

ESTE EXEMPLAR CORRESPONDE A REDAÇÃO FINAL DA
TESE DEFENDIDA POR Luiz CARLOS Vicentin
E APROVADA PELA
COMISSÃO JULGADORA EM 25/08/1999
Maria Clara Filippini Ierardi
ORIENTADOR

UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS
FACULDADE DE ENGENHARIA MECÂNICA

Solda a Laser em Chapas Finas de Aço Baixo Carbono

Autor : **Luiz Carlos Vicentin**
Orientador: **Prof. Dra. Maria Clara Filippini Ierardi**

46/99

UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS
FACULDADE DE ENGENHARIA MECÂNICA
ENGENHARIA MECÂNICA

Solda a Laser em Chapas Finas de Aço Baixo
Carbono

Autor : Luiz Carlos Vicentin

Orientador: Prof. Dra. Maria Clara Filippini Ierardi

Curso: Engenharia Mecânica.

Área de concentração: Materiais e Processo 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, 1999
S.P. - Brasil

8274.00008

UNIDADE	BC
N.º CHAMADA:	T/UNICAMP
	V662s
V.	Ex.
TOMBO BC/	41099
PAGE	278/00
C	☐
D	☒
PREÇO	R\$ 11,00
DATA	15-06-00
N.º CPD	

CM-00142438-4

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

V744s Vicentin, Luiz Carlos
Solda a laser em chapas finas de aço baixo carbono /
Luiz Carlos Vicentin.--Campinas, SP: [s.n.], 1999.

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

1. Solda e soldagem. 2. Laser - Indústria. 3. Chapas
de aço. I. Ierardi, Maria Clara Filippini. II.
Universidade Estadual de Campinas. Faculdade de
Engenharia Mecânica. III. Título.

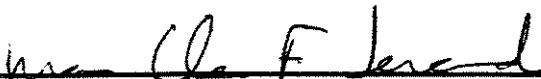
UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS
FACULDADE DE ENGENHARIA MECÂNICA
DEMA / FEM

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO

Solda a Laser em Chapas Finas de Aço Baixo
Carbono

Autor: Luiz Carlos Vicentin

Orientador: Prof.a. Dra. Maria Clara Filippini Ierardi



Prof.a. Dra. Maria Clara Filippini Ierardi, Presidente

UNICAMP



Prof.a. Dra. Célia Marina de Alvarenga Freire

FEM / UNICAMP



Prof.a. Dra. Margarita Ballester

IF / UMCAMP

Campinas 25 de Agosto de 1999

*"Uma viagem de mil milhas
começa apenas com um passo."*

Lao Tse

Dedicatória

Dedico todo o esforço deste trabalho aos meus pais Luiz e Geni, as minhas irmãs Marta e Juliana, aos meus sobrinhos Guilherme e Luiz Gustavo e ao meu cunhado Gustavo

Agradecimentos

Agradeço em especial as instituições e pessoas que foram imprescindíveis para a realização deste trabalho.

À minha família pelo apoio e paciência em todos os momentos de minha vida

À Prof. Dra. Maria Clara F. Ierardi, pela dedicação, estímulo, amizade e apoio durante a realização deste trabalho.

Aos Profs. Dr. Rubens Caram e Dr. Arnauri Garcia, pela amizade e pelo incentivo

Aos professores e funcionários do DEMA e em especial a técnica Rita Jacon

Aos amigos, Zé Mário, Claudia, André, Carlos Alexandre, Jaime, Eli, Reinaldo Sigahi

Ao Laboratório Nacional de Luz Sincrotron e Centro Tecnológico da Marinha em São Paulo

À UNICAMP, pela possibilidade de estudo e desenvolvimento do trabalho

Ao CNPq, pela concessão da bolsa de estudo durante o período de trabalho

À Deus

Resumo

VICENTIN, L.C. , Solda a laser em chapas finas de aço, Campinas,

**Faculdade de Engenharia Mecânica, Universidade Estadual de Campinas,
1997.**

A solda a laser é um processo de elevado potencial na fabricação de tailored blanks (subconjuntos para posterior estampagem, constituídos de materiais de mesma ou diferentes espessuras) para a indústria automobilística. Este trabalho descreve os resultados da investigação da solda a laser de Nd:YAG em chapas finas de aço baixo carbono galvanizadas com 1 mm de espessura. Apresenta-se uma descrição do comportamento das chapas soldadas em ensaios de estampabilidade e a influência dos parâmetros operacionais nas juntas através de análise da microestrutura resultante. São descritos os mecanismos de fixação das chapas e eliminação do plasma que ocorre durante a soldagem objetivando minimizar defeitos típicos em soldas a laser. Os resultados obtidos comprovaram a eficiência e versatilidade do processo de soldagem a laser.

Palavras-chave: Tailored Blanks, Laser, Solda, Nd:YAG, Chapas finas

Abstract

VICENTIN, L.C., Welds the laser in sheet steel, Campinas,

Faculdade de Engenharia Mecânica, Universidade Estadual de Campinas,
1997.

It welds it to laser it is a potential high process in the production of tailored blanks (subsets for posterior stamping, constituted of materials of same or different thickness) for the automobile industry. This work describes the results of the investigation of the it welds the laser of Nd:YAG in fine foils of steel low carbon galvanized with 1 mm of thickness. She comes a description of the behavior of the foils welded in estampabilidade rehearsals and the influence of the operational parameters in the committees through analysis of the resulting microestrutura. They are described the mechanisms of fixation of the foils and elimination of the plasm that it happens during the soldagem objectifying to minimize typical defects in you weld to laser. The obtained results checked the efficiency and versatility of the soldagem process to laser.

Word-key: Tailored Blanks, Laser, Welds, Nd:YAG, Sheet.

Sumário

Capítulo 1- Introdução e Objetivos	1
1.1 Introdução	1
1.2 Objetivos do Trabalho	2
Capítulo 2 - Laser	3
2.1 Fundamentos Básicos do Laser	3
2.2 Distribuição da Intensidade de Energia	7
2.3 Principais Lasers	9
Capítulo 3 - Soldagem	13
3.1 Soldagem	13
3.2 Solda a Laser	16
3.2.1 As Vantagens e Desvantagens de Soldas a Laser:	17
3.2.2 Os Inconvenientes da Utilização da Solda a Laser	19
3.2.3 A Eficiência de Soldas a Laser	19

3.2.4 Soldagem Contínua em Baixa Potência	20
3.3 A Formação de Plasma	23
3.4 Porosidade	26
3.5 Posicionamento	27
3.6 Posicionamento	
Capítulo 4 – O Laser na Indústria Automobilística	29
4.1 Tailored Blanks	29
Capítulo 5 - Análise Experimental	34
5.1 Materiais	35
5.2 Metodologia de Soldagem	35
5.3 Parâmetros de Processo	38
5.4 Qualidade da Soldagem	39
5.4.1 Análise Metalográfica	41
5.4.2 Análise de Microdureza Interna e Superficial	42
5.4.4 Avaliação da Porosidade	43
5.4.5 Ensaio de Embutimento (Erichsen)	43
Capítulo 6 - Resultados e Discussões	46
6.1 Parâmetros	46

6.2 Análise Microestrutural	49
6.2.1 Microestrutura do Substrato	49
6.2.2 Microestrutura da Zona Termicamente Afetada pelo Calor (ZTA)	51
6.2.3 Microestrutura da Zona Fundida (ZF)	53
6.3 Microdureza	54
6.4 Avaliação Qualitativa das Soldas	57
6.5 Ensaio de Embutimento (Erichsen)	59
 Capítulo 7 - Conclusões e Propostas para Trabalhos Futuros	 61
7.1 Conclusões	61
7.2 Trabalhos Futuros	62
 Referência Bibliográfica	 63
Apêndice A	66

Lista de Figuras

Capítulo 2

Figura 2.1 – Espectro eletromagnético dos principais laser

Figura 2.2 – Esquema básico de um laser

Figura 2.3 – Emissão espontânea do meio ativo excitado

Figura 2.4 – Emissão estimulada de fóton. Um fóton (a) o qual se colide com um átomo excitado que poderá emitir um fóton por emissão espontânea (b) e então os dois fótons irão viajar em fase (c) até nova colisão

Figura 2.5 – Alimentação ótica dos fótons pelos espelhos para aumentar o percurso para a emissão estimulada e ampliar a potência do laser

Figura 2.6 – Modos básicos de feixes (a) vista final da densidade de potência do feixe (b) Modo eletromagnético transversal (c) Perfil de densidade de potência.

Figura 2.7 – Representação esquemática de possíveis modos de vibrações da molécula de CO₂

Figura 2.8 – Diagrama dos níveis de energia do íon Nd³⁺ no YAG; a transição laser ocorre entre os níveis $4F_{3/2}$ e $4I_{11/2}$

Capítulo 3

Figura 3.1 – Evolução dos processos de soldagem ao longo do tempo

Figura 3.2 – Profundidade de penetração versus velocidade de soldagem

Figura 3.3 – Ilustração do bloqueio gerado pelo plasma

Figura 3.4 – Bico injetor de gás

Capítulo 4

Figura 4.1 – Porcentagem de automóveis que utilizam Tailored Blanks

Figura 4.2 – Tailored Blanks na indústria automobilística

Figura 4.3 – Detalhe da utilização de tailored Blanks na lateral de um automóvel

Capítulo - 5

Figura 5.1 – Foto do laser de Nd:YAG utilizado na indústria automobilística

Figura 5.2 – Ilustração da sobreposição do feixe laser nas chapas de aço

Figura 5.3 – Ilustração das chapas de aço preparadas para a soldagem

Figura 5.4 – Ilustração do suporte de fixação desenvolvido para o trabalho

Figura 5.5 – Localização das regiões das medidas de microdureza

Figura 5.6 – Localização das regiões das medidas de microdureza superficial

Figura 5.7 – Região da análise de porosidade

Figura 5.8 – Ensaio Erichsen conforme a norma da ASTM E 643-84.

Figura 5.9 – Aparelho de ensaios mecânicos MTS.

Figura 5.10 – Dispositivo de fixação da chapas soldadas utilizado no ensaio de embutimento.

Capítulo - 6

Figura 6.1 – Solda a laser em chapas finas de aço baixo carbono, aumento de 25,6x

Figura 6.2 – Solda laser em chapas de aço baixo carbono sem penetração total, aumento de 25,6x

Figura 6.3 – Desalinhamento entre chapas soldadas (posicionamento incorreto das chapas no suporte de fixação), aumento de 25,6x

Figura 6.4 – Desalinhamento das chapas de aço soldadas (fixação inadequada de uma das chapas), aumento de 25,6x

Figura 6.5 – Irregularidades superficiais no cordão de solda

Figura 6.6 – Microestrutura do aço baixo carbono utilizado nas soldas, aumento de 125x

Figura 6.7 – Microestrutura do aço baixo carbono utilizado nas soldas, aumento de 1500x

Figura 6.8 – Microestrutura da interface entre a ZTA e o substrato, aumento de 100x

Figura 6.9 – Microestrutura da ZTA em solda a laser, aumento de 1500x

Figura 6.10 – Microestrutura da ZF e ZTA em soldas de chapas finas de aço baixo carbono, aumento de 250x

Figura 6.11 – Microestrutura da ZF em soldas de chapas finas de aço baixo carbono , aumento de 3000x

Figura 6.12 – Gráfico da microdureza em soldas (Região superior)

Figura 6.13 – Gráfico da microdureza em soldas (Região mediana)

Figura 6.14 – Gráfico da microdureza em soldas (Região inferior)

Figura 6.15 – Gráfico da microdureza em solda(Região perpendicular)

Figura 6.16 – Representação esquemática da localização da oxidação formada no cordão de solda a laser

Figura 6.17 – Gráfico do ensaio Erichsen para determinação do IE

Figura 6.18 – Copo resultante do ensaio de embutimento

Capítulo 7

Figura 7.1 – Sistema de injeção de gás por meio de turbulência

Lista de Tabelas

Capítulo 3

Tabela 3.1 - Classificação dos processos de soldagem, de acordo com a fonte de energia e o tipo de proteção

Tabela 3.2 - Densidades de diferentes processos de soldagem

Capítulo 4

Tabela 4.1 - Empresas componentes do consórcio ULSAB.

Capítulo 5

Tabela 5.1 - Requisitos de composição química em porcentagem

Tabela 5.2 - Composição química do aço baixo carbono analisado

Tabela 5.3 - Parâmetros utilizados na soldagem de chapas finas de aço baixo carbono

Tabela 5.4 - Resumo da norma EN ISO 13919, que permite classificar qualitativamente a solda

Capítulo 6

Tabela 6.1- Parâmetros de processo

Tabela 6.2 - Resultado da aplicação da norma as soldas a laser realizadas em chapas finas de aço baixo carbono utilizando o conjunto de parâmetros item 2 (Tabela 6.1)

Tabela 6.3. - Resultado obtido no ensaio Erichsen

Nomenclatura

C_p - Capacidade térmica molar	[J/mol.K]
k - Condutividade térmica	[W/m.K]
m - Massa	[g]
t - Tempo	[s]
T_m - Temperatura	[°C]
P - Potência	[W]
λ - Comprimento de onda	[μm]
v - Velocidade de varredura	[cm]
α - Coeficiente de Absorção Óptica	[cm^{-1}]
ω - Raio do feixe	[mm]
ρ - Massa Específica (densidade)	[kg/m^3]
GAP - Espaço entre chapas	[mm]
USLAB - Ultra Light Steel Auto Body	
ZF - Zona fundida	
ZTA - Zona termicamente afetada	

Capítulo 1

Introdução e Objetivos

1.1 Introdução

As novas tendências mundiais de mercado: alta qualidade e minimização de custos, são de vital importância para a sobrevivência da indústria. Na indústria automobilística há uma busca constante de novas tecnologias. A fonte de calor focada (laser) é uma nova tecnologia que vem sendo empregada para a união de chapas finas de aço baixo carbono. Esta técnica não utiliza material de adição na solda. Com o emprego desta técnica ganha-se, além do aumento da qualidade, minimização de custos e aumenta-se também a velocidade de fabricação das partes soldadas. Entre as muitas vantagens, pode-se citar que a solda por laser é um processo quimicamente limpo, com uma pequena região termicamente afetada pelo calor (ZTA). A redução da ZTA é considerada muito importante, pois ela tem característica diferente do resto do substrato, sendo uma região mais dura, dificultando assim a estampabilidade do material. A qualidade da solda depende muito de ajustes adequados de parâmetros, como: velocidade de deslocamento do feixe laser, potência e focalização.

1.2 Objetivos do Trabalho

Tendo em vista a importância da utilização do laser na indústria automobilística para promover a união de chapas finas de aço baixo carbono e uma vez que não são bem entendidas as relações entre os parâmetros do processamento a laser e as microestruturas das soldas resultantes, estabeleceu-se como objetivos do trabalho:

- ① Definição dos parâmetros de processo envolvidos na solda laser de chapas finas de aço baixo carbono
- ② Execução das soldas nas chapas finas de aço baixo carbono

Capítulo 2

Laser

2.1 Fundamentos básicos do laser

Historicamente, o primeiro laser foi construído em 1960, por Th. Maiman [MAILLET, 1987]. O material ativo foi constituído de íons de cromo implantados em um cristal de recepção de rubi e bombeados opticamente em pulsos. A partir dessa data e até nossos dias, quando prosseguem os estudos avançados sobre lasers de elétrons livres e de raios X, literalmente várias centenas de tipos de lasers, funcionando em comprimentos de ondas que vão do IV remoto até o UV e utilizando praticamente todos os meios ativos disponíveis, demonstraram nos laboratórios sua viabilidade. Na Figura 2.1 [STEEN, 1993] pode-se observar o comprimento de onda dos principais lasers, entretanto, apenas algumas dezenas deles são fabricados industrialmente. Embora todos esses lasers possuam em comum um meio ativo, um sistema de bombeamento e uma cavidade ressonante, suas características de funcionamento diferem radicalmente em numerosos aspectos, tais como as propriedades do feixe e as limitações de operação. Evidentemente, diferem também pelo preço.

Um laser é constituído basicamente de dois espelhos, que colocados paralelamente formarão um oscilador óptico, que é uma câmara onde a luz deverá oscilar num movimento de vai e vem entre um e outro espelho para sempre se nenhum mecanismo provocar alguma interferência. Um dos espelhos é parcialmente transparente, permitindo que seja emitido um feixe de luz enquanto o outro espelho deve ser totalmente refletor. Entre os dois espelhos existe

um meio ativo que é um acúmulo de átomos selecionados, moléculas ou íons, no estado líquido, sólido ou gasoso, que são capazes de emitir luz e onde é possível amplificar a oscilação da mesma por um mecanismo de emissão estimulada, o que gerou o denominação Laser: Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation. Para ativar a emissão da luz é necessário um sistema para o bombeamento do meio ativo, que pode ser uma fonte de energia, um pulso de luz ou uma reação química, conforme o meio. Um esquema básico do arranjo ótico de um laser é mostrado na Figura 2.2.

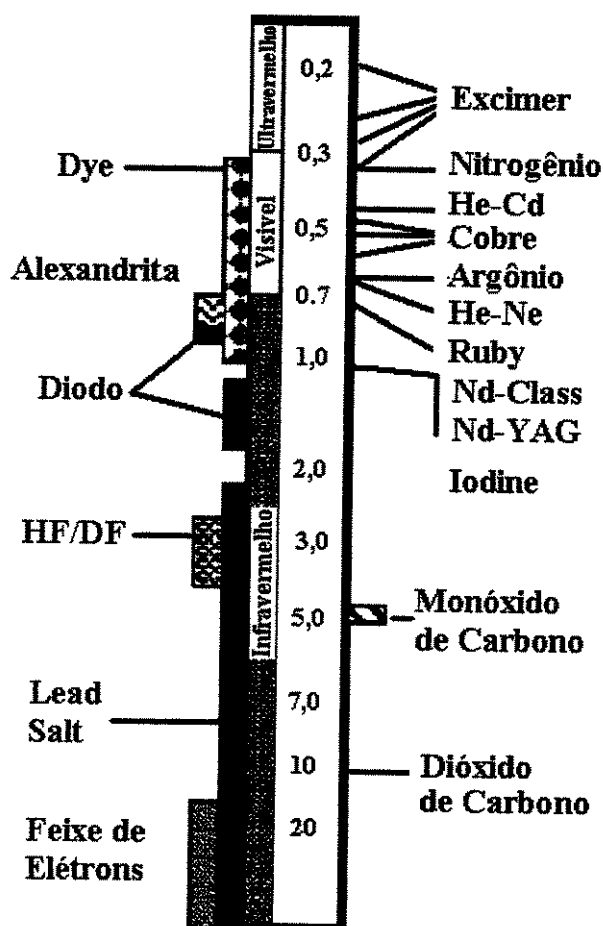


Figura 2.1 - Espectro eletromagnético dos principais lasers

Para a descrição da luz do laser, o termo fóton será usado ao invés de onda de luz, uma vez que os fótons transportam uma quantidade definida de energia de acordo com o seu comprimento de onda. Seja qual for a constituição do meio ativo, existem milhões de átomos, íons ou moléculas, que absorvem energia na forma de fóton quando bombeados, mantendo essa energia por um tempo de vida curto e desordenado. Quando o tempo de vida expira, esses átomos, íons ou moléculas, emitem um fóton e retornam para seu estado anterior até serem bombeados novamente. Esse alívio de fótons é conhecido como emissão espontânea. Conforme esta representado na Figura 2.3, os fótons aliviados viajam em todas as direções em relação ao eixo ótico.

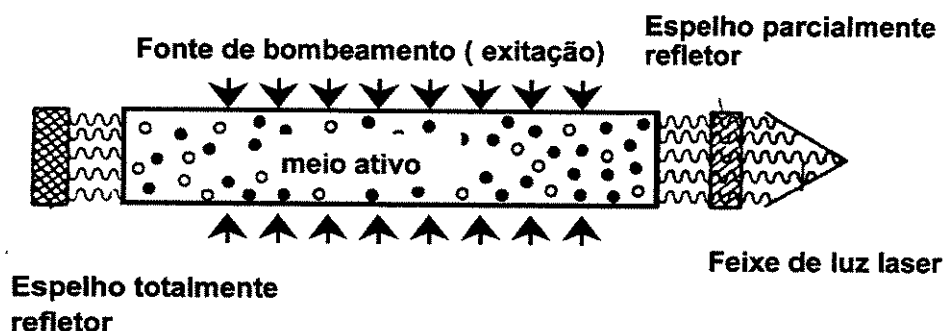


Figura 2.2 - Esquema básico de um laser

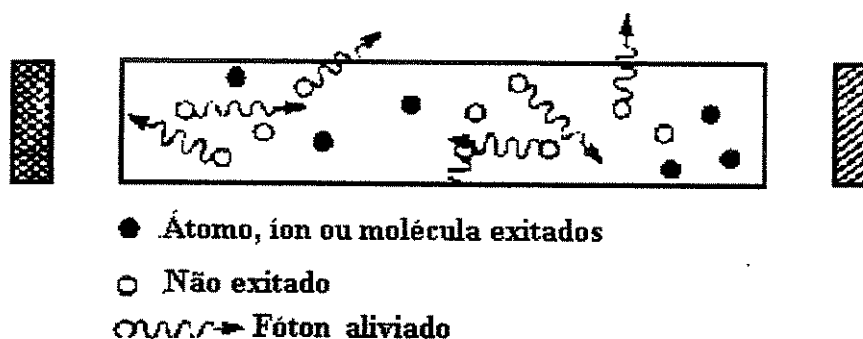


Figura 2.3 - Emissão espontânea do meio ativo excitado

Se um fóton colide com outro átomo energizado, esse átomo irá provocar um alívio prematuro de fóton e os dois fótons irão viajar em fase até a próxima colisão, produzindo um fluxo de fótons de densidade crescente, conforme representado na Figura 2.4. Fótons que não viajam paralelos ao eixo ótico são rapidamente perdidos do sistema. Os que viajam paralelos ao eixo tem o comprimento do seu caminho consideravelmente aumentado pela reflexão nos espelhos, antes de deixar o laser pelo espelho parcialmente refletor representado na Figura 2.5. Essa ação não somente amplifica a geração de fótons por emissão estimulada para alcançar um nível de potência, mas também para gerar um feixe de luz coerente altamente colimado, que torna possível o uso do laser.

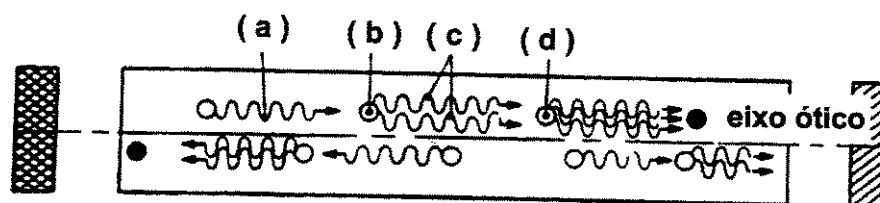


Figura 2.4 - Emissão estimulada de fóton. Um fóton (a) o qual se colide com um átomo excitado que poderá emitir um fóton por emissão espontânea (b) e então os dois fótons irão viajar em fase (c) até nova colisão

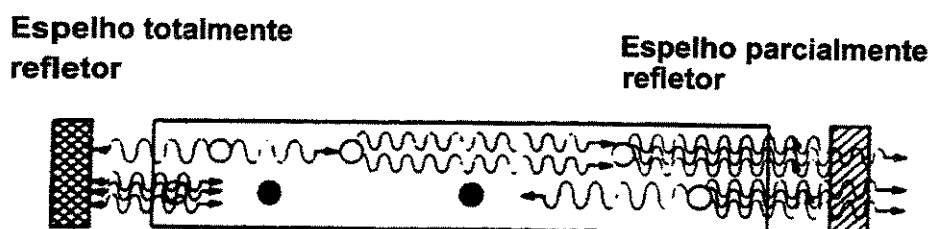


Figura 2.5 – Alimentação ótica dos fótons pelos espelhos para aumentar o percurso para a emissão estimulada e ampliar a potência do laser

2.2 - Distribuição da Intensidade de Energia

A distribuição espacial de energia em um feixe laser, gerada ao longo da cavidade ressonante, é denominada Modo Transversal Eletromagnético (TEM). A radiação que deixa a cavidade ressonante apresenta distribuição temporal e espacial de forma *Gaussiana*. 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. As formas básicas dos perfis de potência dos modos estão representadas na Figura 2.6. Alguns lasers produzem vários modos, sendo denominados lasers de operação multimodo.

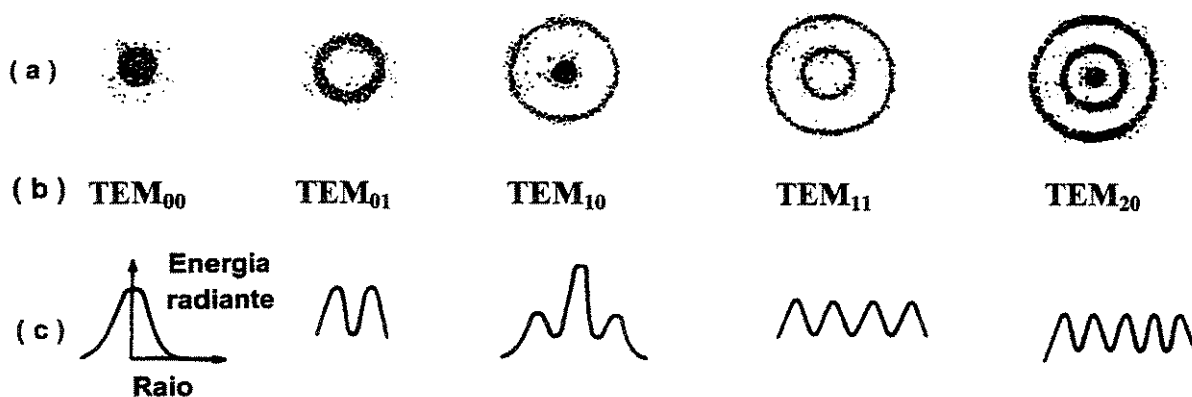


Figura 2.6 – Modos básicos de feixes (a) vista final da densidade de potência do feixe (b) Modo eletromagnético transversal (c) Perfil de densidade de potência.

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 fundamental, possui a maior quantidade de energia no seu centro e decai para a periferia, sendo este modo preferido em aplicações que a área do material atingida pelo feixe laser seja a menor possível. Quando as aplicações que exigem que 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.

Tendo em vista que a 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 [ROESSLER, 1986] operando neste modo, a partir da saída da cavidade ressonante. A equação 1 [MAILLET, 1987] descreve a variação de potência segundo o perfil gaussiano de acordo com a Figura 2.6 C.

$$I(r) = I_0 \times e^{-2r^2 / \omega^2(z)} \quad (1)$$

Onde:

I_0 é a intensidade sobre o eixo óptico e $\omega(z)$ é o raio do círculo para qual a intensidade diminui de um fator e^2 com relação a I_0 . Nota-se que para $r = \omega$ a intensidade relativa $I(r) / I_0 = 1 / e^2 = 0.135$ ou seja, 86.5 % da energia do feixe está contida em um diâmetro 2ω .

2.3 Principais lasers

Quanto ao meio ativo, os lasers podem ser classificados em:

- **Lasers de isolantes dopados**, em que a radiação proveniente de uma lâmpada flash ou de uma lâmpada de arco excita opticamente a emissão de átomos introduzidos sob forma de íons metálicos e de terras raras em uma matriz sólida isolante de cristal ou de vidro. Estes diferentes tipos de laser são construídos de forma semelhante, às vezes até mesmo idêntica exceto quanto à barra ou a alguns elementos ópticos utilizados.
- **Lasers de gás**, que constituem a maior parte da indústria laser e funcionam com base em uma excitação, geralmente de natureza elétrica mas ocasionalmente também de natureza química, de meios gasosos atômicos neutros, ionizados ou moleculares, apresentam dois modos de funcionamento: contínuo e pulsado e dois regimes gasosos: em fluxo ou em regime selado.
- **Lasers de corante**, Todos eles operam com o mesmo tipo de meio ativo: um corante orgânico diluído em um solvente líquido; porém retiram energia da radiação emitida por outras fontes ópticas (lâmpadas flash ou lasers). Suas características dependem essencialmente das características da fonte óptica de bombeamento.
- **Lasers de semicondutores**, em que a radiação é emitida no interior de uma junção p - n em um diodo semicondutor. O comprimento de onda depende da composição desse material, bem como à estrutura do dispositivo.

Serão descritos os lasers de CO₂ e Nd:YAG por serem os principais lasers utilizados na indústria automobilística

Lasers de CO₂

A molécula de dióxido de carbono é uma molécula linear. Os três átomos estão em linha reta, com o átomo de carbono no meio dos dois átomos de oxigênio e podem ocorrer três tipos de vibração com a molécula de dióxido de carbono, conforme representação esquemática na Figura 2.7.

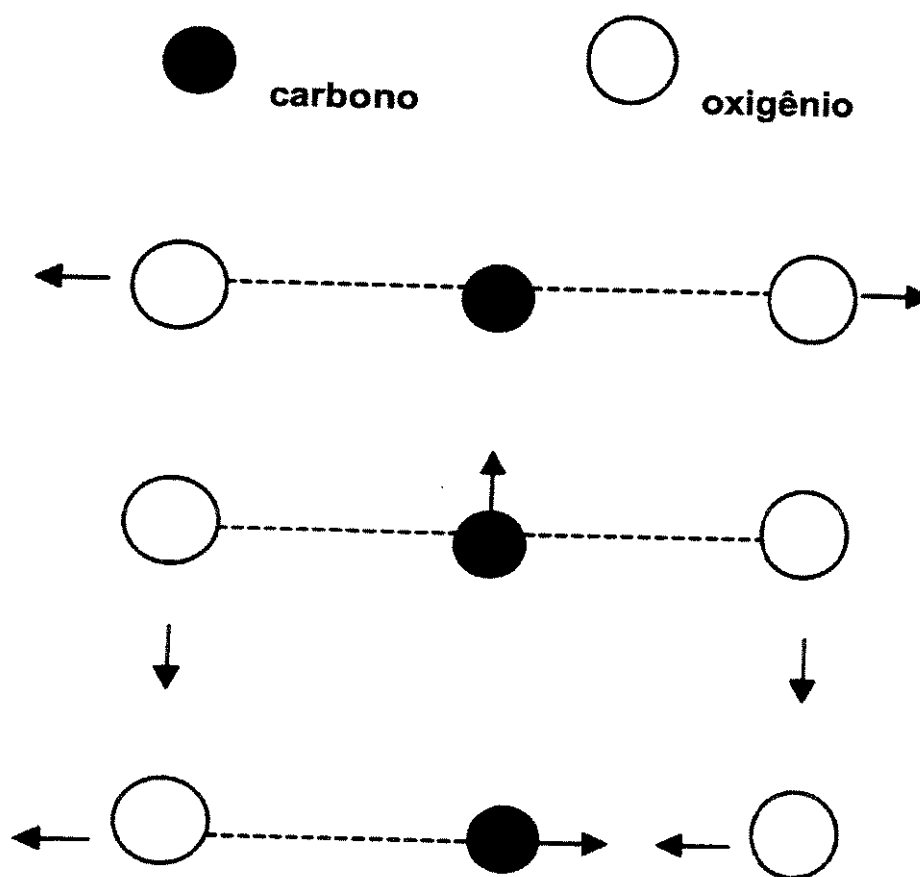


Figura 2.7 – Representação esquemática de possíveis modos de vibrações da molécula de CO₂

No primeiro tipo de vibração, o átomo de carbono permanece em repouso e os átomos de oxigênio oscilam em torno de sua posição de equilíbrio. O segundo modo de vibração é um movimento de dobra, onde os átomos se movem em um movimento perpendicular a linha de

simetria. O átomo de carbono se move em uma direção e os átomos de oxigênio se movem em direção oposta. O terceiro modo é um modo assimétrico no qual os átomos se movem ao longo da linha de simetria. Em um determinado instante, o átomo de carbono esta movendo-se em direção oposta aos átomos de carbono.

De acordo com as leis da mecânica quântica, existe uma energia quantizada associada aos modos de vibração. No estado fundamental, não existe movimento de vibração. Os estados de energia correspondem a um ou mais sub-níveis de energia vibracional. A excitação normalmente é por descarga elétrica

A energia de saída nos lasers de CO₂ puros é baixa e a eficiência é aumentada com adição de nitrogênio e hélio. As potências de saída dos lasers comercialmente viáveis variam de 0,5 a 25 kw.

Lasers de Nd:YAG

O laser de neodímio está entre os mais importantes, pois desempenha papel de destaque em numerosas aplicações industriais e científicas. O sistema atômico utiliza íons trivalentes de uma terra rara denominada neodímio (Nd^{3+}), presente em estado de dopante em um cristal de granada de alumínio (Ítrio Ytrium Aluminium Garnet): $\text{Y}_3\text{Al}_5\text{O}_{12}$ [MAILLET, 1987]. A emissão laser dominante situa-se no comprimento de onda $\lambda_o = 1.064 \mu\text{m}$ à temperatura ambiente. A Figura 2.8 [MAILLET, 1987] apresenta o diagrama dos níveis de energia do Nd:YAG.

O nível superior da transição é o nível $^4\text{F}_{1/2}$ situado em 11.500 cm^{-1} ; e o nível inferior, de população nula em temperatura ambiente, está em 2.111 cm^{-1} . A absorção responsável pela população do nível superior efetua-se em um grande número de bandas situadas entre 13.000 cm^{-1} e 25.000 cm^{-1} . Portanto o Nd : YAG corresponde á um laser de quatro níveis.

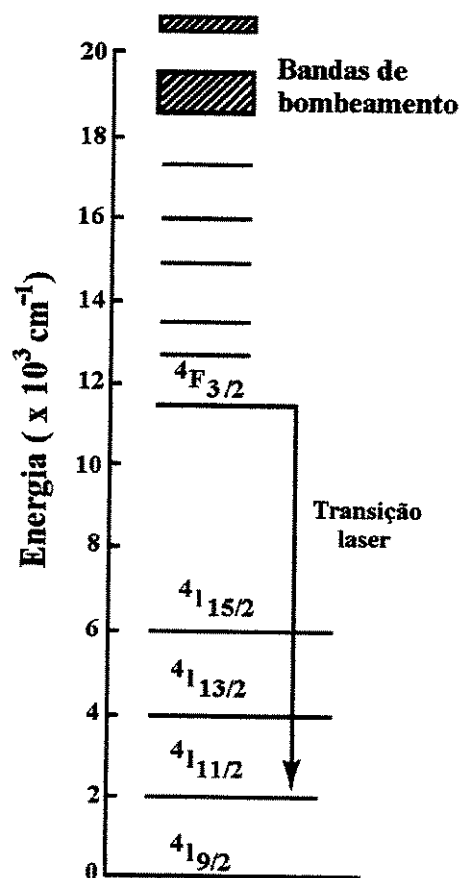


Figura 2.8 - Diagrama dos níveis de energia do íon Nd^{3+} no YAG; a transição laser ocorre entre os níveis $4F_{3/2}$ e $4I_{11/2}$

Capítulo 3

Soldagem

3.1 Soldagem

Denomina-se soldagem todo processo de união entre duas partes metálicas ou não, usando uma fonte de energia, com ou sem aplicação de calor. O processo de soldagem teve seu grande impulso durante a II Guerra Mundial, devido à fabricação de navios e aviões soldados, apesar de o arco elétrico ter sido desenvolvido no século XIX. A Figura.3.1[WAINER, E. 1992] mostra a evolução dos processos de soldagem ao longo do tempo.

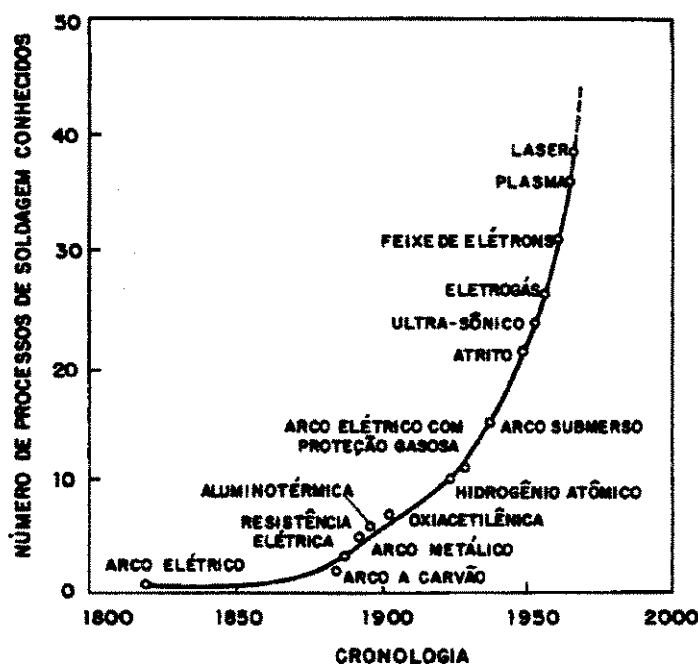


Figura 3.1- Evolução dos processos de soldagem ao longo do tempo

Os processos de soldagem são utilizados na fabricação de estruturas metálicas e produtos, os quais são impossibilitadas de serem confeccionadas como peça única. Pode-se citar como exemplos: navios, aviões, pontes, edifícios, locomotivas, automóveis, componentes eletrônicos e etc. Com o desenvolvimento de novas técnicas de união de duas partes, como colagem, fica impossível imaginarmos um mundo sem a tecnologia da soldagem ou da colagem. Todo o processo de soldagem tem que seguir os seguintes requisitos [WAINER, E.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

As fontes de energia empregadas nos processos de soldagem são: mecânica, química, elétrica e radiante .

- ⇒ *Fonte mecânica* - O calor é gerado por atrito ou por ondas de choque, ou por deformação plástica
- ⇒ *Fonte química* - O calor é gerado por reações exotérmicas como, por exemplo, a queima de combustível (chama) ou reação de oxidação do alumínio
- ⇒ *Fonte elétrica* - O calor é gerado ou pela passagem de corrente elétrica ou com a formação de um arco elétrico. No primeiro caso, o aquecimento é realizado por efeito Joule, enquanto no segundo é através do potencial de ionização, corrente e outros parâmetros de soldagem.

⇒ *Fonte radiante* - O calor é gerado por radiação eletromagnética (laser).

Os processos de soldagem devem assegurar condições de proteção específicas capazes de evitar que a solda seja contaminada pelo ar atmosférico. Assim, a soldagem pode ser feita sob vácuo, com gás inerte, gás ativo, fluxo (escória) e sem proteção. Evidentemente, os métodos de proteção não são gerais para todos os processos de soldagem. A Tabela. 3.1 [WAINER, E.1992]. mostra a classificação dos processos de soldagem baseada no tipo de fonte e de proteção. A letra N indica a impossibilidade de combinação de fonte de energia e tipo de proteção.

Tabela 3.1 - Classificação dos processos de soldagem, de acordo com a fonte de energia e o tipo de proteção

Fonte de energia		Tipo de proteção				
		Vácuo	Gás inerte	Gás	Fluxo (escória)	Sem proteção
Mecânica					N	Explosão Arrito Ultra-som
Química	Chama, plasma	N	Plasma (arco não transferido)	Oxidacetilênica		
	Reação exotérmica	N			Aluminotermia	
Elétrica	Resistência elétrica		N	N	N	Eletroescória Topo-a-topo Ponto Rasão Costura
	Arco elétrico	Eletrodo consumível	N	MIG	MAG Eletrodo tubular	Eletrodo revestido Arco submerso Soldagem de prisioneiros
		Eletrodo não consumível	N	TIG Plasma (arco transferido)		Eletrodo de carbono
Energia radiante	Eletromagnética		Laser		N	N
	Partículas		Feixe de elétrons	N	N	N

3.2 Solda a Laser

A soldagem com feixe de laser é um processo que produz a coalescência dos materiais com o calor obtido da aplicação de um feixe de laser, coerente e concentrado, incidindo sobre a amostra a ser soldada. O laser pode ser considerado, para aplicações de uniões metálicas, como uma única fonte de energia térmica, precisamente controlável em intensidade e posição. Para soldagem, o feixe de laser pode ser focalizado em um pequeno ponto para produzir uma alta densidade de potência. Esta intensidade de potência controlada funde o metal e, no caso de solda com penetração profunda, vaporiza parte deste metal. Quando ocorre a solidificação, resulta numa zona de fusão ou junta de solda. O feixe de laser, que consiste num fluxo de fótons, pode ser transmitido através do ar para apreciáveis distâncias sem perda séria de potência devido a atenuação ou degradação. Na Tabela 3.2 [STEEN,1993] são mostradas as densidades de potência de vários processos de soldagem.

Tabela 3. 2 – Densidades de diferentes processos de soldagem .

Processo	Intensidade da fonte de calor W/m^2	Perfil da região fundida
Soldagem a arco com proteção de fluxo	$5 \times 10^6 - 10^8$	 Baixo
Soldagem a arco com proteção de gás	$5 \times 10^6 - 10^8$	 Alto
Plasma	$5 \times 10^6 - 10^8$	 Baixo
		 Alto
Laser e Electron beam	$10^{10} - 10^{12}$	 Desfocalizado
		 Focalizado

A solda é um dos muitos processos de fabricação em que o laser encontrou um ativo meio de aplicação. Dentre todos os materiais soldáveis com laser, os mais utilizados são os metais. Há uma crescente utilização do laser para a união de polímeros, principalmente alguns termoplásticos, devido a boa absorção que os polímeros oferecem aos lasers que emitem no infravermelho.

Com o advento de sistemas lasers de CO₂ com operação contínua no final da década de sessenta que a capacidade do laser para soldas foi substancialmente aumentada mas mesmo assim a alta densidade de energia contida no feixe laser não era capaz de atingir grandes profundidades de penetração, pois para que ocorra grandes penetrações tem que ser levado em conta certos fatores, tais como: reflexão e geração de plasma na superfície a ser soldada. Além destas características, recentemente as soldas a laser vem se destacando nas indústrias automobilísticas por permitir a soldagem de chapas de diferentes espessuras e diferentes materiais antes do processo de estampagem que são submetidas a várias peças dos automóveis. Este processo é chamado de "Tailored Blanks".

3.2.1 As vantagens e Desvantagens de Soldas a Laser:

As vantagens de se soldar com o laser são:

- a) É um processo de não contato, o qual elimina distorções mecânicas da peças, particularmente em peças finas;
- b) Porque não é necessário contato com a peça, é possível realizar soldagens em áreas restritas, desde que seja permitido o acesso do feixe à junta;
- c) A ausência de contato faz o uso do laser ideal para alta velocidade e sistemas automáticos de soldagem.
- d) O insumo de energia é muito baixo. a distorção causada pelo laser é mínima. As soldas são estreitas e a zona afetada pelo calor pequena;
- e) O processo não requer vácuo;
- d) Não é necessário metal de adição para a maioria das juntas;

- e) A alta densidade de potência do feixe facilita soldas entre metais dissimilarmente compatíveis com grande variedade de propriedades físicas; metais com alta condutividade elétrica e partes diferindo grandemente em massa e tamanho;
- f) Porque o feixe tem focalização bem definida, pode-se obter pontos de solda com poucos centésimos de polegada;
- g) O processo utiliza juntas de geometria simples;
- h) O feixe produz calor e fusão localizados;
- i) As inclusões não metálicas nos aços irão absorver presencionalmente o laser, o que permitirá a obtenção de metais de solda mais limpos devido a vaporização de parte das inclusões;
- j) O feixe de laser não gera raios X como acontece na soldagem com feixe de elétrons.
- l) O feixe de laser pode ser prontamente alinhado, focalizado e redirecionado por meio de elementos óticos;
- m) Pode-se soldar materiais magnéticos, como engrenagens.

O feixe de laser estreito que se afunila em um foco oferece flexibilização de designs, pois permite a solda de configurações de juntas que são inacessíveis para outras técnicas de soldagem, tais como juntas de fronteiras entre engrenagens. A facilidade de acesso oferecida pelo feixe de laser também nos permite obter componentes que são soldados apenas de um lado, e até mesmo a solda entre diferentes espessuras de aços.

Quanto aos materiais, o laser pode soldar quase todos os tipos, assim como as outras técnicas de soldagem, entretanto, alumínio, cobre e suas ligas apresentam dificuldades na solda a laser, devido ao fato de que estes materiais são altamente refletores, não conseguindo assim, absorver a luz do laser.

3.2.2 Os Inconvenientes da Utilização da Solda a Laser

Como todas as soldas convencionais, as soldas a laser também tem suas desvantagens. O tamanho do feixe de laser quando focalizado, que é apenas uma fração de milímetro em diâmetro, requer juntas bem próximas evitando perda de uma grande quantidade de energia do feixe de laser através dos “vãos” existentes nas mesmas, prejudicando assim a profundidade de penetração da solda. Além das juntas estarem bem próximas, deve haver um alinhamento entre o feixe de laser e a linha de junta, para que o feixe não se desvie de sua linha de ação.

Boas qualidades de dimensões das peças de trabalho e boa manipulação dos equipamentos, tanto em relação ao feixe do laser quanto à própria peça, são necessários para a solda a laser, não apenas para se obter um bom alinhamento entre junta e feixe, mas também, para controlar a posição focal do feixe e a velocidade de solda, obtendo assim a energia desejada. Além destes fatores há também o fator financeiro, isto é, o custo despendido para se realizar soldas a laser geralmente é alto. Requer investimentos na área de segurança, tais como telas de proteção ao redor do envelope de operação do canhão de laser para total segurança do operador, gastos com serviços de eletricidade e de água resfriada para a boa operação de lasers, principalmente os de CO₂ e YAG de alta potência. Por fim, o elevado custo do equipamento e manutenção, o qual devem ter uma elevada utilização para que o processo se torne viável.

3.2.3 A Eficiência de Soldas a Laser

Quando se utiliza soldas a laser, está se convertendo potência elétrica em potência óptica, e esta conversão possui baixa eficiência cerca de 15%. Por outro lado, quando é analisada a eficiência global da solda, levando-se em conta apenas a efetividade que esta energia óptica é utilizada na formação da zona de fusão, obtêm-se valores extremamente significativos.

A eficiência é definida pela equação 2 em termos da eficiência de fusão[BANAS, C.1978]

$$\eta_m = \frac{m * c_p * T_m}{P} \quad (2)$$

onde:

- m → massa total do material fundido;
- c_p → calor específico do material;
- T_m → temperatura de fusão do material;
- P → potência nominal do laser;

Medidas de absorção utilizando calorímetros diretos em penetrações profundas de soldagem mostram que o valor de η_m excede os 90%. Em materiais com baixa difusividade térmica, a eficiência de fusão excede os 70%, o que significa que mais de 70% da energia absorvida participa do processo de fusão e que menos de 30% é perdido através da zona de fusão. Para materiais com maior difusividade térmica, pode-se aumentar a velocidade de soldagem, resultando em um aumento da eficiência de fusão. Devido a alta eficiência de fusão obtida, a energia específica de entrada para soldas a laser é geralmente uma ordem de magnitude menor do que a necessária para os processos de solda convencionais por fusão e portanto a energia elétrica requerida para formar uma unidade de comprimento de cordão de solda é comparável àquela requerida em processos à arco, apesar do preço que se paga na conversão da energia elétrica em energia óptica

3.2.4 Soldagem Contínua em Baixa Potência

Laser com níveis de potência média menores que 1 a 1,5 KW, a energia do laser é absorvida na superfície da peça, e a penetração da energia do laser na soldagem é por condução

térmica. Este fato limita a profundidade de penetração, tanto que as profundidades das soldas são relativamente pequenas (espessura máxima de aprox. 0,08 in). A maioria das penetrações são da ordem de menos que 0,04 in. A profundidade da penetração pode ser aumentada baixando-se a velocidade de soldagem, o que irá resultar numa grande zona termicamente afetada (ZTA) [ASM, 1983].

À potência média de 100 W, um laser pulsado repetidamente é uma ferramenta de soldagem para alguns metais. Um laser contínuo deve emitir várias centenas de W para ter uma capacidade de trabalho comparável a um laser pulsado com 100W de potência média. O alto pico de potência contido em um pulso de laser pode romper a refletividade da superfície, permitindo a absorção mais eficiente da energia do laser. À potência de centenas de W, lasers contínuos de Nd:YAG e CO₂ oferecem: boa capacidade de soldagem, boa velocidade de soldagem e acabamento superficial do cordão de solda satisfatórios [READY, J.F., 1978].

A densidade de potência é limitada a uma faixa de operação adequada, onde a energia colocada sobre a superfície da peça faz com que ocorra uma vaporização local, estabelecendo assim uma cavidade no material. Com o apropriado movimento entre o feixe e a peça, a cavidade se torna dinamicamente estável e se move através do material, seguida pela precedente fusão e pela posterior solidificação. A presença desta cavidade faz com que se possa obter a profundidade a partir da energia fornecida pelo laser.

A relação entre profundidade de penetração e velocidade de soldagem para a velocidade de soldagem para soldagem de cordão contínuo com laser CO₂, onda contínua e 375 W é mostrado na Figura 3 para dois aços diferentes. Muitas aplicações potenciais em soldagem podem ser satisfeitas pela combinação de profundidade de penetração e velocidade. Devido às restrições impostas pela condução térmica, altas velocidades de soldagem são possíveis apenas em materiais finos. Mesmo a baixas taxas, a penetração é limitada a aprox. 0,04 in para aço inox e aprox. 0,06 in para aço carbono

Velocidades de soldagens baixas combinadas com altas densidades de potência, por exemplo, podem resultar em grandes poças de fusão. A taxa de solidificação desta poça, no

entanto, depende apenas do material utilizado, não tendo assim, nenhuma ligação com a energia depositada na superfície de trabalho.

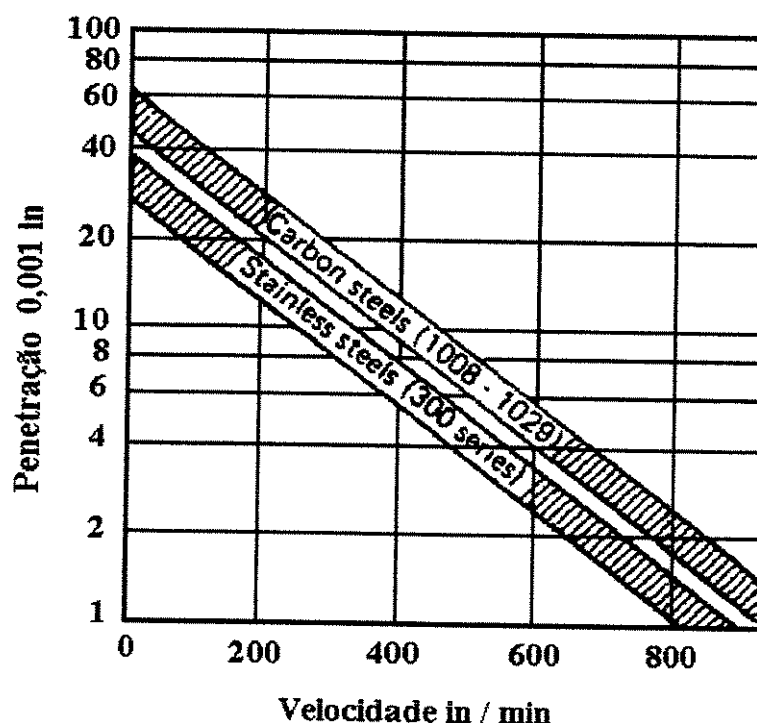


Figura 3.2 - Profundidade de penetração versus velocidade de soldagem

Eventualmente, a pressão do vapor de metal não é suficiente para conter as forças do fluido dinâmico do metal líquido e a cavidade de penetração colapsa. Sob estas condições, um decréscimo abrupto na penetração ocorre e uma zona de fusão hemisférica grosseira característica surge na superfície onde a energia é depositada. As condições imediatamente anteriores a este colapso na cavidade servem para definir a máxima profundidade de penetração que pode ser aproximadamente descrita como [BANAS, C., 1978]:

$$\text{prof.}_{\text{Max}} = \text{pot.}^{0.7} \quad (4)$$

onde:

$\text{prof.}_{\text{Max}}$ = profundidade máxima em mm

pot. = potência nominal do laser em KW

A presença de impurezas na zona de fusão [DAWVES, C, 1992], não é benéfica para a qualidade da solda, uma vez que afeta as propriedades mecânicas do material. Quando o feixe atinge uma superfície limpa de metal fundido ocorre principalmente reflexão dos raios e quando encontra alguma impureza ocorre principalmente absorção destes. Não se sabe ao certo como isso age no material, mas experimentalmente, com a redução de impurezas, obtém-se boas características de resistência à tração, aumento da resistência mecânica da zona de solda e retenção do endurecimento do material.

3.3 A Formação de Plasma

A formação do plasma ocorre em soldas a laser de Nd:YAG, em modo de onda contínua com velocidades menores que 0,7m/min. Quando há interação por longos períodos entre o feixe de laser e o material é levando ao aumento de vapor do material ou ejeção de plasma da cavidade da solda. Este reage com o gás de proteção e, se não for removido rapidamente, forma uma “nuvem” de plasma extremamente densa acima da cavidade da solda conforme esquematizada na Figura 3.3 [STEEN,1993]. A “nuvem” que aparece como uma pequena e brilhante bola azul, de alguns milímetros de diâmetro, não é completamente transparente ao comprimento de onda do laser. Esta “nuvem” reflete parte do feixe de laser em todas as direções. Isto resulta numa difusão geral de potência antes do feixe atingir a superfície do material, resultando num estreitamento da zona de fusão nas proximidades da superfície e conseqüente redução na profundidade de penetração da solda. Uma solução simples, seria utilizar potência e velocidade de soldagem maiores, mas isto, é claro, nem sempre é possível devido às limitações da máquina que se está utilizando.

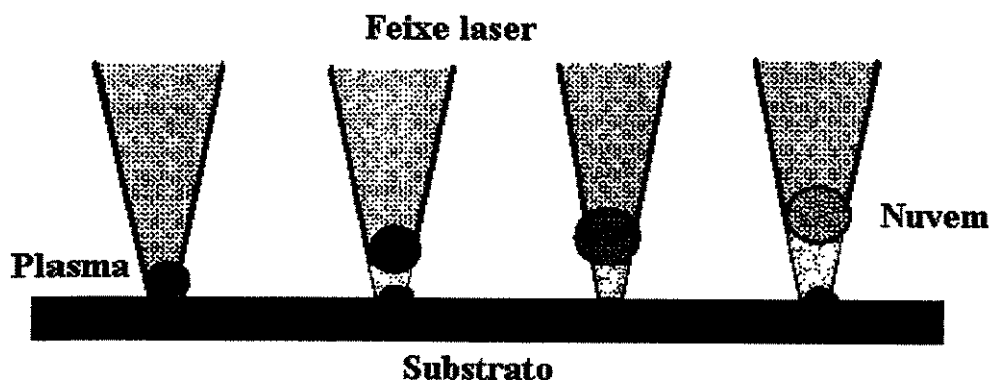


Figura 3.3 - Ilustração do bloqueio gerado pelo plasma

Uma alternativa para se evitar este problema é a introdução de um jato de contenção de plasma. Este jato consiste em um bocal inclinado a 45° capaz de soprar um gás de proteção de forma contínua para simultaneamente remover a nuvem de plasma e manter a área livre de qualquer outro gás que possa reagir e iniciar a formação de plasma. A distância entre o bocal e a cavidade da solda e a taxa do fluxo de gás são importantes e precisam ser otimizadas de acordo à altura do foco. Na Figura 3.4 [DAWES, 1992] é esquematizado o bico injetor de gás.

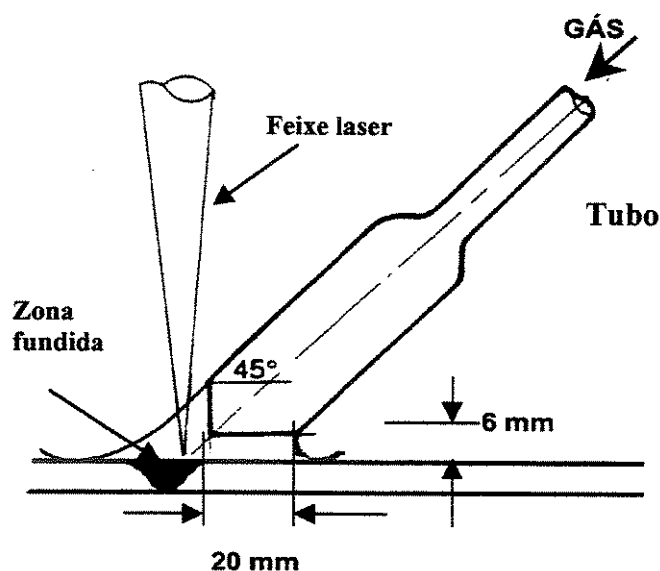


Figura 3.4 - Bico injetor de gás

No caso de velocidades muito baixas uma proteção com gás composto é utilizada, formada de um campo principal e de um jato especial de supressão de plasma. Quando a velocidade de soldagem é acima de 0,7m/min. O controle eficiente do plasma é alcançado utilizando-se uma proteção simples e selecionando o tipo correto de gás. Dentre os gases disponíveis, temos:

Hélio (He)

É o melhor gás de proteção para soldas a laser de CO₂ e Nd:YAG devido ao seu elevado potencial de ionização, o que basicamente significa que ele pode absorver mais energia. Além disso, para uma dada condição de soldagem, penetrações profundas de solda podem ser atingidos. Por ser mais leve que o ar, o hélio não acumula na zona de soldagem por muito tempo e se degrada. É indicado para soldagem de materiais, tais como: o aço inoxidável e materiais como titânio e zinco onde a qualidade da solda será severamente degradada pela oxidação.

Nitrogênio (N₂)

Possui performance tão boa quanto a do hélio em termos de prevenção de uma inaceitável formação de plasma, mas do ponto de vista da qualidade de solda, pode causar fragilização em certos aços e deve ser tratado com precaução se considerado na realização de soldas cujos altos índices de qualidade e confiabilidade são requeridos. Em profundidade de penetração de solda maior do que 4 mm, o gás hélio se mostra mais eficiente no uso da potência disponível do laser do que o nitrogênio. Vale salientar, também, que penetrações mais profundas são geralmente utilizadas em aplicações mais críticas e a fragilização na solda pode ser visto como um problema potencial.

Dióxido de Carbono (CO₂)

Não é recomendável para soldas a laser quando operando no modo de onda contínua. Isto porque o CO₂ reage muito rapidamente com o feixe de laser degradando-o e formando uma indesejável “nuvem” de plasma. A “nuvem” é extremamente brilhante e pode radiar a luz do laser

de volta e danificar a focagem óptica. Acompanhada a isto, pode ocorrer uma rápida perda de penetração em um comprimento de cordão de solda muito pequeno. A utilização deste gás, como gás de proteção, é possível em soldas a laser, quando estes operam no modo pulsado. A operação pulsátil a pequenos intervalos de tempo impede a formação de plasma, o que permite a obtenção de uma solda aceitável.

Argônio (Ar)

É extremamente bom como gás de proteção para a prevenção de oxidação. Não reage e forma uma “nuvem” de plasma tão rapidamente como o CO₂, mas não é tão bom como o hélio e o nitrogênio. Quando utilizado com o laser operando em modo de onda contínua e sobre certas circunstâncias, sendo o argônio mais pesado que o ar, ele não escapa facilmente da zona de solda, permanece estagnado e subitamente, dentro de uma distância de aproximadamente 100mm do ponto de partida da solda, forma uma camada muito densa de plasma o que acarreta numa perda repentina da profundidade de penetração da solda. O argônio é geralmente recomendado quando pode ser retirado rapidamente da zona de solda por gravidade ou por extração. É bastante útil em situações em que a formação de plasma não é problema, como por exemplo, nos estágios finais de solidificação e resfriamento.

3.5 Porosidade

A presença excessiva de gás no metal de trabalho faz com que, durante a solda, este gás se infiltre na poça de fusão durante a solidificação, dando origem assim a pequenas bolhas que fragilizam o material soldado. Uma fonte potencial desta quantidade excessiva de gás são as superfícies de contaminação, tais como: graxas, óleos, óxidos e resíduos de fluidos de corte na superfície da placa a ser soldada. Contudo, a superfície de contaminação pode ser controlada através de preparação especial e limpeza, não consistindo, assim, na principal fonte do problema. Estes seriam os gases dissolvidos na base do material, como por exemplo: oxigênio e nitrogênio. Uma alternativa para minimizá-los seria a utilização de aços com baixas quantidades de gases, isto é, aços inteiramente acalmados - *fully killed steels* - preferencialmente com alumínio. Pode-

se, também, utilizar filetes de metais de deposição para controlar a porosidade, pois podem prover elementos desoxidantes, como o silício e o alumínio, além, é claro, de uma proteção efetiva de gás inerte, juntamente com uma cuidadosa escolha do sistema de controle de plasma.

Vale ressaltar que em soldas a laser, a porosidade é um problema muito mais persistente do que em soldas por feixes de elétrons ou soldas à arco.

3.6 Posicionamento

Há três fatores importantes a serem analisados nas soldas a laser: o alinhamento entre o feixe de laser e a junta, a união e o desnível entre as fronteiras das chapas [DAWVES, C, 1992]. É difícil generalizar a tolerância do alinhamento entre a junta e o feixe de laser, uma vez que para uma dada potência, a largura da solda irá decrescer com o aumento da velocidade e vice-versa, podendo ocasionar assim a saída do feixe de sua linha de ação. Além disso, os materiais a serem soldados terão uma maior influência sobre a largura da solda a ser formada. Por exemplo, para uma dada espessura, potência de laser e velocidade de soldagem, soldas em aços inoxidáveis são geralmente mais estreitas do que os aços “doces”, e soldas em titânio são notoriamente mais largas e paralelas do que as anteriores.

A tolerância para o espaço (GAP) existente entre as faces a serem unidas depende primeiramente do tamanho do bico do feixe de laser focado e posteriormente da qualidade de solda *undercut* que pode ser aceita no serviço. Em placas delgadas, como as utilizadas na carroceria de automóveis, cuja espessura varia de 0,7 a 1 mm, os espaços não devem ser maiores do que a metade do tamanho do diâmetro do bico. Assim, para diâmetros iguais a 0,2 mm, o espaço entre as fronteiras não deve ser maior que 0,1 mm. Uma alternativa para relaxar esta tolerância seria reduzir a velocidade de soldagem ou aumentar a potência nominal do laser e utilizar um bico de diâmetro maior. Todavia, ações desta natureza podem resultar em perda das vantagens que as soldas a laser apresentam em relação aos outros tipos de solda. O espaço tolerado entre as faces não cresce proporcionalmente com a espessura da chapa do material, assim, 0,1 mm de tolerância para 1mm de espessura, não significa 0,2mm para 2mm de espessura. No caso, para 2mm de espessura a tolerância seria de 0,12mm.

O alinhamento entre as faces superiores das chapas é essencial para que não ocorra um desnível entre as mesmas (Surface displacement), evitando assim, problemas na profundidade de solda, empenamento das chapas e a própria fragilidade da solda.

Capítulo 4

O Laser na Indústria Automobilística

4.1 Tailored Blanks

A indústria automobilística vem passando por grandes mudanças nos últimos anos. Estas mudanças são causadas pela nova política ambiental que restringe a emissão de poluentes para a atmosfera. Este fato influenciou a indústria automobilística a desenvolver e aplicar novas tecnologias, melhorando o rendimento dos motores e a aerodinâmica dos automóveis, conseqüentemente teve uma economia de combustível de mais de 25%. No entanto, busca-se reduzir ainda mais o consumo através da redução do peso dos veículos. Esta redução tem sido obtida através da utilização de aços de alta resistência mecânica, emprego de metais não-ferrosos, plásticos e da melhoria da tecnologia de fabricação de automóveis[ANJOS, M. A., 1998]. A solda a laser em chapas finas de aço está sendo crescentemente usada na indústria automobilística, como o laser proporciona uma solda de alta qualidade, peças podem ser produzidas com boa propriedade de deformação e resistência de corrosão [BAYSORE, J. K., 1992].

Em 1994 foi criado o consórcio ULSAB (*Ultra Light Steel Auto Body*), formado por 35 das maiores siderúrgicas mundiais, representando 18 países, que estão listadas na Tabela 4.1[ANJOS, M. A., 1998], para fazer frente à tendência da indústria automobilística de se produzir carrocerias dos automóveis mais leves, a partir da utilização de ligas de alumínio.

O consórcio encomendou à Porsche Engineering mc. o desenvolvimento de uma carroceria de automóvel que fosse mais leve que as atuais, porém sem prejuízo da resistência

mecânica, rigidez, resistência ao impacto e custo final. O projeto baseou-se na utilização maciça de aços de alta resistência e de técnicas modernas de fabricação, como a utilização de *tailored blanks* (TBs). O projeto ULSAB foi concluído em 1998 e, em relação aos valores-alvo inicialmente propostos (baseados em valores médios para carros sedan), foram obtidos os seguintes resultados:

- ⇒ redução de peso de 25%
- ⇒ aumento da rigidez à torção de 60%
- ⇒ aumento da rigidez ao dobramento de 48%

Tabela 4.1 - Empresas componentes do consórcio ULSAB.

Aceralia	Krakatau	SSAB
AK Steel	Krupp Hoesch	STELCO
Bethlehem Steel	LTV Steel	Sumitomo
BHP Steel	National Steel	Tata
British Steel	Nippon Steel	Thyssen
Cockerill Sambre	NKK	US Steel Group
CSN	POSCO	USIMINAS
Dofasco	Preussag	VSZ
Hoogovens	Rouge Steel	Voest-Alpine
Inland	SIDERAR	WCI
Kawasaki Steel	SIDMAR	Weirton
Kobe	SOLLAC	

Alguns dos conceitos desenvolvidos no projeto ULSAB estão sendo incorporados nos novos modelos de automóveis e os aços de alta resistência estão presentes nos últimos grandes lançamentos da indústria automobilística mundial: BMW- Série, Citroën Xsara, Vauxhall Astra, Jaguar XJ8, Land Rover Freelander, LEXUS 05300 Mercedes Classe-A, Volkswagen Golf (23 TBs) e Volvo C70.

Há uma estimativa que até o ano de 2010 os TBs estarão presentes em todos os veículos automotivos, como pode-se observar na Figura 4.1 [PONCHAB. H.,1997]

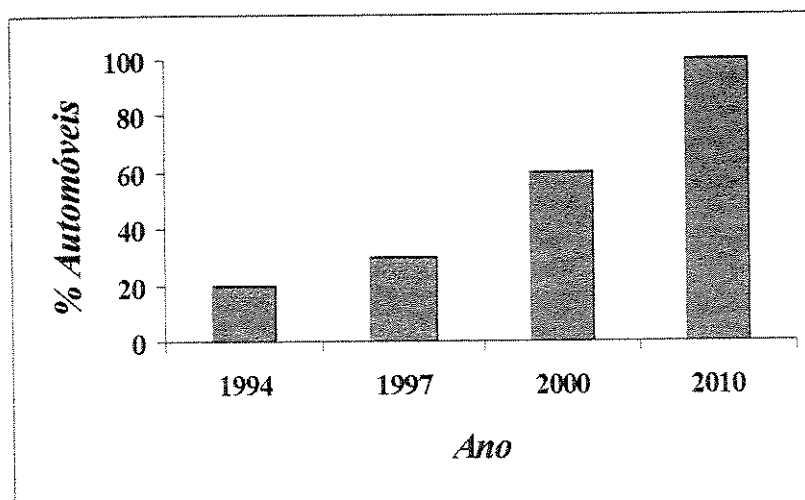


Figura 4.1 - Porcentagem de automóveis que utilizam Tailored Blanks

Os *tailored blanks* consistem de chapas de aço de diferentes ou iguais espessuras, resistências mecânicas e/ou tipos de revestimento, unidas por soldagem e formando um *blank* para estampagem, podendo ser observada na Figura 4.2 (HOME PAGE PEUGUEOT) e detalhado na Figura 4.3. [BARON,J.S, 1997]. O uso da solda a laser tem permitido "redesenhar" componentes, geralmente introduzindo materiais mais baratos, e levando a uma redução do número de operações de manufatura [RODRIGUES, A., 1997]. O que permite obter, em uma única operação de estampagem, uma peça que exhibe áreas com propriedades distintas. Algumas das vantagens desta tecnologia são a redução de material descartado (rebarbas), redução do número de matrizes e ferramentas de estampagem e melhoria da precisão dimensional e das propriedades mecânicas da carroceria.

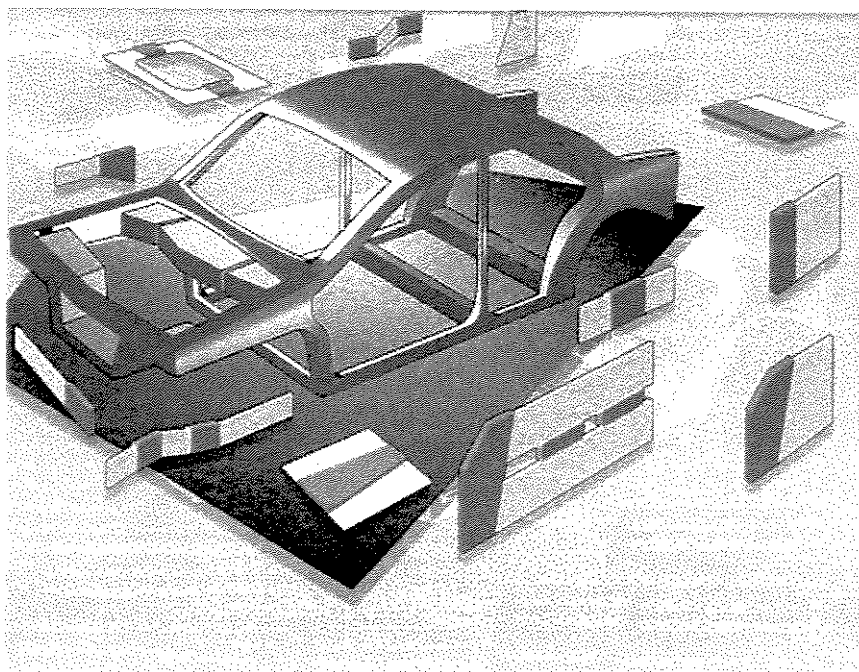


Figura 4.2 - Tailored Blanks na indústria automobilística

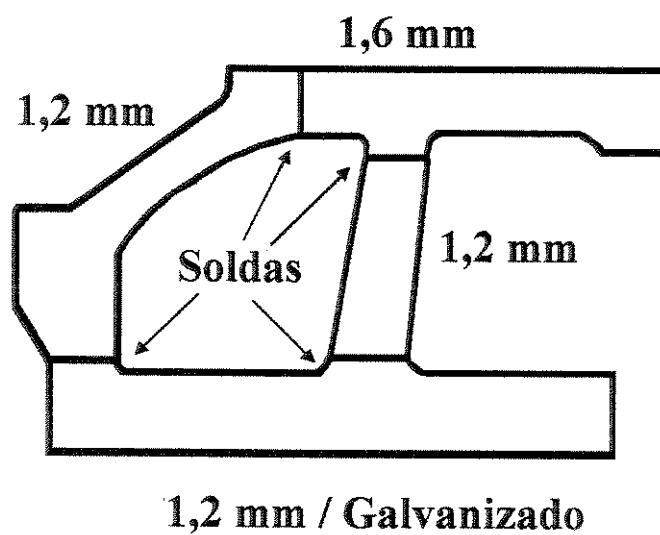


Figura 4.3 - Detalhe da utilização de tailored Blanks na lateral de um automóvel

Para que seja possível o processo de estampagem após a soldagem se faz necessário que a solda apresente certas características, tais como: largura bem pequena e espessura bem próximas ao material base na região da solda ou intermediária no caso de espessuras diferentes, estampabilidade quase igual ou maior que as do materiais base, resistência mecânica da solda igual ou maior que a do material base e alta produtividade.

Apesar do custo relativamente elevado de soldagem a laser, está ocorrendo uma rápida expansão devido à versatilidade e eficiência. Na Europa os “Tailored Blanks” vêm sendo utilizados há vários anos por inúmeros fabricantes automobilísticos, como: GM - Opel, Audi, Renault, Fiat, Volkswagen e outros. A GM - Opel, por exemplo, utiliza os “Tailored Blanks” na produção de algumas peças da carroceria do Lumina. Já a Audi, utiliza para a fabricação da assoalho unindo aços não galvanizados e galvanizados de 0,75mm de espessura.

No Brasil, a tecnologia laser é relativamente recente e a produção de TBs encontra-se em início de implantação. Fato este constatado em entrevista realizada em 1997 com Sidney Hilzendeger membro da Trumpf no Brasil, onde afirmou que as indústrias automobilísticas brasileiras não solicitavam máquinas a laser em suas linhas de produção. Segundo ele, as máquinas a laser estavam normalmente destinadas ao corte, a furação, a marcação e tratamento térmico superficial. Atualmente algumas indústrias já utilizam o laser para a produção de tailored blanks. Em 1994, haviam 40 lasers de alta potência em operação, porém com pequena utilização na indústria automobilística (Corte na Volkswagen e na AETHRA - fornecedora de peças para a FIAT). A CSN, em associação com a Thyssen, possui um centro de serviços, onde produz TBs.

Capítulo 5

Análise Experimental

Neste trabalho o objetivo foi estudar a solda a laser em chapas finas de aço baixo carbono para aplicações automotivas, encontrando-se os parâmetros adequados e analisar os resultados obtidos. Assim dividiu-se este trabalho em duas etapas, sendo:

⇒ **Primeira etapa** - Determinar os parâmetros operacionais adequados para a realização das soldas.

⇒ **Segunda etapa** - Determinar quais seriam os ensaios para analisar os resultados obtidos aplicados aos corpos de prova e método de análise dos resultados.

5.1 Materiais

Foram utilizadas chapas finas de aço baixo carbono galvanizadas laminadas a frio e com espessura de 1 mm para a realização das soldas. Estas chapas de aço são bastante utilizada na indústria automobilística para produzir tailored blanks. A composição química das chapas foi obtida por análise quantitativa e está descrita na Tabela 5.1. De acordo com a norma NBR5915/1984, pode-se classificar as chapas de aço baixo carbono como EEP (estampagem extra profunda, resistente ao envelhecimento). Na tabela 5.2 são descritos os requisitos de composição química para a análise de panela.

Tabela 5.1 - Composição química do aço baixo carbono

%C	%S	%Mn	%Si	%P
0,08	0.010	0,21	0.13	0.019

Tabela 5.2 - Requisitos de composição química em porcentagem

Grau	Carbono Máximo	Manganês Máximo	Fósforo Máximo	Enxofre Máximo	Alumínio metálico mínimo
EM	0,12	0,50	0,040	0,040	-
EP	0,10	0,45	0,030	0,030	-
EEP	0,08	0,45	0,30	0,030	0,020

A soldagem sem material de adição em chapas finas de aço efetua-se tanto com lasers de emissão contínua assim como com lasers pulsados. Para a realização das soldas foi utilizado um laser de Nd:YAG pulsado, que tem como potência média até 300-W e potência de pico até 4000-W pertencente ao CTEM-SP (Centro Tecnológico da Marinha em São Paulo). Na Figura 5.1 (Fonte Home Page Peugeot) pode-se visualizar um Laser de Nd:YAG utilizado na confecção de tailored blanks para a indústria automobilística. A frequência de pulsação do laser utilizada foi de 20 Hz, com uma sobreposição do feixe laser de 80 %, conforme o enfoque da Figura 5.2. Este procedimento foi adotado para garantir a continuidade do cordão de solda.

As chapas finas de aço baixo carbono utilizadas para a realização das soldas, foram preparados com 40 mm de largura e 150 mm de comprimento. As chapas de aço tiveram uma preparação especial quanto o paralelismo das mesmas, isto é, as amostras foram usinadas em uma das laterais para que quando fossem soldadas tivessem um GAP (espaço físico) pequeno e que não influenciasse no resultado final. Quando o GAP entre as chapas for grande haverá falta de material na junção. Um esquema representativo do GAP entre as chapas pode ser visto na Figura 5.3

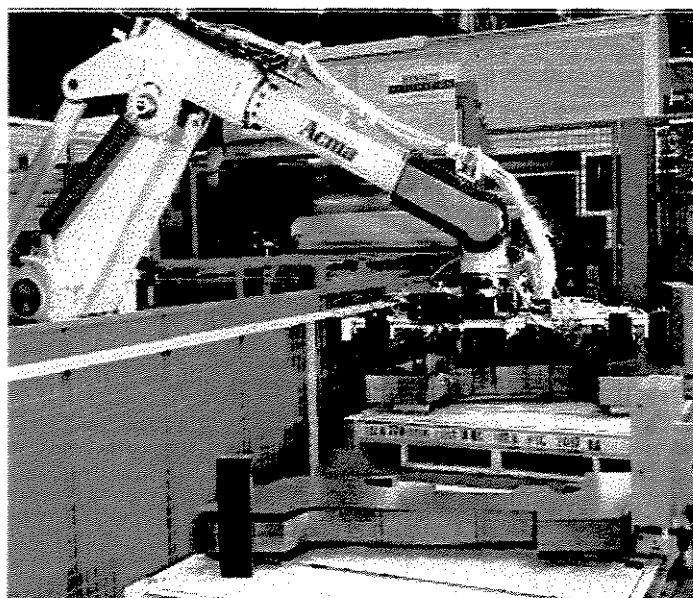


Figura 5.1 – Foto do laser de Nd:YAG utilizado na indústria automobilística

Figura 5.1 – Foto do laser de Nd:YAG utilizado na indústria automobilística

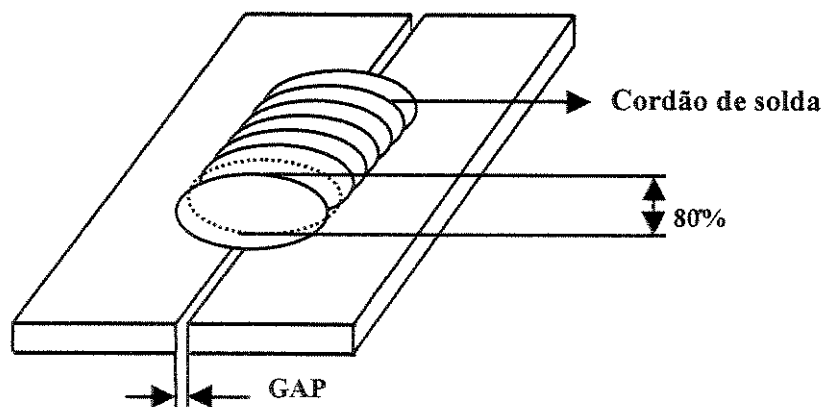


Figura 5.2 – Ilustração da sobreposição do feixe laser nas chapas de aço

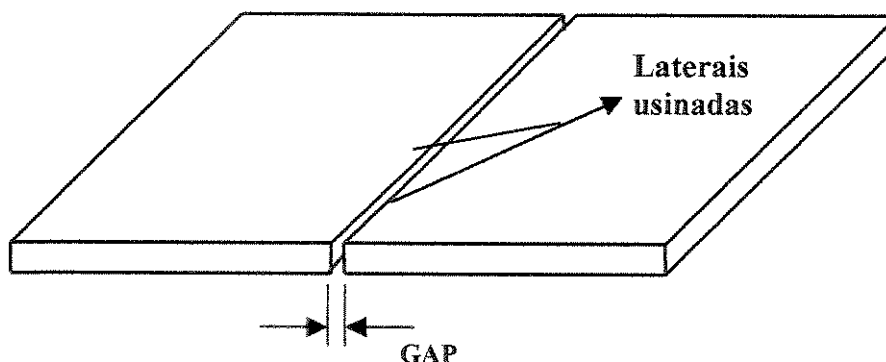


Figura 5.3 – Ilustração das chapas de aço preparadas para a soldagem

Para a eliminação do plasma que se forma durante a soldagem, foi utilizado o gás argônio introduzido por meio de um bico injetor observado na Figura 3.6 do capítulo 3. A vazão do gás argônio utilizado foi de 20 l/min. Para a fixação das chapas de aço, foi desenvolvido um suporte, cuja finalidade foi garantir que os corpos de prova ficassem em perfeitas condições de soldagem. O material utilizado na confecção do suporte foi o aço carbono 1020. Na Figura 5.4, é ilustrado o suporte para fixação das chapas de aço.

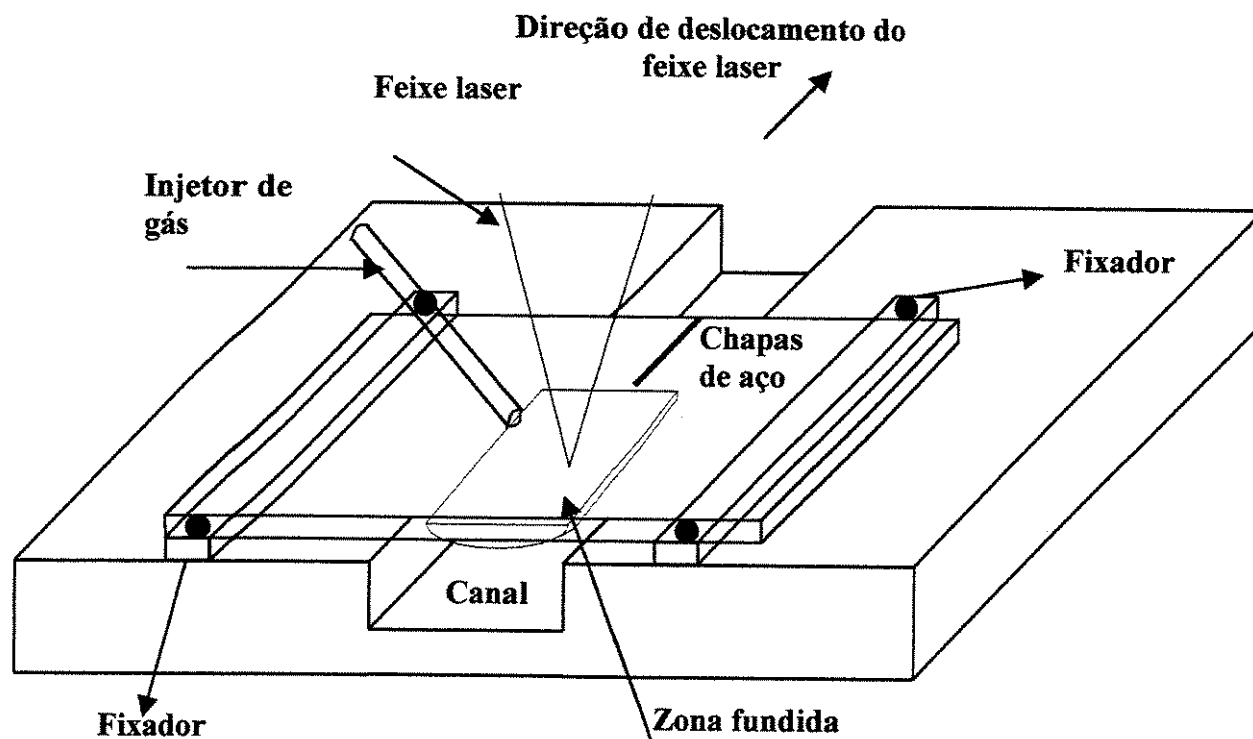


Figura 5.4 – Ilustração do suporte de fixação desenvolvido para o trabalho

5.3 Parâmetros de Processo

Foi feito um ensaio de solda com um conjunto de parâmetros de acordo com informações encontradas na literatura. A partir deste ensaio foi-se alterando parâmetros como: velocidade de deslocamento do feixe laser, potência e etc., para chegar a um resultado satisfatório. O resultado satisfatório esperado tinha como características, um cordão de solda com acabamento superficial sem muita irregularidade e penetração total da região fundida analisados visualmente. Os conjuntos de parâmetros utilizados para a realização dos ensaios de solda estão apresentados na

Tabela 5.3. A distância focal da lente utilizada no laser foi de 150 mm, sendo que no ponto de focalização, o diâmetro do feixe laser foi de aproximadamente 0,6 mm.

Tabela 5.3 - Parâmetros utilizados na soldagem de chapas finas de aço baixo carbono

Parâmetros de processo					
	Intensidade (J)	Duração do pulso (ms)	Focalização (mm)	Velocidade (mm/s)	Frequência (Hz)
1	10	4,0	+1	4,8	20
2	12	3,5	-1	4,8	20
3	10	4,0	-1	4,8	20
4	12	4,0	+1	4,8	10
5	8	3,0	0	4,8	15
6	8	4,5	0	4,0	10
7	9	4,0	0	4,8	20
8	10	4,0	0	4,8	20
9	14	3,5	0	4,8	20
10	14	5,0	0	4,8	20

5.4 Qualidade da Soldagem

Para determinar a qualidade das soldas realizadas nas chapas finas de aço, realizaram-se ensaios metalográficos em três soldas, segundo a norma EN ISO 13919-1 [PEÇAS P. 1998]. Pretendeu-se com esta análise confirmar ou não, os resultados da observação visual das soldaduras-

O objetivo de utilização da norma EN referida, é identificar numa análise breve a presença de defeitos, geométricos ou metalúrgicos, que inibam um bom desempenho das soldaduras. A soldadura laser tem características únicas ao nível do cordão de soldadura, surgindo com muito mais frequência certos tipos de defeitos, do que em relação a outros processos de soldadura.

A norma baseia-se em duas análises:

Identifica a presença de poros e/ou defeitos lineares internos em análise metalográfica, com ampliação macro, por forma a se identificarem defeitos geométricos no cordão. Através da quantificação do número e dimensão destes defeitos, a norma permite qualificar a soldadura em quatro níveis:

nível B: qualidade máxima

nível C: qualidade média

nível D: qualidade medíocre

nível E: inaceitável

Na Tabela 5.3 estão indicados os defeitos identificados pela norma e em esquema o modo de medição. Os valores de aceitação não são absolutos, mas sim relativos à espessura. Indicam-se os valores máximos admitidos para soldaduras com qualidade B, visto ser esta a qualidade que se pretende atingir nas soldaduras realizadas.

A norma descreve cerca de 18 tipos de defeitos. As imperfeições 1 a 8 (Tabela 5.3) podem ser identificadas e quantificadas através da análise metalográfica. Os defeitos 9 a 18 (Tabela 5.3) são quantificados a partir de uma imagem de macrografia.

Tabela 5.4 - Resumo da norma EN ISO 13919, que permite classificar qualitativamente a solda

**Qualidade
máxima B**

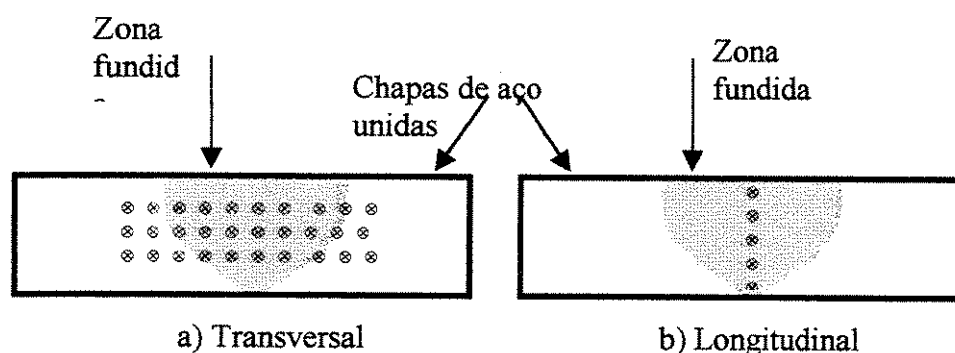
	Imperfeições		1,25 mm	1 mm	0,75 mm
1	Fendas (maiores que 1 mm)		não	não	não
2	Fendas na caraterá		não	não	não
3e4	Porosidade e defeitos lineares Taxa de defeitos (f): $f = \frac{\sum \text{áreas de defeitos}}{\text{comprimento} \cdot \text{espessura}}$	L < F <	0,375 mm 0,7%	0,300 0,7%	0,225 0,7%
5 e 6	Cavitações em tubos e Inclusões		Não aplicável		
7 e 8	Falta de fusão	I <	não	não	não
9	Defeitos em soldas de canto		Não aplicável		
10	Bordos queimados	B <	0,063 mm	0,053 mm	0,038 mm
11	Sobreesspessura no topo do cordão	E <	0,385 mm	0,351 mm	0,275 mm
12	Penetração excessiva	P <	0,385 mm	0,351 mm	0,275 mm
13	Desalinhamento	A <	0,125 mm	0,100 mm	0,075 mm
14	Decaimento do banho	D <	0,125 mm	0,100 mm	0,075 mm
15	Falta de material no topo	F <	0,125 mm	0,100 mm	0,075 mm
15	Falta de material na raiz	C <	0,125 mm	0,100 mm	0,075 mm
17 e 18	Juntas em T e salpicos		Não aplicável		

5.4.1 Análise Metalográfica

Para a análise metalográfica foram preparada amostras retiradas do cordão de solda. As amostras foram lixadas com lixas: 200, 300, 400, 600 e 1200 e posteriormente passaram por polimento utilizando filtros com pasta de diamante de 6 e 1 μm , O ataque químico para revelar a microestrutura resultante foi uma solução aquosa com reagentes químicos específicos (NITAL 2 %). As amostras foram observadas através da Microscopia Ótica, utilizando o analisador de imagens Q 500 MC Leica acoplado ao banco metalográfico Neophot 32 – Carl Zeiss / Gena e Microscópio Eletrônico de Varredura (MEV) do Laboratório de Metalografia - DEMA-FEM-UNICAMP.

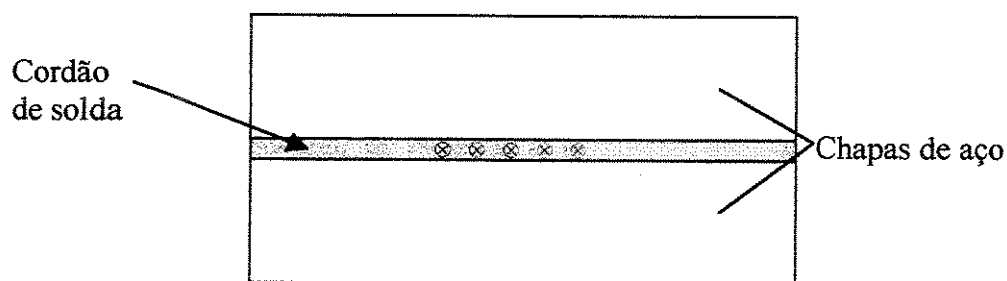
5.4.2 Análise de Microdureza Interna e Superficial

Na realização das medidas de microdureza foram utilizadas as mesmas amostras empregadas na análise metalográfica. O equipamento utilizado foi o Neophot 32 – Carl Zeiss / Gena, o qual possui dispositivo para a realização do ensaio de microdureza Vickers, penetrador piramidal, objetiva de 50x e ocular de 10x e carga de 20 g. A Figura 5.5 mostra a localização da região onde foram realizadas as medições.



A Figura 5.5 – Localização das regiões das medidas de microdureza

Através dos valores de microdureza obtidos no interior da amostra, pôde-se fazer o levantamento da variação da microdureza no interior das chapas soldadas, desde a região fundida (soldada) até o substrato. A análise da microdureza superficial foi feita de acordo com o que se pode observar na Figura 5.6, possibilitando assim o levantamento da variação da microdureza superficial ao longo do cordão de solda



A Figura 5.6 – Localização das regiões das medidas de microdureza superficial

5.4.3 Avaliação da Porosidade

Foram retiradas amostras da região do cordão de solda a cada 1 cm totalizando 13 amostras para análise de porosidade. Com o auxílio do analisador de imagens foi possível realizar a análise quantitativa da permeabilidade do material (poros). A Figura 5.7 representa a seção transversal da amostra submetida a esse ensaio.

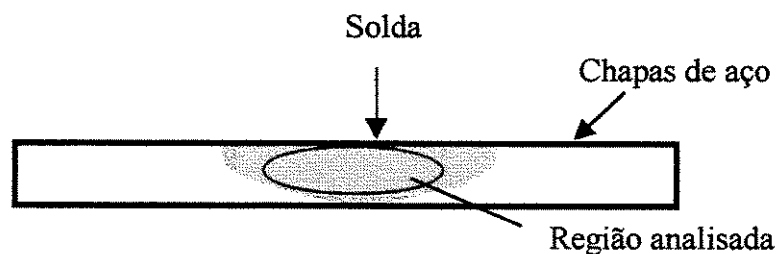


Figura 5.7 – Região da análise de porosidade

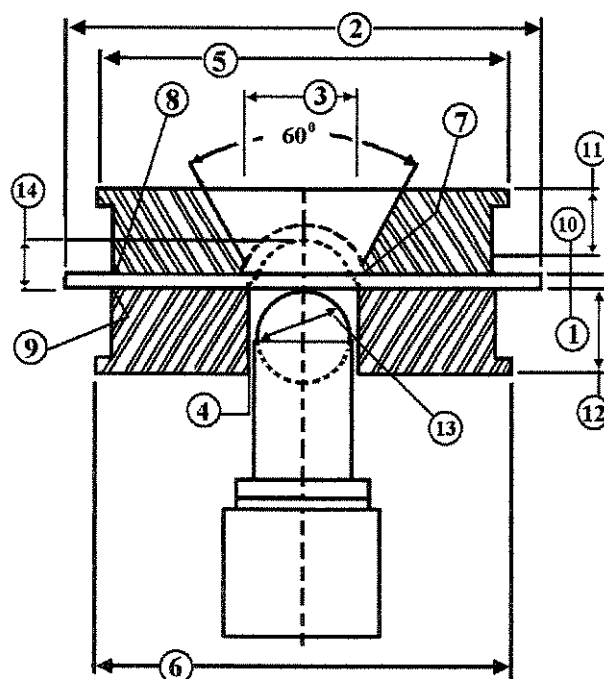
5.4.4 Ensaio de Embutimento (Erichsen)

Em virtude da complexidade inerente aos processos de conformação de chapas metálicas, as medidas das propriedades mecânicas feitas simplesmente a partir de ensaios de tração não dão informações suficientes sobre conformabilidade das chapas soldadas. Vários ensaios de laboratório foram desenvolvidos através dos anos, com o intuito de avaliar a conformabilidade das chapas dos diversos materiais. O ensaio de embutimento escolhido para determinar o índice de embutimento nas chapas soldadas foi o método de Erichsen. Foram utilizados onze corpos de prova para se determinar o índice de embutimento das chapas soldadas.

O ensaio consiste em deformar, com um penetrador provido de um extremo esférico, um corpo de prova com lubrificante recomendado pela norma ASTM E 643-84 preso a uma matriz e um anel de fixação, até ocorrer o início da ruptura e, neste momento, determinar a profundidade da calota produzida. Na Figura 5.8 é detalhado o ensaio Erichsen conforme a norma da ASTM E 643-84.

A norma recomenda para um coeficiente de confiança de 0.90 um número mínimo de seis ensaios. Foram realizados um número de nove ensaios para a determinação do índice de embutimento (IE).

O equipamento utilizado na realização dos ensaios de Erichsen foi o aparelho de ensaios mecânicos MTS. Na MTS está acoplado um registrador gráfico computadorizado e este fornece, com alta confiabilidade o IE., podendo-se ser visualizado na Figura 5.9. Na Figura 5.10 é visualizado o dispositivo de fixação da chapas soldadas utilizado no ensaio de embutimento.



1 - Espessura da chapa em teste	Espeçsura total (mm)
2 - Largura da Chapa em teste (mínima)	90 (mm)
3 - Diâmetro do furo da matriz de topo	ver 6.3
4 - Diâmetro do furo da matriz de fundo	$25,4 \pm 0,1$ (mm)
5 - Diâmetro externo da matriz de topo (aprox.)	90 (mm)
6 - Diâmetro externo da matriz de fundo (aprox.)	90 (mm)
7 - Raio do canto interno da matriz de topo	$0,81 \pm 0,05$ (mm)
8 - Raio do canto externo da matriz de topo	0,8 (mm)
9 - Raio do canto externo da matriz de fundo	0,8 (mm)
10 - Profundidade da matriz de topo	$5 \pm 0,2$ (mm)
11 - Espessura da matriz de topo (mínima)	20 (mm)
12 - Espessura da matriz de fundo (mínima)	20 (mm)
13 - Diâmetro final do penetrador	$22,22 \pm 0,04$ (mm)
14 - Profundidade do copo	Profundidade do copo (mm)

Figura 5.8 - Ensaio Erichsen conforme a norma da ASTM E 643-84.

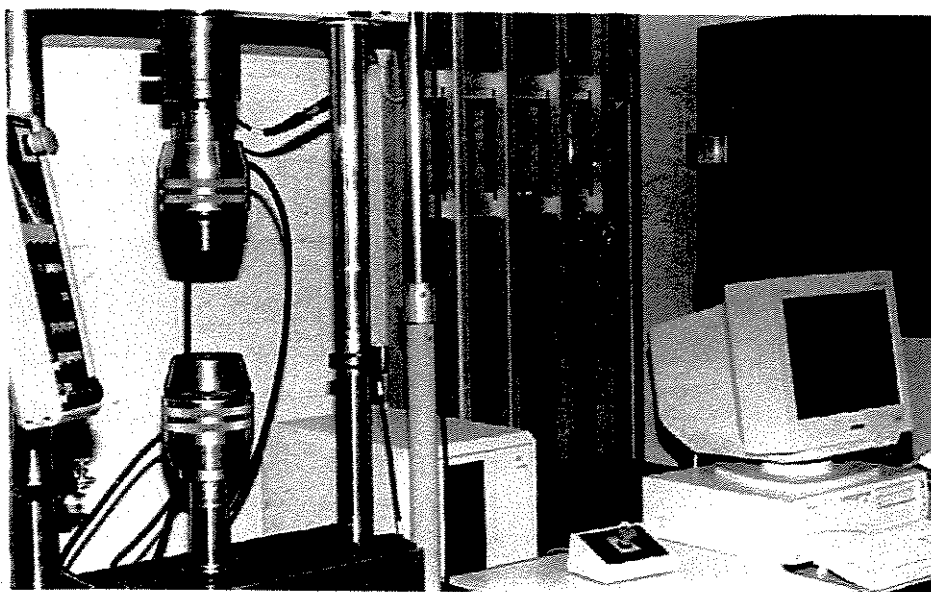


Figura 5.9 - Aparelho de ensaios mecânicos MTS

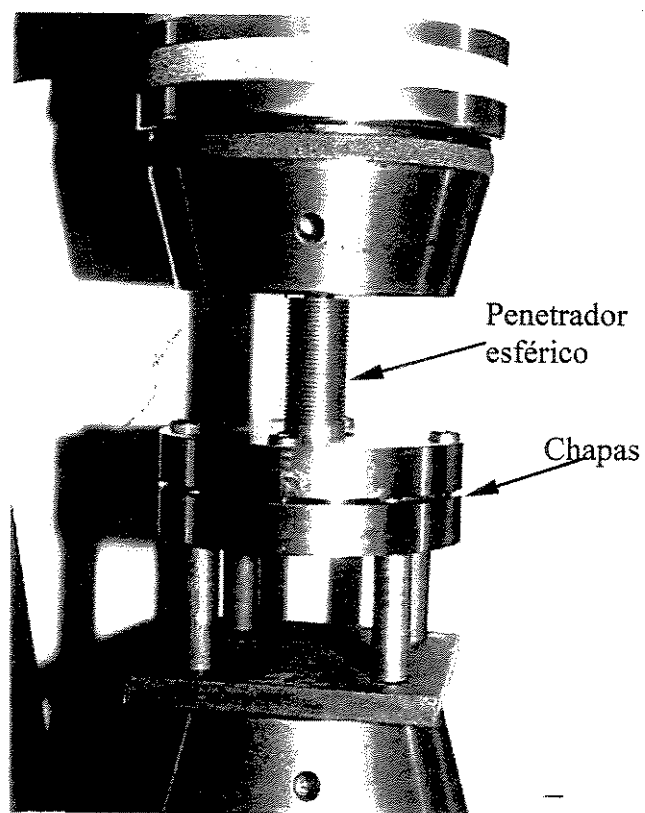


Figura 5.10 - Dispositivo de fixação da chapas soldadas utilizado no ensaio de embutimento.

Capítulo 6

Resultados e Discussões

6.1 Parâmetros

Nos ensaios de solda o objetivo foi determinar qual seria o conjunto de parâmetros operacionais satisfatório. Os conceitos utilizados para a determinação de qual seria a melhor solda são: a profundidade de penetração da região fundida e acabamento superficial do cordão de solda

Tabelas 6.1 – Parâmetros de processo

	Intensidade (J)	Duração do pulso (ms)	Focalização (mm)	Velocidade (mm/s)	Frequência (Hz)
1	10	4,0	0	4,8	20
2	14	3,5	0	4,8	20
3	14	5,0	0	4,8	20

Foi feita a avaliação inicial nos cordões de solda e chegou-se a conclusão que os parâmetros operacionais item 2 (Tabela 6.1) foram os mais satisfatórios. Baseando-se na análise de profundidade de penetração total da zona fundida e superfície do cordão de solda aparentemente satisfatória. Na Figura 6.1. é apresentada uma macrografia da secção transversal do cordão de solda obtida com as condições acima.

Os principais defeitos são causados pela insuficiência da potência, pelo desalinhamento das chapas e pela ineficiência da supressão do plasma. A Figura 6.2 apresenta uma macrografia da análise obtida com o conjunto de parâmetros item 1 (Tabelas 6.1). Observa-se a falta de penetração resultante da potência insuficiente.

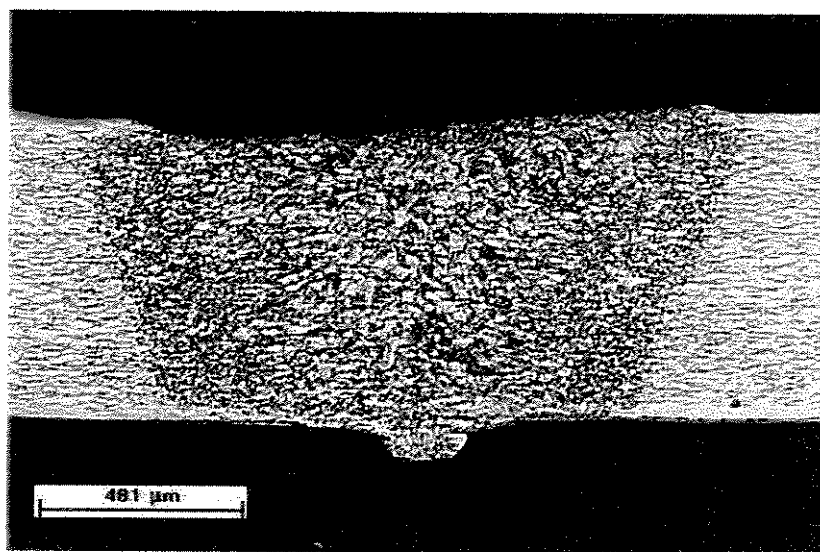


Figura 6.1 - Solda a laser em chapas finas de aço baixo carbono, aumento de 25,6x

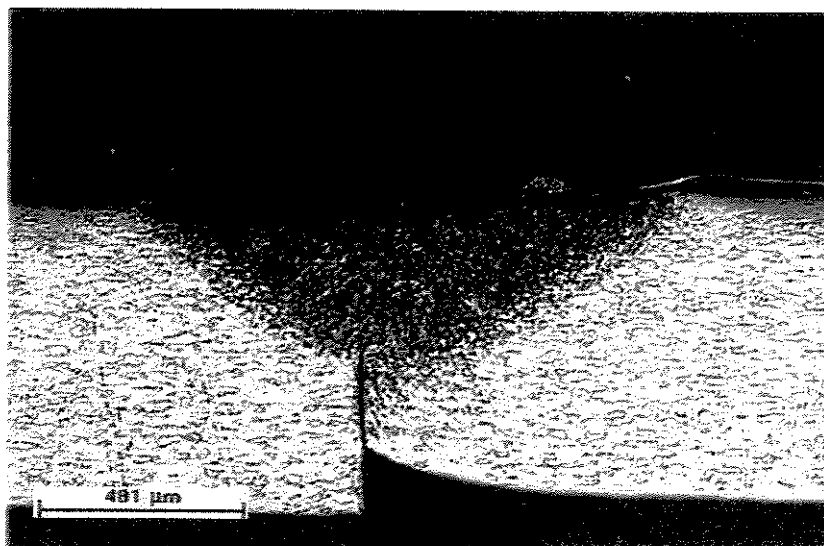


Figura 6.2 – Solda laser em chapas de aço baixo carbono sem penetração total, aumento de 25,6x

As Figuras 6.3 e 6.4 apresentam macrografia resultantes do desalinhamento entre as chapas e fixação "frouxa" de uma das chapas no suporte de fixação.

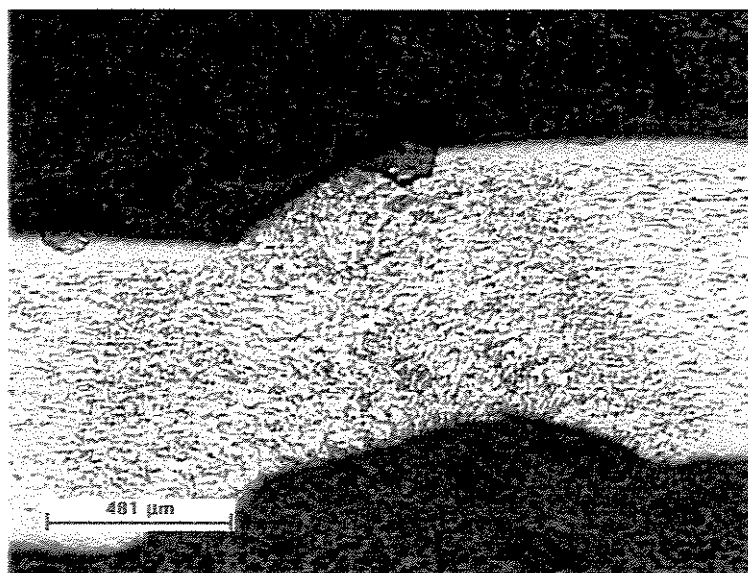


Figura 6.3 – Desalinhamento entre chapas soldadas (posicionamento incorreto das chapas no suporte de fixação), aumento de 25,6x

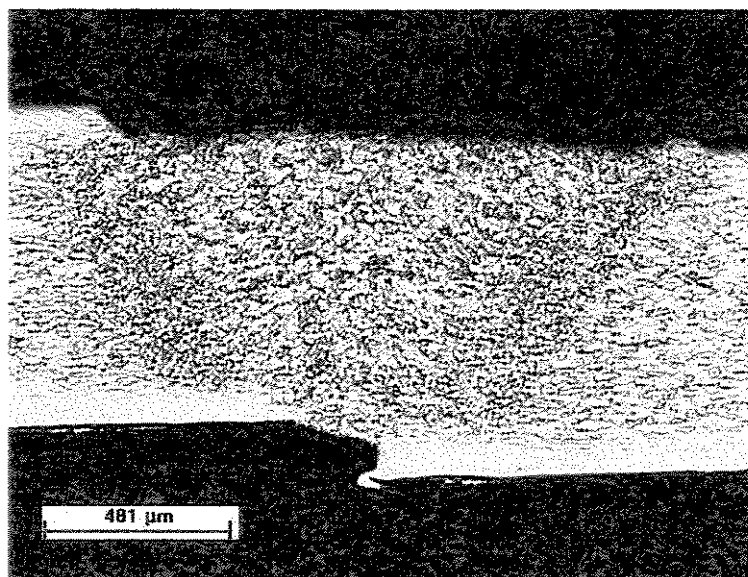


Figura 6.4 – Desalinhamento das chapas de aço soldadas (fixação inadequada de uma das chapas), aumento de 25,6x

Na Figura 6.5 observar-se uma descontinuidade na superfície do cordão de solda obtida com os parâmetros operacionais do item 2 (Tabelas 6.1). Neste caso pode-se afirmar que houve uma ineficiência da eliminação do plasma resultante do posicionamento do bico injetor acima do ponto de eliminação do mesmo.

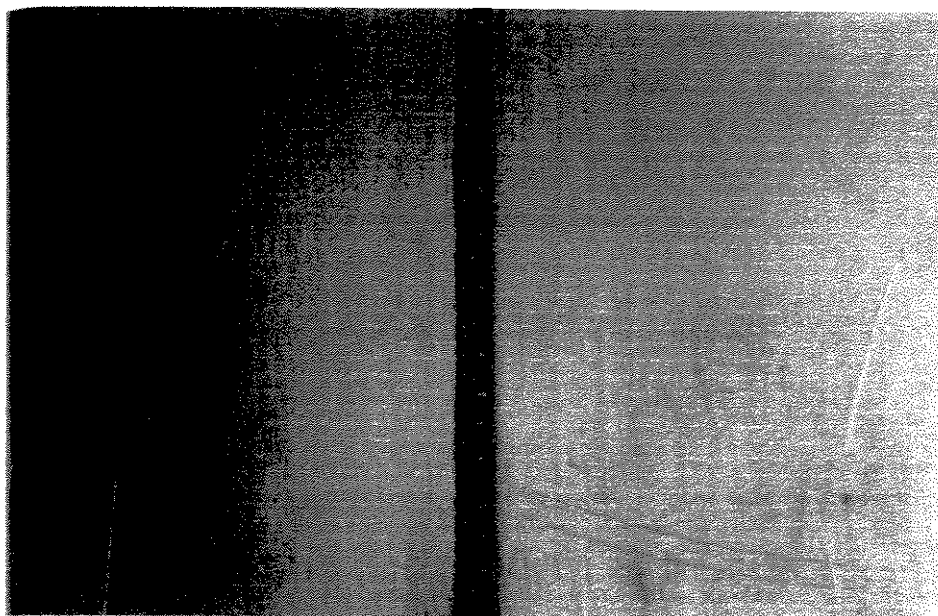


Figura 6.5 – Irregularidades superficiais no cordão de solda a laser

6.2 Análise Microestrutural

6.2.1 Microestrutura do Substrato

Foram realizadas varias soldas para gerar amostras, tornando possível a realização de vários ensaios para comprovar a efetividade das soldas realizadas e a possibilidade de utilização dos blanks. A análise microestrutural pode ser observada através das Figuras 6.6 e 6.7. Na Figura 6.6 visualiza-se a microestrutura do substrato onde observa-se o sentido de laminação devido ao alongamento dos grãos e na Figura 6.7 com um aumento de 1500x revela-se a presença de uma

fase dispersa que analisada quantitativamente no MEV pode-se dizer que são carbonetos(anexo A).

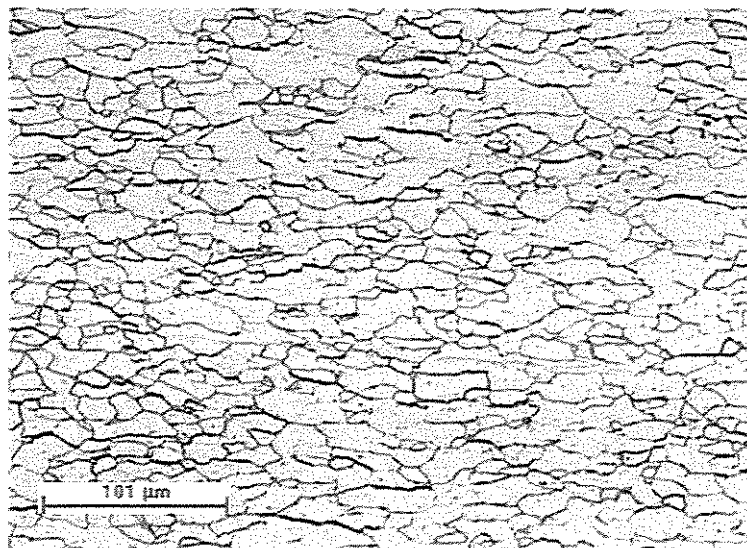


Figura 6.6 - Microestrutura do aço baixo carbono utilizado nas soldas, aumento de 125x

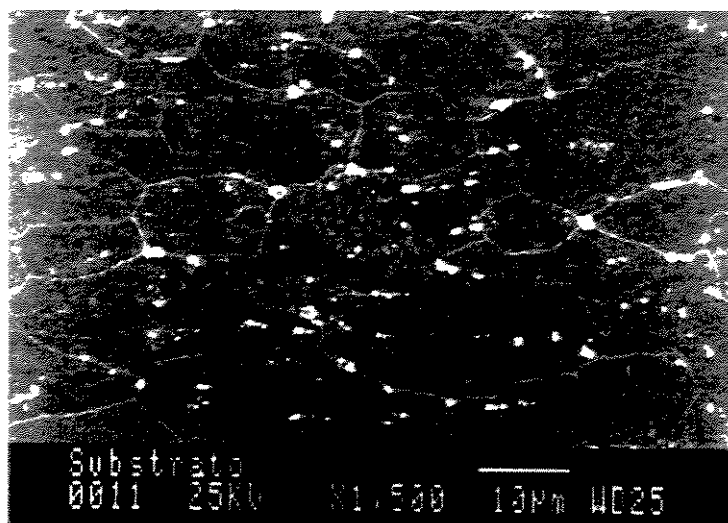


Figura 6.7 - Microestrutura do aço baixo carbono utilizado nas soldas, aumento de 1500x

6.2.2 Microestrutura da Zona Termicamente Afetada pelo Calor (ZTA)

Na Figura 6.8 é observada a microestrutura da interface entre a ZTA e o substrato, onde observa-se com boa definição as regiões do substrato e da ZTA. Foi comprovado experimentalmente que a ZTA resultante da solda a laser é pequena. A largura da zona termicamente afetada pelo calor medida é da ordem de 300 μm . A Figura 6.8 revela que houve uma recristalização na região da ZTA. Seis importantes variáveis influenciam o comportamento da recristalização. São elas: (1) quantidade de pré-deformação, (2) temperatura, (3) tempo, (4) tamanho de grão inicial, (5) composição e (6) grau de recuperação ou poligonização anterior ao início da recristalização [DIETER, E. 1981]. A relação das variáveis dadas acima com o processo de recristalização pode ser resumida em:

1. É necessário uma quantidade mínima de deformação para provocar a recristalização.
2. Quanto menor o grau de deformação, maior a temperatura requerida para provocar a recristalização.
3. O aumento do tempo de recozimento diminui a temperatura de recristalização. De qualquer modo, a temperatura é muito mais importante do que o tempo. Dobrar o tempo de recozimento equivale aproximadamente a aumentar a temperatura de recozimento de 10 °C.
4. O tamanho de grão final depende grandemente do grau de deformação e, em menor escala, da temperatura de recozimento. Quanto maior o grau de deformação e menor a temperatura de recristalização, menor é o tamanho de grão recristalizado.
5. Quanto maior o tamanho do grão original, maior a quantidade de trabalho a frio necessário para produzir uma temperatura de recristalização equivalente.
6. A temperatura de recristalização diminui com o aumento da pureza do metal. Adições em ligas de solução sólida sempre aumentam a temperatura de recristalização.
7. A quantidade de deformação necessária para produzir um comportamento de recristalização equivalente aumenta com o aumento da temperatura de trabalho.
8. Para uma dada redução da seção transversal, diferentes processos de conformação, tais como laminação, estampagem, etc., produzem graus de deformações efetivas um tanto diferentes. Por esta razão, comportamentos idênticos da recristalização não podem ser obtidos.

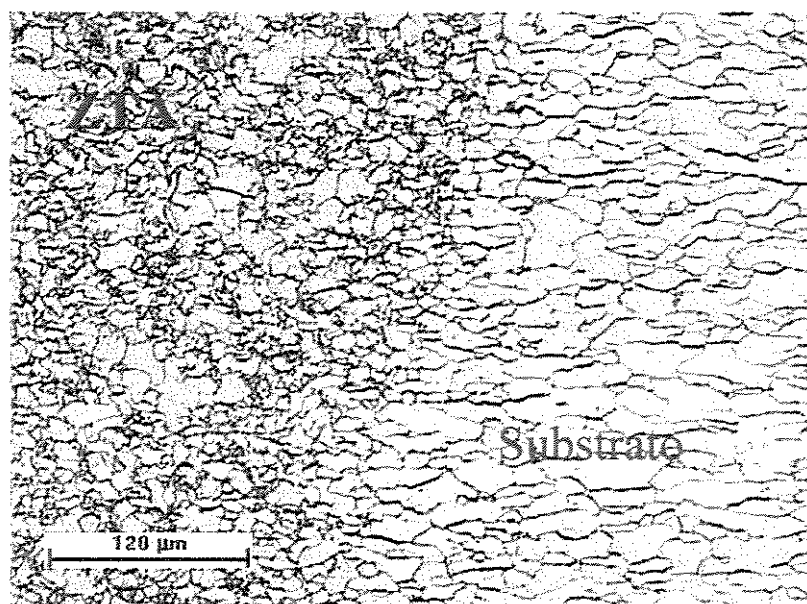


Figura 6.8 - Microestrutura da interface entre a ZTA e o substrato, aumento de 100x.

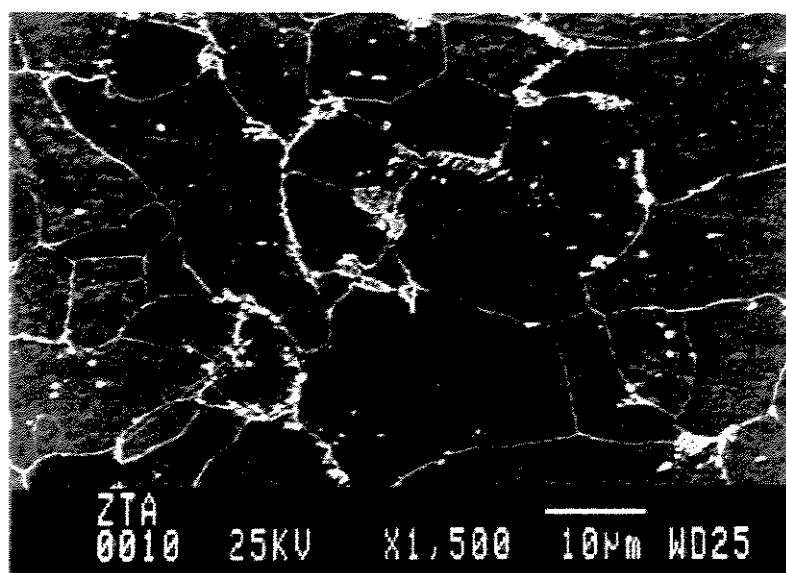


Figura 6.9 - Microestrutura da ZTA em solda a laser, aumento de 1500x.

6.2.3 Microestrutura da Zona Fundida (ZF)

Uma região muito importante quando se trata de solda a laser está relacionada na formação do cordão de solda. Um cordão de solda com alta concentração de poros diminui a resistência mecânica da solda. Foi feita a análise nos cordões de solda com o microscópio óptico e MEV e não se encontrou porosidade na região fundida. Na Figura 6.10 é visualizada a região entre ZF e ZTA facilmente distinguidas. Na região da zona fundida observa-se os grãos resultantes da fusão, livres do efeito de deformação da laminação. Na Figura 6.11 pode-se visualizar melhor a região fundida. Nota-se que a estrutura resultante é semelhante a do substrato porém com grãos grandes.

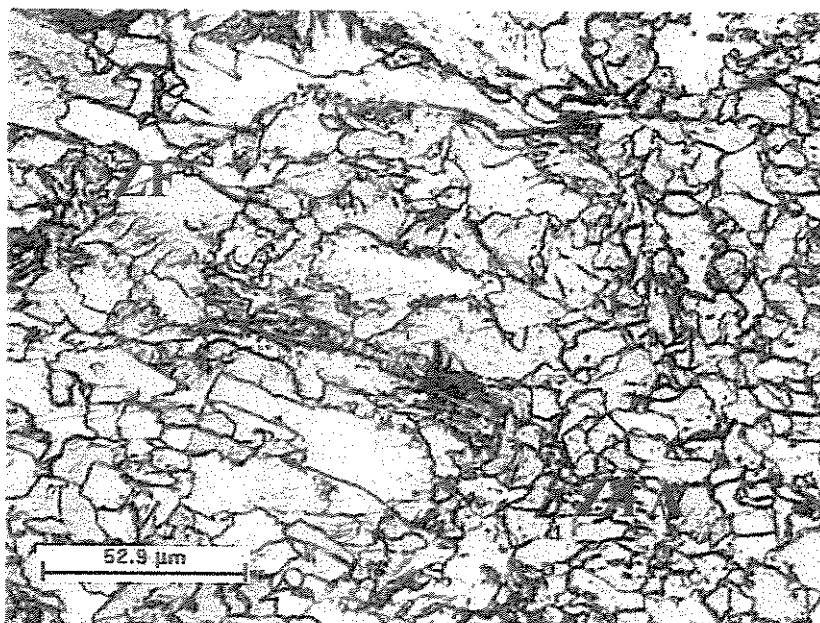


Figura 6.10 - Microestrutura da ZF e ZTA em soldas de chapas finas de aço baixo carbono, aumento de 250x

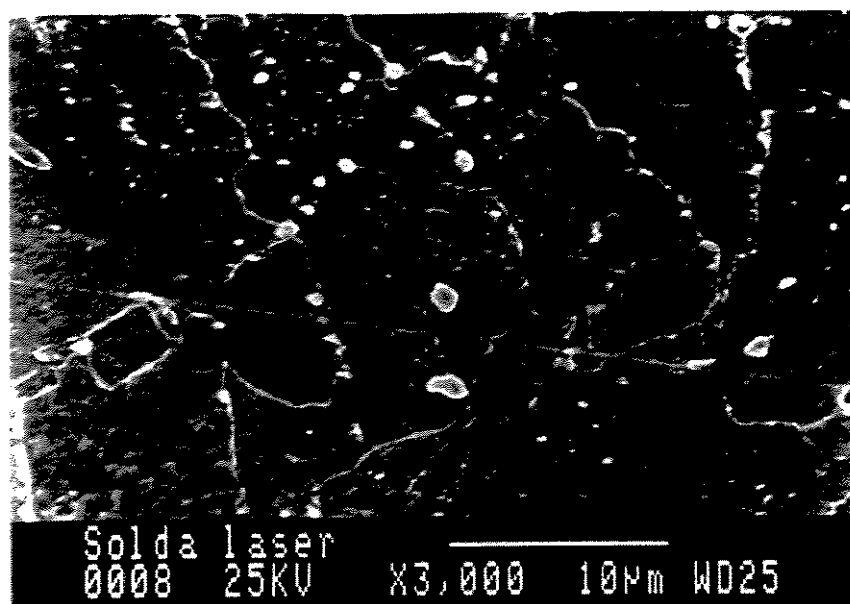


Figura 6.11 - Microestrutura da ZF em soldas de chapas finas de aço baixo carbono, aumento de 3000x

6.3 Microdureza

É fundamental que em soldas de chapas finas de aço baixo carbono utilizados para estampagem, apresentem baixa dureza nos cordões. A dureza no cordão de solda muito acima dos valores do material base diminui muito a capacidade de conformação nesta região. Nos cordões de solda, foram feitas análises de microdureza Vickers (HV) na direção transversal e perpendicular à região fundida. Na Figura 6.12 podem ser visualizados os valores de microdureza na direção transversal à poça fundida (região superior). Os valores de microdureza na direção transversal à poça fundida (região mediana) pode ser visualizada na Figura 6.13. Na Figura 6.14 é visualizado os valores de microdureza na direção transversal à poça fundida (região inferior). Estes resultados apontam para uma microdureza pouco abaixo de 200 HV no centro da ZF e diminuindo em direção ao substrato com microdureza média de 160 HV. Na Figura 6.15 pode-se visualizar a microdureza na direção perpendicular à poça. A microdureza nesta região ficou praticamente estável em torno de 200 HV. A microdureza média na superfície da solda foi de 200 HV.

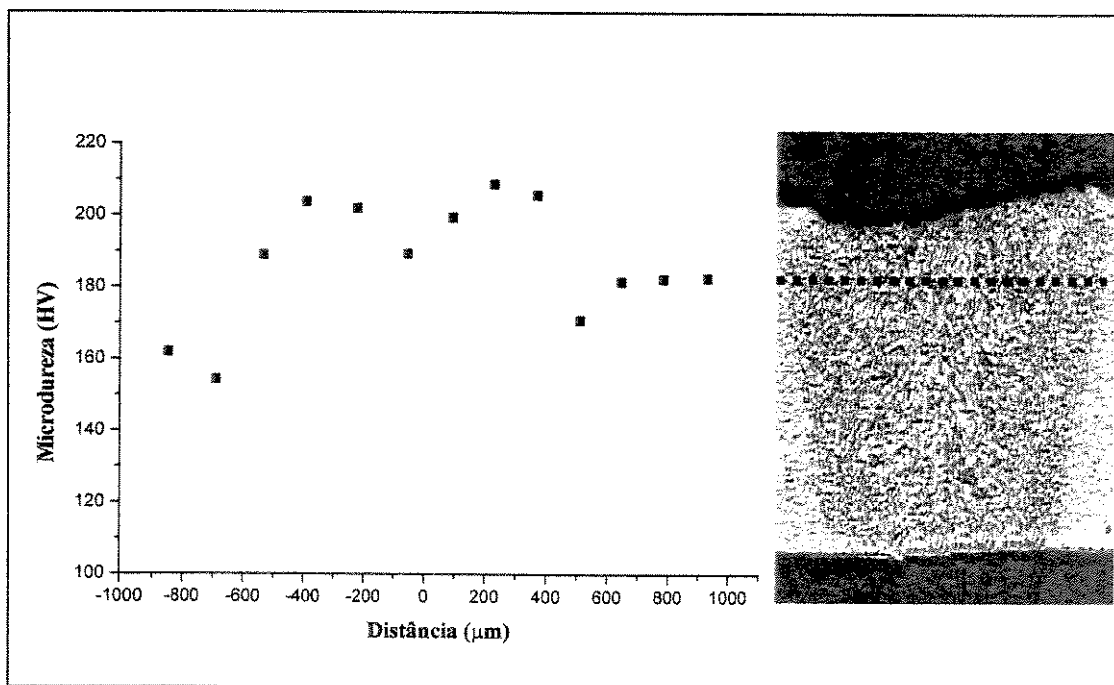


Figura 6.12 - Gráfico da microdureza em soldas (Região superior)

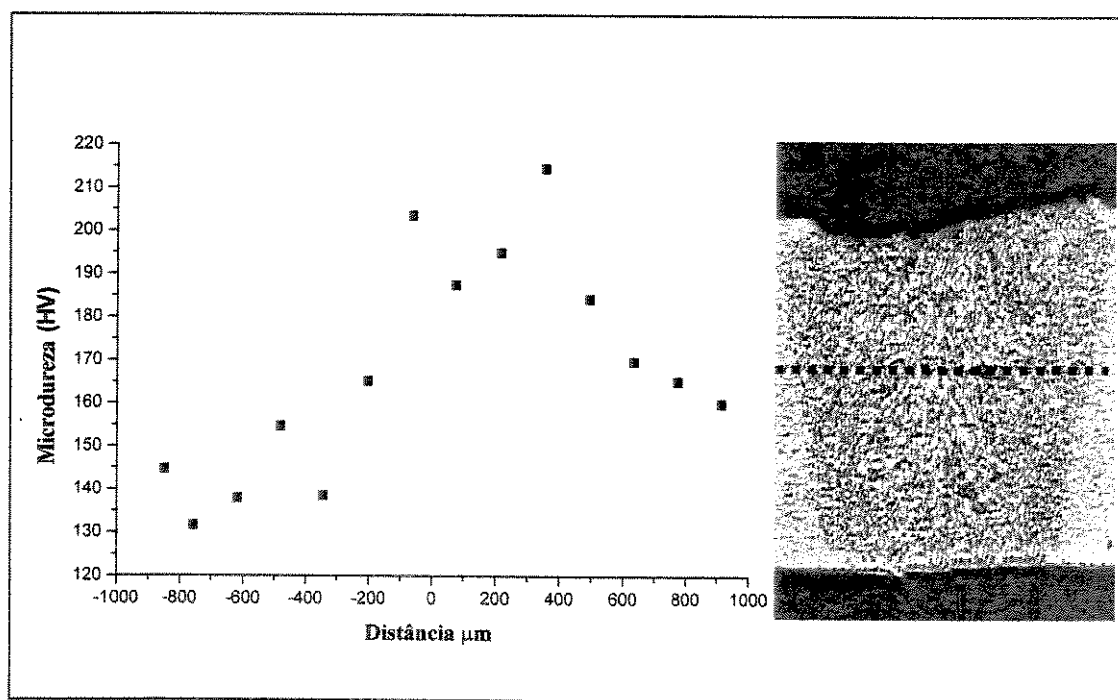


Figura 6.13 - Gráfico da microdureza em soldas (Região mediana)

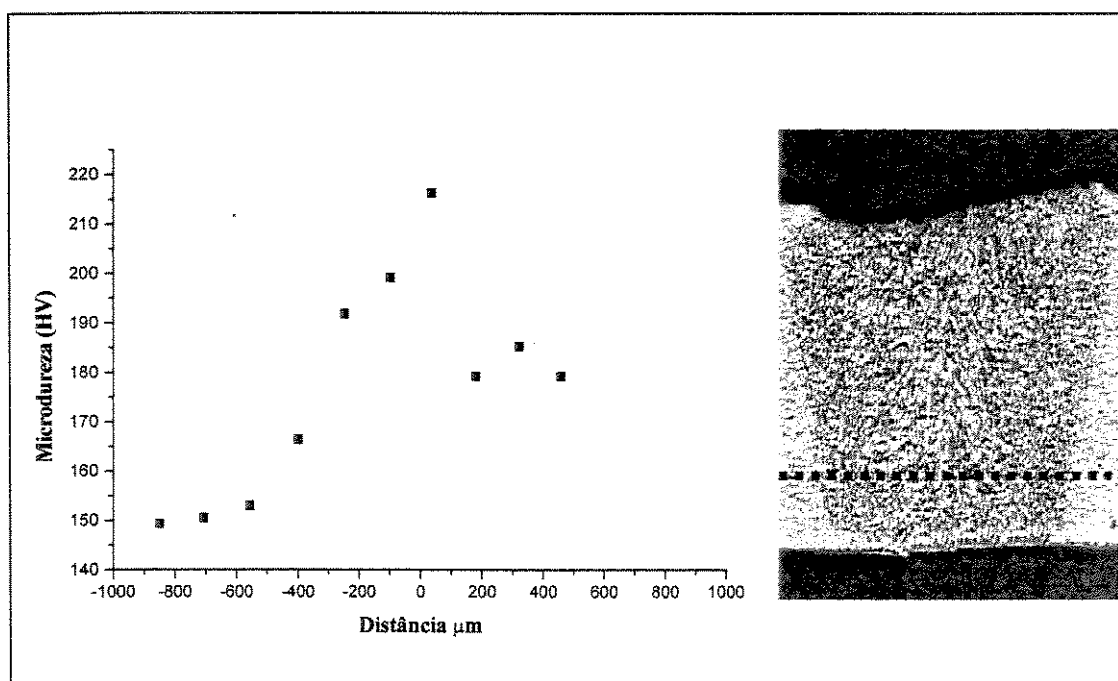


Figura 6.14 - Gráfico da microdureza em soldas (Região inferior)

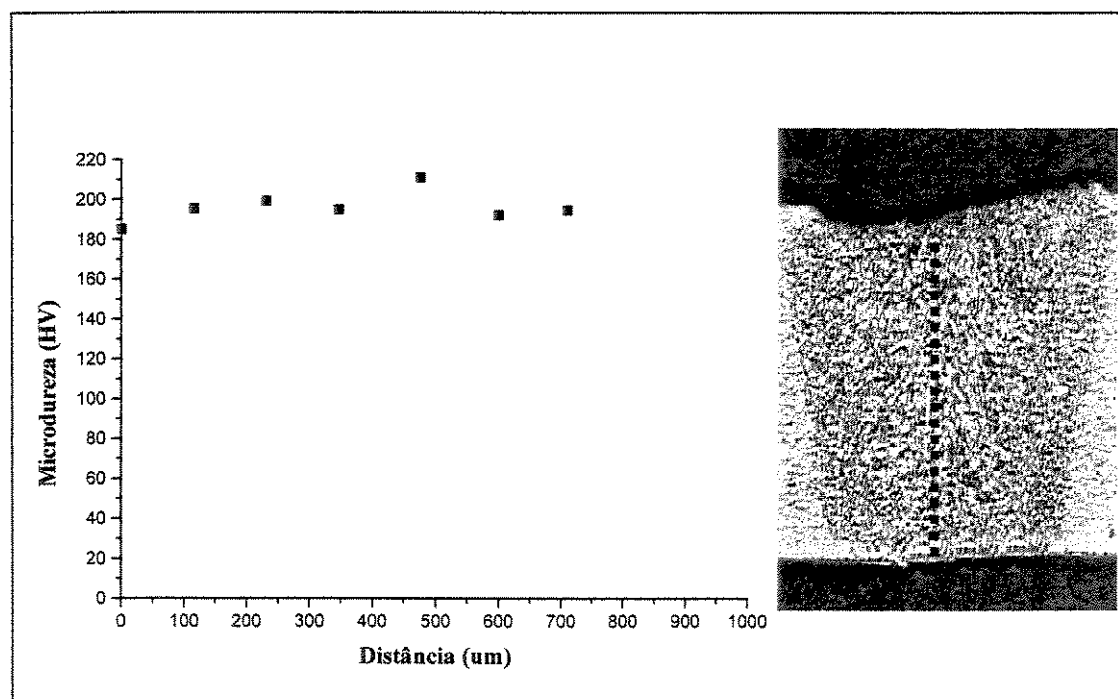


Figura 6.15 - Gráfico da microdureza em solda(Região perpendicular)

6.4 Avaliação Qualitativa das Soldas

Quanto a eliminação do plasma e proteção gasosa superior da região fundida, o sistema de injeção de gás mostrou-se eficiente. O cordão de solda tem um aspecto visual regular ao longo da sua formação e não revelou a presença de oxidação na região superior da zona fundida. A região inferior do cordão também tem um aspecto visual regular, mas apresentou oxidação em sua extensão. A oxidação presenciada nesta região foi causada pela inexistência de proteção gasosa. A Figura 6.16 ilustra a região onde se encontrou oxidação.

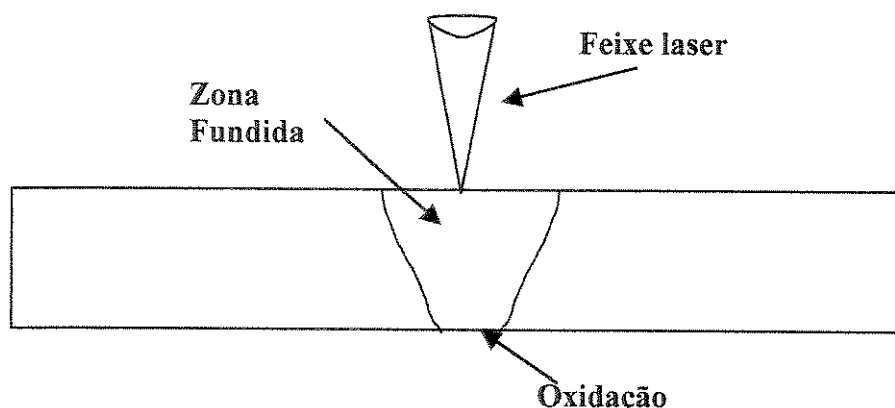
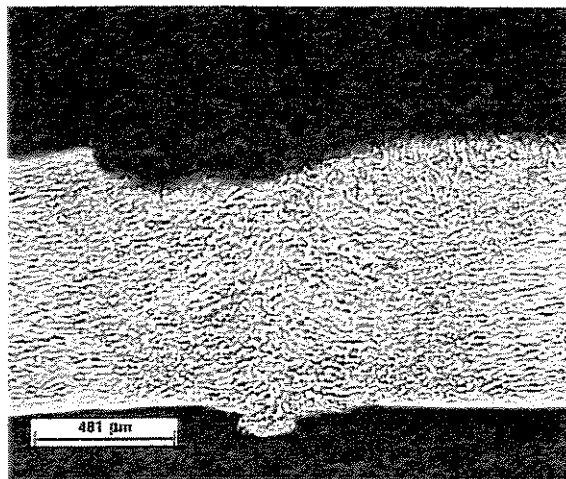


Figura 6.16 Representação esquemática da localização da oxidação formada no cordão de solda a laser

Na análise de porosidade e das macrografias foi possível aplicar a norma EN ISO 13919-1, estando os resultados apresentados na Tabelas 6.2. A norma é rigorosa, no sentido em que, se apenas um defeito for classificado com C e os outros todos com B, a soldadura é classificada com um C. Nas três amostras analisadas foram encontrados 5 defeitos, sendo que quatro foram classificados com B e um foi classificado com C. Portanto a classificação dos ensaios de solda a laser foi classificada com a qualidade C.

Tabela 6.2 - Resultado da aplicação da norma as soldas a laser realizadas em chapas finas de aço baixo carbono utilizando o conjunto de parâmetros item 2 (Tabela 6.1)

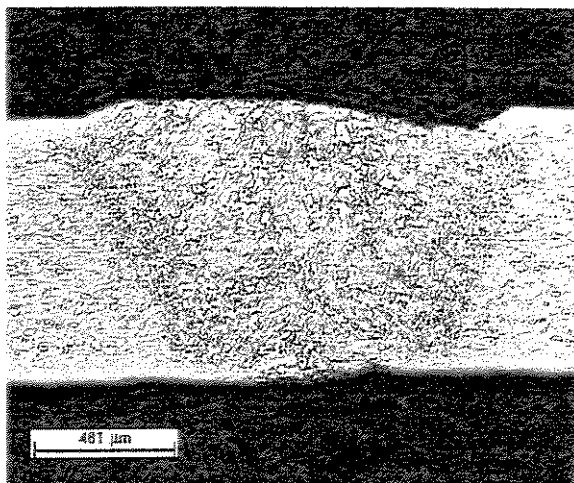


Defeito: 14, 15

Falta de material no topo
176 μm

Decaimento do banho
96 μm

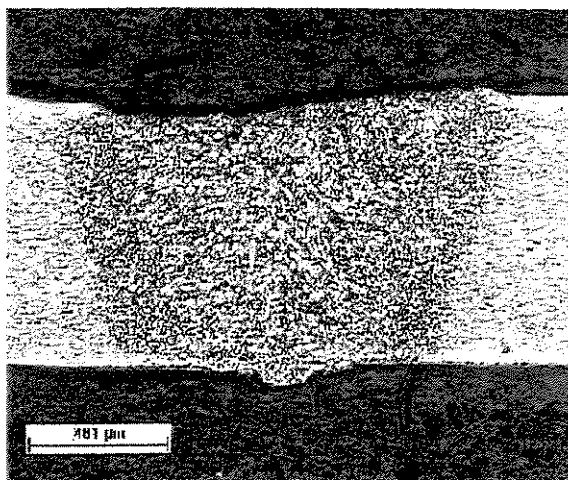
Qualidade : C



Defeito: 14

Falta de material no topo
96 μm

Qualidade : B



Defeito: 14, 15

Falta de material no topo
85 μm

Decaimento do banho
56 μm

Qualidade : B

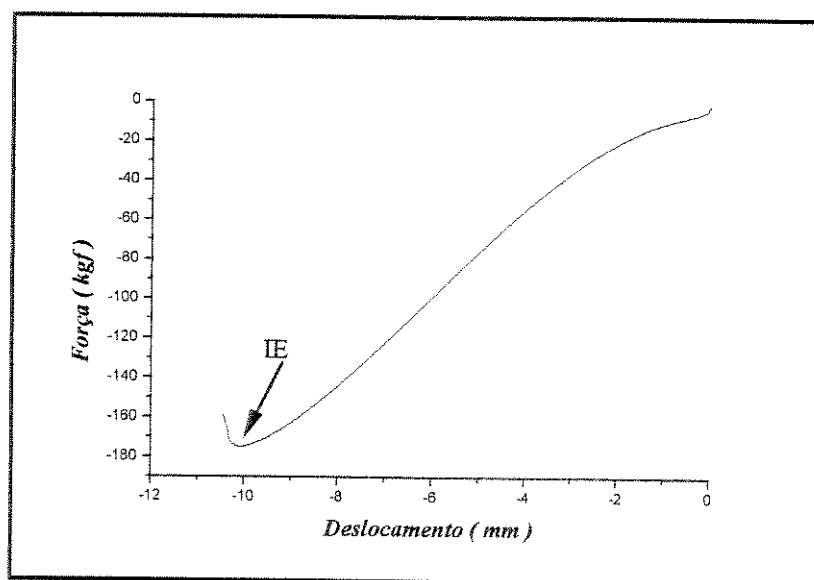
6.5 Ensaio de Embutimento (Erichsen)

O resultado obtido nos ensaios de estampabilidade é apresentado de acordo com a norma ASTM E 643-84 e visualizado na Tabelas 6.3.

Tabelas 6.3. - Resultado obtido no ensaio Erichsen

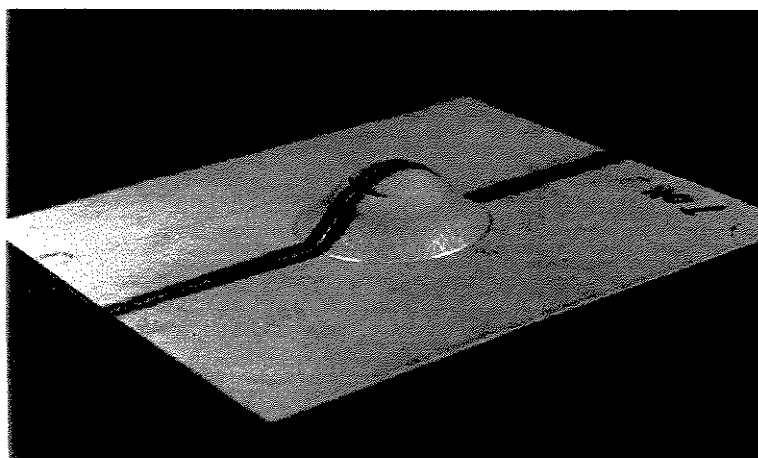
Identificação do material	Ver capítulo 5
Espessura	1 mm
Método da determinação de ruptura	Computadorizado
Numero de teste	9
Tipo de lubrificação	Ver capítulo 5
Valor médio do IE	10,02 mm
Carga média máxima (se souber)	170 kgf
Força nos corpos de prova	Proporcional
Força de fixação nos corpos de prova (se souber)	não

Na Figura 6.17 pode-se visualizar o gráfico de um dos ensaios Erichsen realizados neste trabalho. Este gráfico determina o IE para cada ensaio.

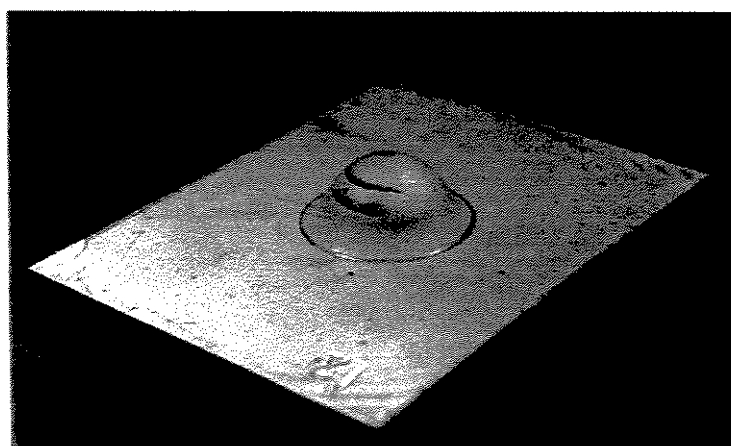


Na Figura 6.17 - Gráfico do ensaio Erichsen para determinação do IE

Nos ensaios de embutimento realizados observou-se que a ruptura dos corpos de prova ocorreram transversalmente ao cordão de solda. Foram feitos ensaios de embutimento em seis corpos de prova sem solda para a comparação com as soldadas. Na Figura 6.18a e 6.18b visualiza-se a ruptura das chapas soldadas e das chapas de aço sem solda, quando submetidas ao ensaio de embutimento. O valor médio do IE nas chapas sem solda foram de 11,06 e 10,02 para as chapas soldadas. O valor mínimo do índice de embutimento para chapas de aço EEP (sem soldas) com espessura de 1 mm e conforme a recomendação da norma NBR 5915/1984, é de 10,8 mm. O valor de IE obtido nas chapas soldadas é próximo ao valor de IE mínimo de chapas de aço EEP .



a) Copo das chapas soldadas



b) Copo das chapas não soldadas

Figura 6.18 - Copo resultante do ensaio de embutimento

Capítulo 7

Conclusões e Propostas para Trabalhos Futuros

7.1 Conclusões

Nos ensaios de solda utilizando-se o laser de Nd:YAG, o sistema de fixação das chapas e o bico de injeção de gás, pode-se concluir que:

A utilização do bico injetor de gás com vazão de 20 l/min, permitiu a eliminação do plasma e proteção superficial da zona fundida. Considerando que a velocidade de solda foi baixa pode-se dizer que o consumo de gás foi alto. A velocidade de soldagem foi limitada pela potência média da máquina laser utilizada.

A usinagem feita nas chapas de aço baixo carbono permitiu um contato entre as mesmas muito bom. O GAP formado entre as chapas foi muito pequeno e não teve influência negativa nas junções, porém o custo de preparação das chapas é muito elevado.

A eliminação de um dos defeitos típicos de soldagem em chapas finas, o desalinhamento, tornou-se possível através da utilização do sistema de fixação desenvolvido.

A largura dos cordões obtida é típica em soldagem a laser, aproximadamente igual a da espessura das chapas soldadas, e apresentou dimensões da zona termicamente afetada pelo calor bastante reduzidas (300 μm).

O conjunto de parâmetros de processo adotado propiciou a soldagem nas chapas com qualidade C, como se comprova pela análise realizada segundo a norma EN ISO 13919-1, pela observação metalográfica, pelos valores de microdureza obtidos e pelos resultados do ensaio de embutimento conforme a norma ASTM E 643-84

7.2 Trabalhos Futuros

Montar um sistema de injeção de gás por turbulência e proteção gasosa na região inferior da zona fundida evitando-se assim a oxidação. Na Figura 7.1 e esquematizado o sistema de proteção e injeção de gás inibidor do plasma.

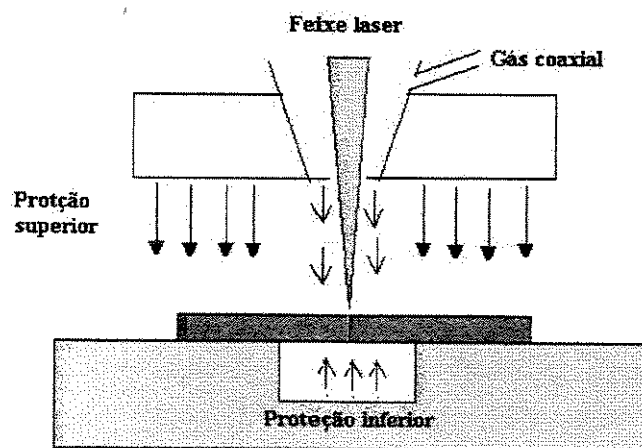


Figura 7.1 - Sistema de injeção de gás por meio de turbulência

Utilizar lasers de CO₂ e Nd:YAG com elevada potência para realização de soldas no modo Key Hole.

Soldas em chapas de diferentes espessuras

Soldas em chapas de diferentes materiais

Referência Bibliográfica

- ANJOS, M. A. ARAUJO, C.S., MARRA,K.M.," *A utilização de lasers para a produção de tailored blanks na industria automobilística*" Seminário Iberoamericano sobre Procesamento de Materiales por Láser - Buenos Aires-abril (1999), 30-34
- AMENDE, W. Industrial Applications of Lasers. Edited by H. Koebner: John Wiley & Sons Ltd,(1984) cap. 3.
- ASM, Metais Handbook 9th edition, Vol. 6, *Welding Brazing and Soldering*, Laser beam Welding, Materials Park, OH., (1983) 647-671.
- BANAS, M.C, "*High Laser Welding*" Optical Enginnering , vol 17 n° 3 , May-June (1978)-210 116
- BARON, J.S., Welding Journal, v 76, n10, (1997), 39-45
- BAYSORE B.J.K., WILIAMSON M.S., ADONIYI Y. and Milian J.L.; "*Laser Beam Welding and Formability of Tailored Blanks*", 73rd Annual AWS Meeting, Chicago, March 22-27, (1992) 345s-351s
- CHIAVERINI, V. Aços e Ferros Fundidos. São Paulo : ABM, (1990). cap. 7.
- DAWES, C. "*Laser Welding*", McGraw-Hill Book CompanyTechnology/Ind. Arts (1992)
- GRABAM M. P., WECKMAN D.C., KERR., "*Nd:YAG Laser Beam Welding of Coated Steels Using a Modzfied Lap Joint Geometry*", Welding Research Supplement, May (1996)1 62s-1 70s.

- HUME-ROTHERY, W. *Estruturas de Ligas de Ferro: Introdução elementar*, São Paulo Edgard Blücher Ltda, (1968). cap. XI.
- IERARDI, M.C.F, "*Tratamentos Superficiais por Refusão com Laser* " Tese de Livre Docência , Unicamp/DEMA/FEM (1999)
- IRVING B., "*Welding Tailored Blanks Is Hot Issue For Automakers*", Welding Journal, August (1995) 49-52.
- KRAUSS, G. STEEIS: "*Heat Treatment and Processing Principles*". ASM, (1989). cap. 1.
- LI, Z., GOBBI S.L., "*Laser Welding for lightweight structures*", Journal of Materials Processing Technology 70, (1997)137-144.
- MAILLET,H., *O laser Principios e Técnicas de Aplicação*, Editora Manole Ltda (1987)
- MATSUMOTO, L. et. al; "*Application of Laser Beam Welding to Thin Steel Sheet*", Japan Welding Society, Oct. (1989) 50-55.
- MUNHOZ, A.L.J., "*Cura Localizada de Resina Termosencível Utilizando o Laser de CO₂ Como Fonte Seletiva de Calor*" Tese de mestrado, Unicamp/DEMA/FEM (1997)
- RODRIGUES DA COSTA, A., "*O estágio atual e as perspectivas das aplicações do laser Nd:YAG*" Seminário Iberoamericano sobre Procesamento de Materiales por Láser - Buenos Aires-abril (1999), 3-9
- PEÇAS,P., GOUVEIA, H., QUINTINO, L. "*Soldadura laser de sub-conjunto para estampagem (Tailored Blanks)*" Revista de Metalurgia , Madri, 34 (2), (1998), 210-219
- PEÇAS,P., GOUVEIA, H., QUINTINO, L. "*Soldadura laser de chapa fina de aço carbono e aço galvanizado*" Revista de Metalurgia , Madri, 34 (2), (1998), 233-241

SHANNON, G. J., NUTTALL, R., WATSON AND W. F. DEANS "*Preliminary Results on Underwater Laser Beam Welding of Steels*" Welding Journal July (1994), WELDING RESEARCH SUPPLEMENT I 173-s-174-s

STEEN, W. M.; "*Laser Material Processing*", Springer-Verlag London Limited, (1993).

PONSCHAB H., HINTERHOLZ K., MÜLINER A., RADLMAYR K., SZINYUR J., CORRODI R., SONINIER D., "*Advantages and First Experiences with a New Technology for the Production of Laser- Welded Blanks*", Proc. IBEC'97, (1997) 113-122.

PRANGE W., SCHNEIDER C., JARONI U., "*Tailored Blanks - Production Procedures and the Behavior of the Welded Parts*", Proc. IBEC'95, (1995) 91-95.

WEINER, E. ET AL.; *Soldagem - Processos e Metalurgia*, Sao Paulo: Editora Edgar Biucher Ltda (1992).

WESTGATE S. A., KIMCHI M.; "*A New Process for Tailored Blank Production*", Welding Journal, May (1995) 45-49.

WHITAKER, L. R., MCCARTNEY D. G.; "*The microstructure of CO₂ Laser Welds in an Al-F-V-Si alloy*", Materials Science and Engineering, v.196, n. 5, May. (1994)155-163.

Apêndice A

Resultado da análise feita na ZF com auxílio do MEV

SQ: Identify

Qualitative Element Identification

Sample ID: Solda laser - Zona Fundida

Possible identification

FE KA KB

F KA

AL KA

C KA

Peak Listing				
	Energy	Area EL. And Line		
1	0,267	168	C	KA
2	0,677	5790	F	KA
3	1,489	206	AL	KA
4	6,396	62425	FE	KA
5	7,051	8244	FE	KB

Solda laser - Área fundida

Standardless Analysis

25.0 kV 50.1 Degrees

SQ: Quantify

Solda laser - Área fundida

Standardless Analysis

25.0 kV 50.1 Degrees

Retif_CRK' _CNK' _MNK' _MNK"

Retif_CRK

Chi-sqd = 1.94

Element	Rel. K-ratio	Net Counts
Fe-K	0.99816 +/- 0.00607	71060 +/- 432
Cr-K	0.00000 +/- 0.00000	0 +/- 0
Mn-K	0.00184 +/- 0.00077	141 +/- 59