Tailored Blanks). *Revista de Metalurgia*. Madrid, p. 210-216, Marzo-abril, 1998.
- Peças, P., Gouveia, H., Quintino, L. Soldadura Laser de Chapa Fina de Aço Carbono e Aço Galvanizado. *Revista de Metalurgia*. Madrid, p. 232-241, Marzo-abril, 1998.
- Pezzutti, M. Although resistance spot welding is still the major player in the automotive industry, other processes are gaining attention for a variety of applications. *Welding Journal*. Vol.79, nº 6, 2000.
- Roessler, D. M; "An Introduction to the Laser Processing of Materials", *The Industrial Laser Annual Handbook*, pp 16 - 30 1986.
- Ross, M., *Laser Applications*. Ed. Academic Press, London, 1971.
- Rossini, F., R., Santos, C., A., Vilar, R., M., C., S., Ierardi,M.,C., F., Soldas em Chapas Grossas de Aço Baixo Carbono Utilizando Laser de CO₂, 56º Congresso Annual ABM/Internacional Belo Horizonte, Brasil, CD-Rom, pp 800-809, 2001.
- Seyffarth, P., Hoffmann, J. Tecnologias de Raios Laser-estágio Atual da Técnica e Perspectivas. 1º Simpósio sobre Tecnologia de Soldagem Brasil-Alemanha. Editora VDI. Brasil, São Paulo, p. 41-59, 28-29 de junho 2000.

- Seyffarth, P., Hoffmann, J. O Laser na Construção Naval-realidade, Visão ou Ideal?. 1º Simpósio sobre tecnologia de soldagem Brasil-Alemanha. Editora VDI. Brasil, São Paulo, p. 60-74, 28-29 de junho 2000.
- Seyffarth, P., Hoffmann, J. Construção de Navios-Um futuro domínio para a soldagem a laser. 2º Simpósio sobre tecnologia de soldagem Brasil-Alemanha. Editora VDI. Brasil, São Paulo, p. 16-28, 16-17 de outubro 2001.
- Soares, O., D., D., Amor, M., P., Applied Laser Tooling. Ed. Martinus Nijhoff Publishers, Dordrecht, 1987.
- Sousa, M. A. B., Os Laseres.(Diagramas, 37). Editora Editorial Estúdios Cor., Lisboa, 1998.
- Souza, U. M., Produção de uma Liga AlNi por Refusão com Laser. Campinas: Faculdade de Engenharia, Universidade de Campinas, dissertação de Mestrado 2001.
- Strychor, R., Moon, D., W., Metzbower, E., A, Microstructure of ASTM A-36 Steel Laser Beam Weldments. Naval Reserch Laboratory. Washington, DC, p 63-70, 1978.
- Steen, W., M. Laser Material Processing. Ed. Ed. Springer-Verlag, Great Britain, 1996.
- Sun, Z., Kuo, M., Briding the Joint Gap with Wire Feed Laser Welding. Journal of Materials Processing Technology, vol 87, p. 213-22, 1999.
- Tzeng, Y. F., Parametric analisis of the pulsed Nd:YAG laser seam-welding process. Journal of Materials Processing Technology, vol 102, p. 40-47, 2000.
- Vicentin, L., C. Solda a Laser em Chapas Finas de Aço Baixo Carbono. Universidade Estadual de Campinas, Faculdade de Engenharia Mecânica. Campinas, São Paulo, Brasil. Tese (Mestrado), 1999.
- Young, M., Óptica e Lasers. Ed. Edusp, São Paulo, Brasil, 1998.
- Wainer, E., Brandi, S., D., Mello, F., D., H., Soldagem, Processos e Metalurgia. Ed. Edgard Blucher Ltda, 1992.
- Whitaker, I., R., The Microstructure of CO2 Laser welds in na AL-Fe-V-Si alloy, Materials Science and Engineering A, vol. 196, pp. 155-163, 1995.