

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIA E ENGENHARIA DE MATERIAIS**

**CONTRIBUIÇÕES PARA A SOLDAGEM DE TITÂNIO A LASER NA GEOMETRIA
DE JUNTA EM ARESTA**

**DISSERTAÇÃO SUBMETIDA À UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA
PARA A OBTENÇÃO DO GRAU DE MESTRE EM CIÊNCIA E ENGENHARIA DE
MATERIAIS**

CHARLES CRISTIAN DE SOUZA

FLORIANÓPOLIS, DEZEMBRO 2002.

**CONTRIBUIÇÕES PARA A SOLDAGEM DE TITÂNIO A LASER NA GEOMETRIA
DE JUNTA EM ARESTA**

CHARLES CRISTIAN DE SOUZA

ESTA DISSERTAÇÃO FOI JULGADA PARA OBTENÇÃO DO TÍTULO DE MESTRE EM
CIÊNCIA E ENGENHARIA DE MATERIAIS

ESPECIALIDADE CIÊNCIA E ENGENHARIA DE MATERIAIS E APROVADA EM SUA
FORMA FINAL PELO PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIA E
ENGENHARIA DE MATERIAIS

Prof. Dr. Rer. Nat. Alexandre Lago – Orientador

Prof. Dr. Rer. Nat. Alexandre Lago – Coordenador do Curso

BANCA EXAMINADORA

Prof. Dr.-Ing. Augusto José de Almeida Buschinelli

Prof. Dr.-Ing. Márcio Celso Fredel

Prof. Dr. Eng. Pedro Amedeo Nannetti Bernardini

À todos os pesquisadores do mundo.

AGRADECIMENTOS

O presente trabalho é resultado de um período de estudo realizado no Instituto de Pesquisas de Materiais (*Institut für Materialforschung - IMA*) na Universidade de Bayreuth (*Bayreuth Universität*) situada na Republica Federal da Alemanha. O trabalho foi realizado no Departamento de Materiais Metálicos (*Lehrstuhl Metallische Werkstoffe - LMW*) do referido Instituto de Pesquisas inicialmente dirigido pelo Prof. Dr.-Ing. Hans Wilhelm Bergmann até dezembro de 2000 e atualmente pelo Prof. Dr.-Ing. Günter Ziegler.

Inicialmente gostaria de agradecer ao Professor Bergmann, onde quer que ele esteja, já que não foi possível agradecê-lo antes, pela grande oportunidade oferecida e confiança depositada que posteriormente deram início a este trabalho.

Agradecimento em especial também ao Dott. Ing. Jean Pierre Bergmann, o *Giovanni*, por toda sua experiência, ensinamentos repassados, constante troca de informações, paciência, orientação do trabalho, pelas aulas de alemão, de italiano e pelos vinhos degustados.

Agradeço também ao Dr.-Ing. Hans Waldmann, engenheiro chefe do Instituto, pela oportunidade e confiança depositada e pela orientação, disposição e atenção oferecida sempre que necessária.

Agradecimento especial também ao técnico Hans Lasnner, pelas orientações práticas, ensinamentos repassados e pelas aulas de alemão.

Também agradeço ao Prof. Dr. Alexandre Lago pela orientação do trabalho e à UFSC que através do Programa de Pós-Graduação em Ciência e Engenharia de Materiais PGMat tornou possível a realização desse projeto.

À Nano Endoluminal S.A. pelos seis meses de “férias”.

Agradeço também em especial ao Dott. Ing. Gabriele Casalini, o *Frocio*, pelas aulas de italiano, pelos vinhos e pelo constante intercâmbio de informações durante nossas pesquisas.

À AUDI AG por todo o material utilizado no trabalho, ao Estado Livre da Bavária pela bolsa recebida através da Universidade de Bayreuth durante todo meu período na Alemanha, a todos os pesquisadores e funcionários do IMA – LMW que tive contato, entre eles Dipl. Phys. Michael Guynot, Dr.-Ing. Klaus Müller, Dr.-Ing. Hao Zhang, Dr.-Ing. Andre Eltze, Dipl. Ing.-FH Werner Schrödel, Dipl. Ing. Michel Hasnik, Dipl. Ing. Thilo Bernd, Dipl. Ing. Clemens Wallmann, Helgo Martin, Bernd Dauerling, e Petra Tönnies.

Gostaria de fazer um agradecimento especial à minha mãe, Lila Facchini, e meu irmão, André Luis Facchini de Souza, por todo amor, carinho e incentivo depositado durante a execução deste trabalho.

Não posso esquecer também de agradecer aos irmãos Maisel, criadores da melhor cerveja da Alemanha, a Maisel's Weisse, parceiras sempre presentes que alegravam as confraternizações e festas.

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO.....	1
2	LASER.....	10
2.1	BREVE HISTÓRICO.....	10
2.2	PRINCÍPIO DE FUNCIONAMENTO.....	11
2.3	PROPRIEDADES.....	13
2.4	CARACTERÍSTICAS IMPORTANTES PARA O PROCESSO DE SOLDAGEM.....	14
2.5	SOLDAGEM A LASER.....	15
2.6	APLICAÇÕES NA INDÚSTRIA AUTOMOTIVA.....	19
3	TITÂNIO.....	24
3.1	BREVE HISTÓRICO.....	24
3.2	CARACTERÍSTICAS GERAIS.....	26
3.3	INFLUÊNCIA DOS ELEMENTOS DE LIGA.....	28
3.4	CARACTERÍSTICAS DAS LIGAS.....	32
3.4.1	<i>Ligas α</i>	32
3.4.2	<i>Ligas β</i>	32
3.4.3	<i>Ligas $\alpha\beta$</i>	33
4	SOLDAGEM DE TITÂNIO.....	34
4.1	TIG.....	36
4.2	MIG.....	37
4.3	PLASMA.....	38
4.4	FEIXE DE ELÉTRONS.....	39
4.5	SOLDAGEM DE TITÂNIO A LASER.....	40
5	MATERIAIS E PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL.....	41
5.1	MATERIAIS.....	41
5.2	FONTE DE LASER.....	42
5.3	EXPERIMENTO.....	43
5.4	METALOGRAFIA.....	45
5.5	TESTES DE TRAÇÃO.....	45
5.6	ENSAIO DE TRAÇÃO A ALTA VELOCIDADE.....	48
5.7	ENSAIOS DE FADIGA.....	49
6	RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	49
6.1	MICROESTRUTURA.....	53
6.2	MICRODUREZA.....	57
6.3	RESISTÊNCIA À TRAÇÃO.....	58
6.4	RESISTÊNCIA À FADIGA.....	67
6.5	ASPECTOS GEOMÉTRICOS.....	69
7	CONCLUSÕES.....	75
8	SUGESTÕES PARA NOVOS TRABALHOS.....	76
9	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	78
10	ANEXOS.....	83

LISTA DE TABELAS

Tabela 3.1 - Histórico da redução do titânio.....	25
Tabela 3.2 - Classificação ASTM para titânio e suas ligas [43].....	27
Tabela 3.3 – Propriedades do titânio e suas ligas [40].....	33
Tabela 4.1 – Soldabilidade de titânio e suas ligas.	34
Tabela 4.2 – Propriedades típicas de Ti grau 5 soldado por MIG [40].....	37
Tabela 4.3 – Propriedades típicas de titânio grau 5 soldado por Plasma [15].	38
Tabela 4.4 – Propriedades típicas de titânio soldado por EBW [40].....	39
Tabela 5.1 – Composição química[17].....	41
Tabela 5.2 – Propriedades mecânicas[17].	41
Tabela 5.3 – Fonte de laser usada nos experimentos.	42
Tabela 6.1 – Parâmetros de soldagem.	52
Tabela 6.2 – Propriedades mecânicas.	58

LISTA DE FIGURAS

Figura 1.1 - Douglas Mach2 X3 Stiletto [50].	1
Figura 1.2 - Divisão das aplicações do titânio [15].	2
Figura 1.3 - Previsão do consumo de titânio.	3
Figura 1.4 - Museu Guggenheim em Bilbao na Espanha.	4
Figura 1.5 - Relação resistência-densidade de diferentes materiais.	4
Figura 1.6 - Comparação de diferentes materiais sob mesmo carregamento [18].	5
Figura 1.7 - Exemplos do uso de titânio na indústria automotiva [7, 9, 14, 19].	6
Figura 1.8 - Exemplos de aplicação de juntas em aresta.	8
Figura 1.9 - Juntas sodadas a laser em titânio [7].	8
Figura 2.1 - Componentes de uma fonte de laser.	12
Figura 2.2 - Exemplos de modos de energia [12].	13
Figura 2.3 - Densidade de potência de alguns processos de soldagem.	15
Figura 2.4 - Exemplo de soldagem a laser por condução e <i>keyhole</i> .	16
Figura 2.5 - Soldagem por condução e por <i>keyhole</i> .	17
Figura 2.6 - <i>Tailored blank</i> .	19
Figura 2.7 - Formas de construção [29].	20
Figura 2.8 - Formas construtivas para aplicação do laser na indústria automotiva [29].	21
Figura 2.9 - Seção transversal de um perfil de uma coluna de um automóvel com a união das chapas do teto em solda ponto (esquerda) e por laser (direita).	22
Figura 2.10 - Soldagem por laser (Nd:YAG) do teto do VW Passat.	23
Figura 2.11 - Soldagem por laser (Nd:YAG bombeado a diodo) Volvo.	23
Figura 3.1 - Tipos de estruturas do titânio.	26
Figura 3.2 - Transformação de fase.	28
Figura 3.3. Efeito estabilizador do oxigênio na fase α .	29
Figura 3.4 - Efeito da adição de elementos de liga [4].	30
Figura 3.5 - Efeito da adição de elementos de liga [4].	31
Figura 3.6. Microestrutura Titânio comercialmente puro 250x. [4]	32
Figura 3.7 - Ti6Al4V.	33
Figura 4.1- Contaminação de Ti Grau 2. [15].	35
Figura 4.2 - Contaminação de Ti Grau 5	35
Figura 4.3 - Ti6Al4V (20mm) soldado por MIG. [40]	37

Figura 4.4 - Ti grau 2 (esquerda) e Ti6Al4V (direita) soldado por laser.....	40
Figura 5.1 - Fonte de laser Nd:YAG modelo Rofin Sinar DY044.	42
Figura 5.2 - Esquerda câmara de soldagem e direita fixação das placas dentro da câmara.....	43
Figura 5.3 - Robô KuKa (esquerda) e detalhe da ótica (direita).	44
Figura 5.4 - Exemplo de corpo de prova.	45
Figura 5.5 - Geometria do corpo de prova para ensaio de tração.	47
Figura 5.6 - Máquina de ensaios de tração e exemplos de corpos de prova sob carregamento....	47
Figura 5.7 - Máquina de ensaios Gleeble e corpos de prova.	48
Figura 5.8 - Máquina de ensaios de fadiga.	49
Figura 6.1 - Representação dos corpos de prova.	50
Figura 6.2 - Janela do processo.....	51
Figura 6.3 - Efeito <i>Humping</i>	51
Figura 6.4 - Junta em aresta Ti2, chapas soldadas para os ensaios (esquerda), detalhe dos flanges soldados (direita).....	52
Figura 6.5 - Micrografias de titânio grau 1(esquerda) e titânio grau 2 (direita). Onde p (penetração) e ZTA (zona termicamente afetada).	53
Figura 6.6 - Ti2, junta em aresta, zona fundida e ZTA (esquerda, aumento 50x) zona fundida (direita, aumento 200x).....	54
Figura 6.7 - Ti2, junta em aresta, metal base e ZTA (esquerda, aumento 200x); ZTA (direita, 200x).	54
Figura 6.8 - Junta sobreposta de Ti2 contaminada com oxigênio.....	55
Figura 6.9 - Estrutura martensítica em Ti2 cp.	56
Figura 6.10 - Ensaio de dureza para Titânio grau 2.	57
Figura 6.11 - Diagrama tensão nominal de tração x comprimento do flange.....	59
Figura 6.12 - Diagrama alongamento x comprimento do flange.	59
Figura 6.13 - Diagrama tensão deformação para cp's de titânio grau 1 e grau 2, respectivamente.	60
Figura 6.14 - Deformação do flange para Ti1.	61
Figura 6.15 - Deformação do flange para Ti2.	62
Figura 6.16 - Comparação entre titânio grau 1 e grau 2 para juntas em arestas soldadas por laser de Nd:YAG.	63
Figura 6.17 - Comparação das juntas em aresta de titânio e aço inoxidável.	64
Figura 6.18 - Comparação de diferentes juntas soldadas a laser em titânio grau 2.	65

Figura 6.19 - Ensaio de tração a alta velocidade.....	66
Figura 6.20 - Curva SN titânio grau 2.	67
Figura 6.21 - Curva SN titânio grau 1 e 2 flange 10mm.	68
Figura 6.22 - Geometria de soldagem otimizada.....	69
Figura 6.23 - Imperfeições no cordão de solda (esquerda) e excesso de curvamento (direita).	70
Figura 6.24 - Falta de material na poça de fusão (flange 2mm).	70
Figura 6.25 - Falta de material na poça de fusão (flange 1mm).	71
Figura 6.26 - Flange 2mm soldado.....	71
Figura 6.27 - Posicionamento dos flanges.	72
Figura 6.28 - Folga entre as chapas.	72
Figura 6.29 - Erro de posicionamento do feixe laser.....	73
Figura 6.30 - Fratura da junta em aresta, esquerda Ti grau 1 e direita Ti2 grau 2.....	74

SIMBOLOGIA

Ti1	-	Titânio grau 1
Ti2	-	Titânio grau 2
CO ₂	-	Dióxido de carbono
He	-	Hélio
Ne	-	Neônio
Nd:YAG	-	Neodímio ítrio alumínio garnato
P	-	Potência
v	-	Velocidade
λ	-	Comprimento de onda
TiO ₂	-	Dióxido de titânio
C	-	Carbono
Cl	-	Cloro
Mg	-	Magnésio
hc	-	Hexagonal de corpo centrado
ccc	-	Cúbico de corpo centrado
P	-	Penetração
L	-	Comprimento do flange
S	-	Espessura da chapa
F	-	Força
σ_b	-	Tensão de flexão
σ_z	-	Tensão de tração
Laser	-	Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation
AISI	-	American Iron and Steel Institute
Ar	-	Argônio
EUA	-	Estados Unidos da América
MIG	-	Metal Inert Gas
TIG	-	Tungsten Inert Gas
PAW	-	Plasma Arc Welding
EBW	-	Eletron Beam Welding
LBW	-	Laser Beam Welding
UFSC	-	Universidade Federal de Santa Catarina

LMW	-	Lehrstuhl Metallische Werkstoffe
IMA	-	Institut für Materialforschung
ZTA	-	Zona termicamente afectada
ZF	-	Zona fundida
MB	-	Metal base

RESUMO

Reduzir peso com aumento constante da resistência dos componentes é o lema da indústria automotiva. Com objetivo de reduzir o consumo de combustível e aumentar a relação potência-peso, materiais de baixa densidade devem ser estudados e suas propriedades avaliadas. Devido à boa relação resistência-densidade alumínio, magnésio, titânio e algumas ligas de aço inoxidável tornam-se materiais interessantes para aplicações em estruturas de baixo peso. A possibilidade de juntar ou soldar um material é uma das propriedades mais importantes quando este material deve ser usado em uma grande estrutura ou unido a outros componentes. Devido à boa produtividade e baixas distorções nas peças, o processo de soldagem a laser vem se difundindo nos últimos anos e tem sido empregado com sucesso na indústria automotiva. Aliando a busca de novas aplicações de materiais de baixo peso, especificamente do titânio com a utilização do processo de soldagem a laser, este trabalho tem como objetivo avaliar a soldabilidade e propriedades mecânicas de juntas em aresta de titânio comercialmente puro (Ti ASTM grau 1 e 2) através do processo de soldagem a laser (Nd:YAG). Foram variados os comprimentos de flange (2 a 30mm) da geometria e efetuada a soldagem. Os resultados mostram que titânio comercialmente puro pode ser soldado por laser desde que uma atmosfera controlada (900ppm de oxigênio) seja utilizada. Titânio grau 1 apresenta resultados proporcionais (de 50 a 60% da resistência do material base) aos encontrados para a mesma geometria em aços inoxidáveis austeníticos (AISI 304 e Nirosta[®] H400). Titânio grau 2 apresenta resultados não recomendados (aproximadamente 10% da resistência do material base) para aplicações onde há necessidade de alta resistência da união soldada. Para esses casos são recomendados outros tipos de geometrias de junta.

ABSTRACT

Reducing weight by constant increasing of the components strength is the motto of automotive industry. In order to reduce fuel consumption and increase the ratio power-weight, lightweight materials have to be tested and their workability proofed. Due to their good strength-density ratio, aluminum, magnesium, titanium and some stainless steel alloys play an important role in lightweight structures. The possibility of joining or welding a material is one of the most important properties when the material has to be applied in a big construction or joined to other components. Due the high productivity and small distortions on the workpieces, laser beam welding has been successfully applied in automotive industry. The scope of this work is to evaluate the weldability and mechanical properties of edge laser (Nd:YAG) welded geometries in commercially pure titanium (Ti ASTM grade 1 and 2). Results show that titanium can be easily laser welded provided that a controlled environment (900ppm of oxygen) is used. Flange lengths of the geometry were varied (2 to 30mm) and the edges laser welded. Results show that titanium grade 1 has a proportional behavior (joint strength of 50 to 60% base material strength) to some austenitic stainless steels (AISI 304 and Nirosta[®] H400). Edge laser welded joints of titanium grade 2 are not recommended for applications where high strength is required. Results show strength of around 10% of the base material strength. Other joint geometries are suggested for those applications.

1 Introdução

Desde 1930 vários pesquisadores e indústrias dos Estados Unidos da América e da Europa vêm desenvolvendo e estimulando o uso de titânio e suas ligas. Em 1950 o titânio foi empregado pela primeira vez na indústria de aeronaves para a fabricação do chamado Douglas Mach 2 X-3 Stiletto (Figura 1.1) pela empresa Douglas Aircraft Company nos Estados Unidos da América [20, 26] . A partir daquela data o titânio e suas ligas começaram a fazer história inicialmente nas aplicações militares e aeroespaciais. Com o desenvolvimento dos processos de extração e processamento, o titânio tornou-se um material extremamente interessante para as mais diversas aplicações nos mais diversos setores.

Nos últimos anos notou-se um crescente aumento no interesse de muitos setores pelo titânio e suas ligas. O titânio deixou de ser considerado um material exótico, caro ou novo. Em todos os campos onde se deseja resistência mecânica aliada a baixa densidade (*resistência específica*), excelente resistência à corrosão e/ou biocompatibilidade, titânio e suas ligas são recomendados. Atualmente o titânio e suas ligas vêm desempenhando um importante papel nos mais diversos campos, sejam eles: indústria química, aeroespacial, automotiva, militar, medicina e artigos esportivos (Figura 1.1).



Figura 1.1 - Douglas Mach2 X3 Stiletto [50].

Os maiores consumidores de titânio no mundo são os Estados Unidos com 50% do total mundial seguidos pela Europa com 26% e Japão com 13%. Especialistas prevêem um aumento expressivo no consumo de titânio para esta década [46].

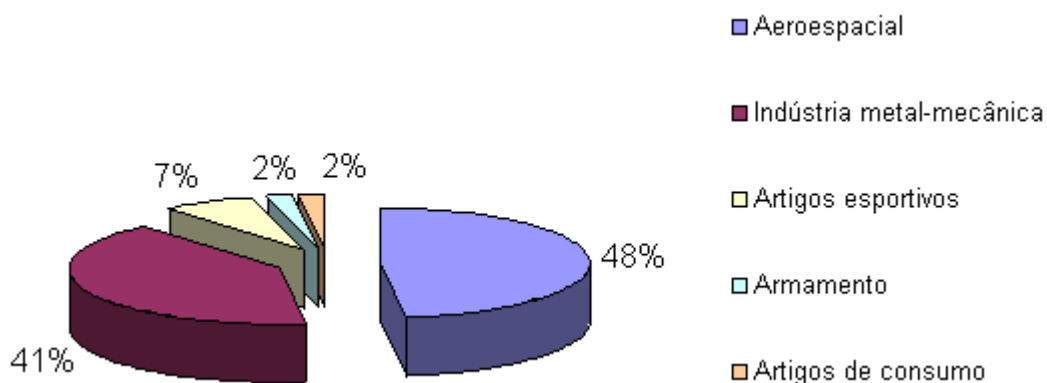


Figura 1.2 - Divisão das aplicações do titânio [15].

A indústria de aviação comercial vem crescendo a cada dia que passa e a necessidade de um maior número de aeronaves ou de aeronaves mais espaçosas é notório. Fazendo uma previsão para os próximos vinte anos [46], será necessário construir 18000 aeronaves das quais 7000 para repor as atuais e 11000 novas. Isso significa aproximadamente 48000 novos motores. Boeing e Airbus estão cada vez mais usando titânio em suas aeronaves. Como exemplo pode-se citar o Boeing 777 cuja quantidade de titânio empregada é algo em torno de 50 toneladas o que equivale aproximadamente 9% do peso da aeronave vazia [26]. De acordo com *Zeloni* [46], estes desenvolvimentos representarão um consumo anual pelo setor de aproximadamente 35 mil toneladas de produtos em titânio em 2002, contra os 18 mil do ano de 2001.

Já o setor militar vem desde 1940 utilizando o titânio em aeronaves na força aérea americana [26, 28] com um pico na década de 80 no período de guerra fria [46]. Em 1960 o Phantom F-4 já possuía 9% do peso em titânio. Hoje o F22 apresenta 39% do seu peso em titânio. O SR-71 Blackbird, recordista de altitude e velocidade da força aérea americana apresenta 90% do seu peso em titânio [26].

Como visto, pode-se prever o aumento do uso de titânio não somente na indústria de aviação comercial, mas também na indústria de aviação militar (Figura 1.3). Titânio e suas ligas também são aplicados na produção de tanques militares e helicópteros do exército americano [28].

O consumo de titânio pela indústria vem crescendo gradativamente e nos últimos anos vem sobrepondo às aplicações aeronáuticas e militares. Um significativo desenvolvimento ocorre no setor de energia, indústrias químicas e indústrias de alimentos onde o titânio é usado para a fabricação de tanques, trocadores de calor, tubulações, válvulas, etc.

O setor de bens de consumo tem encontrado bons resultados com aplicações do titânio. Gabinetes de computadores, relógios, jóias e bijuterias, armações de óculos são os usos mais comuns.

O setor esportivo também encontra no titânio um material com excelentes propriedades e inúmeras aplicações. Raquetes de tênis, tacos de golfe, quadros de bicicletas, trenós, equipamentos de montanhismo são exemplos de aplicações.

No setor médico, o titânio encontra um grande potencial devido a sua excelente resistência à corrosão e biocompatibilidade. O uso de ligas de titânio na fabricação de próteses é muito difundido. Parafusos e implantes dentários em titânio também apresentam grande aplicação. Marca-passos, coração artificial, próteses das mais diversas, cadeiras de roda são outros exemplos de aplicações do titânio no setor médico [26].

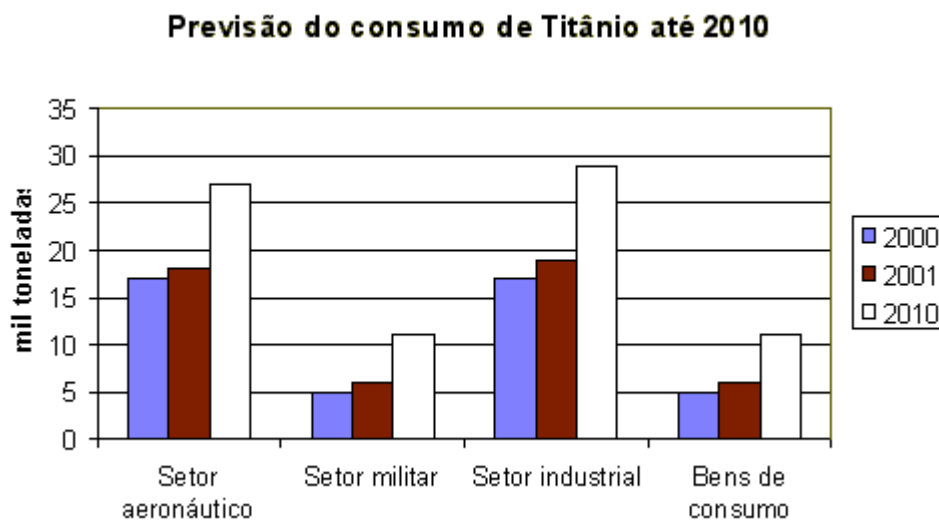


Figura 1.3 - Previsão do consumo de titânio.

[46]

Uma das mais recentes aplicações do titânio pode ser encontrada no setor de arquitetura e construção. O museu Guggenheim em Bilbao na Espanha é coberto por aproximadamente 30.000 m² de chapas em titânio criando uma fachada extremamente bela e futurista (Figura 1.4). Foram usadas na obra aproximadamente 33.000 lâminas de 0,3mm em titânio [22].

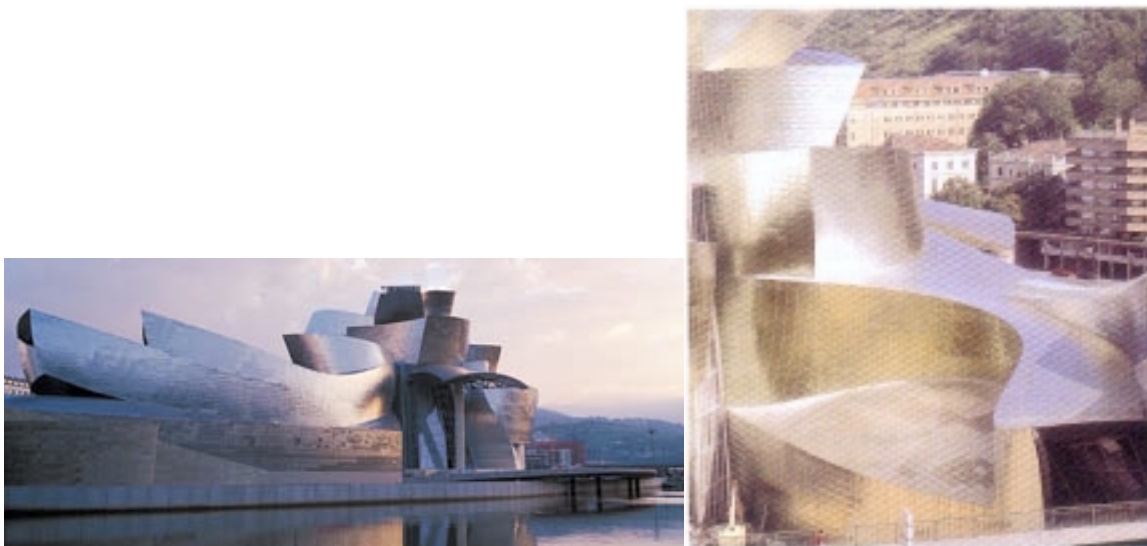


Figura 1.4 - Museu Guggenheim em Bilbao na Espanha.

O titânio é um material de grande potencial e seu campo de aplicação vem aumentando a cada dia.

A alta relação resistência-densidade faz do titânio um material de grande importância para a indústria automotiva (Figura 1.5).

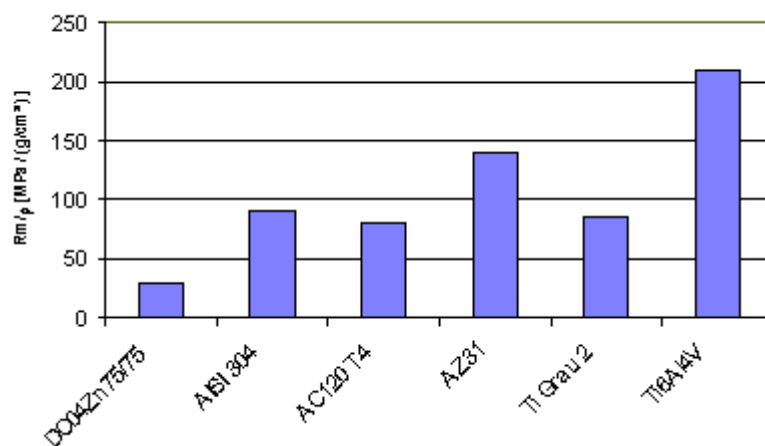


Figura 1.5 - Relação resistência-densidade de diferentes materiais.

[7].

Reduzir peso com o aumento constante da resistência dos componentes é o lema da indústria automotiva. A fim de reduzir o consumo de combustível e aumentar a performance dos automóveis o peso total do veículo é reduzido. Isso significa que materiais de baixo peso e suas ligas devem ser caracterizados e sua trabalhabilidade testada. Devido à sua baixa densidade alumínio, magnésio e titânio desempenham um papel importante em estruturas de baixo peso e por isso a indústria automotiva vem aumentando o emprego desses materiais na fabricação de veículos automotores.

A Figura 1.6 mostra a comparação de diferentes materiais entre eles magnésio, alumínio, titânio e aço, sob mesmo carregamento estático. Na primeira coluna as barras apresentam mesma seção transversal diferente peso e rigidez. Na segunda coluna as barras possuem o mesmo peso com diferente seção transversal e diferente rigidez. Na terceira coluna as barras têm a mesma rigidez mas o peso e a seção transversal são diferentes.

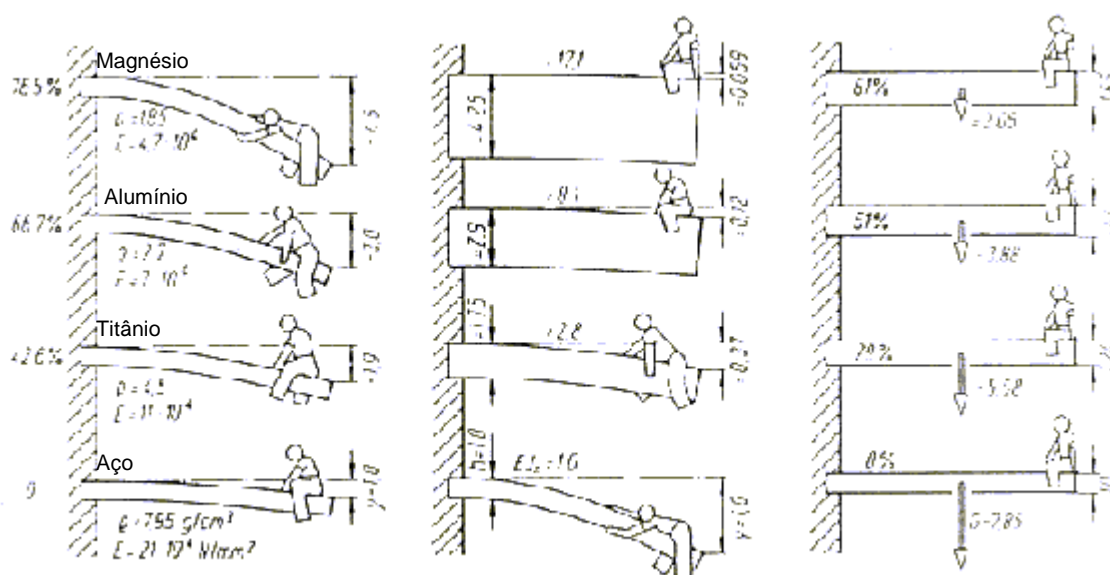


Figura 1.6 - Comparação de diferentes materiais sob mesmo carregamento [18].

O uso de titânio e suas ligas para esse tipo de aplicação vêm crescendo rapidamente nos últimos anos e pode ser observada na fabricação de bielas, válvula, molas de válvulas, virabrequins, suspensão, molas de suspensão, caixa de câmbio, sistemas de exaustão, etc.

Pesquisas recentes da indústria automotiva vêm investigando e desenvolvendo processos para o uso de titânio e suas ligas em veículos automotores. Como exemplo pode-se citar o uso de titânio pela Corvette, onde todo o sistema de exaustão do Corvette Z06 é produzido em titânio, o que economizou pouco mais de 8kg no peso total do novo veículo. Isso representou aproximadamente 11% do objetivo de redução total de peso do novo veículo[19]. Outros exemplos de aplicações do titânio na indústria automotiva estão no sistema de suspensão do Volkswagen Polo [7] e no sistema de transmissão dos modelos da Ferrari [14] (Figura 1.7).



Figura 1.7 - Exemplos do uso de titânio na indústria automotiva [7, 9, 14, 19].

Com o crescente aumento de aplicações do titânio na indústria automotiva, torna-se necessário o desenvolvimento de técnicas de fabricação para serem aplicadas na transformação do material. Dentre as técnicas de fabricação a soldagem é uma das mais importantes na área industrial, pois a capacidade de se unir ou soldar um material é umas das principais propriedades quando este material é usado em uma grande estrutura ou unido a outros componentes.

Uma das variantes da soldagem é a soldagem por laser, processo que teve início a partir de 1960 e atualmente vem substituindo os processos convencionais no setor industrial, principalmente na indústria automotiva. O Processo de soldagem por laser apresenta algumas vantagens em relação aos processos convencionais. Entre elas podemos destacar: pequena zona termicamente afetada, alta velocidade de soldagem e fácil automação. As vantagens em relação aos processos convencionais serão abordadas nas próximas seções.

Uma das possíveis aplicações do titânio na indústria automotiva é em partes estruturais e em tanques de combustíveis. Atualmente os tanques de combustíveis são confeccionados em material polimérico (polietileno de alta densidade - PEAD), mas devido a normas ambientais americanas e européias que estarão em vigor a partir de 2004 este tipo de material encontrará dificuldades para se enquadrar às normas devido a sua permeabilidade [2]. A US Emission Standards controla o limite de emissão de hidrocarbonetos de todo o veículo. A emissão se dá através de tubulações de combustível e grande parte através do tanque, pois este não é totalmente impermeável [3].

O limite atual estabelecido pela norma é de 2g de hidrocarbonetos a cada 24h e para 2004 a norma prevê uma redução de 75% deste valor [EPA/US Standards]. Outra vantagem na utilização de titânio para a confecção de tanques é na economia de peso gerada. O tanque atual de PEAD possui uma parede entre 4 e 8mm de espessura, um peso total de aproximadamente 9kg e gera uma emissão de 0,3g/24h de hidrocarbonetos. Um tanque de aço inoxidável tem uma espessura de 0,6 a 0,8mm, peso de aproximadamente 7kg e emissão nula. O mesmo tanque confeccionado em titânio teria emissão também nula e pesaria em torno de 4kg [9] além de ser 100% reciclável. Uma economia de peso tendo em vista os objetivos da indústria automotiva de redução de peso.

O tanque feito em material metálico é produzido através de processos convencionais e especiais de conformação. Fabricado em duas partes, superior e inferior, que posteriormente são soldadas.

A geometria de soldagem nesse caso é a de junta em aresta, podendo ser realizada através de vários processos. A Figura 1.8 mostra alguns exemplos de aplicações da geometria de junta em aresta.



Figura 1.8 - Exemplos de aplicação de juntas em aresta.

Atualmente pesquisadores vêm analisando o comportamento de diferentes juntas soldadas em titânio como pode ser observado na Figura 1.9.

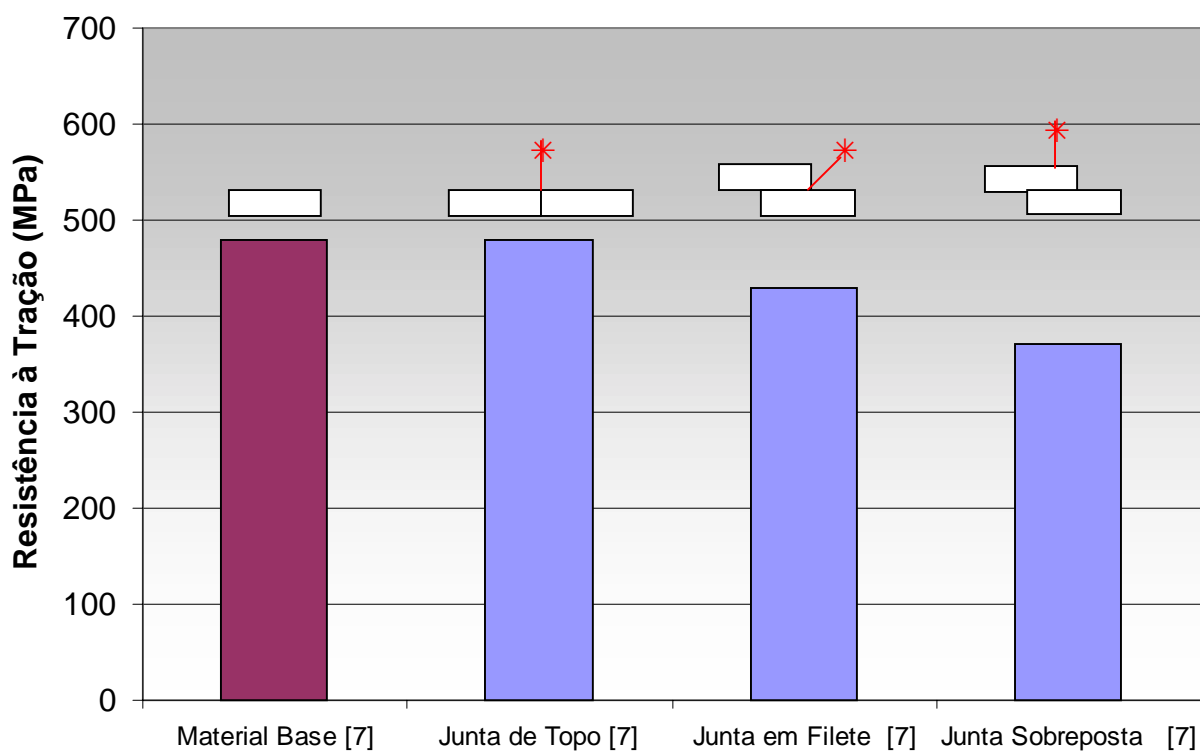


Figura 1.9 - Juntas soldadas a laser em titânio [7].

A necessidade de investigações da soldagem na geometria de junta em aresta em titânio pelo processo de soldagem por laser motivou a realização deste trabalho. O trabalho foi realizado especificamente para a empresa AUDI AG nas instalações do Institut für Materialforschung – Lehrstuhl Metallische Werkstoffe LMW – IMA (Instituto de Pesquisa de Materiais – Departamento de Materiais Metálicos) da Universität Bayreuth (Universidade de Bayreuth), na República Federal da Alemanha.

Para tal aplicação ser considerada industrialmente viável, são necessárias investigações técnicas e econômicas do processo assim como das juntas soldadas. Este trabalho baseou-se na investigação do processo de soldagem por laser da geometria de junta em aresta em titânio. Assim teve-se como objetivo principal do estudo:

- Avaliar as propriedades mecânicas de elementos soldados por laser de Nd:YAG em titânio na geometria de junta em aresta.

E como objetivos específicos:

- Comparar o comportamento mecânico de dois tipos de titânio comercialmente puro, Titânio ASTM Grau 1 e Titânio ASTM Grau 2;
- Avaliar o comportamento mecânico da junta soldada com a variação da geometria;
- Comparar os resultados obtidos com resultados publicados de outras geometrias em titânio;
- Comparar os resultados obtidos com resultados publicados da mesma geometria em aço inoxidável.

2 Laser

2.1 Breve histórico

A palavra LASER é o acrônimo do termo em inglês *Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation*, isto é, Amplificação da Luz pela Emissão Estimulada de Radiação.

A evolução histórica do laser pode ser resumida nos fatos relacionados abaixo:

1917 – Einstein publica a teoria da emissão estimulada

1954 – Townes e Shawlow criam o *Maser*

1958 - Townes e Shawlow publicam suas hipóteses para a construção de um laser

1960 – Maimann constrói o primeiro laser

1961 – Javan e Herriot desenvolvem laser de HeNe

1962 – Rediker, Nathan e Hall desenvolvem o laser de diodo

1964 – Patel constrói o laser de CO₂

1964 – Geusic desenvolve o laser Nd:YAG

Década de 70 e 80 – Utilização industrial do laser de CO₂ e Nd:YAG

Década de 80 e 90 – Desenvolvimento de novas fontes de laser

Década de 80 e 90 – Disseminação do uso de laser em vários campos.

O comprimento de onda e a potência de saída de um determinado laser definirão sua aplicação. Atualmente os lasers são aplicados nos mais diversos campos, tais como:

- Optoeletrônicos -CD players; CD-ROM drivers;
- Medicina – oftalmologia; dermatologia; odontologia;
- Medição e Instrumentação – alinhamento de máquinas; medidas superficiais;
- Fabricação – corte; soldagem; tratamento superficial;

2.2 Princípio de funcionamento

Fonte de *Laser*

A fonte de laser é formada por uma cavidade dividida em três partes: (Figura 2.1)

- Meio ativo;
- Fonte de energia;
- Ressonador ótico.

Meio Ativo

É o meio onde a luz será gerada, através da inversão de população e emissão estimulada, e será amplificada. O meio ativo pode ser sólido, líquido ou gasoso. Como exemplo destacam-se:

- Sólido – Nd:YAG, Rubi;
- Líquido – Rodemina 6G;
- Gasoso – CO₂, HeNe, Excimer.

Fonte de Energia

Produz a energia necessária para estimular os átomos do meio ativo e propiciar a inversão de população e emissão estimulada. Dependendo do meio ativo utilizado, a fonte de energia pode ser elétrica ou ótica. Entre algumas fontes de energia, destacam-se: lâmpadas de xenônio, passagem de correntes elétricas pelo meio ativo, etc.

Ressonador Ótico

Consiste de dois espelhos montados em lados opostos do ressonador. O tamanho e forma do ressonador variam de acordo com o tipo de meio ativo utilizado e potência do aparelho. Os espelhos apresentam reflexões diferentes, sendo um deles com 100% de reflexão e outro com até 98%. Entre os espelhos encontra-se o meio ativo.

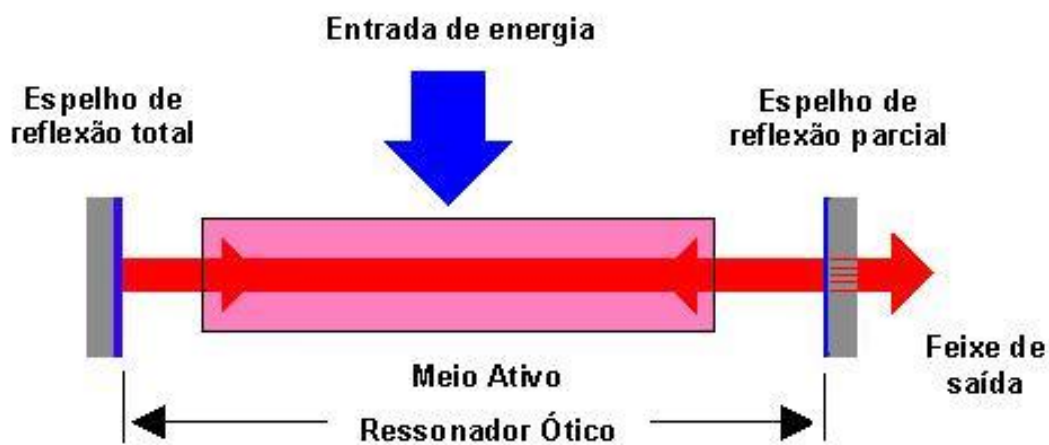


Figura 2.1 - Componentes de uma fonte de laser.

De acordo com o tipo das partes componentes utilizadas na fabricação de uma fonte de laser, a mesma poderá apresentar regime contínuo ou pulsado. Muitas fontes não podem trabalhar em regimes contínuos devido à sollicitação térmica dos materiais empregados na sua fabricação.

O meio ativo, a fonte de energia e o tipo de construção do ressonador ótico definirão as características físicas do feixe laser gerado pela respectiva fonte. Entre essas características destacam-se: comprimento de onda, modo e intensidade. Desse modo os feixes de laser podem ser diferentes para os diversos modelos de fontes.

2.3 Propriedades

A energia de um feixe laser é uma forma de energia eletromagnética que apresenta algumas características bem definidas, tais como:

Comprimento de Onda – característica do feixe que depende do tipo de material utilizado como meio ativo;

Coerência – é a organização do feixe no espaço e tempo. Essa característica é importante em aplicações de medições, pois determina a precisão com que será possível a realização de medidas de distâncias e deformações;

Modo e diâmetro – determina a distribuição de energia transversal no feixe de laser. É representado por TEM_{p0} (*Transverse Eletromagnetic Mode*). Lasers com TEM_{p0} maiores têm maior diâmetro no foco e por consequência menor densidade de energia. (Figura 2.2 - Exemplos de modos de energia [12]).

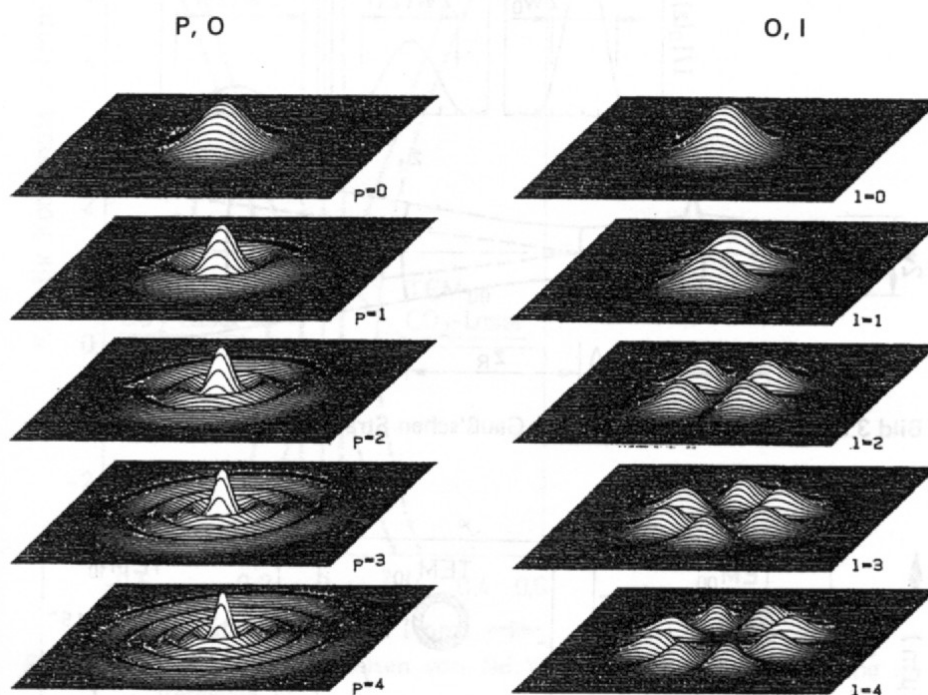


Figura 2.2 - Exemplos de modos de energia [12].

2.4 Características importantes para o processo de soldagem

O laser pode ser considerado uma fonte de alta densidade de energia obtida, como descrito anteriormente, através da concentração da luz. Para o processo de soldagem o laser apresenta características diversas e importantes não encontradas nos processos convencionais.

O feixe de saída da fonte laser não é conseguido através de corrente elétrica, não requer que o material a ser trabalhado seja condutor eletromagnético, não é influenciado por eletromagnetismo. Dessa forma podem ser realizadas soldas em materiais cerâmicos, materiais plásticos ou soldas de materiais dissimilares, o que é complicado para os processos convencionais de soldagem.

O laser consegue depositar energia de forma controlada e posicionada. O ponto focal, podendo ser na ordem de microns de metro de diâmetro, pode ser posicionado nas mais diversas e variadas peças fazendo com que soldas micrométricas possam ser efetuadas com um mínimo de distorção e excelentes propriedades metalúrgicas.

Sistemas de posicionamento computadorizados acoplados às fontes laser tornam o processo altamente preciso.

Como não existe contato físico entre o feixe laser e o material a ser processado, o processo de soldagem a laser é considerado um processo limpo do ponto de vista da contaminação dos materiais que estão sendo trabalhados. Assim como nos processos convencionais de soldagem, o laser pode ser empregado em atmosferas controladas para evitar oxidação da solda, e ao contrário do processo de soldagem por feixe de elétrons não necessita de câmara de vácuo para obter propriedades similares ao material soldado.

2.5 Soldagem a Laser

Soldagem a laser é um processo de união que utiliza o laser como fonte de energia. Sua utilização industrial no processamento de materiais vem crescendo nos últimos anos. A aplicação da soldagem a laser iniciou com o desenvolvimento das fontes de alta potência de laser de CO₂ na década de 70 [32].

O feixe de laser é umas das fontes de maior densidade de energia disponíveis hoje para a indústria. Sua densidade de energia é comparável ao feixe de elétrons [21, 41](Figura 2.3) e como consequência o processo de soldagem a laser apresenta algumas vantagens em relação aos processos convencionais de soldagem, entre elas pode-se destacar:

- Distorções mínimas nas peças;
- Pequena zona termicamente afetada;
- Altas velocidades de soldagem;
- Soldagem de materiais dissimilares;
- Boa repetibilidade;
- Facilidade na automação do processo.

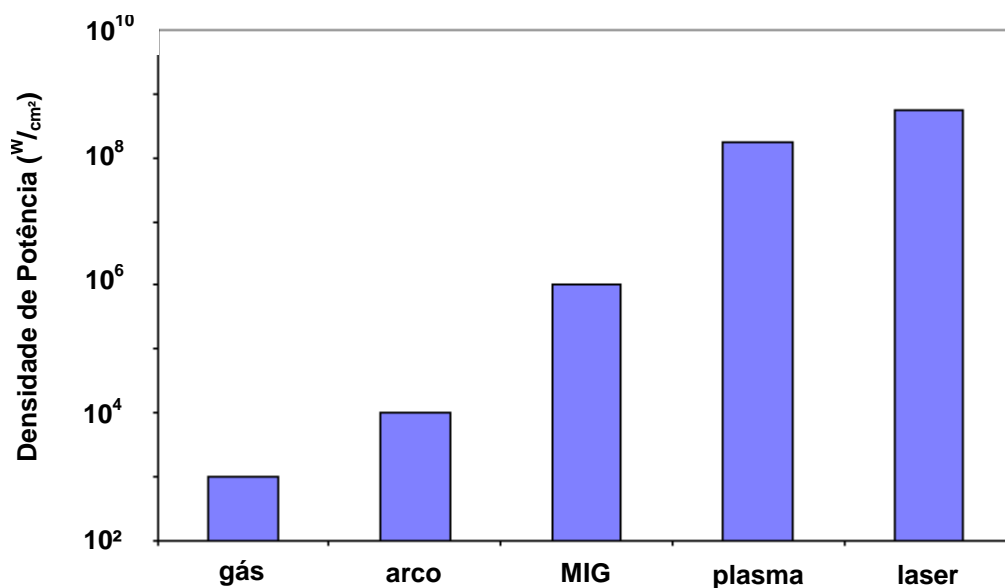


Figura 2.3 - Densidade de potência de alguns processos de soldagem.

O surgimento de novas fontes de laser tornou possível na última década a introdução da tecnologia de soldagem a laser na produção em série. As diversas vantagens do processo, como descrito anteriormente, tornam o laser atrativo para indústrias de alta produção, em particular a indústria automotiva. As primeiras aplicações de laser de alta potência na indústria automotiva iniciaram no começo da década de 90 com laser de CO₂. Em 1996, os automóveis da BMW série 5 já apresentavam 11m de soldagem a laser [9]. Atualmente diversas indústrias automotivas utilizam o laser em suas linhas de produção como é o caso da Porsche, Volvo, Audi, BMW e Volkswagen [7, 47, 48].

O processo de soldagem a laser pode ser dividido em duas variantes:

- Soldagem por condução;
- Soldagem profunda ou soldagem por *keyhole*.

A diferença entre as duas variantes está na densidade de energia utilizada para efetuar a soldagem (Figura 2.4 - Exemplo de soldagem a laser por condução e *keyhole*).

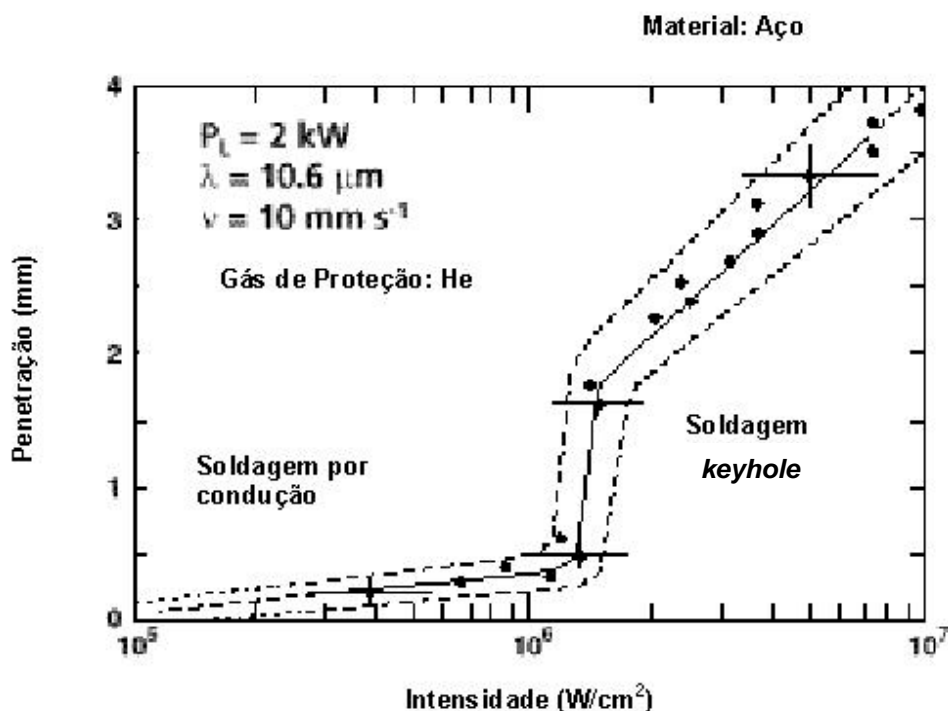


Figura 2.4 - Exemplo de soldagem a laser por condução e *keyhole*.

[Bergmann H., Universität Bayreuth]

Soldagem por Condução

Na soldagem por condução, a densidade de energia utilizada no processo é suficiente para fundir o material a ser soldado.

Soldagem por *Keyhole*

Na soldagem profunda, denominada por *Keyhole Effect* (Efeito buraco de fechadura, devido ao formato obtido na região fundida da solda lembrar um buraco de fechadura) utiliza altas densidades de energia, podendo efetuar soldagens com penetrações maiores.

De forma semelhante à soldagem por feixes de elétrons e plasma, surgem capilares de vapor e plasma na região de interação do feixe laser com o material. Dessa forma, o *keyhole* comporta-se como um corpo negro ótico, no qual a radiação que penetra no buraco é sujeita a múltiplas reflexões antes de escapar e sair do mesmo. Como consequência, quase todo o feixe é absorvido. Isso pode ser positivo ou negativo quando materiais com alta refletividade são soldados, pois é necessária uma alta potência para iniciar a solda e logo que o *keyhole* se forma a refletividade baixa de 97% para 2% [41]. A Figura 2.5 exemplifica os dois tipos de soldagem.

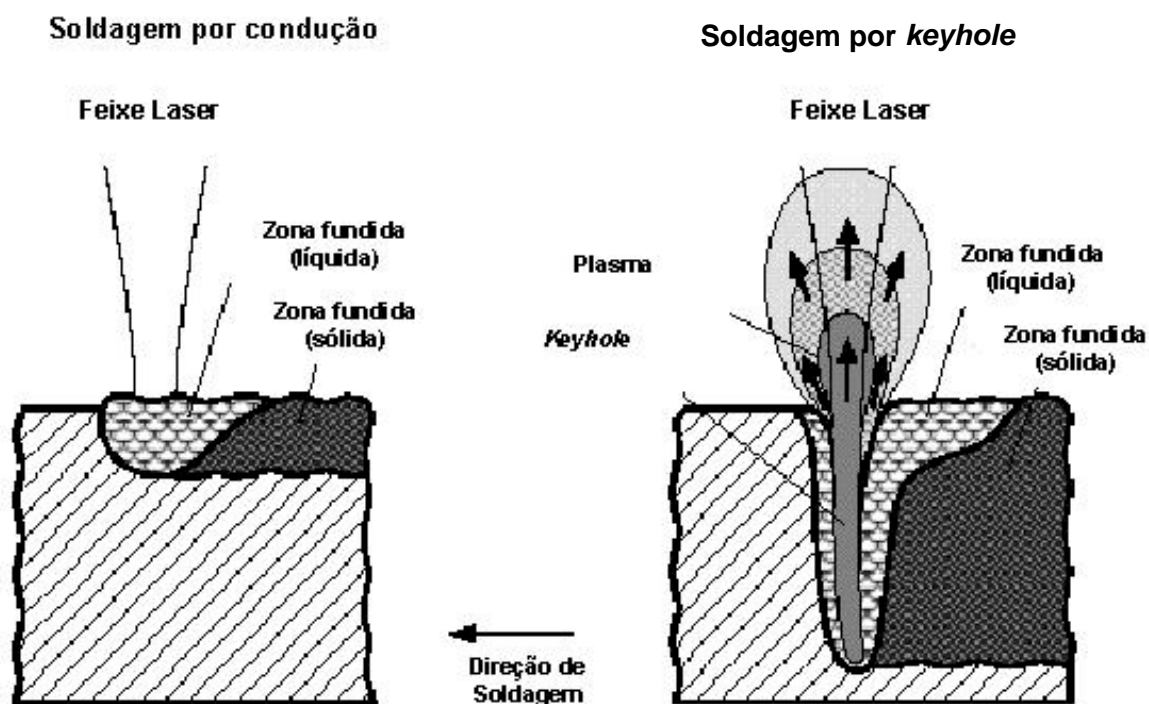


Figura 2.5 - Soldagem por condução e por keyhole.

Parâmetros de Processo

Os seguintes parâmetros de processo determinam a qualidade do processo de soldagem a laser [11, 41]:

- **Característica do feixe de laser** - potência, foco, distribuição de energia, comprimento de onda, inclinação;
- **Velocidade de soldagem**;
- **Atmosfera gasosa** - tipo de gás, vazão;
- **Propriedades do material a ser soldado** – térmicas, óticas, químicas e mecânicas;
- **Tipo de geometria.**

2.6 Aplicações na Indústria Automotiva

A soldagem a laser apresenta inúmeras aplicações nos dias atuais. Uma das principais aplicações industriais da soldagem a laser está no setor automotivo onde são necessárias algumas características não encontradas nos processos convencionais, tais como:

- Geometria profunda e estreita da região de solda;
- Pequenas distorções da peça;
- Alta velocidade de soldagem;
- Pequena zona termicamente afetada;
- Boa estanqueidade da solda.

Setores da indústria aeroespacial também encontram aplicações para a soldagem a laser. A soldagem a laser irá, em pouco tempo, substituir os rebites utilizados na fixação da fuselagem de aeronaves. A operação de rebiteamento da fuselagem no Airbus 318 é estimada em 40% do total de homens-hora da fabricação da aeronave [33, 34].

Outra vantagem da soldagem a laser atualmente bastante difundida e utilizada pela indústria automotiva é a utilização de *tailored blanks*, ou seja, chapas de diferentes espessuras ou materiais que são soldadas antes da estampagem [42] (Figura 2.6).

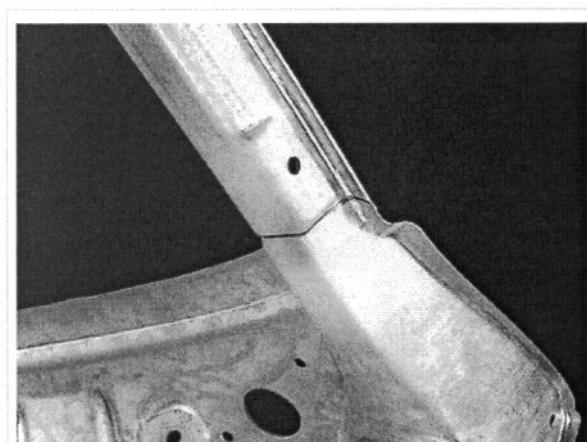


Figura 2.6 - *Tailored blank*.

[42]

A indústria automotiva trabalha com diversas formas complexas estampadas em metal. Diversas dessas formas não podem ser estampadas ou conformadas em uma única peça por isso é necessário um processo de união das peças (Figura 2.7). Diversos processos de união podem ser utilizados para se obter a forma final desejada, entre eles parafusos, rebites ou soldagem.

Como muitas peças devem apresentar propriedades como rigidez, juntas vedadas, boa aparência e às vezes flanges para fixação de outras partes, frequentemente a soldagem é o processo mais adequado[29]. As propriedades do laser como fonte de soldagem tornam o processo ideal para estas aplicações.

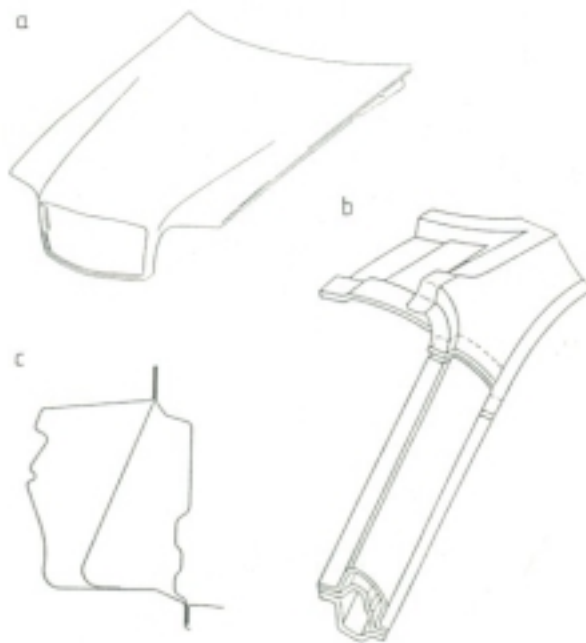


Figura 2.7 - Formas de construção [29].

A indústria automotiva trabalha basicamente com chapas finas que são conformadas e soldadas ou soldadas e conformadas [*tailored blank*] dependendo das aplicações ou finalidades. Existem inúmeras maneiras de se unir chapas finas, ou seja, inúmeros tipos de juntas que podem ser usadas no processo. Na Figura 2.8 pode-se observar alguns dos diversos tipos de junta e formas de união dos elementos utilizados na fabricação de elementos da indústria automotiva. Cada geometria apresenta características específicas e parâmetros de processo variados que afetarão consideravelmente as propriedades mecânicas da junta soldada.

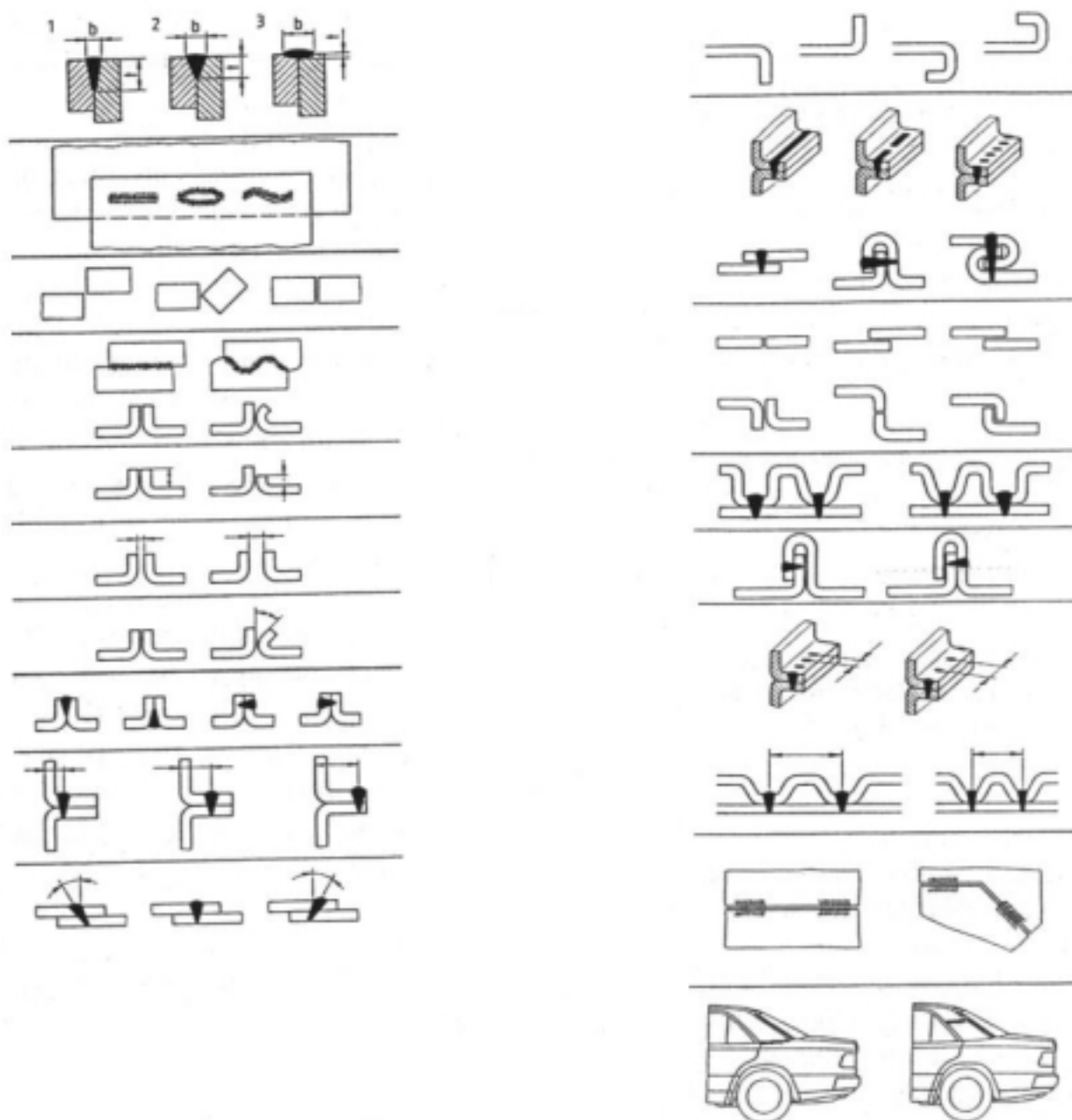
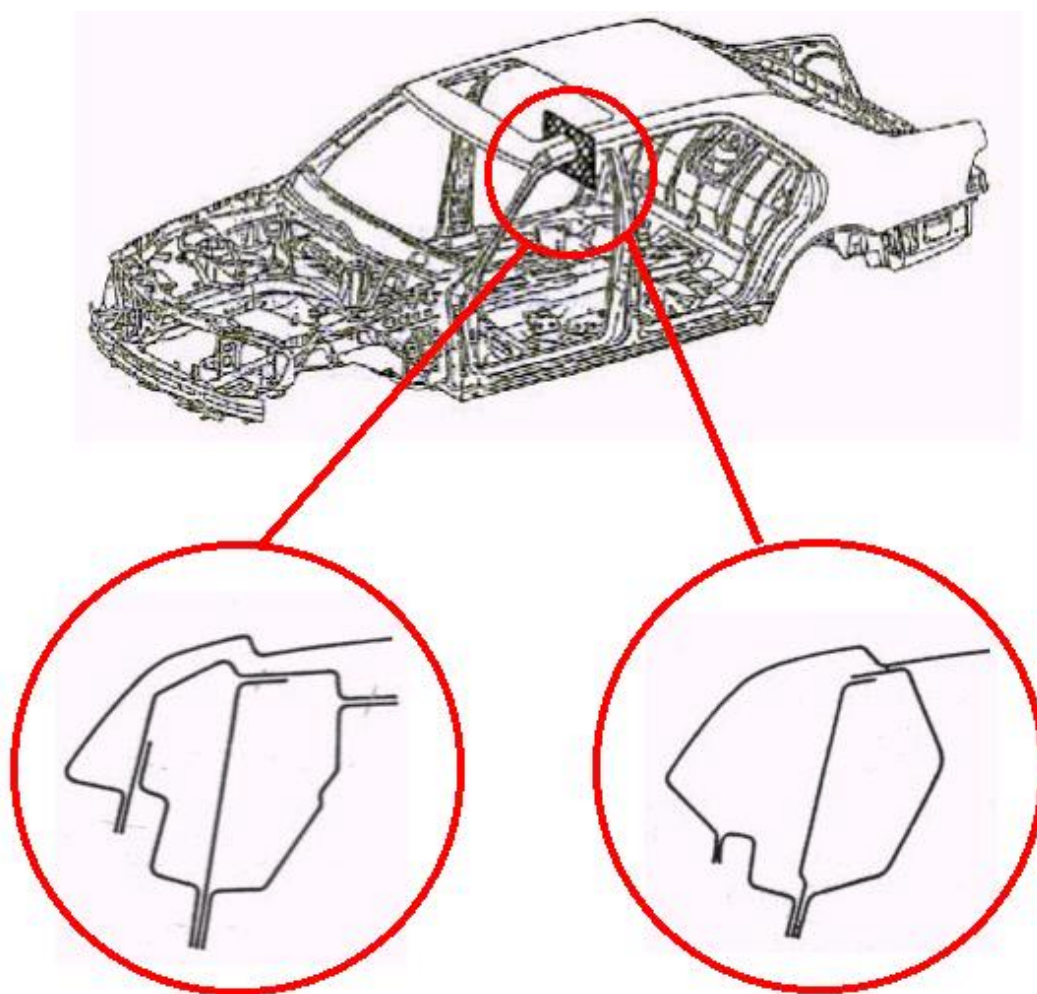


Figura 2.8 - Formas construtivas para aplicação do laser na indústria automotiva [29].

Dependendo da aplicação do processo de soldagem a laser na indústria automotiva, existe uma considerável diminuição do peso final da estrutura assim como um aumento da rigidez da mesma. Como exemplo pode-se observar na Figura 2.9 a comparação do perfil da estrutura soldada por soldagem ponto e por laser para a mesma aplicação [29].



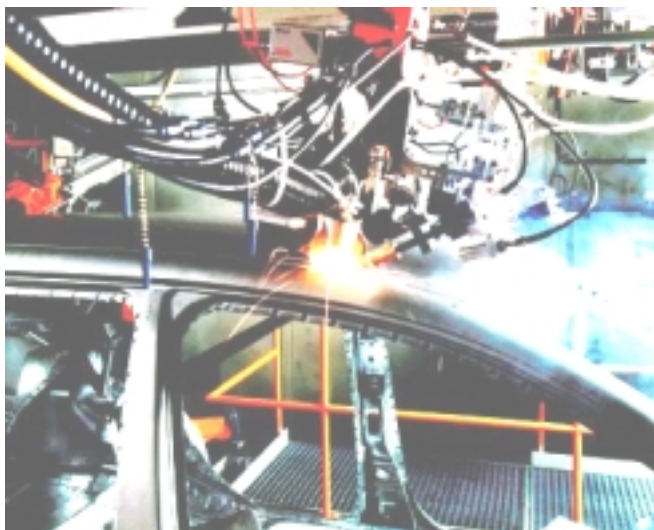
Soldagem elétrica por ponto

Soldagem por laser

Figura 2.9 - Seção transversal de um perfil de uma coluna de um automóvel com a união das chapas do teto em solda ponto (esquerda) e por laser (direita).

[29].

A coluna soldada por ponto necessita da inclusão de mais uma chapa para obtenção das mesmas propriedades mecânicas obtidas pela estrutura soldada por laser. São usadas 4 perfis na estrutura soldada por laser e 5 na estrutura soldada por ponto implicando no peso final da estrutura mais elevado. As figuras 2.10 e 2.11 mostram exemplos do mesmo tipo se soldagem executadas pela Volkswagen e Volvo respectivamente.



**Figura 2.10 - Soldagem por laser (Nd:YAG) do teto do VW Passat.
[47].**



**Figura 2.11 - Soldagem por laser (Nd:YAG bombeado a diodo) Volvo.
[48].**

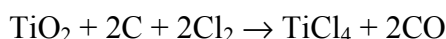
3 Titânio

3.1 Breve Histórico

Titânio é o nono elemento mais abundante na crosta terrestre e o quarto elemento metálico mais abundante [26, 43]. Na natureza o titânio é encontrado na forma de rutilo (dióxido de titânio-TiO₂), ilmenita (titanato de ferro-FeTiO₃) e anatásio. Ilmenita é comum em regiões rochosas e os principais depósitos são encontrados em regiões da África do Sul, Noruega, Finlândia, Austrália, Canadá, Brasil e Estados Unidos.

De todo o titânio extraído e processado, apenas 5% é utilizado para a produção de titânio metálico. O restante 95% é utilizado na fabricação de TiO₂. O dióxido de titânio é usado como pigmento de tintas, papéis, plásticos e em alimentos e cosméticos [26].

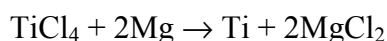
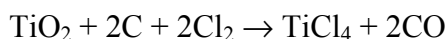
O titânio foi descoberto em 1790 pelo Reverendo William Gregor, geólogo amador que identificou o elemento nas areias escuras da Cornualha, costa da Inglaterra. Gregor registrou na época que o mineral continha uma substância metálica desconhecida. Cinco anos mais tarde um químico alemão chamado Martin Heinrich Klaproth reconheceu um dióxido da mesma substância no minério rutilo (TiO₂) e o batizou como “Titânio”, em homenagem aos Titãs, poderosos Deuses da mitologia Grega, os primeiros filhos da Terra, que tinham enorme resistência. Entretanto seus esforços em isolar o metal falharam [20, 26, 43]. Muitas tentativas foram feitas com o objetivo de isolar o metal, mas todas resultaram em um material extremamente frágil [20]. Em 1910, o químico Norte Americano M.A. Hunter conseguiu isolar o metal e marcou o nascimento da indústria do titânio [26]. O processo Hunter, como ficou posteriormente conhecido, envolvia a mistura do minério TiO₂ com coque e cloro sob calor conforme a Equação 3.1.



Equação 3.1 - Redução do Titânio.

Dessa forma era, produzido o tetracloreto de titânio (TiCl₄), que então era reduzido com sódio. Nessa época o titânio era usado principalmente como elemento de liga em aços.

Depois de vários anos de pesquisas e tentativas, em 1937 Dr. Wilhelm Kroll, de Luxemburgo, inventou o primeiro método viável em larga escala para a redução de titânio. O processo de produção Kroll, como ficou conhecido e ainda hoje é assim chamado, utiliza o magnésio ao invés do sódio como agente redutor de acordo com a Equação 3.2



Equação 3.2 - Redução do Titânio.

A partir do final de 1930 inúmeros investimentos de indústrias e do governo Norte Americano impulsionaram o desenvolvimento do titânio e suas ligas [20].

A tabela seguinte mostra um breve resumo da evolução histórica na tentativa de redução do titânio.

Tabela 3.1 - Histórico da redução do titânio.

<i>Ano</i>	<i>Pesquisador</i>	<i>Método de Redução</i>
1825	J.J. Berzelius	K_2TiF_6 com Na
1855	H. St. Claire Deville	TiCl_4 com Na
1887	L. Nilson e O. Petterson	TiCl_4 com Na
1892	K. Seubert e A. Schmidt	TiCl_4 com Mg sobre CO_2
1910	M. A. Hunter	TiCl_4 com Na
1914	D. Lely e L. Hamburger	TiCl_4 com Na
1925	A.E. van Arkel e J.H. DeBoer	TiI_4
1937	W.J. Kroll	TiCl_4 com Ca e também com Mg, sob 1atm Ar

3.2 Características Gerais

O titânio é um material alotrópico, isto é, com a variação da temperatura apresenta mudança da estrutura cristalina. Na temperatura ambiente apresenta uma estrutura cristalina hexagonal compacta (hc) denominada fase α , estável até 880°C, ponto onde se transforma na fase β , que apresenta uma estrutura cristalina cúbica de corpo centrado (ccc). A Figura 3.1 representa um esquema das estruturas cristalinas.

O ponto de fusão é em torno de 1600°C e suas propriedades mecânicas mantêm-se até a temperaturas de 500°C, o que torna o titânio e suas ligas bastante utilizados em peças de aeronaves e estruturas de veículos aeroespaciais. A resistência à corrosão também é elevada e, por isso, sua utilização na indústria química também é bastante disseminada [37].

As ligas de titânio são classificadas segundo os seguintes tipos: liga estabilizada α , liga estabilizada β e liga $\alpha\beta$.

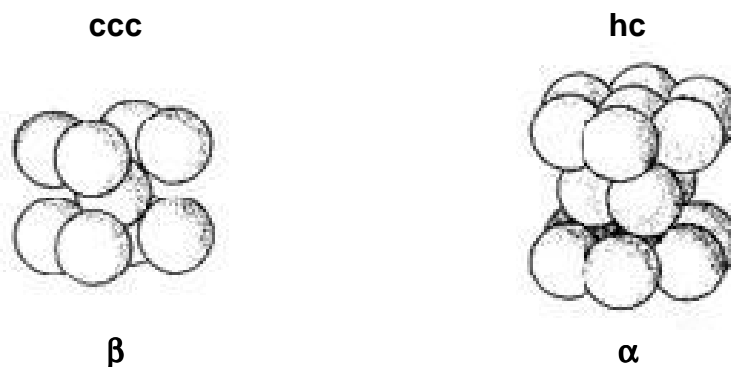


Figura 3.1 - Tipos de estruturas do titânio.

A combinação de alta resistência, peso reduzido e excelente resistência à corrosão resulta em uma boa relação resistência-peso, o que torna o titânio um material interessante na área de engenharia (vide Figura 1.5).

De acordo com a ASTM, titânio e suas ligas são classificados por graus. Na tabela abaixo podem ser visualizadas as principais ligas de titânio de acordo com a classificação ASTM.

Tabela 3.2 - Classificação ASTM para titânio e suas ligas [43].

<i>Grau</i>	<i>Composição Nominal</i>	<i>Liga</i>
Grau 1	Ti	α
Grau 2	Ti	α
Grau 3	Ti	α
Grau 4	Ti	α
Grau 5	Ti6Al4V	$\alpha\beta$
Grau 7	Ti (grau 2)-0,2Pd	α
Grau 9	Ti-3Al-2,5V	α
Grau 11	Ti (grau1)-0,2Pd	α
Grau 12	Ti-0,3Mo-0,8Ni	α
Grau 16	Ti (grau2)-0,05Pd	α
Grau 17	Ti (grau1)-0,05Pd	α
Grau 19	Ti-3Al-8V-6Cr-4Zr-4Mo	β
Grau 21	Ti-15Mo-2,7Nb-3Al-0,25Si	β

3.3 Influência dos Elementos de Liga

Os elementos de liga podem se dissolver intersticialmente ou substitucionalmente com o titânio. Átomos que tem aproximadamente o mesmo diâmetro do átomo de titânio formam soluções sólidas substitucionais caso fatores como a valência e eletronegatividade sejam favoráveis. Os elementos de pequeno diâmetro atômico comumente encontrados como impurezas formam soluções sólidas intersticiais com o titânio. Os elementos de liga podem ser classificados em duas categorias, dependendo do efeito que têm sobre a estrutura cristalina ou estabilização da fase.

Os elementos solúveis na fase α são chamados de elementos substitucionais α e os solúveis na fase β são denominados elementos substitucionais β .

Carbono, nitrogênio, oxigênio e hidrogênio formam soluções sólidas intersticiais com titânio. Os três primeiros são mais solúveis na fase α e por isso denominados estabilizadores da fase α . Hidrogênio é mais solúvel na fase β e por isso recebe a denominação de elemento estabilizador da fase β .

Esses elementos também influenciam a temperatura de transformação de uma fase para outra aumentando ou diminuindo a linha beta transus (Figura 3.2).

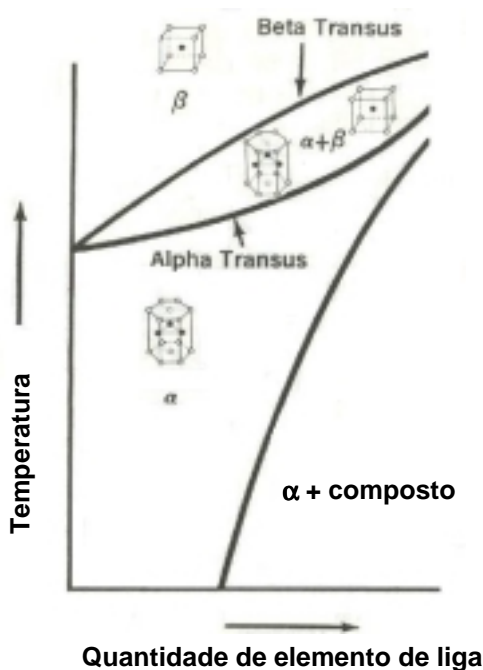


Figura 3.2 - Transformação de fase.

O efeito do oxigênio como estabilizador da fase α pode ser visualizado na Figura 3.3 onde a placa (0,8mm) de titânio ligado Ti6Al4V(α β) foi aquecida por 1h em temperatura de 1000°C em forno com presença de oxigênio. Verifica-se a estabilização da fase α nas proximidades da superfície da placa devido à ação estabilizadora do oxigênio contido no forno.

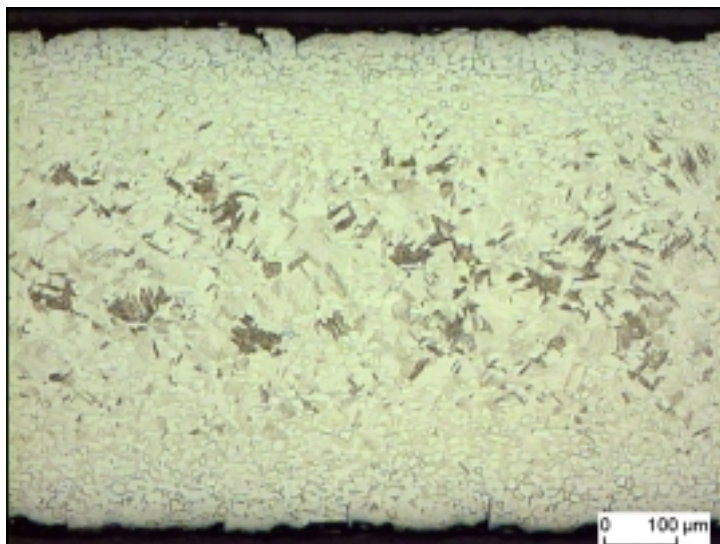


Figura 3.3. Efeito estabilizador do oxigênio na fase α .

A diferença nas propriedades mecânicas entre os diferentes graus de titânio não ligados é devido às diferenças nas quantidades de elementos intersticiais, principalmente oxigênio. No caso da soldagem de titânio, esses elementos geralmente provêm de impurezas ou deficiências na proteção atmosférica durante o processo de soldagem. Qualquer resíduo ou impureza presente nas peças a serem soldadas pode gerar uma solda de má qualidade. Resíduos de óleos sobre as peças a serem soldadas geralmente conduzem à contaminação por carbono e hidrogênio no metal soldado [4]. Na Figura 3.4 pode ser visualizado o efeito da adição de elementos intersticiais nas propriedades do material.

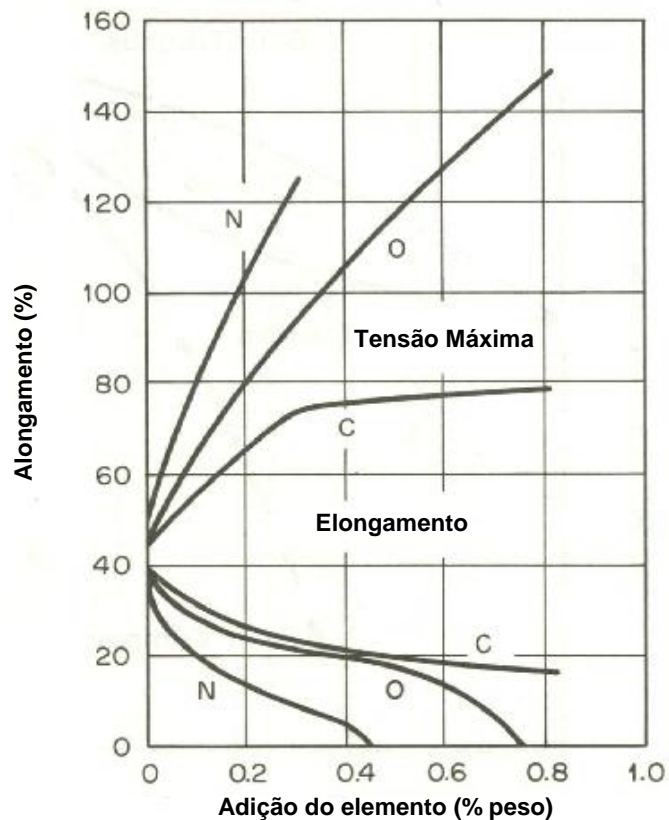


Figura 3.4 - Efeito da adição de elementos de liga [4].

Existem relativamente poucos elementos substitucionais que estabilizam a fase alfa. Entre eles pode-se destacar o alumínio, o gálio e o germânio. O sistema alumínio-titânio é o sistema mais importante na metalurgia do titânio. Devido à sua disponibilidade, baixo custo e grande contribuição para a relação resistência-peso, quase todas as ligas comerciais contêm alumínio como um dos elementos de liga. Entre as ligas comerciais destaca-se o Ti6Al4V (titânio ASTM grau 5) pela sua excelente relação resistência-peso.

A Figura 3.5 ilustra o efeito da adição de elementos substitucionais sobre as propriedades mecânicas.

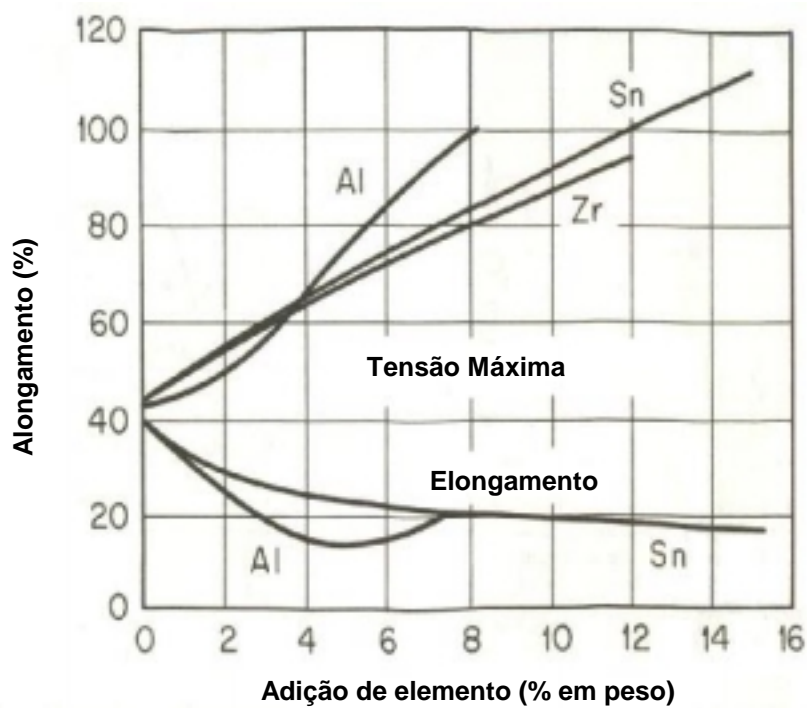


Figura 3.5 - Efeito da adição de elementos de liga [4].

3.4 Características das Ligas

A seguir serão apresentadas algumas características gerais de acordo com o tipo de liga.

3.4.1 Ligas α

- Estrutura hexagonal compacta HC até 880°C
- Moderada conformabilidade a frio
- Usado em aplicações onde se requer resistência em altas temperaturas

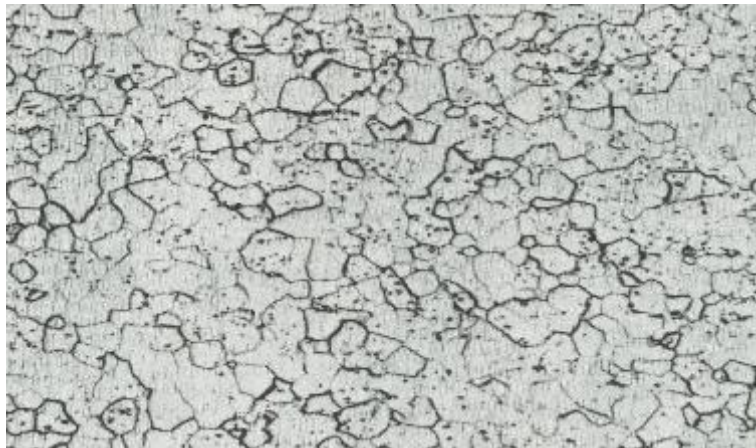


Figura 3.6. Microestrutura Titânio comercialmente puro 250x. [4]

3.4.2 Ligas β

- Estrutura cúbica de corpo centrado
- Boa conformabilidade a frio
- Alta resistência

Ex: Ti3Al8V6Cr4Zr4Mo

3.4.3 Ligas $\alpha\beta$

- Estrutura hexagonal compacta HC até 880°C
- Boa relação resistência-densidade
- Endurecível com tratamento térmico

Ex: Ti6Al4V (Figura 3.7)

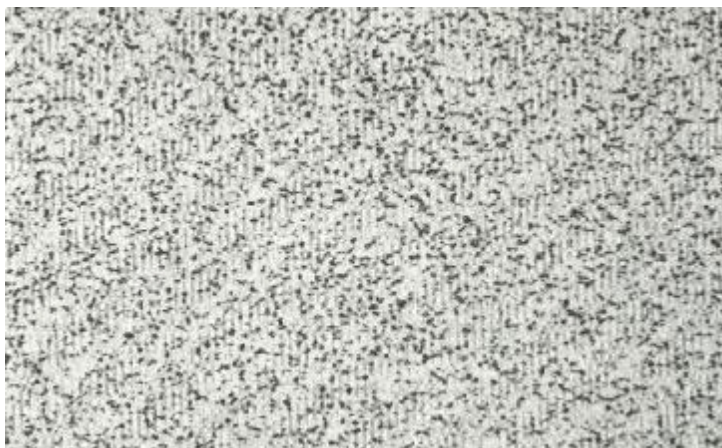


Figura 3.7 - Ti6Al4V.

As propriedades físicas e mecânicas das ligas de titânio podem ser visualizadas na Tabela 3.3 [40]:

Tabela 3.3 – Propriedades do titânio e suas ligas [40].

<i>Designação</i>	<i>Titânio comercialmente puro</i>	<i>Ligas de média resistência</i>	<i>Ligas de alta resistência</i>	<i>Ligas de elevada resistência</i>
<i>Tipo de liga</i>	α	$\alpha\beta$	$\alpha\beta$	β
Tensão de escoamento (MPa)	345 – 480	480 – 550	725 – 1000	1100 – 1400
Resistência à Tração (MPa)	480 – 620	600 – 650	830 – 1100	1200 – 1500
Alongamento (%)	20 – 25	15 – 20	8 – 15	6 – 12
Módulo de elasticidade Longitudinal (GPa)	103	104	110 – 120	69 – 110
Módulo de Elasticidade transversal (GPa)	45	43	40 – 48	38 – 45
Dureza (HV)	160 – 220	200 – 280	300 – 400	360 – 450
Densidade (g/cm ³)	4,51	4,48 – 4,51	4,43 – 4,60	4,81 – 4,93
Expansão térmica (10 ⁻⁶ /°C)	8,9	8,3	8,9	7,2 – 9,5
Condutividade (W/mK)	22	8,0	6,7	6,3 – 7,6
Calor específico (J/kg°C)	525	544	565	490 - 524

4 Soldagem de titânio

Titânio e suas ligas são altamente oxidáveis com temperaturas elevadas. Por isso, os únicos processos adequados para a soldagem desses materiais são os que apresentam atmosfera gasosa controlada.

Adições de oxigênio ou nitrogênio na região da solda causarão fragilização da junta soldada.

A soldabilidade do titânio e suas ligas pode ser visualizada na tabela abaixo:

Tabela 4.1 – Soldabilidade de titânio e suas ligas.

[40]

<i>Grau ASTM</i>	<i>Soldabilidade</i>	<i>Comentários</i>
1, 2, 3, 4, 7, 11, 12, 13	Excelente	Comercialmente puro e graus de baixa liga com menores quantidades de Pd, Ru e Mo
14, 15, 16, 17, 26, 27	Excelente	
9, 18, 28	Boa	
21	Excelente	Liga Beta
6	Boa - Excelente	

A limpeza antes de efetuar a soldagem é de grande importância para a obtenção de uma união soldada com qualidade. Contaminações com hidrogênio presentes em óleos ou graxas diminuem consideravelmente a resistência da junta soldada. *Barret et al.* [6] encontraram significantes reduções das propriedades mecânicas com a introdução de quantidades controladas de hidrogênio, nitrogênio e oxigênio na região de solda.

Para evitar esses problemas é necessária uma preparação das juntas a serem soldadas. *Denney e Metzbowler* [16] concluíram que a preparação da superfície a ser soldada não afeta o nível de oxigênio nas soldas de titânio. A contaminação por oxigênio está relacionada com a deficiência da proteção gasosa durante o processo.

A região a ser soldada deve ser livre de poeira, óleos ou graxa e até mesmo a oleosidade proveniente da mão do operador deve ser evitada através da limpeza da região de solda com álcool ou acetona [4].

Se a atmosfera gasosa não for suficiente para a proteção da união soldada, a solda terá colorações diferenciadas. Normalmente a solda de titânio possui uma coloração prateada de aspecto brilhante. Com falta ou ineficiência da proteção gasosa a solda terá colorações de tons de palha, passando pelo amarelo, violeta e chegando no branco, o que indica total contaminação da região soldada (Figura 4.1 – 1 a 8) . As diferentes tonalidades de coloração são provenientes da espessura da camada de óxido formada na região soldada e dependem da quantidade de oxigênio presente durante a soldagem. Essas colorações podem ser vistas na Figura 4.1 e na Figura 4.2, onde foram feitos cordões de solda através do processo TIG (Figura 4.1) e Laser (Figura 4.2) de titânio comercialmente puro e Ti6Al4V respectivamente. A presença destes tipos de colorações indica que a solda foi contaminada e que a mesma está fragilizada.



Figura 4.1- Contaminação de Ti Grau 2. [15]

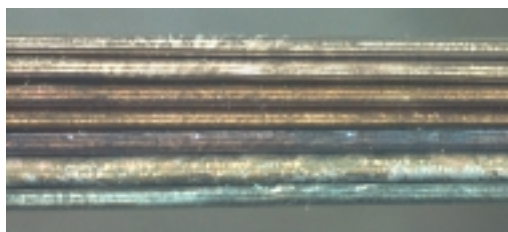


Figura 4.2 - Contaminação de Ti Grau 5

A seguir será feita uma breve abordagem sobre os principais processos empregados na soldagem de titânio e suas ligas.

4.1 TIG

O processo de soldagem TIG (*Tungsten Inert Gas*) é o processo de união mais comum na soldagem de titânio e suas ligas. O titânio é um dos metais mais fáceis de serem soldados pelo processo TIG, pois sua baixa densidade e alta tensão superficial permite um bom controle da poça de fusão e penetração[40].

A principal desvantagem do processo de soldagem TIG para a soldagem de titânio é a baixa taxa de deposição, ou seja, o número de passes por junta aumenta rapidamente com o aumento da espessura das peças a serem soldadas. Uma preparação da junta é necessária para peças com espessuras maiores que 3mm. Juntas com espessuras maiores necessitam a adição de material de aporte [4, 31]. No entanto, tem-se desenvolvido sistemas de soldagem TIG por *Keyhole* que são capazes de soldar, em um único passe, juntas com espessuras de 3 até aproximadamente 12mm. Testes e experimentos têm mostrado que o processo é apropriado para a soldagem de titânio [31].

Como gás de proteção podem ser usados o He, Ar ou uma mistura de ambos os gases. Como o He apresenta densidade mais baixa que o ar, devem ser tomados cuidados especiais quando for utilizado. O Ar geralmente é empregado com bocais difusores adaptados à tocha, bocais estes que protegem a poça de fusão e parte do cordão de solda que se solidifica[40].

Em linhas gerais pode-se destacar as vantagens e desvantagens do processo como:

Vantagens

- Processo manual ou automatizado;
- Possibilidade de soldagem em todas as posições;
- Soldas de boa qualidade;
- Solda sem respingos.

Desvantagens

- Baixa produtividade;
- Contaminação com tungstênio quando o eletrodo toca a peça.

4.2 MIG

O processo MIG (*Metal Inert Gas*) não é muito aplicado na soldagem de titânio. Este método requer altas correntes e por isso altas velocidades o que restringe o processo à soldagem mecanizada ou semimecanizada. Defeitos causados pela falta de fusão podem ser um problema[40]. Recentes técnicas e desenvolvimento do processo MIG pulsado têm mostrado melhores resultados na soldagem de titânio por este processo, tornando a transferência de metal mais estável[40, 6].

O processo MIG apresenta uma maior produtividade do que o processo TIG. A Figura 4.3 mostra um exemplo de junta de topo em Ti grau 5 soldada pelo processo MIG. Os resultados de resistência à tração do material base e da junta soldada são mostrados na Tabela 4.2.

Vantagens

- Processo automatizado;
- Possibilidade de soldagem em todas as posições;
- Melhor produtividade que o processo TIG

Desvantagens

- Solda com respingos.

Tabela 4.2 – Propriedades típicas de Ti grau 5 soldado por MIG [40].

	<i>Resistência à Tração (MPa)</i>	<i>Alongamento (%)</i>
Metal Base	987	17
Junta Soldada	968	6

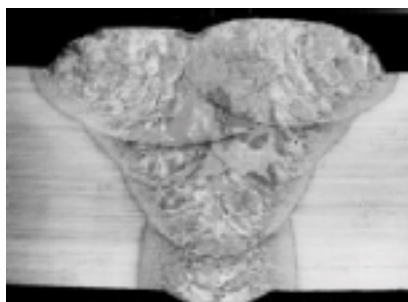


Figura 4.3 - Ti6Al4V (20mm) soldado por MIG. [40]

4.3 Plasma

O processo de soldagem por Plasma (*PAW-Plasma Arc Welding*) apresenta a qualidade obtida pelo processo TIG com certas vantagens em relação à velocidade e penetração de soldagem [39]. Os resultados de resistência à tração do metal base e da junta soldada são mostrados na Tabela 4.3.

Vantagens

- Mais rápido que o processo TIG;
- Possibilidade de executar soldas de único passe em materiais com até 18mm de espessura [11, 43];
- Maior imunidade à porosidade do metal de solda que outros processos à fusão.

Desvantagens

- Dificuldade de soldagem de chapas finas (espessuras menores que 1,5mm ocasionam o corte da chapa)

Tabela 4.3 – Propriedades típicas de titânio grau 5 soldado por Plasma [15].

	<i>Resistência à Tração (MPa)</i>	<i>Alongamento (%)</i>
Metal Base	987	17
Junta Soldada	979	8

4.4 Feixe de Elétrons

A soldagem por feixe de elétrons (*EBW – Elétron Beam Welding*) era considerado o processo preferido para a soldagem de uniões críticas em ligas de titânio. Podem ser produzidas soldas de alta qualidade e confiabilidade. A produtividade também pode ser considerada boa, especialmente para seções espessas, as quais podem ser soldadas em um único passe [40].

Entretanto, a necessidade de uma câmara de vácuo torna o processo limitado e com custo elevado em comparação aos processos convencionais. Os resultados de resistência à tração do metal base e da junta soldada são mostrados na Tabela 4.4.

Vantagens

- Processo automatizado;
- Soldagem de único passe para peças espessas;
- Não há necessidade de metal de adição;
- Significante experiência industrial.

Desvantagens

- Alto custo de equipamento
- Tamanho das peças limitadas ao tamanho da câmara de vácuo
- Geração de raios-x [14]

Tabela 4.4 – Propriedades típicas de titânio soldado por EBW [40].

<i>Liga</i>	<i>Resistência à Tração (MPa)</i>	<i>Alongamento (%)</i>	<i>Espessura da placa (mm)</i>
Ti5Al2,5Sn	925	13	25
Ti6Al4V	1076	6	50

4.5 Soldagem de titânio a laser

O laser vem sendo aplicado com sucesso na soldagem de titânio. Sua aplicação vem crescendo nos últimos anos na produção de tubos soldados utilizados nas indústrias químicas para a fabricação de tanques e vasos de pressão [40]. O processo apresenta baixa distorção e boa produtividade. É mais flexível que TIG ou feixe de elétrons para automação. A Figura 4.4 mostra dois exemplos de soldagem a laser em titânio com duas geometrias diferentes.

Vantagens

- Processo automatizado;
- Alta velocidade de soldagem;
- Não necessita câmara de vácuo;
- Possibilidade do uso de fibra ótica para o transporte do feixe até o local de trabalho.

Desvantagens

- Alto custo do equipamento

As propriedades mecânicas do titânio e suas ligas soldados a laser são equivalentes ao metal de base assim como os demais processos descritos anteriormente. O que torna o processo de soldagem a laser atrativo para aplicações industriais de grande escala é sua velocidade, reprodutibilidade e qualidade.

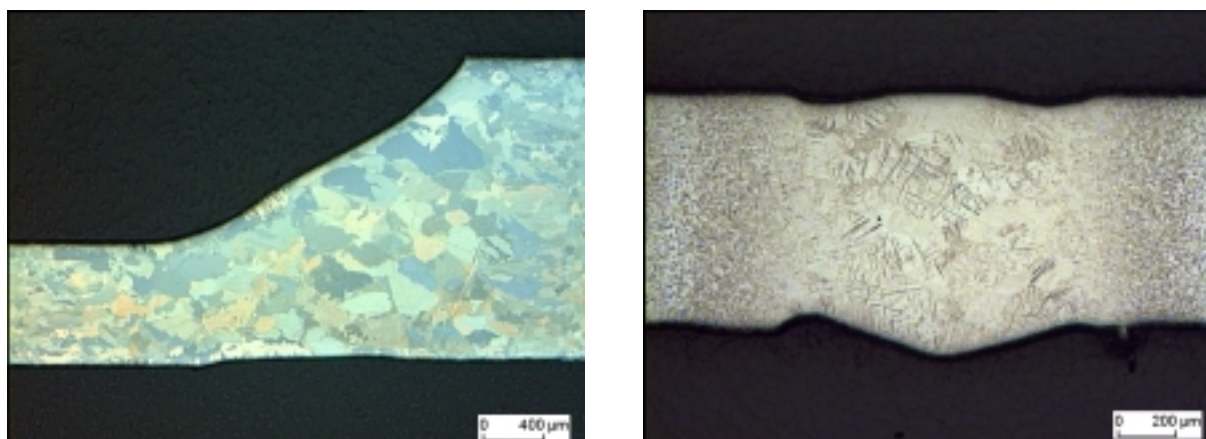


Figura 4.4 - Ti grau 2 (esquerda) e Ti6Al4V (direita) soldado por laser.

5 Materiais e Procedimento Experimental

5.1 Materiais

Os materiais utilizados neste trabalho foram dois tipos de titânio não ligado ASTM grau 1 e ASTM grau 2, considerados comercialmente puros (cp).

A diferença entre os vários graus está na quantidade de oxigênio e ferro (Tabela 5.1).

Tabela 5.1 – Composição química[17].

<i>DIN cód. nome</i>	<i>DIN cód. n°</i>		<i>Fe</i>	<i>O</i>	<i>N</i>	<i>C</i>	<i>H</i>
Ti 1	3.7025	Min.	-	-	-	-	-
		Max.	0,15	0,12	0,05	0,06	0,013
Ti 2	3.7035	Min.	-	-	-	-	-
		Max.	0,20	0,18	0,05	0,06	0,013
Ti 3	3.7055	Min.	-	-	-	-	-
		Max.	0,25	0,25	0,05	0,06	0,013
Ti 4	3.7065	Min.	-	-	-	-	-
		Max.	0,30	0,35	0,05	0,06	0,013

Os materiais apresentavam-se na forma de chapas de espessura reduzida, 0,6mm para Ti grau 1 e 0,8mm para Ti grau 2. Todas as chapas usadas nos ensaios foram fornecidas pela Deutsche Titan GmbH. De acordo com o fabricante, o material apresenta as propriedades mecânicas descritas na Tabela 5.2.

Tabela 5.2 – Propriedades mecânicas[17].

<i>DIN cód. nome</i>	<i>Tensão de Escoamento (MPa)</i>		<i>Resistência à tração (MPa)</i>		<i>Alongamento (%)</i>		<i>Dureza Brinell (HB 30)</i>
	<i>R_{p0,2}</i>	<i>R_{p1,0}</i>	<i>min.</i>	<i>max.</i>	<i>longit.</i>	<i>transv.</i>	
Ti 1	180	200	290	410	30	25	120
Ti 2	250	270	390	540	22	20	150
Ti 3	320	350	460	590	18	16	170
Ti 4	390	410	540	740	16	15	200

5.2 Fonte de Laser

Foi utilizada no estudo uma fonte de laser de Nd:YAG bombeada por laser de diodo da marca Rofin Sinar modelo DY044 (Figura 5.1) com as características descritas na Tabela 5.3.

Tabela 5.3 – Fonte de laser usada nos experimentos.

<i>Modelo</i>	<i>Fabricante</i>	<i>Meio Ativo</i>	<i>Potência Máxima(W)</i>	<i>Tamanho focal(mm)</i>	<i>Delivery System</i>	<i>Foco (mm)</i>	<i>Modo</i>	<i>Polarização</i>
DY044	Rofin Sinar	Nd:YAG	4400 contínuo	Ø0,4	Fibra Ótica	200	Multimodo	Não Polarizada



Figura 5.1 - Fonte de laser Nd:YAG modelo Rofin Sinar DY044.

O feixe laser chegava até a área de trabalho através de uma fibra ótica de 20 m de comprimento e 0,4 mm de diâmetro. Para a colimação do feixe era utilizado um conjunto ótico de 200 mm de comprimento.

5.3 Experimento

Primeiramente, as placas a serem soldadas eram conformadas a frio através de uma prensa viradeira convencional. A geometria pode ser visualizada na Figura 5.4 As placas eram conformadas variando-se o tamanho do flange de 2 a 30mm.

As placas conformadas eram limpas com acetona e posicionadas dentro da câmara de atmosfera controlada com argônio, conforme Figura 5.2, e com uma concentração de 900 ppm de oxigênio, medidas através de 4 sensores posicionados no interior da câmara.

A inclinação do cabeçote do laser era de 20° em relação ao eixo vertical.

A câmara assim como as placas posicionadas e fixadas são mostradas na Figura 5.2 .

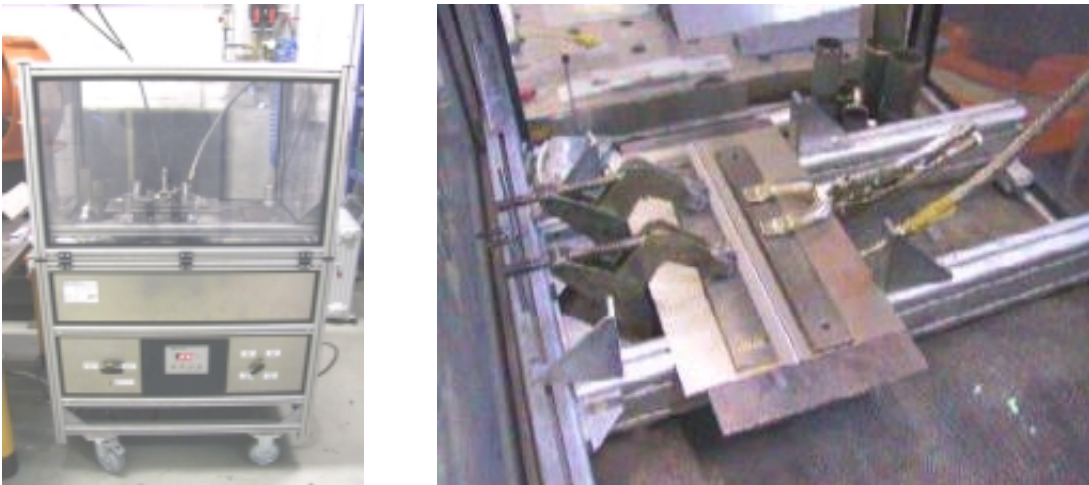


Figura 5.2 - Esquerda câmara de soldagem e direita fixação das placas dentro da câmara.

Soldas autógenas foram efetuadas através de um robô industrial de 6 eixos KuKa (Figura 5.3).

Os parâmetros velocidade de soldagem, distância focal e potência do laser foram variados e analisados no estudo para se obter uma faixa de parâmetros que apresentasse resultados aceitáveis de propriedades mecânicas das juntas soldadas.



Figura 5.3 - Robô KuKa (esquerda) e detalhe da ótica (direita).

Demais parâmetros como, por exemplo, inclinações do feixe de laser e tipo de gás de proteção foram mantidos constantes para todos os elementos soldados.

Após a soldagem eram seccionados corpos de prova das placas soldadas a fim de se avaliar mecanicamente o comportamento da junta soldada. A penetração era identificada através de amostras metalográficas retiradas das placas soldadas.

De acordo com a indústria automotiva a penetração desse tipo de geometria deve ser no mínimo igual à espessura da placa soldada. Dessa forma, os parâmetros eram alterados e as análises eram conduzidas até se encontrar uma faixa onde se obtinha a penetração desejada.

5.4 Metalografia

Amostras para a análise metalográfica eram retiradas das placas soldadas e embutidas a frio em resina (Technovit), sendo posteriormente lixadas (lixas 320, 500, 800 e 1000) e polidas (discos de polimento com solução de diamante 5 e 3μ , efetuando-se um pré-ataque da amostra durante o último disco de polimento com uma solução composta de 100ml H_2O , 10ml H_2O_2 e 10g KOH).

Após o polimento, atacavam-se as amostras com uma solução composta de 95% H_2O , 2% HF e 3% HNO_3 . O tempo de ataque utilizado foi de 20s. Na seqüência era feita uma análise microscópica utilizando um microscópio ótico (Zeiss Axioplan 2). Após a análise metalográfica eram feitos testes de microdureza Vickers (HV 0,1).

5.5 Testes de Tração

Os elementos soldados eram testados sob carregamento quasi-estático a fim de se determinar a resistência à tração das juntas soldadas.

Quando submetido a esforços de tração, uma geometria de junta em aresta sofre esforços de flexão no cordão de solda devido ao momento gerado pelos flanges da geometria. Mas, a fim de se obter uma propriedade de tração da junta soldada, os dados referentes à tensão nominal de tração serão utilizados para uma análise quantitativa de resistência à tração do elemento soldado.

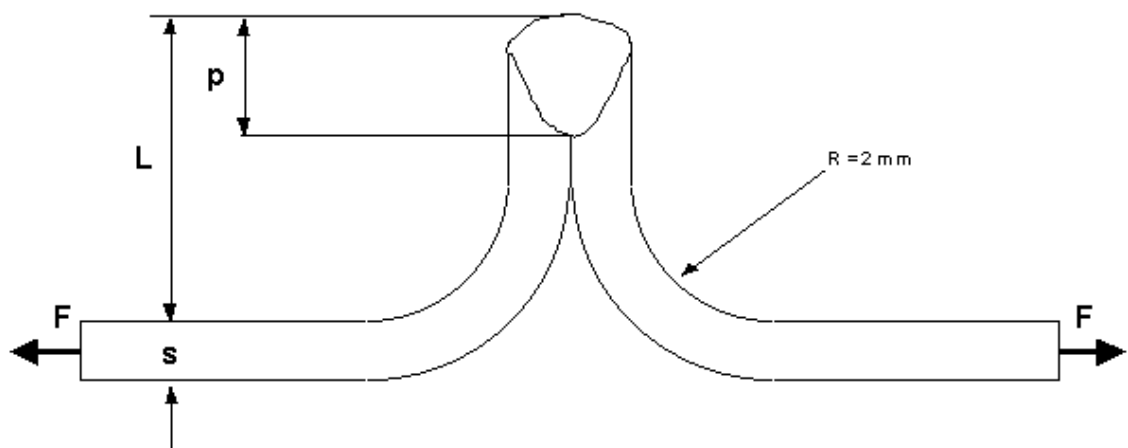


Figura 5.4 - Exemplo de corpo de prova.

Como a penetração da solda deve ser, no mínimo, igual a espessura da placa, a tensão média de tração do elemento soldado pode ser calculada dividindo-se a força de tração pela área da seção transversal da placa

A tensão de flexão pode ser calculada através da equação 1:

$$\sigma_b = \sigma_z \cdot \left(\frac{6 \cdot L - 3 \cdot p + 3 \cdot s}{s} \right) \quad \text{Equação 5.1 - Tensão de flexão da geometria de soldagem em aresta}$$

Onde:

F – Força de tração,

s – Espessura da placa;

L – Tamanho do flange;

P – Penetração de soldagem;

σ_z – Tensão máxima de tração do material;

σ_b – Tensão de flexão.

Os corpos de prova utilizados nos ensaios de tração foram confeccionados de acordo com normas internas da AUDI AG para ensaios de tração de geometrias de junta em aresta (Figura 5.5).

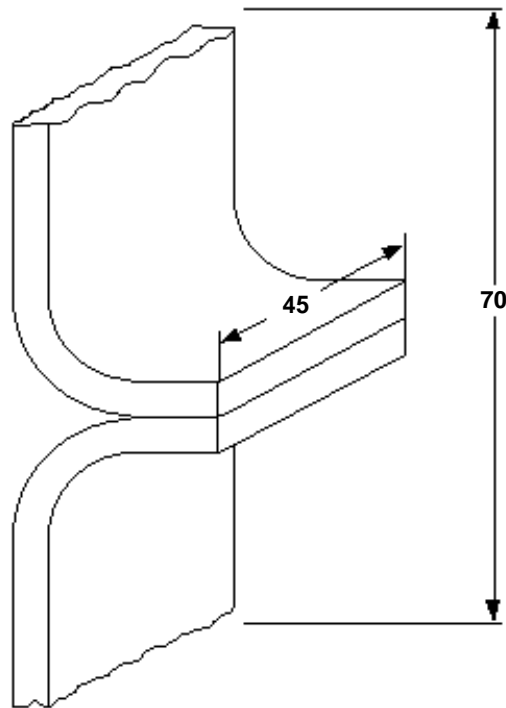


Figura 5.5 - Geometria do corpo de prova para ensaio de tração.

Os ensaios de tração foram realizados em uma máquina universal de testes da marca Zwick modelo Zwick Z100 – Figura 5.6. Os corpos de prova eram fixados com um comprimento inicial de ensaio de 70mm e velocidade de ensaio de $10^{\text{mm}}/\text{min}$. [AUDI AG].

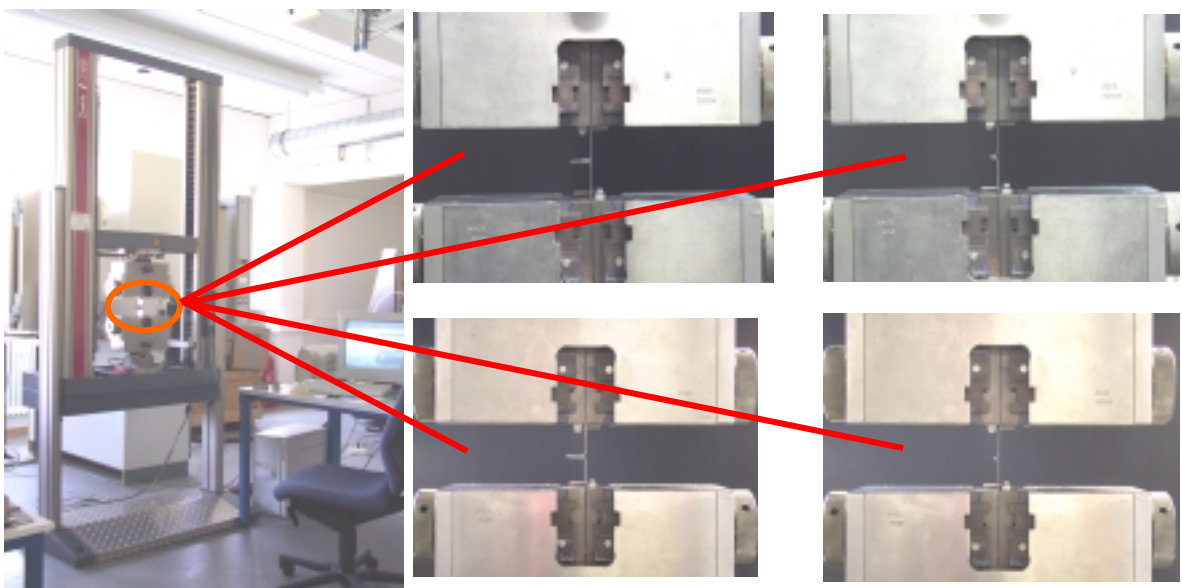


Figura 5.6 - Máquina de ensaios de tração e exemplos de corpos de prova sob carregamento.

5.6 Ensaio de tração a alta velocidade

Foram realizados testes a fim de se obter e analisar o comportamento das juntas soldadas quando submetidas a altas velocidades de deslocamento. Devido à geometria da máquina, os corpos de prova eram menores (100x20mm) do que os corpos de prova utilizados nos testes de tração quasi-estática (200x45mm). Devido a limitações da máquina, peças com flanges maiores que 20 mm não puderam ser testadas.

Ensaio de tração a alta velocidade foram realizados utilizando uma máquina de ensaios Gleeble[®] (Figura 5.7). Velocidades de ensaio de 200^{mm}/s foram usadas em corpos de prova.

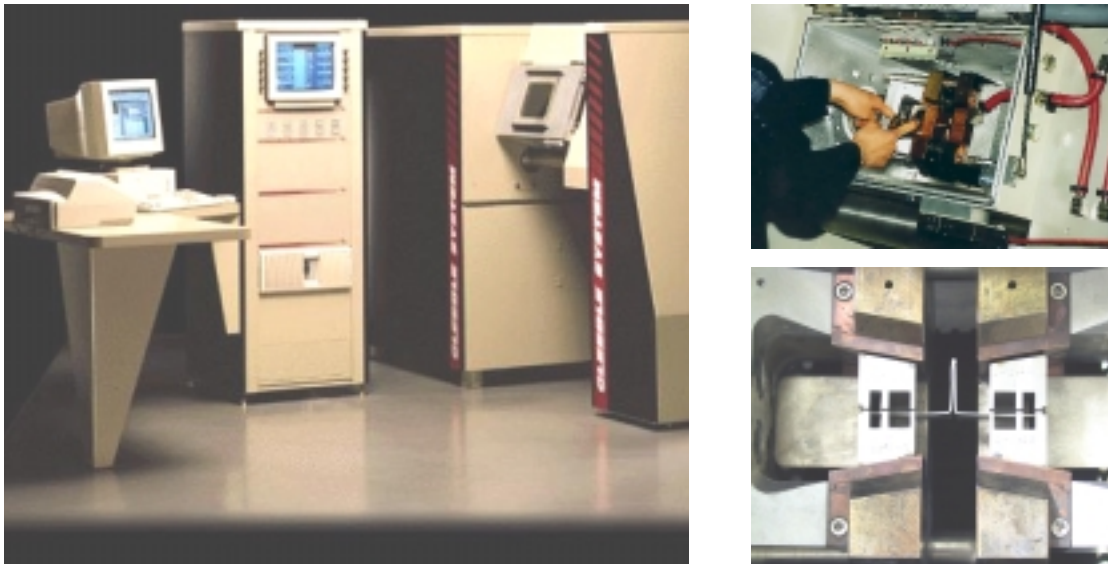


Figura 5.7 - Máquina de ensaios Gleeble e corpos de prova.

5.7 Ensaios de Fadiga

Ensaios de fadiga foram realizados para se verificar o comportamento dinâmico das juntas soldadas. Os ensaios foram realizados em uma máquina servo hidráulica da marca Zwick modelo Zwick Roell Amsler HC25 (Figura 5.8). A forma e dimensões dos corpos de prova eram as mesmas utilizadas para os ensaios de tração quasi-estático.

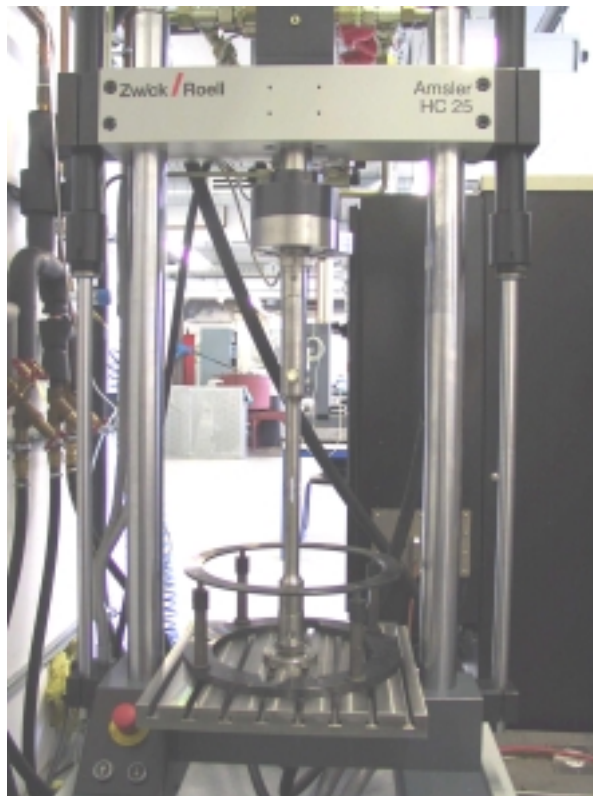


Figura 5.8 - Máquina de ensaios de fadiga.

6 Resultados e Discussões

Inicialmente foram realizadas diversas tentativas para se encontrar valores aceitáveis de penetração nas juntas soldadas. Para agilizar o trabalho e economizar material, os testes preliminares foram realizados soldando-se pequenos corpos de prova conforme Figura 6.1.

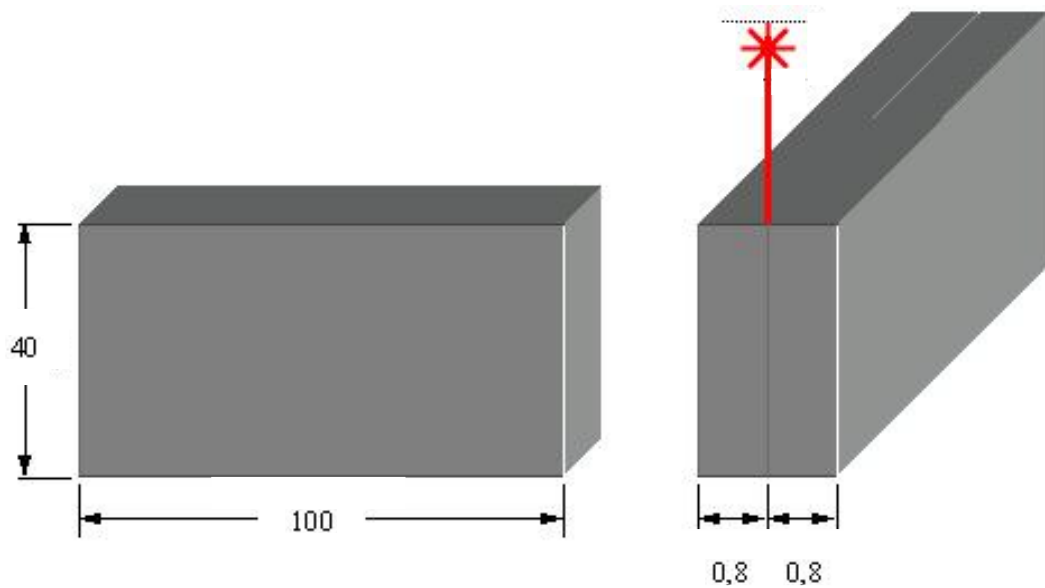


Figura 6.1 - Representação dos corpos de prova.

Como foi especificado no capítulo 5, as chapas de Ti1 apresentavam uma espessura de 0,6 mm enquanto que as chapas de Ti2 apresentavam 0,8 mm de espessura.

Partindo-se de parâmetros já conhecidos de outras geometrias de soldagem feitas com os mesmos materiais, determinou-se uma faixa de parâmetros que produziram soldas com penetrações satisfatórias, assim como um cordão esteticamente aceitável.

Pode-se visualizar na Figura 6.2 a janela do processo obtida a partir dos pré-ensaios descritos acima.

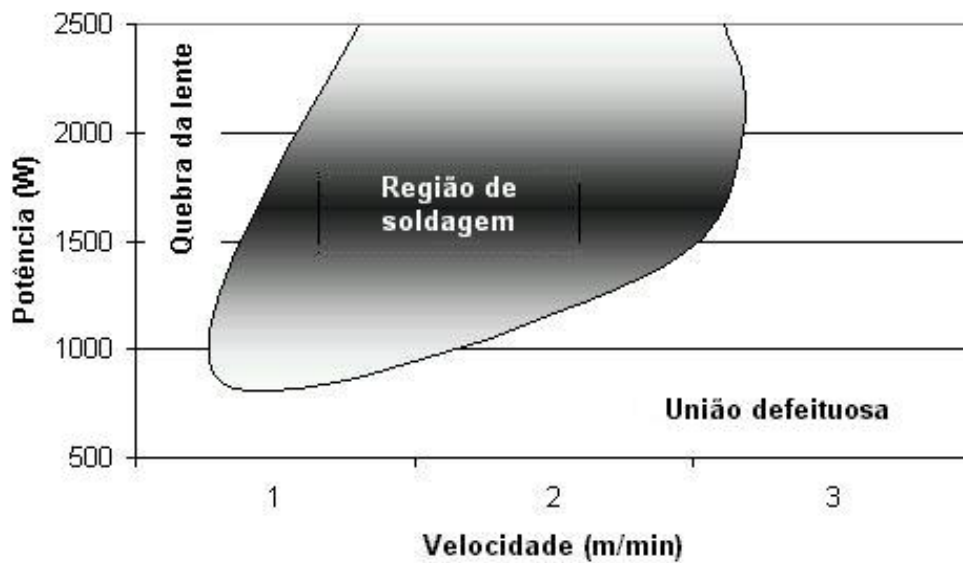


Figura 6.2 - Janela do processo.

Regiões à direita da área boa de soldagem levavam a reduzidas penetrações de solda ou penetrações incompletas no decorrer do cordão. Regiões a esquerda da região de soldagem faziam com que a lente de proteção do cabeçote ótico quebrasse ou conduziam a imperfeições como efeito *Humping* (Figura 6.3). Esse fenômeno trata-se de turbulências que ocorrem na condução da poça de fusão devido a parâmetros inadequados ou erros de posicionamento do feixe laser.



Figura 6.3 - Efeito *Humping*.

Estando definidos os parâmetros através dos pré-ensaios partiu-se para os ensaios com as chapas já conformadas na geometria de junta em aresta (Figura 6.4).

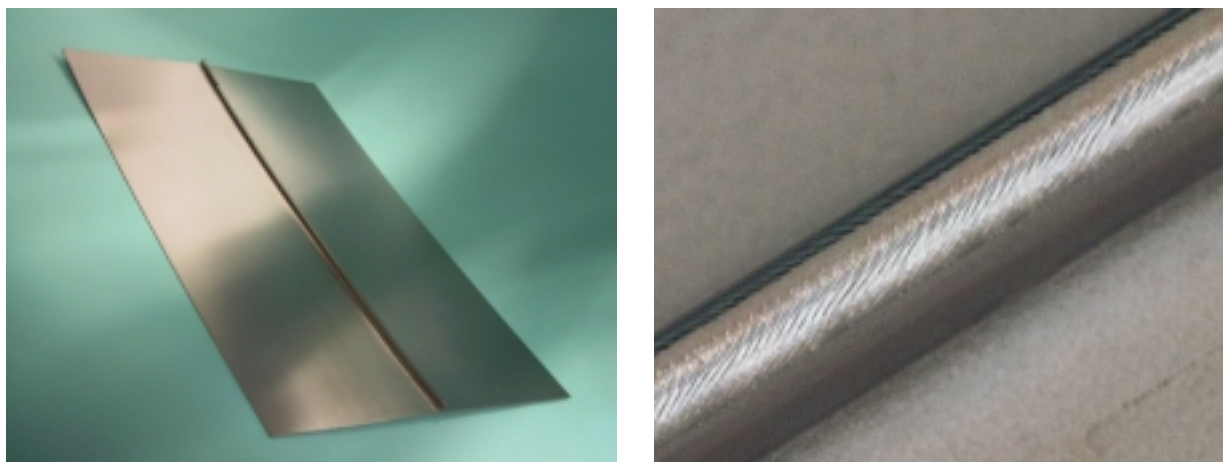


Figura 6.4 - Junta em aresta Ti2, chapas soldadas para os ensaios (esquerda), detalhe dos flanges soldados (direita).

Os dados dos ensaios são mostrados na tabela seguinte. A Figura 6.5 mostra as micrografias de algumas juntas soldadas.

Tabela 6.1 – Parâmetros de soldagem.

Corpo de Prova	Fonte de Laser	Material	Tamanho do Flange (mm)	Potência (W)	Velocidade (m/min)	Posição Focal	ZTA (mm)	Penetração (mm)
01	DY044	Ti Grau 2	2	1100	1,5	3	1,26	0,94
02	DY044		3	1100	1,5	3,5	1,05	0,8
03	DY044		4	1600	1,5	3,0	0,97	1,25
04	DY044		6	2000	1,5	3,0	1,37	0,95
05	DY044		8	2000	1,5	3,0	1,42	1,00
06	DY044		10	2000	1,5	2,0	1,25	1,10
07	DY044		12	2000	1,5	3,0	1,10	0,90
08	DY044		20	1200	1,5	3,5	1,01	0,97
09	DY044		30	1200	1,5	3,5	1,23	0,90
10	DY044	Ti Grau 1	2	1300	1,5	3,5	1,4	0,95
11	DY044		4	900	1,5	3,5	0,94	0,75
12	DY044		6	900	1,5	3,5	0,91	0,8
13	DY044		10	1000	1,5	3,5	1,21	1,06
14	DY044		15	900	1,5	3,5	0,68	0,86
15	DY044		20	1100	1,5	3,5	0,87	0,73
16	DY044		30	900	1,5	3,5	0,85	0,82

Microestrutura

Analisando as micrografias dos materiais, nota-se que a microestrutura da zona fundida e da zona termicamente afetada é formada de grãos α grosseiros com contornos de grão irregulares. Essa estrutura pode ser observada na Figura 6.6.

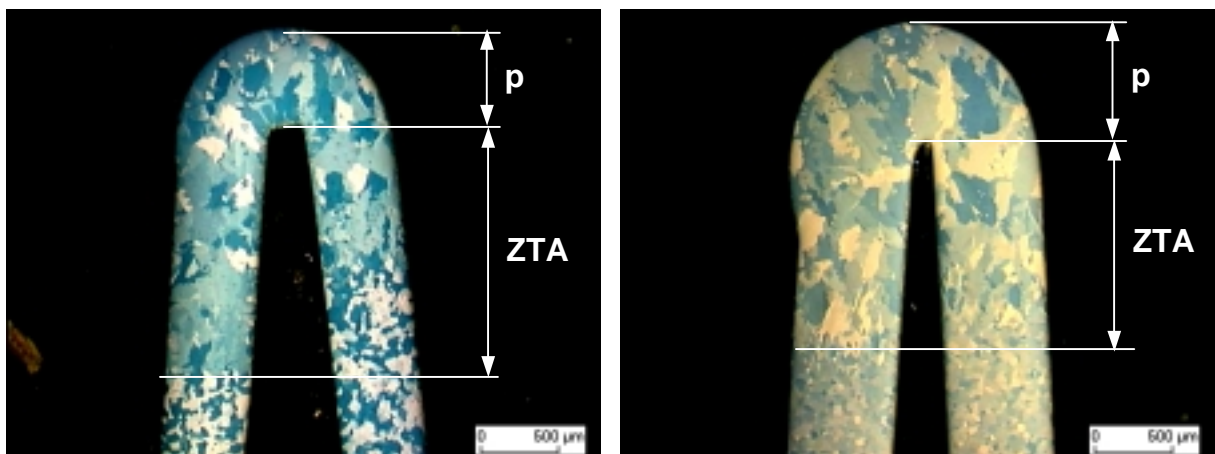


Figura 6.5 - Micrografias de titânio grau 1(esquerda) e titânio grau 2 (direita). Onde p (penetração) e ZTA (zona termicamente afetada).

Analisando as micrografias dos materiais, nota-se que a microestrutura da zona fundida e da zona termicamente afetada é formada de grãos α grosseiros com contornos de grão irregulares. Essa estrutura pode ser observada na Figura 6.65 e 6.6.

No titânio comercialmente puro e ligas de titânio α , a zona fundida e a zona termicamente afetada apresentam estruturas similares com contornos de grãos complexos e irregulares o que torna difícil a visualização da linha de fusão [25, 31]. Isso pode ser mais bem visualizado na Figura 6.7 onde se observa a transição entre o metal base, a zona termicamente afetada e a zona de fusão.

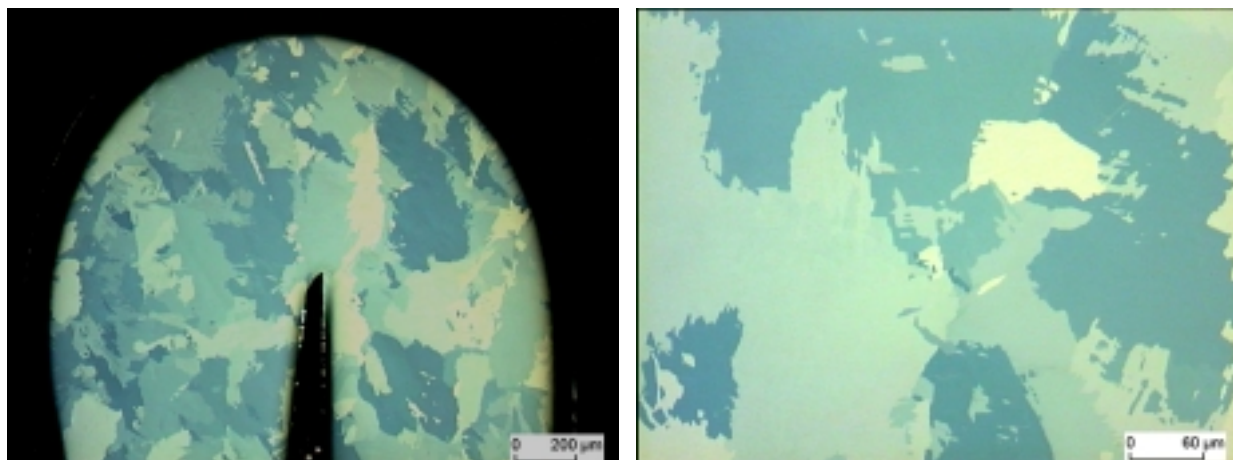


Figura 6.6 - Ti2, junta em aresta, zona fundida e ZTA (esquerda, aumento 50x) zona fundida (direita, aumento 200x).

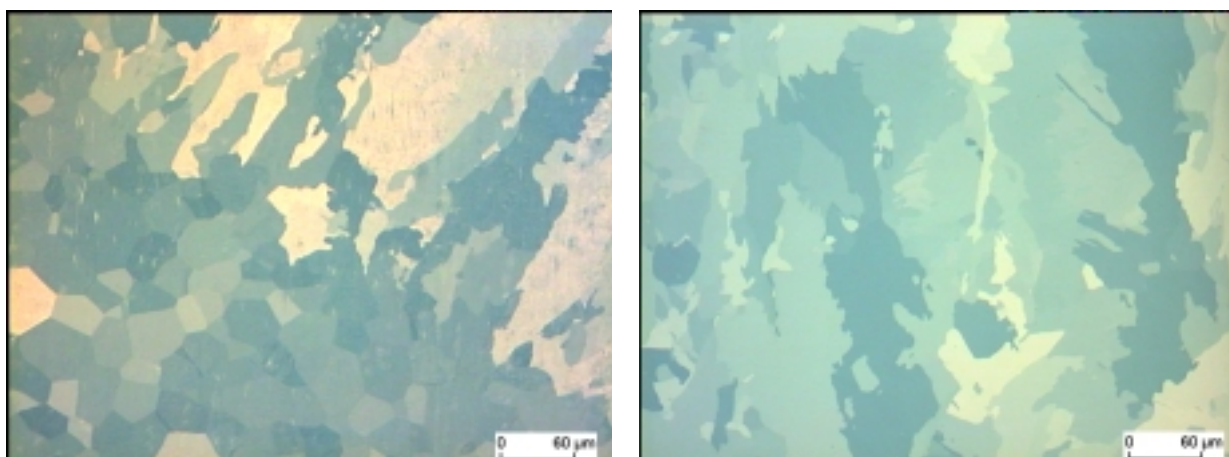


Figura 6.7 - Ti2, junta em aresta, metal base e ZTA (esquerda, aumento 200x); ZTA (direita, 200x).

Não foram observadas grandes variações na zona termicamente afetada, ficando os valores entre 1 e 1,4mm para o caso do Ti2 e entre 0,8 e 1,2mm para o Ti1. Quando comparados os flanges, nota-se uma pequena diminuição dos valores para o Ti1, mas isso se deve ao fato das chapas serem menos espessas e conseqüentemente apresentarem aporte térmico menor.

As juntas soldadas foram testadas sob carregamento quasi-estático a fim de se determinar as propriedades de tração e o comportamento de ambos os materiais. Os melhores resultados obtidos nos ensaios de tração podem ser visualizados na tabela abaixo e também na Figura 6.11.

No que diz respeito à microestrutura do material soldado e à zona termicamente afetada, pode-se notar que as microestruturas são similares. Em ambos os casos, têm-se uma microestrutura formada pela fase alfa, apresentando grãos grosseiros com contornos irregulares

como mostrado na Figura 6.5. Devido a essa similaridade das microestruturas, é difícil definir ou visualizar claramente a linha de fusão. Quando a solda é contaminada com grande quantidade de oxigênio a zona fundida fica mais visível (Figura 6.8) e pode-se observar claramente ambas as regiões (ZTA e zona fundida). Devido à grande quantidade de elemento intersticial e a alta taxa de resfriamento durante a solidificação na soldagem, forma-se uma estrutura denominada α' (martensita α). Essa estrutura caracteriza-se por apresentar uma morfologia acicular que fragiliza consideravelmente a região soldada (Figura 6.9).

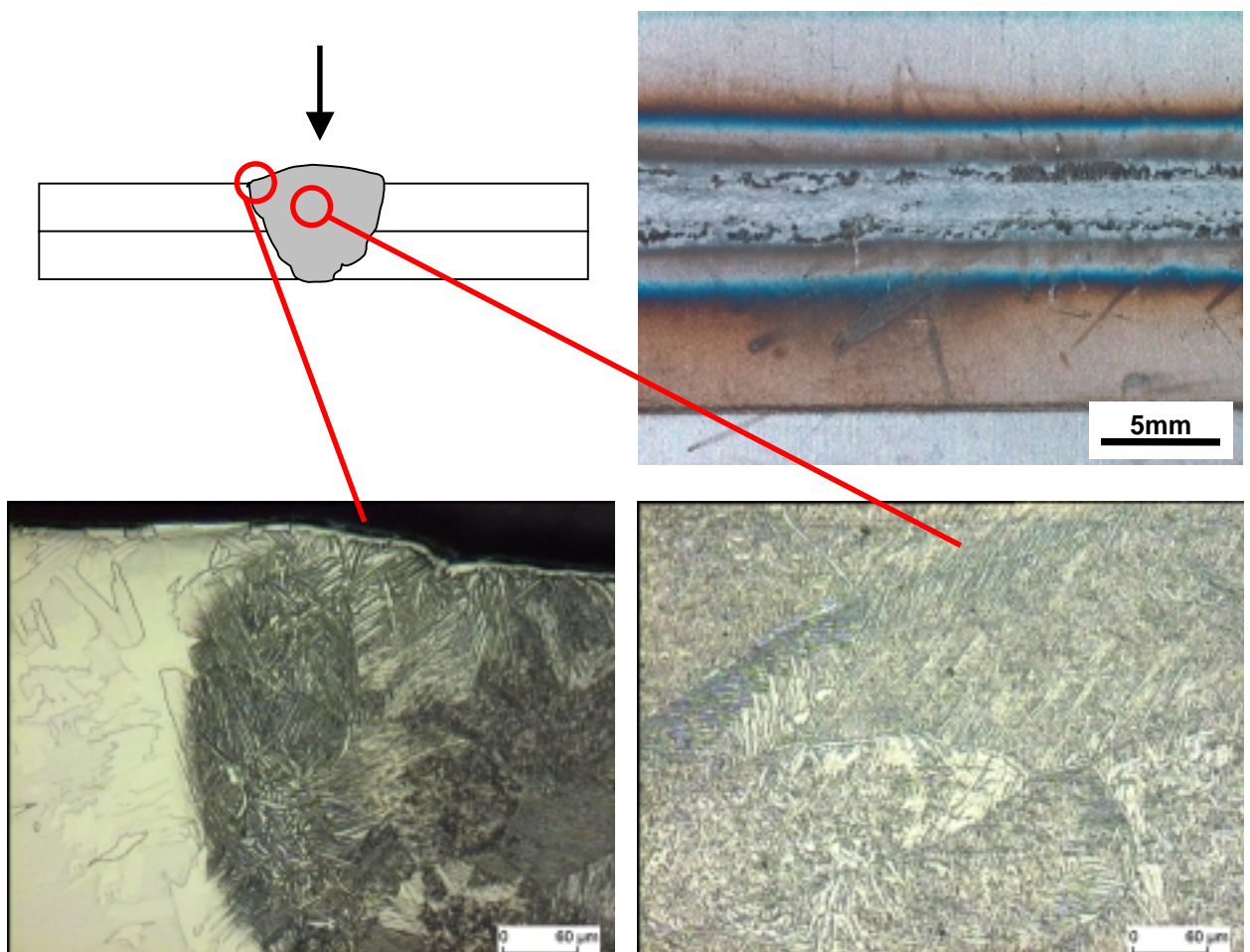


Figura 6.8 - Junta sobreposta de Ti2 contaminada com oxigênio.

A Figura 6.8 mostra a contaminação com grande quantidade de oxigênio. Para quantidades reduzidas nota-se a formação da fase martensítica α' nas regiões superficiais da solda como mostrado na Figura 6.9 para uma contaminação de aproximadamente 2,5% (25000ppm) de oxigênio.

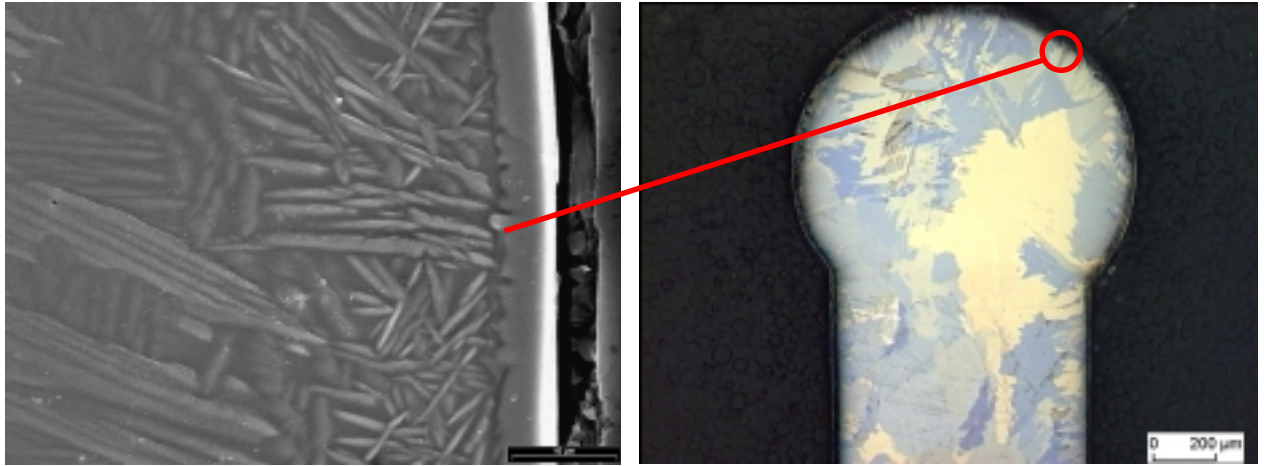


Figura 6.9 - Estrutura martensítica em Ti2 cp.

Microdureza

Testes de microdureza mostrava que titânio grau 1 apresenta de 130 a 150HV de dureza no material base e na região de solda. Titânio grau 2 apresenta uma estrutura com dureza mais elevada, entre 150 e 250 no material base e no material soldado.

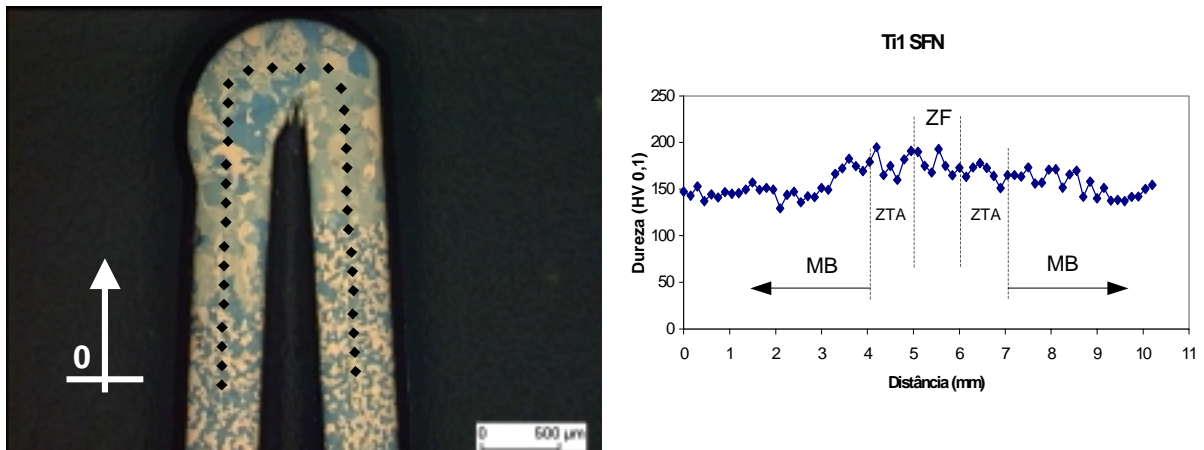


Figura 6.7 - Ensaio de dureza para Titânio grau 1.

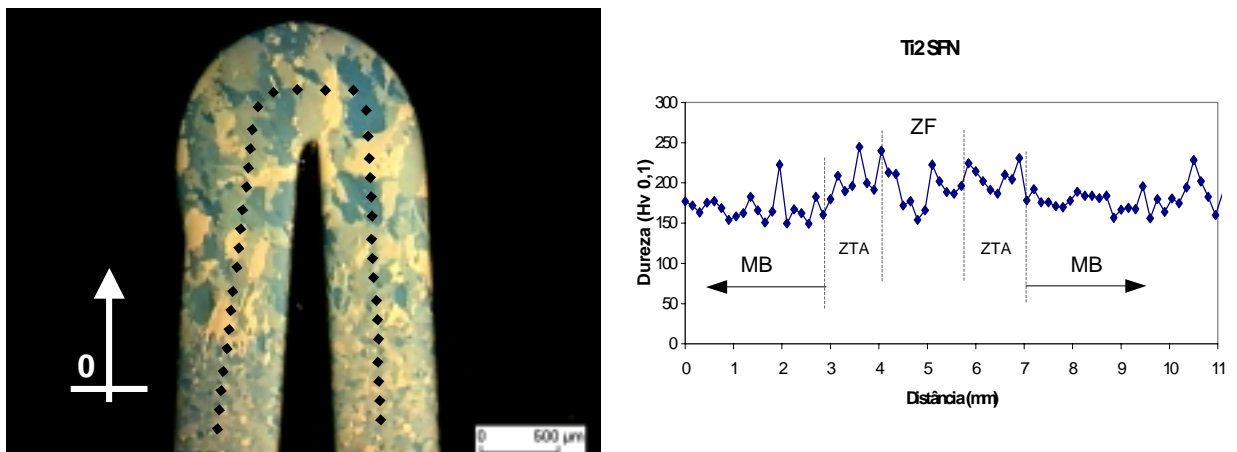


Figura 6.10 - Ensaio de dureza para Titânio grau 2.

OBS: As identações representadas na figura são apenas orientativas.

6.1 Resistência à Tração

O titânio grau 1 tem uma melhor resistência à tração devido à sua boa trabalhabilidade a frio, o que conduz à deformação total do flange alcançando um estado geométrico plano do corpo de prova na deformação durante o ensaio, de maneira que a solda não é afetada com a deformação plástica do flange (Figura 6.13).

O titânio grau 1 possui mais baixas quantidades de oxigênio e ferro, o que lhe dá as melhores propriedades de ductilidade e conformabilidade de todos os 4 graus de titânio comercialmente puro[16].

Os resultados de resistência à tração para ambos os materiais são mostrados na Tabela 6.2 e na Figura 6.11.

Tabela 6.2 – Propriedades mecânicas.

<i>Corpo de Prova</i>	<i>Fonte de Laser</i>	<i>Material</i>	<i>Tamanho do Flange (mm)</i>	<i>Tensão Nominal de Tração da junta (MPa)</i>	<i>Deformação (mm)</i>
01	DY044	Ti Grau 2	2	122 ± 3	1,9 ± 1
02	DY044		3	78 ± 1	2,9 ± 1
03	DY044		4	62 ± 4	4,5 ± 1
04	DY044		6	53 ± 5	8,5 ± 1
05	DY044		8	64 ± 13	12,2 ± 2
06	DY044		10	50 ± 3	16,3 ± 1
07	DY044		12	38 ± 1	14,7 ± 1
08	DY044		20	12 ± 1	28,8 ± 4
09	DY044		30	13 ± 3	52,2 ± 3
10	DY044	Ti Grau 1	2	206 ± 9	4,7 ± 1
11	DY044		6	202 ± 12	13,4 ± 1
12	DY044		8	202 ± 13	15,6 ± 1
13	DY044		10	194 ± 18	20,1 ± 2
14	DY044		15	165 ± 6	29,7 ± 1
15	DY044		20	121 ± 10	38,7 ± 1
16	DY044		30	169 ± 5	56,9 ± 2

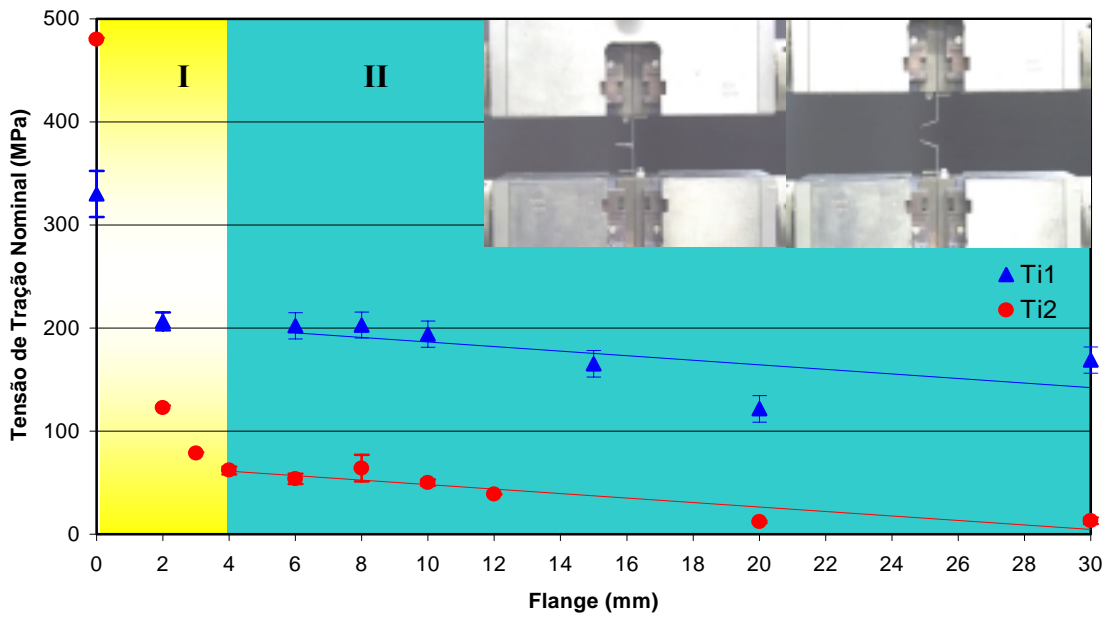


Figura 6.11 - Diagrama tensão nominal de tração x comprimento do flange.

A Figura 6.12 mostra o alongamento obtido nos mesmos ensaios de tração das juntas soldadas.

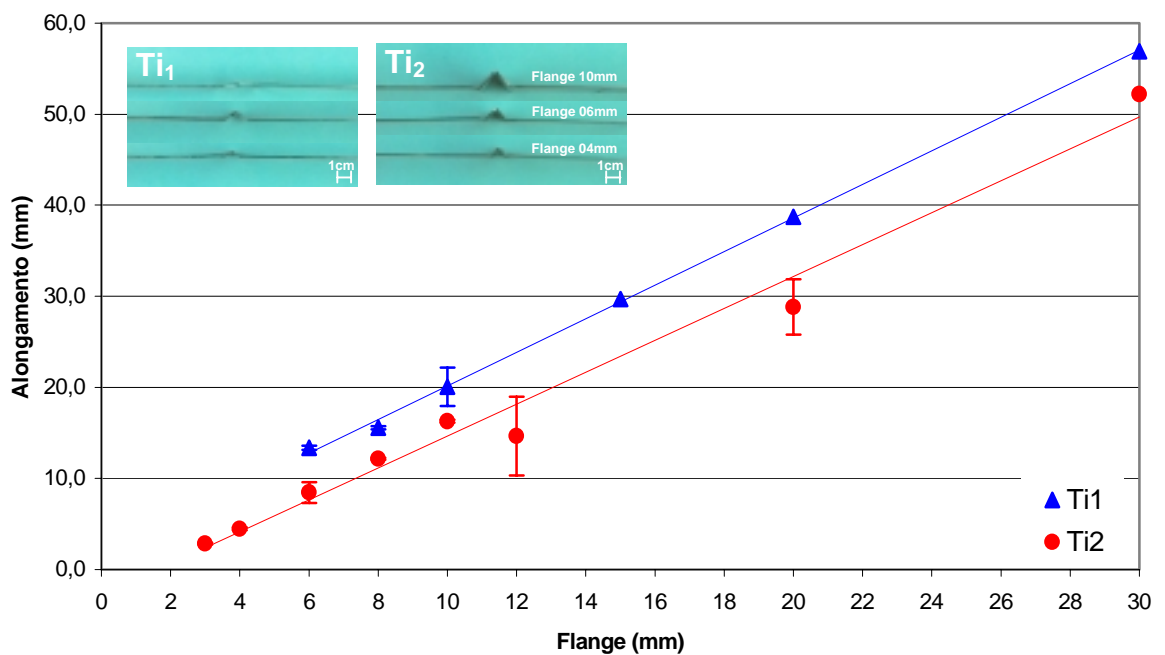


Figura 6.12 - Diagrama alongamento x comprimento do flange.

A Figura 6.13 mostra a deformação e a resistência do titânio grau 1 e grau 2

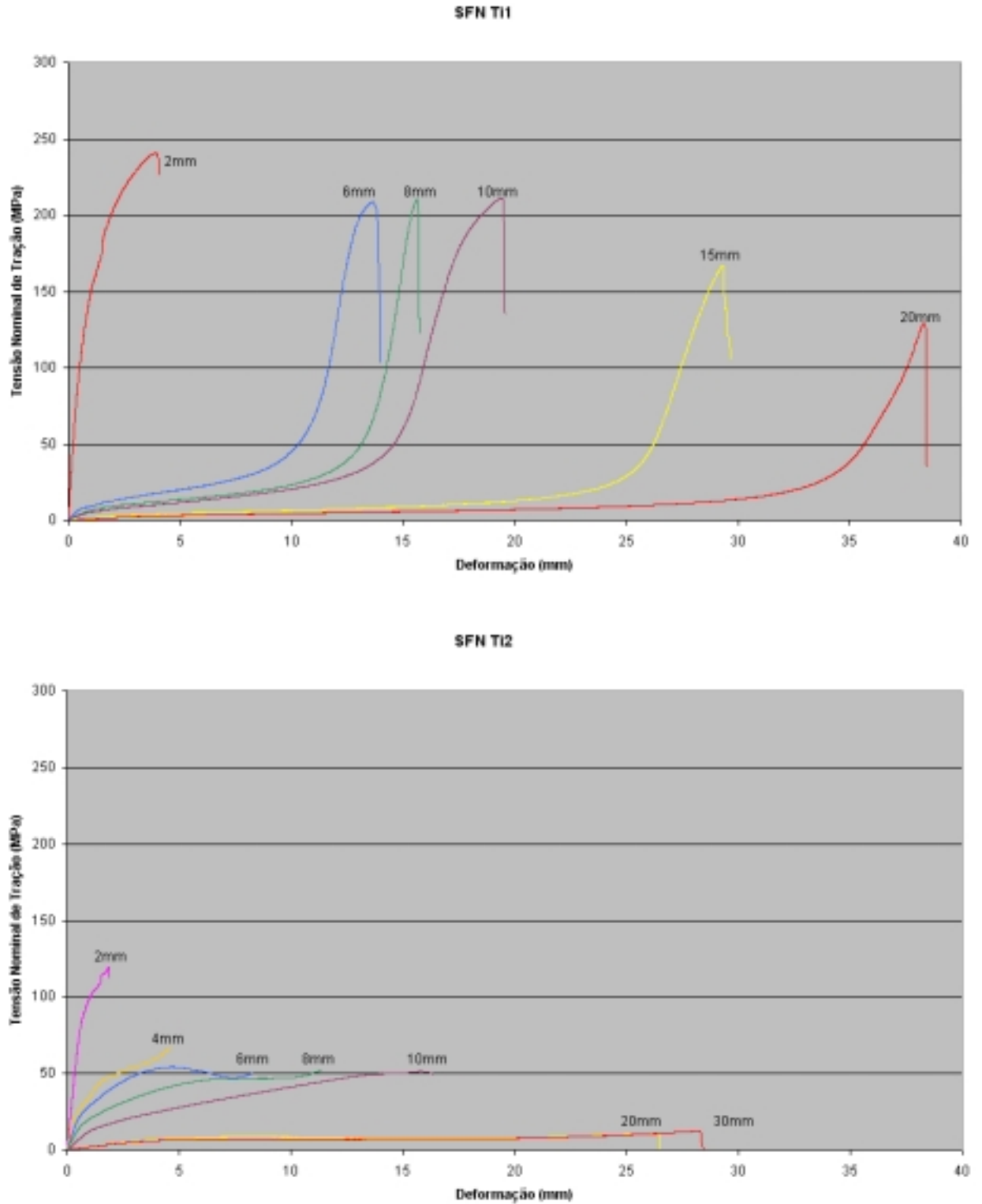


Figura 6.13 - Diagrama tensão deformação para cp's de titânio grau 1 e grau 2, respectivamente.

As Figura 6.14 e 6.27 mostram a seqüência de fotos obtidas durante o ensaio de tração da união soldada. Observa-se claramente para o caso do titânio grau 1 a deformação total do flange, o que não ocorre para o titânio grau 2.

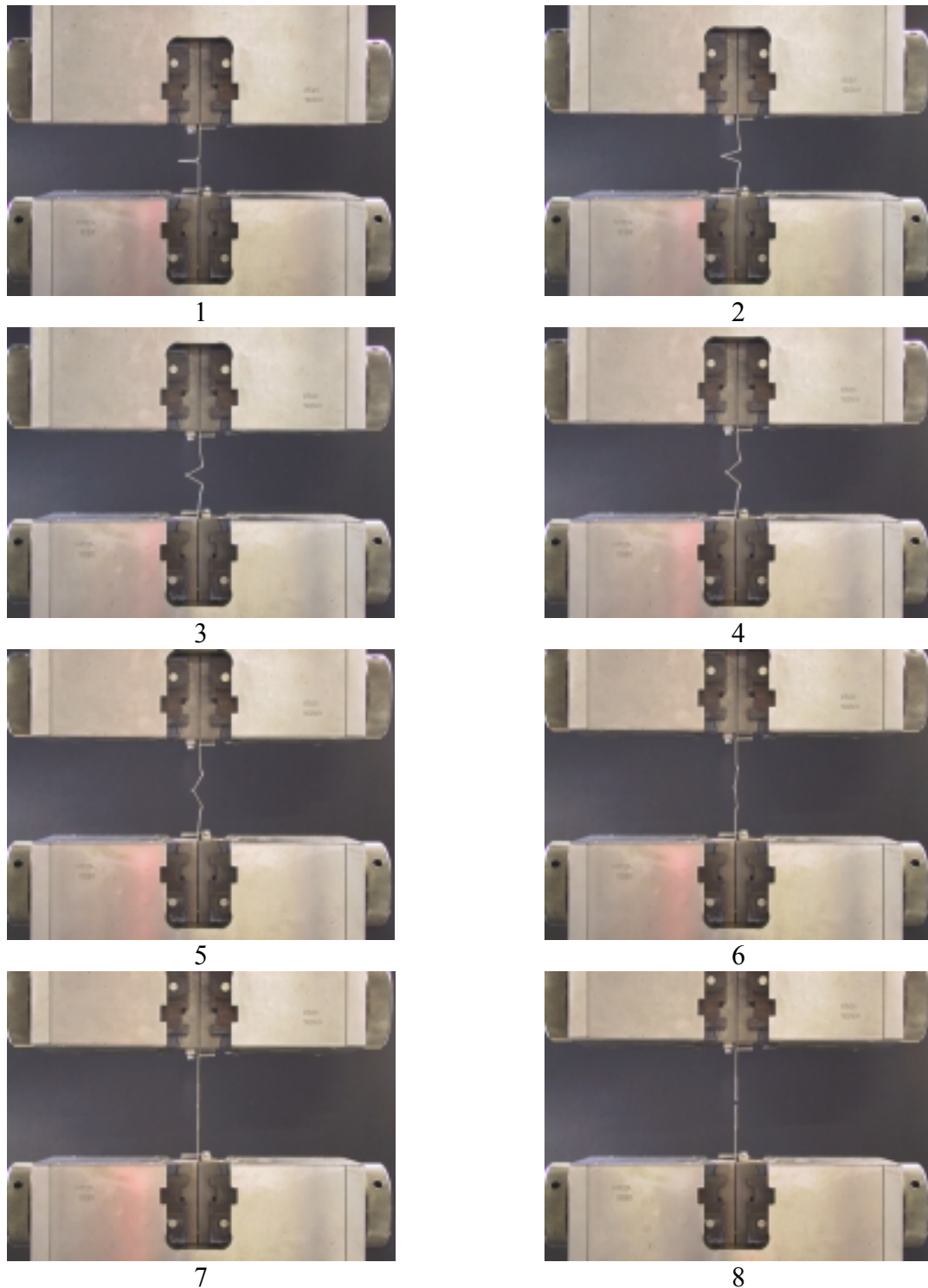
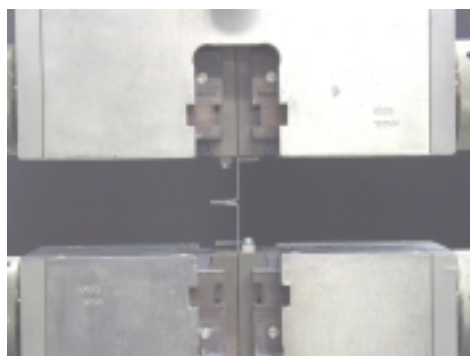
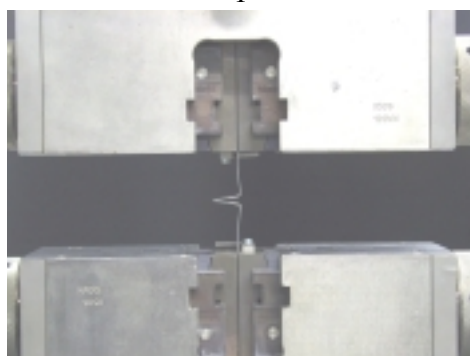


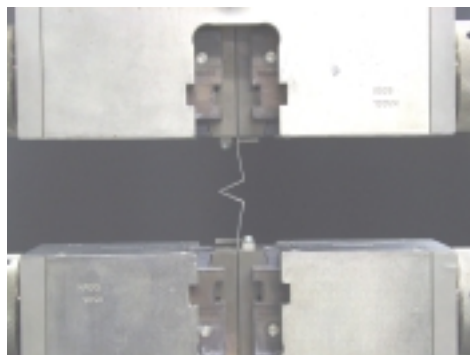
Figura 6.14 - Deformação do flange para Ti1.



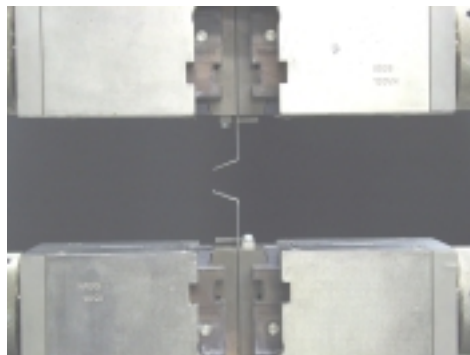
1



2



3



4

Figura 6.15 - Deformação do flange para Ti2.

De acordo com a Figura 6.13, Figura 6.14 e Figura 6.15 pode-se observar a diferença de comportamento da junta soldada de acordo com o material. Para o caso do titânio grau 1, existe uma total deformação do flange da geometria ocasionando um estado de tensões no cordão de solda diferente daquele gerado na junta em titânio grau 2. Devido às diferenças nas composições químicas dos dois materiais, maiores quantidades de oxigênio e ferro no titânio grau 2, há um aumento da resistência à deformação do flange gerando um estado de tensões diverso no cordão de solda, o que diminui a resistência à tração da junta.

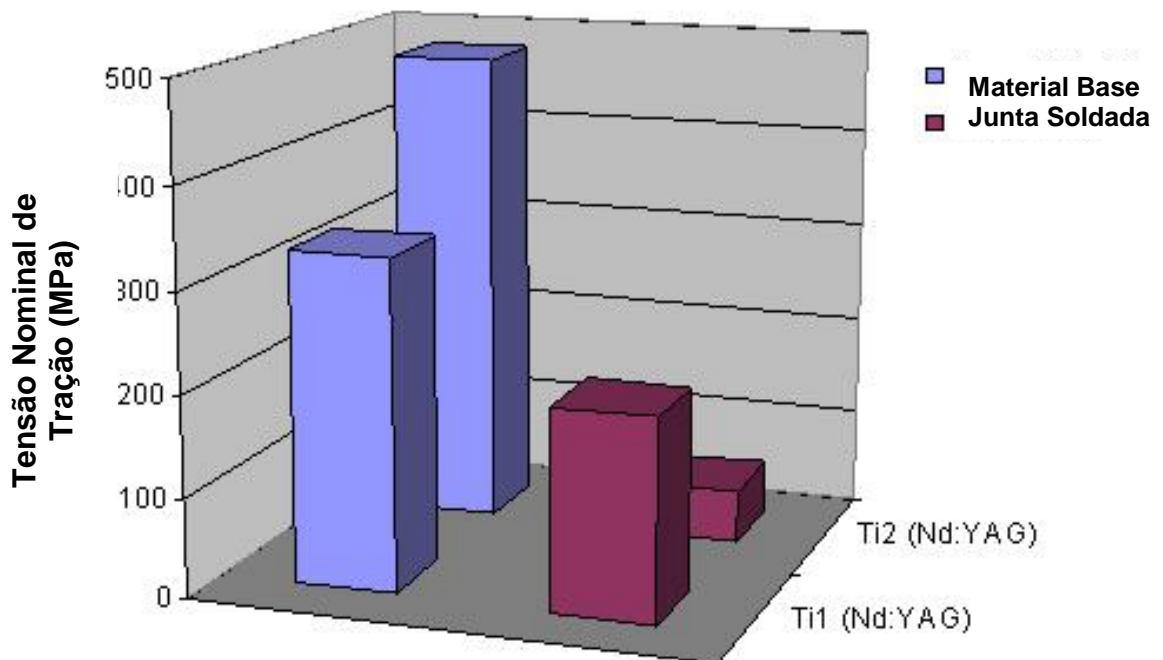


Figura 6.16 - Comparação entre titânio grau 1 e grau 2 para juntas em arestas soldadas por laser de Nd:YAG.

A resistência nominal à tração obtida para as soldas em aresta de titânio grau 1 são equivalentes a aproximadamente 60% da resistência à tração do material base. Isto pode ser considerado um bom valor se comparado ao titânio grau 2 onde os valores obtidos não excederam 12% do valor do material base. (Figura 6.16).

Quando comparado a materiais com semelhantes características de resistência mecânica e à corrosão, como por exemplo aços inoxidáveis, o titânio grau 1 soldado na geometria de junta em aresta apresenta resultados satisfatórios como pode ser visualizado na Figura 6.17.

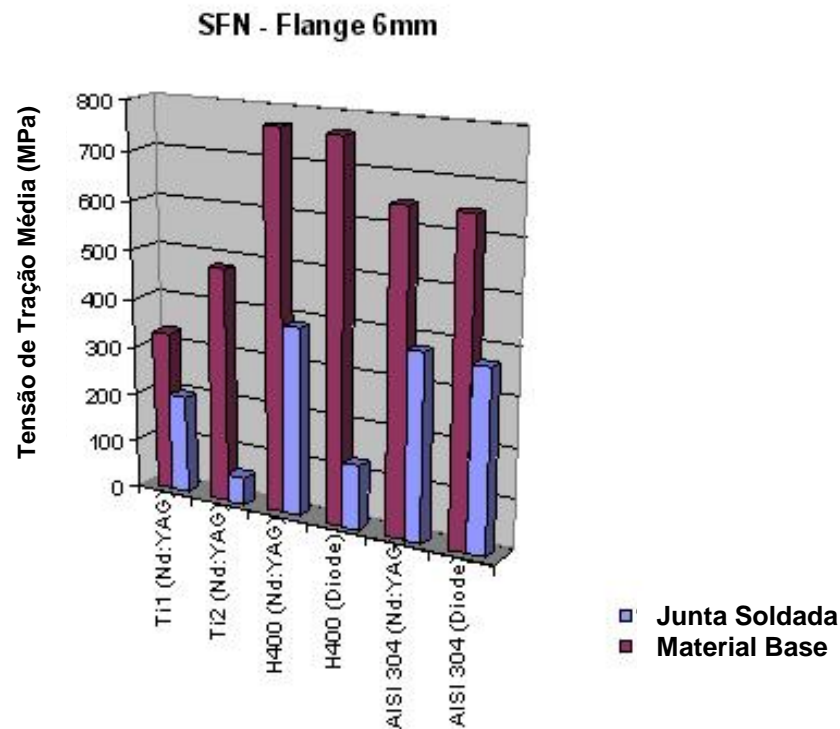


Figura 6.17 - Comparação das juntas em aresta de titânio e aço inoxidável.

[7, 9, 49]

Aços inoxidáveis austeníticos AISI 304 e Nirosta[®] H400 apresentam propriedades de resistência à corrosão similares à do titânio, por essa razão e também devido às suas excelentes propriedades mecânicas esses materiais despertam grande interesse na indústria automotiva.

Dessa forma, comparando-se a resistência da mesma junta para ambos os tipos de titânio com a mesma geometria soldada a laser em aços inoxidáveis, nota-se que Titânio grau 2 não apresenta resultados satisfatórios para aplicações onde alta resistência seja exigida. Titânio grau 1, ao contrário, apresenta resultados proporcionais aos dos aços inoxidáveis austeníticos para a soldagem a laser da geometria em aresta.

Quando comparada com outras geometrias soldadas a laser de Nd:YAG, a junta de titânio grau 2 soldada em aresta apresenta resultados muito inferiores como pode ser visto na Figura 6.18.

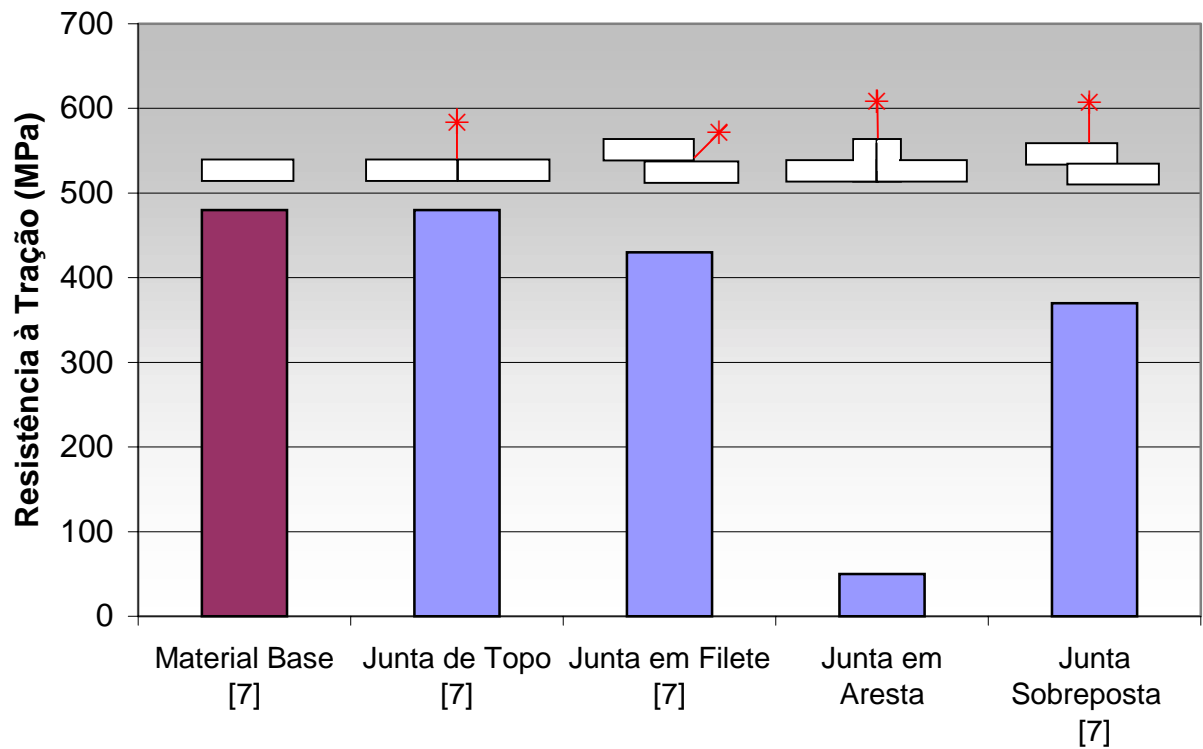


Figura 6.18 - Comparação de diferentes juntas soldadas a laser em titânio grau 2.

Dessa forma é possível perceber que a junta soldada a laser da geometria de junta em aresta para titânio grau 2 não apresenta resultados confiáveis sendo os aços inoxidáveis austeníticos supracitados uma opção de substituição para aplicações específicas.

Os resultados dos testes de tração a alta velocidade mostraram que as juntas apresentam satisfatório comportamento se comparadas com o comportamento quasi-estático.

Figura 6.19 mostra os resultados obtidos.

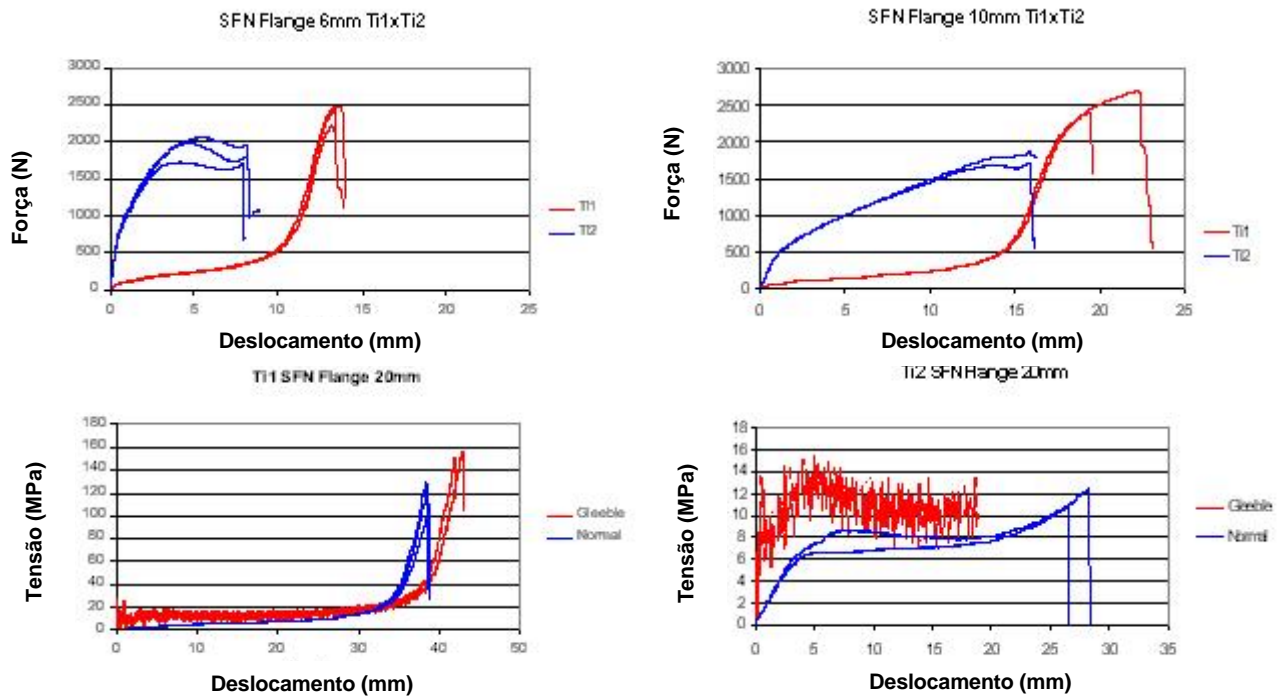


Figura 6.19 - Ensaio de tração a alta velocidade.

6.2 Resistência à Fadiga

Ensaio de fadiga com titânio grau 2 mostraram o comportamento da variação do tamanho do flange com a resistência à fadiga da junta soldada. A Figura 6.20 mostra o diagrama SN para uma probabilidade de ruptura de 50%. Quanto maior o comprimento do flange menor a sua resistência à fadiga sob mesmo carregamento. Flanges de 6 e 10mm mostraram um comportamento praticamente estável. Devido a limitações da máquina de teste, tentativas com flanges maiores que 10mm não foram possíveis de serem realizadas.

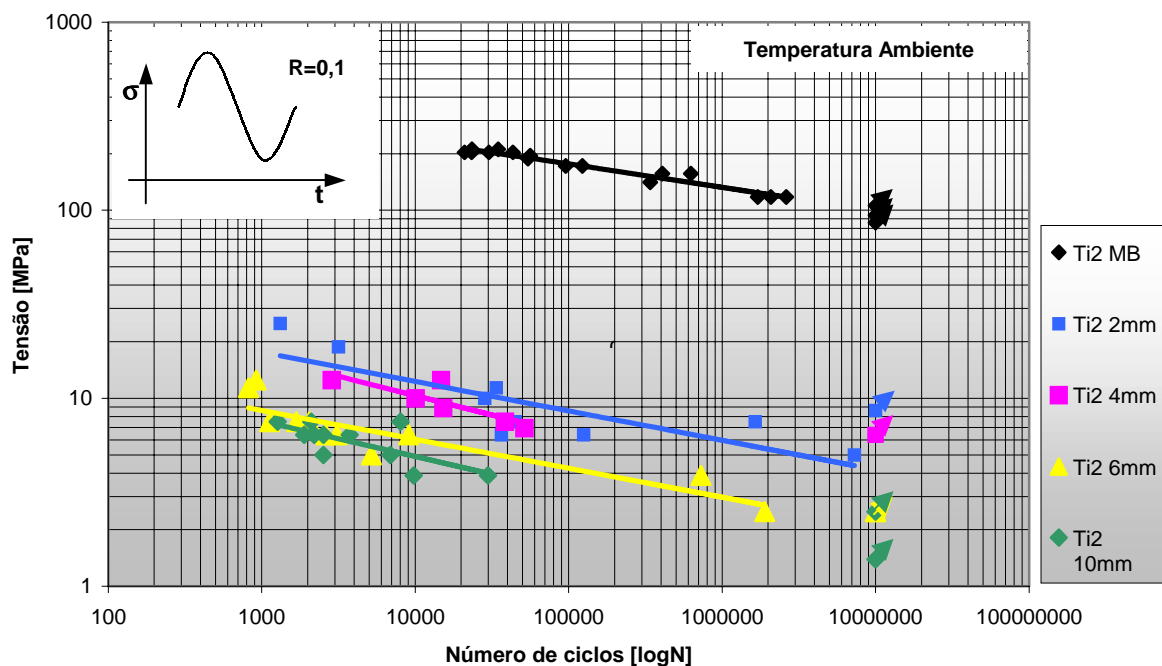


Figura 6.20 - Curva SN titânio grau 2.

Não foi possível a realização dos ensaios com Ti1 com as mesmas dimensões de flanges devido à indisponibilidade de material. Testou-se para este material apenas o flange de 10mm para uma comparação com o mesmo flange em Ti2. Os resultados podem ser visualizados na Figura 6.21.

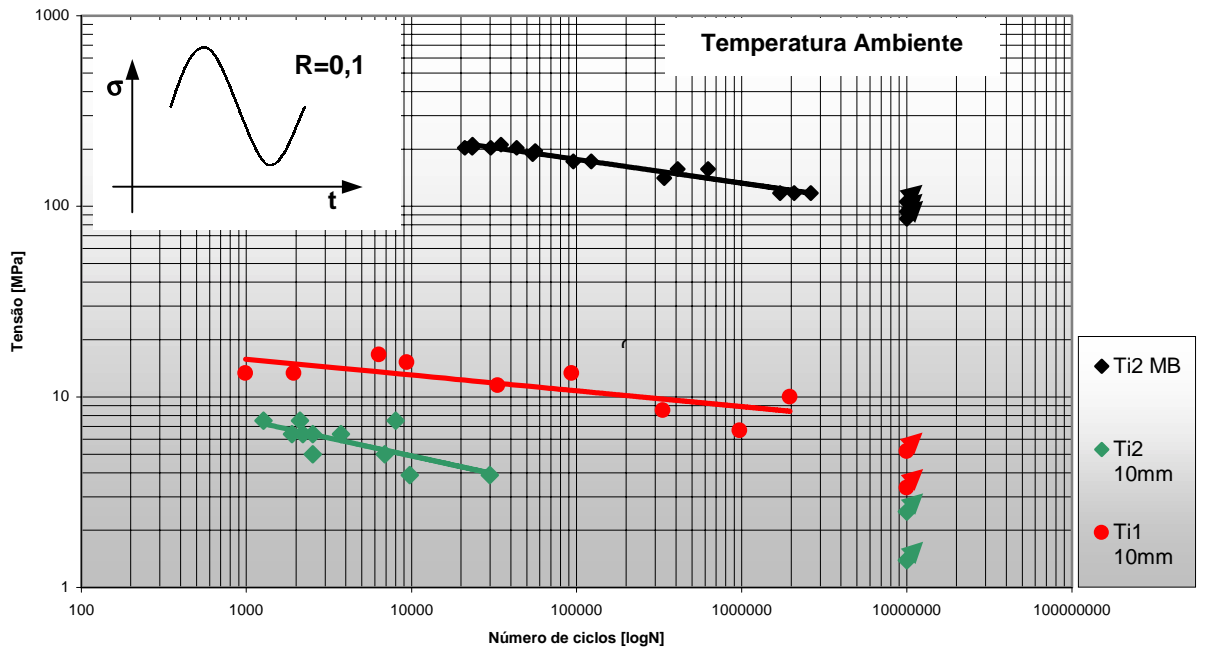


Figura 6.21 - Curva SN titânio grau 1 e 2 flange 10mm.

6.3 Aspectos Geométricos

Titânio grau 1 e grau 2 têm um comportamento similar considerando a queda da resistência à tração com o aumento do flange. Os valores de resistência à tração encontrados para o titânio grau 1 são superiores aos encontrados para o titânio grau 2 como pode ser visto na Figura 6.11. De zero milímetros, isto é, uma geometria de solda de topo, até 3 milímetros (região I) há uma grande variação na tensão de tração. Esta queda abrupta é provavelmente linear como mostrado no diagrama. Tamanhos de flanges menores que 3mm levaram a instabilidades do processo que apresentaram resultados não confiáveis.

A geometria de junta em aresta apresentou resultados satisfatórios para o caso do titânio grau 1, mas para o caso do titânio grau 2 os resultados foram indesejados.

Esta geometria tem algumas particularidades que tornam sua preparação pré-soldagem muito importante para a obtenção de um elemento soldado confiável. A etapa de fixação das placas pode conduzir a uma perfeita soldagem das partes ou a imperfeições do cordão de solda que conseqüentemente irão gerar propriedades mecânicas indesejáveis.

As placas a serem soldadas devem ser conformadas de maneira que o comprimento do flange seja aproximadamente o raio de conformação mais a espessura da placa. (Figura 6.22).

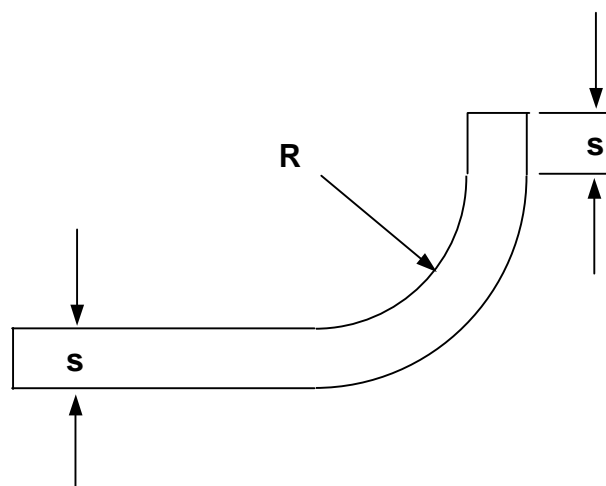


Figura 6.22 - Geometria de soldagem otimizada.

Caso contrário o elemento soldado produzirá instabilidades no processo resultando em um cordão de solda como mostrado na figura 41, levando a problemas como o efeito *Humping*

ou conduzindo a imperfeições do cordão de solda. As chapas também não devem curvadas em excesso, pois isso também poderá levar a instabilidades do processo (Figura 6.23) fazendo com que o feixe de laser atravessasse a junta sem soldar.

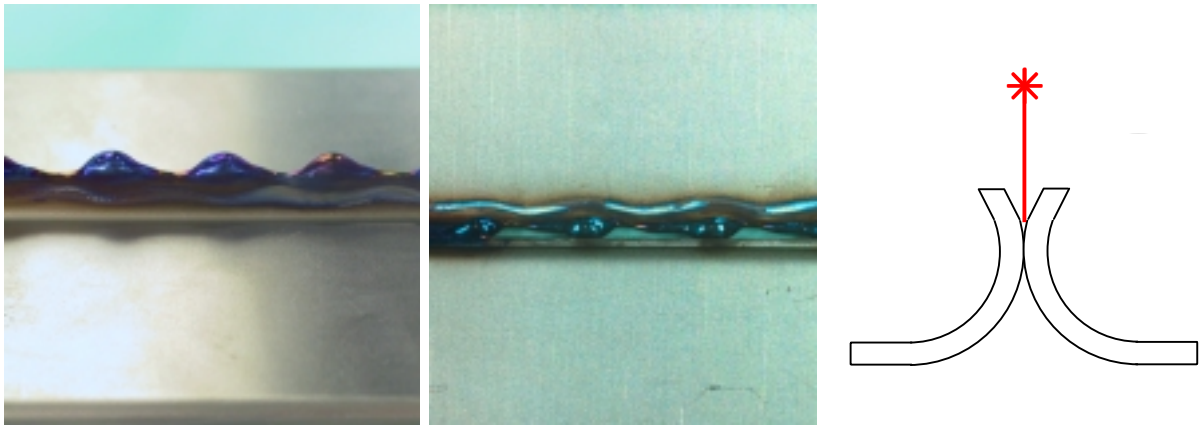


Figura 6.23 - Imperfeições no cordão de solda (esquerda) e excesso de curvamento (direita).

Flanges menores que 3mm de comprimento levam a instabilidades do processo. A penetração de soldagem deve ser pelo menos igual à espessura da chapa para que as propriedades mecânicas sejam confiáveis. Como a geometria de estudo tinha um raio de curvatura de 2mm, de acordo com a Figura 6.22 o menor comprimento de flange para se obter uma junta soldada confiável seria de 3mm.

As instabilidades do processo são causadas porque existe falta de material na poça de soldagem de maneira que o feixe de laser passa através das chapas sem soldar ou soldando com imperfeições (Figura 6.24).

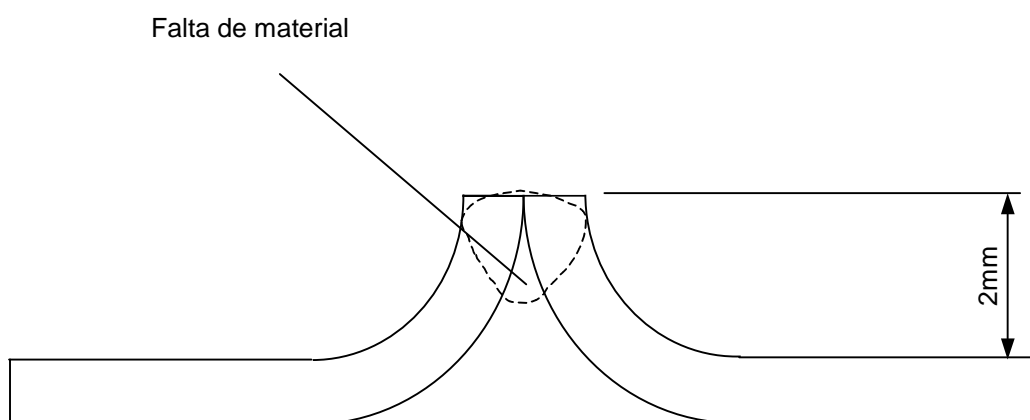


Figura 6.24 - Falta de material na poça de fusão (flange 2mm).

Foram feitas algumas tentativas para soldar flanges de 1mm de comprimento. A princípio pensava-se que flanges com 1mm de comprimento poderiam substituir o material de adição para o caso de soldagem de topo, mas após algumas tentativas foi comprovado que a falta de material na poça de fusão leva a instabilidades como mostrado na Figura 6.25.

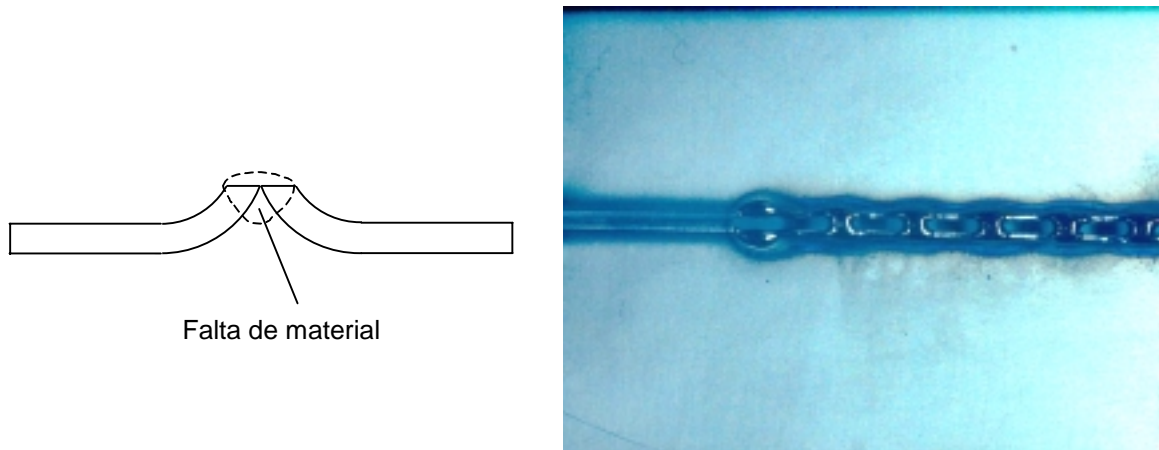


Figura 6.25 - Falta de material na poça de fusão (flange 1mm).

Também foram feitas tentativas com flanges de 2mm de comprimento. Teoricamente o processo se tornaria instável gerando uma soldagem com aparência não desejada e propriedades mecânicas não confiáveis. Mas com um pequeno deslocamento na posição do feixe de laser sobre a aresta da chapa, a junta pode ser soldada e apresentou resultados aceitáveis de propriedades mecânicas Figura 6.26.

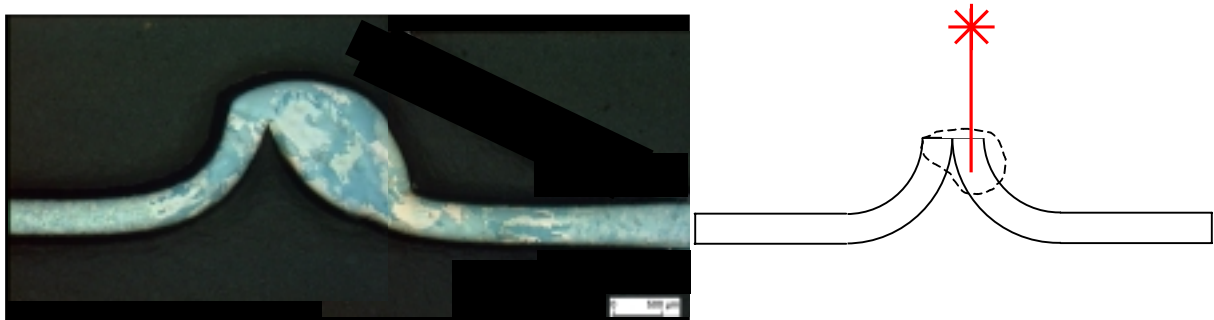


Figura 6.26 - Flange 2mm soldado.

Um outro problema está relacionado à fixação das chapas a serem soldadas. O posicionamento de ambas arestas dos flanges afeta a integridade da solda. As arestas dos flanges devem ser posicionadas de tal maneira a não existir desalinhamento entre as mesmas (Figura 6.27). Tais diferenças poderão conduzir a problemas nas soldas.

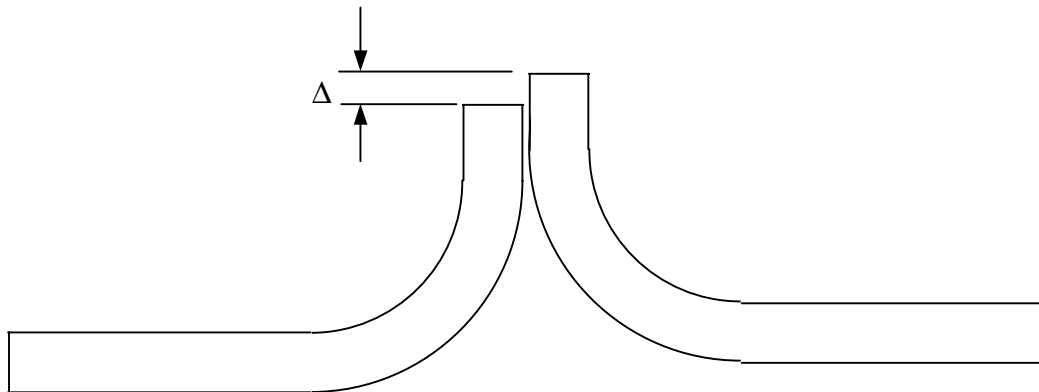


Figura 6.27 - Posicionamento dos flanges.

A folga entre as placas também tem influência sobre as propriedades mecânicas da junta soldada. *Bergmann* [9] verificou em soldas em aresta de titânio (chapas com 0,8mm de espessura) que uma folga de 0,6mm entre as chapas pode levar a uma redução de 10% da resistência à tração (Figura 6.28).

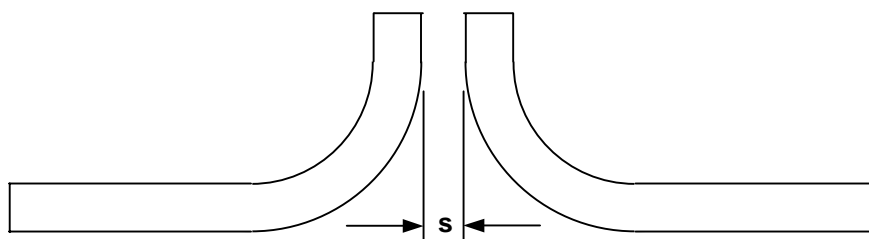


Figura 6.28 - Folga entre as chapas.

Além do problema de fixação das chapas, existe ainda o problema de posicionamento do feixe de laser. Sensores, sistemas automatizados ou uso de laser de diodo reduzem drasticamente o risco de tais erros, mas a título de ilustração pode-se verificar que existe a possibilidade de serem geradas soldas indesejadas devido a esse problema. A Figura 6.29 mostra um exemplo desse tipo de erro.

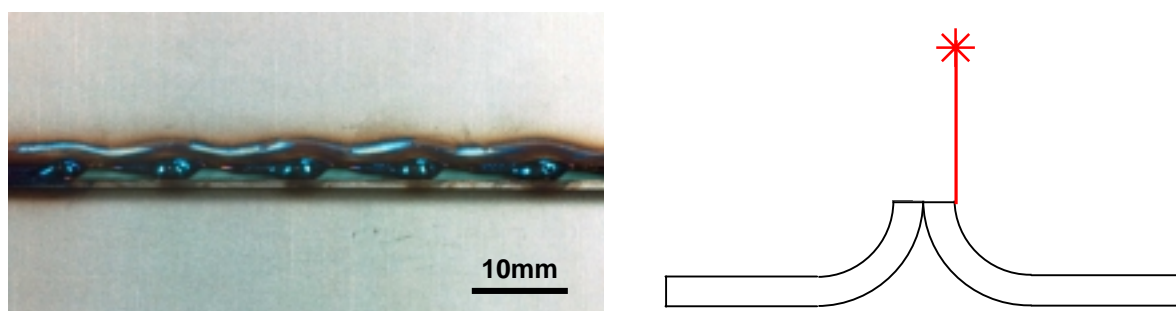


Figura 6.29 - Erro de posicionamento do feixe laser.

A partir de 3mm, a resistência à tração apresenta uma diminuição linear para ambos os materiais. Quanto maior o flange mais baixa é a resistência à tração devido ao aumento do braço de momento gerando uma tensão de flexão maior.

Como não há diferenças significantes nas zonas termicamente afetadas e na penetração, a queda da resistência à tração com a variação do comprimento do flange pode ser considerada linear.

A fratura sempre ocorreu entre a zona termicamente afetada e a zona de fusão como mostrado na figura abaixo (Figura 6.30).

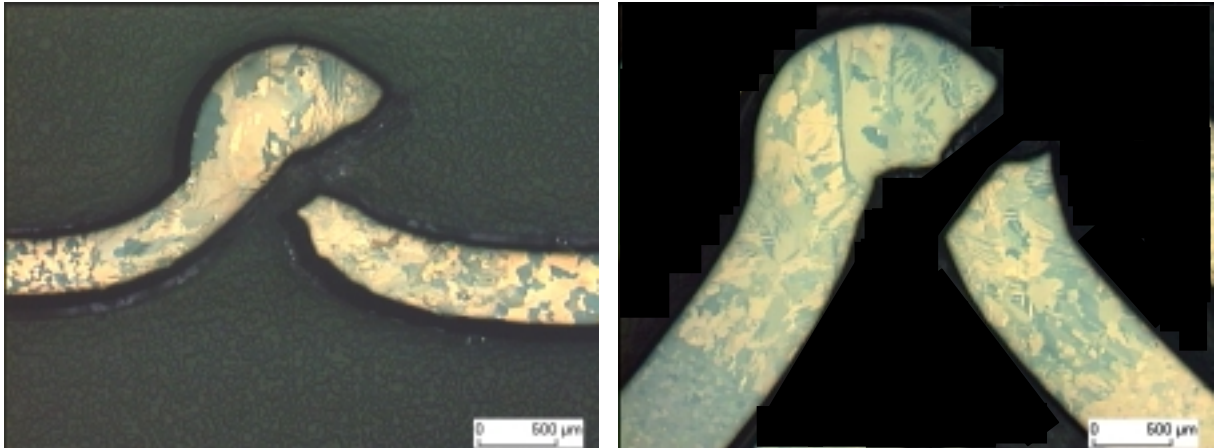


Figura 6.30 - Fratura da junta em aresta, esquerda Ti grau 1 e direita Ti2 grau 2.

Os ensaios de fadiga mostraram que a resistência decresce com o aumento do comprimento do flange. Comprimentos de flange de 6 a 10 mm apresentam praticamente o mesmo comportamento de fadiga. (Figura 6.20). Titânio grau 1 teve um melhor comportamento quando comparado ao titânio grau 2 para o flange de 10 mm. Obteve-se um comportamento semelhante ao flange 2mm em Ti grau 2. Isso ajuda a confirmar o melhor desempenho das soldas em arestas de titânio grau 1 quando comparado com soldas em aresta de titânio grau 2.

Devido à falta de material, não foi possível efetuar ensaios de fadiga com os demais comprimentos de flanges para o caso do titânio grau 1.

7 Conclusões

Titânio pode ser soldado por laser na geometria de junta em aresta desde que os devidos cuidados quanto à contaminação da solda por oxigênio e preparação das juntas sejam tomados.

Juntas soldadas em Titânio grau 1 apresentam melhores propriedades mecânicas, proporcionais às dos aços inoxidáveis austeníticos AISI 304 e Nirosta[®] H400.

Juntas soldadas em aresta de titânio grau 2 não apresentam propriedades mecânicas confiáveis quando comparadas com as do material base ou com outras geometrias do mesmo material devido à influência de sua composição química na resistência de deformação da junta quando submetida à esforços mecânicos.

Comprimentos de flange na faixa de 6 a 10mm apresentam comportamentos semelhantes para ambos os materiais testados.

Existe uma otimização do flange de acordo com o raio de curvatura da junta e a espessura da chapa a ser soldada. Soldas com geometrias não otimizadas podem gerar cordões irregulares ou imperfeições.

8 Sugestões para novos trabalhos

- Estudo de otimização dos parâmetros visando melhores propriedades mecânicas das juntas soldadas. Parâmetros de soldagem como potência de trabalho, foco e velocidade de soldagem devem ser otimizados de maneira que possa se ter certeza de que a faixa de trabalho pertence a um intervalo ótimo de parâmetros. O estudo não se preocupou em otimizar os parâmetros, mas sim de se trabalhar numa faixa com parâmetros aceitáveis que proporcionavam boas penetrações de solda.
- Aplicação de outros processos de soldagem para a geometria de junta em aresta e comparação com o processo a laser. Aplicação de processos como soldagem a plasma, TIG ou MIG para a soldagem do mesmo tipo de junta a fim de se verificar as vantagens ou desvantagens dos processos para esta geometria.
- Avaliação da resistência à corrosão das juntas soldadas a laser.
- Estudo da soldagem a laser na geometria de junta em aresta com materiais diferentes. A indústria automotiva trabalha com diversos tipos de peças as quais às vezes são compostas de materiais com propriedades diferentes, como é o caso do *tailored blank*. Devido a esse tipo de aplicação é interessante conhecer o comportamento de juntas soldadas com materiais diferentes como por exemplo Ti1 e Ti2, Ti1 e aço inoxidável ou Ti2 e aço inoxidável.
- Estudo da soldagem a laser de geometria em aresta com mais de duas chapas. Algumas configurações de juntas na indústria apresentam mais do que duas chapas, o que torna um estudo interessante verificar o comportamento mecânico ou parâmetros adequados para a soldagem de tais configurações de juntas.
- Avaliação da influência da quantidade de oxigênio nas propriedades mecânicas das juntas soldadas em titânio. A fim de se reduzir o consumo de argônio ou hélio na atmosfera de

soldagem, é interessante verificar até que ponto pode-se permitir a contaminação na junta soldada.

- Aplicação do laser de diodo na soldagem em aresta de titânio. O laser de diodo vem se mostrando uma excelente alternativa como fonte de soldagem na indústria devido a seu tamanho reduzido, tornando a automação ainda mais fácil e reduzindo custos. A forma retangular do foco do laser de diodo também apresenta vantagens para a soldagem da geometria de junta em aresta, pois pequenos deslocamentos ou erros de posicionamento do feixe não afetarão a qualidade da solda, dessa forma há uma redução dos custos do processo, pois não são necessários equipamentos especiais para o posicionamento ou monitoramento preciso do feixe.

9 Referências Bibliográficas

- [1]. AMENDE W., BEHNISCH H., BEYER E., BERGMANN H., et al., **Laserstrahltechnologien in der Schweißtechnik**. DVS Verlag, 1989, Deutschland.
- [2]. ANDERSON T., **Hydrocarbon emissions by liquid motor fuels in underground plastics pipes systems**. Pipe Magazine n.1 pp. 7-11, Sweden.
- [3]. ANDERSON T., **Polyethylene pipeworks for petrol stations – background**. Pipe Magazine n.1 pp.6-7, 1999, Sweden.
- [4]. AWS, **Welding Handbook-Metals and their Weldability**. Section 4, 6th Edition, 1972.
- [5]. AWS, **Welding Handbook-Welding Processes Resistance and Solid State Welding and Other Joining Processes**. Section 3, 7th Edition, 1980.
- [6]. BARRET J.C. et al., **Effect of Atmospheric Contaminants on Arc Welds in Titanium**. Welding Research Supplement. June 1953, p283s-291s.
- [7]. BERGMANN J.P., BERGMANN H., **Laserwelding of Titanium with Nd:YAG Laser**. Euromat 2001.
- [8]. BERGMANN J.P., **Laserstrahlschweißverbindung von Titan und Titanlegierungen sowie Schwingfestigkeitsnachweis der erzielten Schweißnahtgeometrie auch unter Korrosion**. AUDI – LMW Uni Bayreuth Projekt, 2001.
- [9]. BERGMANN J.P., SOUZA C.C., GUYENOT M., WALDMANN H., BERGMANN H., **Idoneità alla saldatura laser di materiali leggeri: il giunto d’orlo**. Giornata Nazionali di saldatura, novembre 2001, Italia.
- [10]. BERTOLOTTI, M., **Masers and Lasers**. 1983.

- [11].BIERMANN B.A, **Schneiden und Schweißen von Titan- und Aluminium-Luftfahrtlegierungen mit dem CO₂ Laser**. Technische Fakultät der Universität Erlangens-Nürnberg. Erlangen 1993.
- [12].BIMBERG D., **Material-bearbeitung mit Lasern: Grundlagen und Anwendungen**. Expert Verlag, 1991, Deutschland.
- [13].CARROL, J.M., **The Story of Laser**. New York E.P. Dutton&Co. 1964.
- [14].CASALINI G., **Confronto tra le proprietà meccaniche e microstrutturali di giunti testa a testa in lamiera sottile di titânio e sue leghe, per applicazioni automobilistiche effettuati tramite tecnologia TIG, Nd:YAG e Fascio Elettronico**. Tese di Láurea Università Degli Studi di Ferrara, Facoltà di Ingegneria dei Materiali, marzo 2002, Italia.
- [15].COLICA M., **Le Molteplici Possibilità del Titânio**. Titanium Industry n.1, maggio, 2001, pp.12-14, Italia.
- [16].DENNEY P.E., METZBOWER E.A., **Laser Beam Welding of Titanium**. Welding Research Supplement. August1989, p342s-346s.
- [17].DEUTSCHE TITAN, **Mit Titan Zukunft gestalten**, Katalog Krupp Thyssen, Deutschland, 2000.
- [18].DILTHEY U., **Verhalten der Werkstoffe beim Schweißen**. Schweisstechnische Fertigungsverfahren Band 2, 1995.
- [19].FALLER K., **Chevrolet Corvette demonstrates Titanium is priced right for production cars**. Titanium ITA Association, vol. I, Sept. 2000, pp. 1-3, USA.
- [20].FROES F.H., EYLON D., BOMBERGER H.B., **Titanium Technology: Present Status and Future Trends**. The Titanium Development Association, 1985, USA.
- [21]. **Fügetechnik Schweißtechnik**. DVS Verlag, 1995, Deutschland.
- [22].GALUCCI G., **Il grande fascino del “Museo Splendente”**. Titanium Industry n.1, maggio, 2001, pp.36-39, Italia.

- [23]. GOULD J.E., BECKER D., WILLIAMS J.C., **Microstructural characterization of Ti weldments**. R. Kossowsky, M.E. Glicksman (Eds.), Physical Metallurgy of Metal Joining. Metallurgical Society of AIME, Warrendale, PA, USA, 1980, pp. 199-221.
- [24]. GRIGORYANTS A.G., **Basics of Laser Material Processing**. Mir Publishers, 1994, USA.
- [25]. INOUE H., **Welding and joining of titanium and titanium alloys**. Welding Technique 1995 43 (8) 68-71, USA.
- [26]. ITA, **Titanium Facts**. International Titanium Association ITA. Colorado, USA. 1999.
- [27]. JAFEE R.I., **Metallurgical System**. R.I. Jafee, H.M. Burte (Eds.), Titanium Science and Technology, vol. 3, Pleunum Press, London, 1973, pp. 1665-1693.
- [28]. KINAS E.N., **Titanium Applications – US Army**. The science, technology and application of titanium, R.I. Jafee, Oxford, 1970, pp.1161-1167.
- [29]. KOLLER R., **Grundlagen des Metodischen Konstruierens von Laserschweißverbindungen. Laserschweißgerechtes Konstruieren**. DVS-Verlag, 1994, pp.15-24, Deutschland.
- [30]. KÖNIG, W., **Fertigungsverfahren – Band 3**. VDI – Verlag. Düsseldorf, Alemanha, 1990. p.133-180.
- [31]. LATHABAI S., JARVIS B.L., BARTON K.J., **Comparison of keyhole and conventional gas tungsten arc welds in commercially pure titanium**. Materials Science and Engineering A299, pp.81-93, 2001.
- [32]. MAZUNDER J., STEEN W.M., **Microstructure and Mechanical Properties of Laser Welded Titanium 6Al-4V**. Metallurgical Transactions. Vol. 13A, may 1982. p 865-871.
- [33]. MENDEZ P.F., EAGAR T.W., **Welding Processes for Aeronautics**. Advanced Materials & Processes, may 2001, pp. 39-43, USA.

- [34]. MENDEZ P.F., **New Trends in the Aeronautics Industry**. Conference New Trends for the Manufacturing in the Aeronautic Industry, may 24-25, 2000, pp. 21-38, Spain.
- [35]. MINNICK W.H., **Gas Tungsten Arc Welding Handbook**. 1992. p.177-182.
- [36]. MONTGOMERY, D., **Design and Analysis of Experiments**. 4a. Edição Wiley&Sons USA 1996.
- [37]. OKUMURA T., TANIGUCHI C., **Engenharia de Soldagem e Aplicações**. Rio de Janeiro. 1982.
- [38]. POPRAWA R., WESTER R., **Laser Tutorial**, ILT Fraunhofer Institut für Lasertechnik, Aachen, Alemanha 1998.
- [39]. RÜDINGER K., **Stand und Entwicklungstendenzen des Schweissens von Titan und seinen Legierungen**. Schweissen und Schneiden, 27 1995, Heft D, p366-369.
- [40]. SMITH L.S., THREADGILL P., GITTOS M., **Welding Titanium – A Designers and Users Handbook**. TWI, may 1999.
- [41]. STEEN W.M., **Laser Material Processing**. Springer-Verlag. 1996.
- [42]. TRUMPF, **Laser Welding**. Technical Documentation of TRUMPF Werkzeugmaschinen GmbH. 2000.
- [43]. WELSCH G., BOYER R., COLLINGS E.W., **Material Properties Handbook: Titanium Alloys**. ASM International, june, 1994, USA.
- [44]. WILLIAMS J.C., **Kinetics and Phase Transformation**. R.I. Jafee, H.M. Burte (Eds.), Titanium Science and Technology, vol. 3, Pleunum Press, London, 1973, pp. 1433-1494.
- [45]. WOOD D.J., **The Characterization of Particulate Debris Obtained from Failed Orthopedic Implants**. San Jose State University – College of Materials Engineering, Spring 1993, USA.
- [46]. ZELONI F., **La richiesta cresce: Quali i settori emergenti?** Titanium Industry n.1, maggio, 2001, pp.22-25, Italia.

- [47]. MANN K., **Diodengepumpte Scheibe – Ein Festkörper Lasersystem mit Potential – Haas Laser GmbH & Co. KG, Schramberg / Schwarzwald.** 3.Workshop Anwendung von Hochleistungs-Diodenlasern 14-15 Sept. Dresden 2000.
- [48]. EMMELMANN C., **Design von 2,4kW Diodengepumpten Nd:YAG – Rod – Lasern.** **Rofin Sinar Laser GmbH, Hamburg.** 3.Workshop Anwendung von Hochleistungs-Diodenlasern 14-15 Sept. Dresden 2000.
- [49]. BERGMANN H.W., WALDMANN H., **Einsatz des HLDL für das Schweißen von Leichtbaustrukturen.** Universität Bayreuth. 3.Workshop Anwendung von Hochleistungs-Diodenlasern 14-15 Sept. Dresden 2000.
- [50]. NASA Dryden Flight Research Center Photo Collection.
<http://www.dfrc.nasa.gov/gallery/photo/index.html/>

10 Anexos