

**CENTRO FEDERAL DE EDUCAÇÃO TECNOLÓGICA
CELSO SUCKOW DA FONSECA – CEFET/RJ**

**Análise das tensões residuais geradas nos
processos de soldagem MIG/MAG e Plasma**

Thiago de Menezes Maia

Prof.^a Orientadora: Tatiane de Campos Chuvas

**Rio de Janeiro
Junho de 2015**

**CENTRO FEDERAL DE EDUCAÇÃO TECNOLÓGICA
CELSO SUCKOW DA FONSECA – CEFET/RJ**

**Análise das tensões residuais geradas nos
processos de soldagem MIG/MAG e Plasma**

Thiago de Menezes Maia

Projeto final apresentado em cumprimento às
normas do Departamento de Educação Superior
do CEFET/RJ, como parte dos requisitos para obtenção
do título de Bacharel em Engenharia Mecânica

Prof^ª. Orientadora: Tatiane de Campos Chuvas

Rio de Janeiro

Junho de 2015

M217

Maia, Thiago de Menezes

Análise das tensões residuais geradas nos processos de soldagem
MIG/MAG e Plasma /Thiago de Menezes Maia – 2015
xii, 54f : il.color, grafs, tabs; enc.

Projeto Final (Graduação) Centro Federal de Educação Tecnológica
Celso Suckow da Fonseca , 2015

Bibliografia : f.51-54

Orientadora : Tatiane de Campos Chuvas

1.Solda e Soldagem. 2.Tensões residuais. I. Chuvas, Tatiane de
Campos (orient.). II. Título.

CDD 671.52

DEDICATÓRIA

Dedico este trabalho a todos aqueles que me apoiaram e acreditaram em mim.

AGRADECIMENTOS

Aos meus pais, Newton Alves Maia e Maria Cristina de Menezes Maia, por me apoiarem e acompanhar em todos os momentos, mostrando que todos são capazes de conseguirem seus objetivos quando estão dispostos a alcançá-los.

À minha irmã, Tatiana de Menezes Maia, por ter me apoiado e aconselhado em muitos momentos, tanto na minha vida profissional como social.

À minha namorada, pelo amor e incentivo em muitos momentos.

Ao Centro Federal de Educação Tecnológica Celso Suckow da Fonseca, pela infraestrutura e oportunidade de estudar nessa instituição e todos os professores que conheci ao longo dos anos.

À minha orientadora Tatiane Chuvas, pela ajuda, paciência e compreensão por todas as dificuldades surgidas ao longo da confecção do mesmo. Pelo conhecimento adquirido na área de soldagem.

À Dr^a. Maria Cindra Fonseca, por ter disponibilizado Laboratório de Análise de Tensões – LAT, do Departamento de Engenharia Mecânica da UFF para a realização das medições das tensões.

À Empresa White Martins, na pessoa do Engenheiro Marcos Lobato por, cordialmente, disponibilizar a infraestrutura para a realização da soldagem MIG/MAG e Plasma do aço AHSS DP 600.

RESUMO

A indústria automobilística vem investindo em novos processos de fabricação que melhorem produtividade sem perda de qualidade. Entretanto, tensões residuais resultantes de processos como a soldagem podem ser deletérias a vida do componente. Neste contexto, o conhecimento sobre a influência dos parâmetros de soldagem na natureza e magnitude das tensões residuais é de extrema importância, pois dessa maneira é possível otimizar os mesmos e evitar possíveis falhas. No presente trabalho, foi analisado a influência do gás de proteção no processo de soldagem GMAW na geração das tensões residuais superficiais de um aço avançado de alta resistência DP600, utilizado na indústria automobilística. Complementarmente, foi realizada uma comparação com as tensões residuais resultantes do processo automatizado de soldagem à plasma por *keyhole*, que mesmo sendo um processo de alta produtividade ainda não é muito explorado industrialmente. As tensões residuais, que se apresentaram trativas na zona termicamente afetada em uma das condições de soldagem MIG/MAG, foram medidas por difração de raios-X, pelo método do $\text{sen}2\psi$.

Palavras-Chave: aço DP600; soldagem a plasma; soldagem MIG/MAG, tensões residuais; gases de proteção, difração de raios-X.

ABSTRACT

The auto industry has invested in new manufacturing processes that improve productivity without loss of quality. However, residual stresses resulting from processes such as welding may be deleterious component life. In this context, knowledge about the influence of welding parameters on the nature and magnitude of the residual stresses is extremely important, because that way you can optimize them and avoid possible failures. In the present study, we analyzed the influence of shielding gas in GMAW welding process in the generation of surface residual stress of an advanced high strength steel DP600, used in the automotive industry. In addition, it performed a comparison with the residual stresses resulting from the automated process of welding to plasma keyhole, that even being a high productivity process is still not much exploited industrially. The residual stress, which tensile stress presented in the heat affected zone in welding conditions of the MIG / MAG were measured by X-ray diffraction at sen2ψ method.

Key-words: Steel DP600; Plasma welding; GTAW, residual stresses; shielding gases, X-ray diffraction.

SUMÁRIO

Introdução.....	1
1.1 Motivação.....	1
1.2 Justificativa.....	2
1.3 Objetivos	2
1.4 Metodologia e Trabalho Realizado	3
1.5 Organização do Trabalho	3
2 Revisão Bibliográfica	4
2.1 Aços Dual – Phase.....	4
2.2 Soldagem MIG/ MAG.....	7
2.2.1 Gases de Proteção.....	11
2.3 Soldagem a Plasma.....	12
2.3.1 Método de Keyhole:	16
2.4 Tensões Residuais	18
2.4.1 Tensões Residuais em Soldagem	20
2.4.2 Métodos de medição de tensões residuais	21
2.4.3 Tensometria por difração de raios-X.....	22
3 Materiais e Métodos	27
3.1 Material	27
3.2 Métodos.....	27
3.2.1 Corte	27
3.2.2 Soldagem MIG/MAG.....	30
3.2.3 Soldagem a plasma.....	31
3.2.4 Análise de tensões residuais	33
4 Resultados e Discussões	36
5 Conclusão	49
6 Trabalhos Futuros.....	50
Referências Bibliográficas:.....	51

LISTA DE FIGURAS

FIGURA 1: Microestrutura do aço bifásico.	5
FIGURA 2: Desenvolvimento dos aços avançados de alta resistência	6
FIGURA 3: Curvas de tensão-alargamento de aços DP e microligados com a mesma composição química e um aço carbono	7
FIGURA 4: Processo de soldagem MIG/MAG	8
FIGURA 5: Sistema básico para soldagem MIG/MAG.....	9
FIGURA 6: Modo de transferência metálica.....	10
FIGURA 7: Aplicação de <i>tailored blanks</i> na lateral de um veículo.....	13
FIGURA 8: Esquema da tocha de soldagem a arco por plasma.....	14
FIGURA 9: Sistema básico de soldagem a plasma	15
FIGURA 10: Métodos de processo de soldagem a plasma.	16
FIGURA 11: Esquema do Processo Keyhole (PAW)	16
FIGURA 12: Representação da diminuição do valor de tensão aplicada devido a presença de tensão residual de natureza compressiva	18
FIGURA 13: Superposição dos três tipos de tensões residuais.....	19
FIGURA 14: Distribuição de tensões residuais superpostas geradas por um arco convencional: (C) Contração, (T) Transformação de fase e (R) Resfriamento intenso na superfície	21
FIGURA 15: Modelo esquemático dos raios – X incidentes e difratados na rede cristalina do material	23
FIGURA 16: Modelo do estado plano de tensões	25
FIGURA 17: Sistema de corte a plasma semiautomático: (a) montagem da tocha de plasma, (b) módulo de plasma, (c) controle da parte móvel da tocha.	28
FIGURA 18: Esquema de corte a plasma das chapas.	29
FIGURA 19: Serra de fita utilizada para o segundo corte.....	29
FIGURA 20: Esquema de corte mecânico das chapas.	30
FIGURA 21: Fonte Fronius utilizada na soldagem MIG/MAG.....	31
FIGURA 22: Sistema de soldagem a plasma White Martins.	32
FIGURA 23: Analisador de tensões X-Stress3000: (a) Equipamento completo; (b) Sistema de medição.	34
FIGURA 24: Pontos de medição dos perfis (L) longitudinal e (T) transversal.....	34
FIGURA 25: Posições de medidas das tensões residuais nas diferentes regiões das juntas.....	35

FIGURA 26: Tensões residuais na ZTA Transversal - 1º passe.	37
FIGURA 27: Tensões residuais na ZTA Transversal - 2º passe.	37
FIGURA 28: Tensões residuais na ZTA Longitudinal - 1º passe.	38
FIGURA 29: Tensões residuais na ZTA Longitudinal - 2º passe.	39
FIGURA 30: Tensões residuais no MS Transversal - 1º passe.	40
FIGURA 31: Tensões residuais no MS Transversal - 2º passe.	41
FIGURA 32: Tensões residuais no MS Longitudinal - 1º passe.	41
FIGURA 33: Tensões residuais no MS Longitudinal - 2º passe.	42
FIGURA 34: Perfil transversal das amostras - 1º passe.	43
FIGURA 35: Perfil transversal das amostras - 2º passe.	43
FIGURA 36: Perfil longitudinal das amostras - 1º passe.	44
FIGURA 37: Perfil das amostras (longitudinal - 2º passe) 1 e 8.	44
FIGURA 38: Amostras soldadas por GMAW nas condições 1 e 2.	45
FIGURA 39: Perfil das tensões residuais na direção transversal soldada a PAW.	46
FIGURA 40: Perfil das tensões residuais na direção longitudinal soldada a PAW.	46
FIGURA 41: Tensões residuais transversais nas amostras soldadas nas duas condições de GMAW e uma em PAW.	47
FIGURA 42: Tensões residuais longitudinais nas amostras soldadas nas duas condições de GMAW e uma em PAW.	48

LISTA DE TABELAS

TABELA 1: Principais gases e misturas de proteção utilizados no processo de soldagem MIG/MAG.....	11
TABELA 2: Comparação entre os métodos de medição de tensões residuais.....	22
TABELA 3: Composição química do aço AHSS DP600 de 4,15mm (em % de peso)..	27
TABELA 4: Propriedades mecânicas do aço DP600	27
TABELA 5: Parâmetros de soldagem utilizados no processo MIG.....	30
TABELA 6: Percentual de composição química do eletrodo ER70S6 (em % de peso) .	31
TABELA 7: Parâmetros de soldagem das juntas.	32
TABELA 8: Tensões residuais na ZTA.	36
TABELA 9: Tensões residuais no metal de solda (MS).	39

LISTA DE EQUAÇÕES

EQUAÇÃO (1):.....	23
EQUAÇÃO (2):.....	23
EQUAÇÃO (3):.....	24
EQUAÇÃO (4):.....	24
EQUAÇÃO (5):.....	24
EQUAÇÃO (6):.....	25
EQUAÇÃO (7):.....	25
EQUAÇÃO (8):.....	25

LISTA DE ABREVIATURAS E SIMBOLOS

AHSS – Advanced High Strength Steel

Al – Alumínio

Ar- Argônio

CA – Corrente Alternada

CC – Corrente Contínua

CO₂ – Dióxido de Carbono

CP – Corrente Pulsada

Cu - Cobre

d - distância interplanar;

DP – Dual Phase

E - Módulo de elasticidade do material

GMAW- Gas Metal Arc Welding

He – Hélio

K - Fator de escala do equipamento

L₅₀ e L₀ - Distância entre as intensidades máximas dos feixes difratados em relação à linha de referência

MAG – Metal Active Gas

MB – Metal de Base

Mg – Magnésio

MIG- Metal Inert Gas

MS – Metal de Solda

O₂ – Oxigênio

PAW – Plasma Arc Welding

SAE – Society of Automotive Engineers

TIG – Tungsten Inert Gas

TR – Tensões Residuais

ZF – Zona Fundida

ZTA – Zona Termicamente Afetada

ΔL_{calib} - Diferença entre L_{50} e L_0 para os feixes difratados pelo material de calibração (sem tensões residuais)

ε - Deformação

θ - ângulo entre o feixe incidente e o plano refrator.

θ_0 - Valor do ângulo de Bragg para o material sem tensão residual

λ - comprimento de onda;

ν - Coeficiente de Poisson

σ - Tensão

Capítulo 1

Introdução

Tensões residuais são tensões internas auto equilibradas e existentes nos materiais, em condições de temperatura uniforme e sem carregamento externo. Portanto, qualquer modificação como a remoção de material e aplicação de carregamentos térmicos ou mecânicos, gerados por processo de fabricação ou condições de trabalho alteram o seu estado e causam sua redistribuição, de modo que as tensões se reequilibrem. Neste contexto, já é bem detalhado na literatura que tensões residuais tratativas têm efeito deletério nos materiais, pois diminuem a vida em fadiga e a resistência à corrosão sob tensão dos mesmos. Por outro lado, tensões superficiais de natureza compressiva oferecem benefícios, principalmente, por ser uma barreira para a propagação de trincas. Dessa forma, o setor industrial vem desenvolvendo técnicas para introduzir tensões compressivas ou minimizar a magnitude das tensões residuais tratativas em seus componentes, principalmente em juntas soldadas.

Neste trabalho foi realizado um estudo experimental sobre a influência do percentual de CO₂ nos gases de proteção com base em Argônio, no processo de soldagem MIG /MAG, processo amplamente utilizado na indústria automobilística, nas tensões residuais do aço avançado de alta resistência DP600. Complementarmente, realizou-se uma comparação das tensões residuais provenientes do processo MIG/MAG com as tensões em juntas do mesmo material soldadas a Plasma, um processo automatizado de grande produtividade, mas ainda pouco explorado.

1.1 Motivação

A presença de tensões residuais (TR), geradas em todos os processos de fabricação, constitui um dos grandes problemas encontrados na indústria metal mecânica, pois estas podem se somarem as tensões de carregamento externo e causar falhas catastróficas em equipamentos e componentes. Assim, estudos sobre o efeito dessas tensões em peças e estruturas têm aumentado, consideravelmente, nos últimos

anos. Entretanto, sendo a soldagem um dos processos de fabricação mais utilizados atualmente, é necessário conhecer como os parâmetros de soldagem influenciam na geração de tensões residuais.

1.2 Justificativa

Os processos de soldagem semi-automáticos e/ou automáticos, como o MIG/MAG, são muito utilizados na indústria automobilística com o objetivo principal de aumentar a produtividade, que é alcançado com um estudo preciso sobre os parâmetros de soldagem que serão aplicados para cada condição. Entretanto, existem poucos dados sobre como esses parâmetros influenciam na geração de tensões residuais nos processos de soldagem. Nessa mesma linha de raciocínio, considerando os grandes avanços tecnológicos no setor, o processo de soldagem a plasma tem grande potencial para aumentar ainda mais a produtividade. Contudo, sua utilização ainda é restrita e o conhecimento sobre tensões residuais em juntas de aços aplicados na indústria automobilística é bem escasso.

1.3 Objetivos

O objetivo desse trabalho é caracterizar, no âmbito das tensões residuais, a influência dos gases de proteção no processo semi-automático MIG/MAG e, adicionalmente, apresentar dados prévios sobre a natureza e magnitude das tensões residuais superficiais resultantes de um processo de soldagem totalmente automatizado como a soldagem a plasma.

1.4 Metodologia e Trabalho Realizado

O material utilizado neste trabalho, uma chapa de aço avançado de alta resistência - DP600 foi primeiramente cortado com processos que resultassem em uma zona termicamente afetada (ZTA) mínima para não influenciar nos resultados.

As soldagens foram realizadas na White Martins com controle rigoroso dos parâmetros. Após a soldagem, as tensões residuais superficiais foram medidas por difração de raios-X, pelo método $\text{sen}^2\psi$, nas direções longitudinal e transversal as juntas soldadas em três regiões distintas para a soldagem MIG/MAG: zona termicamente afetada (ZTA), metal de solda (MS) e metal de base (MB). Com relação à soldagem a plasma, as medições foram mais restritas a zona fundida (ZF). Finalizando, perfis de tensões residuais transversais foram adquiridos para cada condição.

1.5 Organização do Trabalho

O presente trabalho foi realizado em cinco etapas: Revisão bibliográfica, materiais e métodos; resultados e discussões; conclusão; sugestões para trabalhos futuros.

Na revisão bibliográfica, os conceitos e definições relevantes são discutidos para melhor embasamento teórico e desenvolvimento do trabalho. Em materiais e métodos relata a parte experimental do trabalho: corte das amostras, soldagem das amostras nos dois processos de soldagem (MIG/MAG e plasma). Nos resultados e discussões, todas as análises sobre as tensões provenientes das soldagens são apresentadas e após, conclusões e sugestões para trabalhos futuros.

Capítulo 2

2 Revisão Bibliográfica

2.1 Aços *Dual – Phase*

Atualmente, a preocupação com o meio ambiente tem aumentado, devido ao crescimento exponencial na emissão dos gases poluentes, favorecendo o aquecimento global. Com esta preocupação, a indústria automobilística vem buscando novos materiais, com alta resistência a tração e com boa tenacidade, para a fabricação dos veículos mais leves, resultando em um menor consumo de combustível [1].

Os aços bifásicos (também chamados *Dual-Phase*) são amplamente utilizados na indústria automobilística, devido a sua alta resistência mecânica, grande alongamento e alta taxa de endurecimento. A tecnologia de fabricação desses aços iniciou-se na década de 70, porém só a partir de 2000 a indústria automobilística investiu na sua utilização, com o intuito de diminuir o peso da estrutura dos veículos, e conseqüentemente, o consumo de combustível e emissões de gases poluentes na atmosfera [2,3].

Como apresentado na Figura 1, os aços *Dual-Phase* (DP) possuem uma microestrutura composta basicamente por uma matriz de 80 a 85% de ferrita poligonal e 15 a 20% de martensita. A presença de uma matriz ferrítica macia possibilita ao aço uma alta ductilidade e conformabilidade, por outro lado, a martensita é responsável pelo endurecimento da matriz, dando ao aço uma alta resistência. Contudo, na prática, a microestrutura dos aços bifásicos é bem mais complexa, pois podem ter também bainita, austenita e perlita dependendo da composição do aço e das condições de processamento [4].

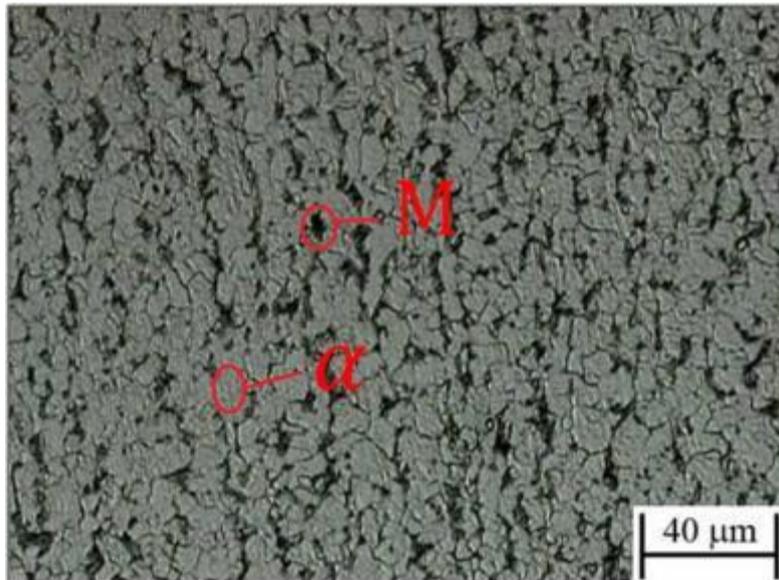


Figura 1: Microestrutura do aço bifásico [5 modificado].

A microestrutura bifásica pode ser obtida através de um resfriamento rápido e controlado do aço após sofrer um recozimento ou um processo de laminação a quente até uma zona térmica intercrítica, em uma faixa de temperatura entre A_1 e A_3 . Entretanto, tanto a taxa de resfriamento, quanto a presença dos elementos de liga no aço influenciam na microestrutura e nas propriedades mecânicas do material [2].

Os aços bifásicos pertencem à classe dos aços avançados de alta resistência (*AHSS, Advanced High Strength Steels*), como apresentado na Figura 2, e apresentam um percentual muito baixo de carbono, em média 0,1%, garantindo uma boa ductilidade, devido à fase ferrítica. Contudo, é necessária a inclusão de elementos de liga no aço, como por exemplo, o manganês, aumentando a temperabilidade do aço. A adição de Ni, Ti e V pode ser feita também para reforçar a precipitação de carbonetos [6].

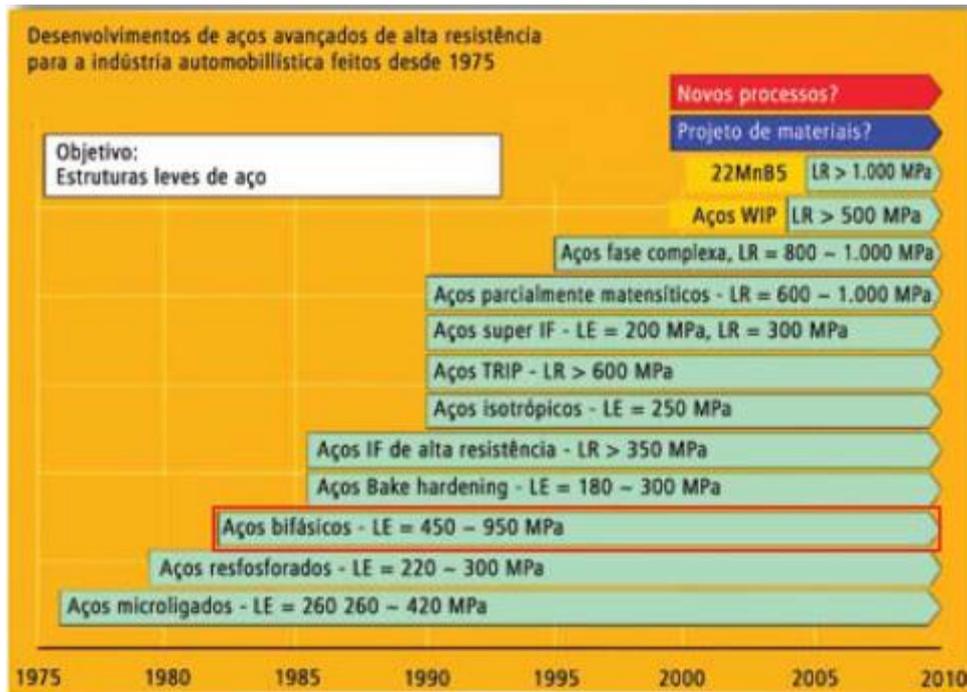


Figura 2: Desenvolvimento dos aços avançados de alta resistência [7 modificado].

A microestrutura dos aços bifásicos garante a esses aços uma boa ductilidade e um escoamento contínuo, como pode ser visto na Figura 3. Observa-se também, que os aços bifásicos apresentam uma resistência mecânica similar aos aços microligados, porém com uma ductilidade semelhante com a dos aços carbono [7].

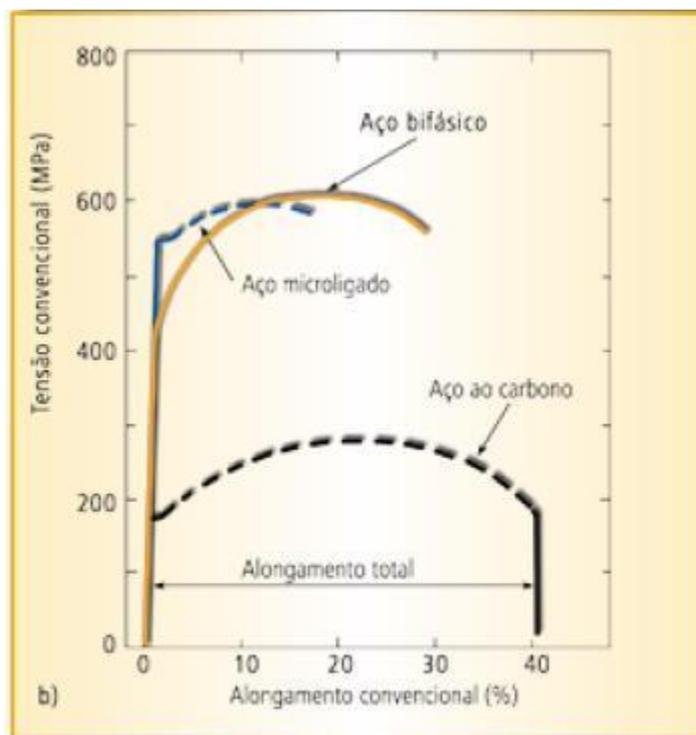


Figura 3: Curvas de tensão-alargamento de aços DP e microligados com a mesma composição química e um aço carbono [7].

Conforme a norma SAE J2745 [8], o aço DP600 deve possuir um limite de elasticidade entre 340 – 440 MPa, resistência a tração mínima de 590 MPa e alongamento na faixa de 21%.

2.2 Soldagem MIG/ MAG

A soldagem MIG/MAG (*GMAW – Gas Metal Arc Welding*) é um processo de soldagem a arco elétrico, com a finalidade de permitir a coalescência entre os metais, através do calor gerado pelo arco elétrico entre o metal de base e o eletrodo maciço contínuo com um gás de proteção, que pode ser inerte MIG (*Metal Inert Gas*) ou pode ser ativo MAG (*Metal Active Gas*). A Figura 4 representa o processo [9].

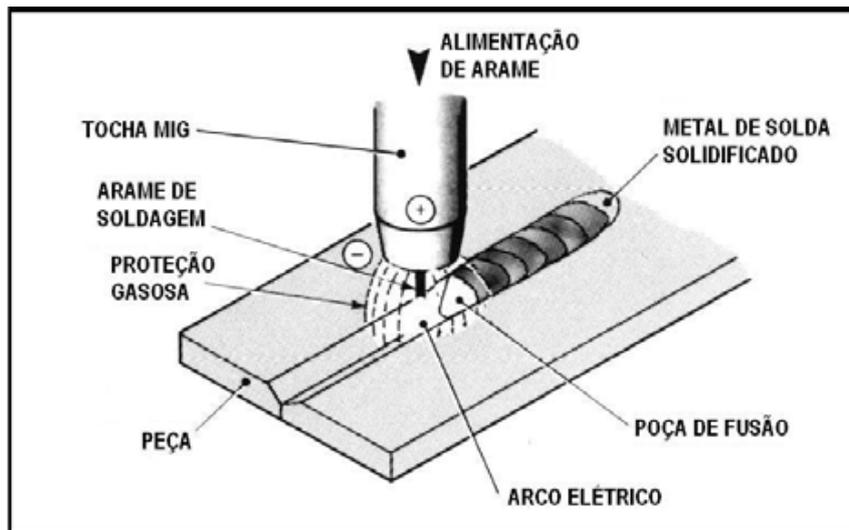


Figura 4: Processo de soldagem MIG/MAG [9].

O estudo desse processo teve início aproximadamente em 1920, mas foi introduzido no mercado industrial após 1948. No começo, foi utilizado para a soldagem do alumínio usando gás inerte – processo MIG. Posteriormente, foram desenvolvidas atividades com baixas densidades de correntes e correntes contínuas pulsadas, e uso de gases de proteção reativos (como, dióxido de carbono – CO_2) e misturas de gases. A utilização de gases de proteção reativos na poça de fusão deu origem ao processo MAG [9].

Atualmente, com os avanços tecnológicos em equipamentos e instrumentos aplicados, o processo GMAW é amplamente utilizado pelas indústrias, devido ao alto fator de trabalho e a alta densidade de corrente, que permite uma elevada taxa de fusão [10].

Comparado a outros processos de soldagem convencionais, como eletrodo revestido, TIG, arco submerso, o processo GMAW apresenta vantagens, como a alta taxa de deposição de metal de solda; soldagem sem utilização de fluxo, permitindo a visibilidade durante todo o processo; menor tempo de execução de soldagem (comparado ao eletrodo resvetido); o processo pode ser semi-automático ou automático; exige menor habilidade do operador do que o eletrodo revestido ou TIG, não há limite superior de espessura a soldar (o limite inferior é em torno de 4 mm para soldagem semi-automática e de 1,5 mm para soldagem automática) e não apresenta escória. Entretanto, algumas limitações devem ser destacadas, como: a alta velocidade de resfriamento, por não apresentar a camada de escória; limitações de soldagem no

campo, em razão da possibilidade de dispersão do gás protetor por ventos; maior sensibilidade às variações dos parâmetros elétricos de operação, que influenciam diretamente na qualidade do cordão de solda depositado; além de necessitar de equipamentos mais caros, complexos e pouco portáteis [11,12].

O processo MIG/MAG opera normalmente com corrente contínua (CC) e a polaridade pode ser reversa (mais usual) ou direta. A polaridade reversa é caracterizada por apresentar o eletrodo ligado ao pólo positivo e a direta, por sua vez, o eletrodo ligado no pólo negativo [9].

O equipamento básico para soldagem GMAW, mostrado na Figura 5, é constituído de: uma fonte de energia, uma tocha de soldagem com um jogo de bocais, um alimentador de arame, um par de cabos elétricos, um jogo de válvulas redutoras para o gás de proteção, canalizações para transporte do gás, sistema de controle, uma fonte para o gás de proteção e uma garra para fixação do cabo a peça [11].

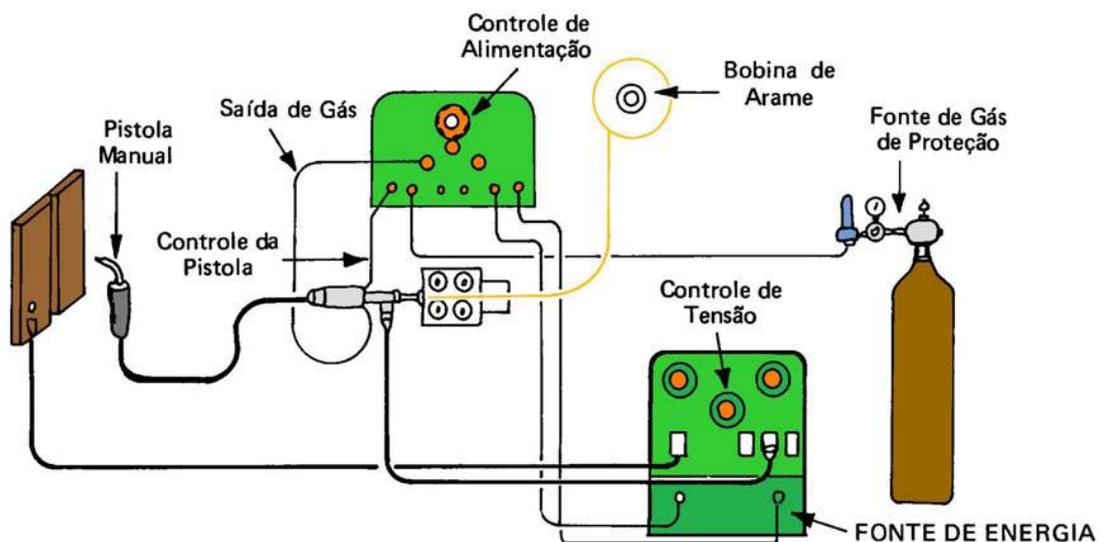


Figura 5: Sistema básico para soldagem MIG/MAG [13].

Alguns ajustes nas variáveis operacionais, como: corrente, tensão, o diâmetro e a composição química do eletrodo usado, gás de proteção, entre outros, influenciam no modo de transmissão metálica, ou seja, forma como o metal fundido se transfere do eletrodo para poça de fusão. O modo de ocorrência da transferência metálica é muito importante para o processo de soldagem, visto que afeta diretamente algumas características como a quantidade de respingos, estabilidade do arco, quantidade de

gases absorvida pelo metal fundido e até a aplicabilidade em determinadas posições de soldagem. Basicamente, existem três formas básicas de transferência do metal de adição do eletrodo para a peça: curto-circuito, globular e por *spray* (também chamado de aerossol), conforme apresentado na Figura 6 [11,12,14].

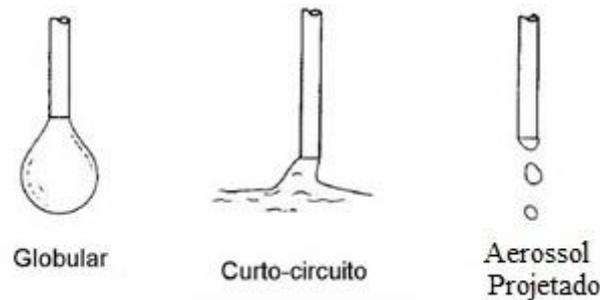


Figura 6: Modo de transferência metálica [11 modificado].

A transferência por curto circuito é assim denominado, pelo fato da gota de metal líquido na ponta do eletrodo atingir um determinado tamanho, encostando na poça de fusão periodicamente, criando um curto circuito. A soldagem com esse modo de transferência metálica opera com tensões e correntes baixas e bastante utilizada para soldagem de materiais com espessuras pequenas em qualquer posição de soldagem, grandes espessuras na posição vertical ou sobrecabeça e no enchimento de largas aberturas. Também é usada para peças que tenham como restrição o mínimo de distorção. Todavia, devido a grande instabilidade do arco, esse modo de transferência pode gerar uma quantidade elevada de respingos, que pode ser minimizada pela escolha correta dos parâmetros de soldagem [9,12].

No modo de transferência metálica globular, a corrente e a tensão de soldagem são superiores que as utilizadas no modo de curto circuito. O metal se transfere através do arco e a gota de metal fundido apresenta um diâmetro maior que a do arame. Pode ocorrer curtos circuitos ocasionais e respingos [9]. Já a transferência metálica em *spray* se caracteriza por pequenas gotículas do metal fundido serem arremessadas a peça pelas forças eletromagnéticas. Como a energia é muito alta e a poça de fusão é muito fluida, só é recomendado a soldagem na posição plana e alguns casos na horizontal [15].

2.2.1 Gases de Proteção

As principais funções dos gases de proteção são: evitar a contaminação do ar atmosférico na poça de fusão e manter uma estabilidade no arco elétrico. O contato do ar atmosférico com a poça de fusão pode contaminar o metal de solda, podendo favorecer o surgimento de poros e resultar na diminuição a tenacidade e a ductilidade da solda; o hidrogênio, por exemplo, também pode causar trincas [9,15]. Os gases mais utilizados nos processos de soldagem MIG/MAG estão representados conforme a Tabela 1.

Tabela 1: Principais gases e misturas de proteção utilizados no processo de soldagem MIG/MAG [16 modificado].

Gás ou Mistura	Comportamento químico	Aplicações
Argônio (Ar)	Inerte	Quase todos os metais (menos aço)
Hélio (He)	Inerte	Al, Mg, Cu e suas ligas
Ar + 20 a 50% He	Ligeiramente oxidante	Idem He (melhor que 100% He)
Ar + 1 a 2% O ₂	Oxidante	Aços inoxidáveis e algumas ligas de Cu
Ar + 3 a 5% O ₂	Oxidante	Aços Carbonos e alguns baixas ligas
CO ₂	Oxidante	Aços Carbonos e alguns baixas ligas
Ar + 20 a 50% CO ₂	Oxidante	Diversos aços – transferência curto circuito
Ar + CO ₂ + O ₂	Oxidante	Diversos aços

A aplicação do dióxido de carbono é limitada no processo GMAW, por causa da deficiência de desempenho em algumas posições de soldagem, mesmo apresentando uma boa penetração da junta e um custo menor. Em contrapartida, conforme escrito por Mukhopadhyay e Pal (2006) [17], o argônio puro não é muito aplicado na soldagem de aços, por não apresentar uma boa estabilidade no arco e boas características da junta desejada. Assim, misturas de Ar - CO₂ vem sendo bastante usadas na soldagem de aços

carbono e aços de baixa liga, a fim de obter um equilíbrio entre incidência de respingos e penetração, com uma boa estabilidade de arco, trabalhando com maiores velocidades de soldagem [9,18].

O percentual de CO₂ ou de O₂ na mistura dos gases de proteção dependerá do material que se deseja soldar e o modo de transferência metálica pretendida na soldagem. O aumento da proporção do dióxido de carbono pode causar redução na condutividade do arco e no aumento da corrente de transição [18]. Acima de 20% de CO₂ a transferência em aerossol torna-se instável e começam a ocorrer transferências por curto-circuito e globular, de forma aleatória. Contudo, melhores penetrações são alcançadas com menos porosidade quando se utilizam adições de dióxido de carbono no lugar das adições de oxigênio [9].

Alguns estudos quanto à mistura e variações dos componentes dos gases de proteção mostram, por exemplo, que a força de Lorenz é maior num arco com argônio do que com a predominância do hélio; o arco elétrico torna-se mais constricto com a presença de hidrogênio, além de maior temperatura e tensão no arco, e conseqüentemente uma poça de fusão mais ampla; a temperatura do arco elétrico aumenta com a presença do hélio, hidrogênio ou nitrogênio, isso ocorre devido à baixa condutividade elétrica do hélio e o alto calor específico dos outros gases [18].

Para evitar a formação de monóxido de carbono no metal de solda, fabricantes do arame adicionam elementos desoxidantes no metal de adição, como o silício e o manganês, com a finalidade de se obter silicato de manganês, o qual possui um ponto de fusão e densidade inferior ao metal de solda, permanecendo na superfície do cordão de solda [15].

2.3 Soldagem a Plasma

O processo de soldagem a plasma por arco constricto teve início na década de 60 com o desenvolvimento da indústria aeroespacial. Contudo, a aplicabilidade nas indústrias em geral, começou nos anos 70. Alguns países, como Alemanha, ainda restringem a utilização deste processo, devido à falta de informações de regulação dos

parâmetros de soldagem e os materiais soldáveis, tendo em vista que, este processo exige uma menor tolerância, ou seja, melhor preparação das juntas [19].

A fabricação de equipamentos de aço inoxidável, como trocadores de calor e reatores, na indústria química e petroquímica, é uma das principais aplicações do processo de soldagem a plasma. Na indústria automobilística, esse processo pode ser utilizado na fabricação de radiadores, soldagem de componentes elétricos (transformadores e alternadores), eixos, componentes estruturais para linha branca, na confecção dos *tailored blanks* (Figura7) e na parte superior dos amortecedores [5,20].

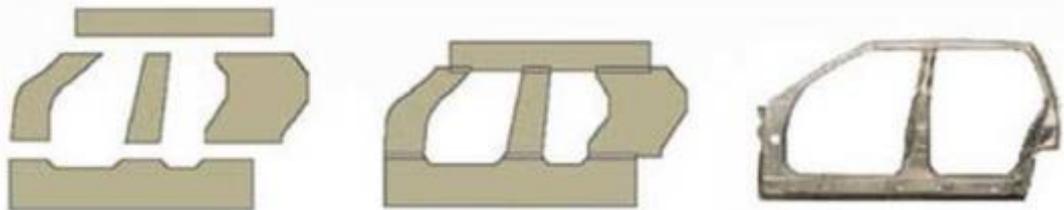


Figura 7: Aplicação de *tailored blanks* na lateral de um veículo [5].

A matéria apresenta três estados conhecidos: sólido, líquido e gasoso. O plasma é considerado o quarto estado da matéria, proveniente de um gás aquecido, alterando suas propriedades, como temperaturas e características elétricas. Este processo é conhecido como ionização, onde o gás passa ter elétrons livres e íons do gás em equilíbrio. Quando isso ocorre, o gás perde sua função de isolante e passa ser um meio condutor de corrente elétrica [21].

A soldagem a plasma é um processo de coalescência de metais através do aquecimento gerado por um arco elétrico constrito, o qual pode ser aberto por um eletrodo não consumível de tungstênio e a peça (arco transferido) ou entre o eletrodo e o bocal de constrição (arco não transferido) [22].

O arco elétrico é considerado constrito devido ao fato da tocha possuir um bocal (Figura 8), cuja função é restringir a saída do gás, concentrando a vazão do plasma em uma área pequena e, conseqüentemente, diminuindo a área da zona termicamente afetada (ZTA). Por ser um arco colimado, normalmente não é perturbado por campos magnéticos fracos, devido à maior velocidade do jato a plasma, possibilitando uma

melhor direção de soldagem. Além de apresentar uma pressão de 6 a 10 vezes maior do que um arco não-constrito e uma concentração de energia até 3 vezes maior [19,20].

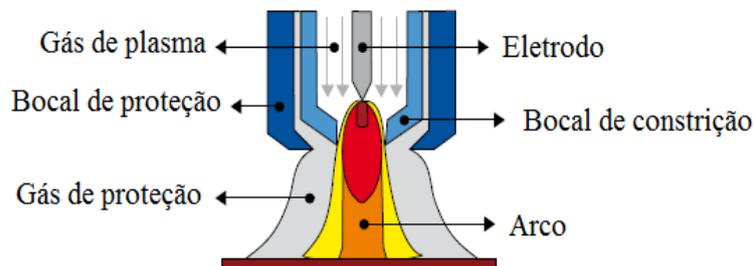


Figura 8: Esquema da tocha de soldagem a arco por plasma [19].

Como o eletrodo encontra-se no interior das tochas de soldagem a plasma, a abertura de arco ocorre pelo auxílio de um arco piloto de baixa potência, entre o eletrodo e o bocal constritor sob uma pequena vazão de gás plasma e um ignitor de alta frequência. Posteriormente, o arco principal é aberto pela energização entre o eletrodo e a peça [5].

Quando se necessita diversas aberturas de arco sequentemente, recomenda-se manter o arco-piloto aberto, com baixo nível de corrente (entre 2 a 15 A), com o intuito de minimizar a deterioração do eletrodo. Outro fator prejudicial é o pulso de alta tensão, que podem causar interferência em controladores eletrônicos em operadores automatizados [19].

A escolha do tipo de corrente a ser usada na soldagem a plasma influencia nas propriedades e na microestrutura do material. Normalmente, o tipo mais usado é de corrente contínua (CC) com polaridade direta, em que o eletrodo está conectado no polo negativo emitindo elétrons para o metal de base através da emissão termoiônica, necessitando de baixa energia e aquecendo pouco o eletrodo [23].

Outros tipos de correntes também são usados, como a corrente contínua pulsada (CP), utilizada na soldagem de chapas finas (espessura menor que 3 mm), e corrente alternada (CA) aplicada em soldagem de ligas de alumínio e similares [5,19].

Os equipamentos básicos para soldagem a plasma, conforme a Figura 9, são: gases plasma e proteção, reguladores/monitores de vazão de gás, fonte de soldagem,

módulo de controle de plasma, tocha de soldagem, cabos elétricos. Para casos específicos pode ser utilizado um sistema de alimentação de arame [24].

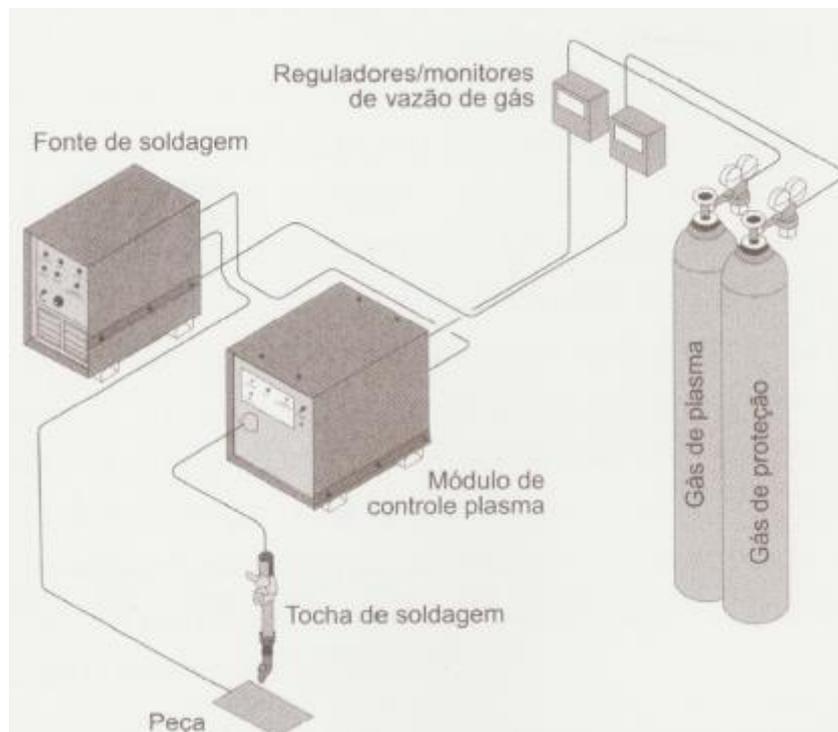


Figura 9: Sistema básico de soldagem a plasma [19].

O processo de soldagem plasma se subdivide em três métodos: microplasma, *melt-in* e *keyhole*, representados na Figura 10. O microplasma tem por característica principal a utilização de baixas correntes (0,1 a 15 A) que resulta em um arco de pequeno diâmetro, como uma agulha; normalmente, não possui metal de adição, usado para soldagens de fios e chapas finas da ordem de décimos de milímetro. O segundo processo, *metl-in*, opera em uma faixa de corrente entre 15 a 200A e é aplicado em chapas finas de até 3 mm de espessura. O *keyhole*, método aplicado no presente trabalho, é recomendado para soldagem de juntas entre 2,5 – 6 mm de espessura [19].

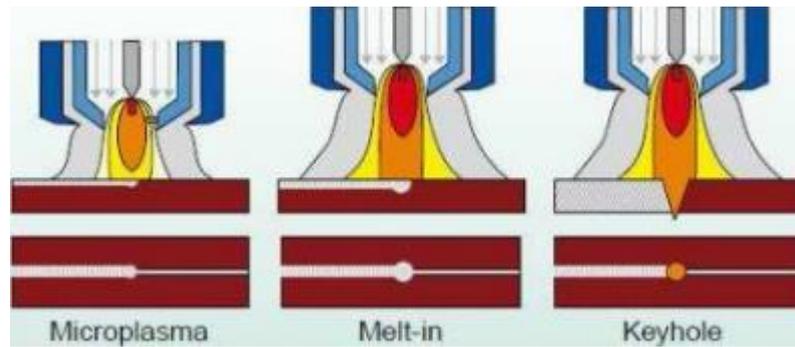


Figura 10: Métodos de processo de soldagem a plasma [5].

2.3.1 Método de *Keyhole*:

O método *keyhole* ou buraco de fechadura recebe essa nomenclatura, graças a forma como é feita a coalescência dos metais. O arco elétrico, neste método, incide sobre uma pequena área do metal de base, atravessando-o completamente formando um pequeno orifício, cujo o mesmo se fecha a medida que a tocha (o arco) avança no percurso de soldagem, esquema representado na Figura 11 [20].

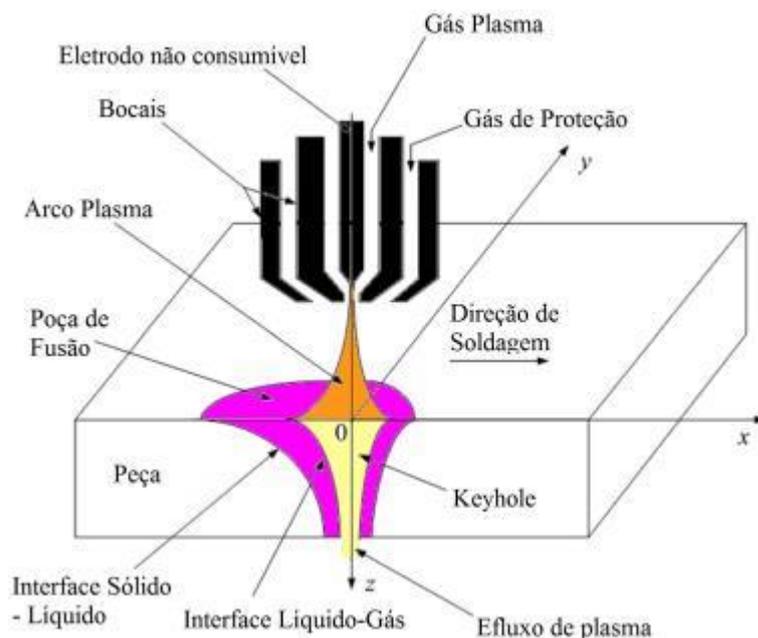


Figura 11: Esquema do Processo *keyhole* (PAW) [25 modificado].

O modo *keyhole* permite uma penetração total da junta em um único passe, além de ser um processo de soldagem autógena, e pode ser utilizado para soldar juntas de topo de até 8 mm de espessura. Entretanto, recomenda-se utilizar esse método para soldagem de juntas entre 2,5 – 6 mm de espessura [16,22].

Como relatado anteriormente, a escolha do método a ser utilizado varia de acordo com a espessura da junta a ser soldada e a composição química do material. Para o *keyhole*, sem adição de material, peças com espessuras acima de 6 mm tendem a ter uma raiz mais estreita, devido ao arco não apresentar energia suficiente para atravessar a peça, podendo causar a presença de vazios no interior do cordão. Porém, uma das formas de evitar estes vazios, é usar uma pequena abertura na preparação da solda, sendo a máxima permitida de 1 mm. No caso de juntas finas, a raiz do cordão será mais larga. Contudo, se a junta for muito fina, o *keyhole* pode não ser útil, perdendo a estabilidade, ou seja, não fechando o orifício quando o plasma transpõe a junta [19].

É evidente um acúmulo de material no início do cordão no método *keyhole* decorrente do fato do plasma estar ainda em fase de penetração. Ao final da soldagem é visualizada uma cratera no final do cordão, em virtude da interrupção do arco bruscamente. Nada obstante, esses defeitos podem ser eliminados ou minimizados pelo aumento ou diminuição da corrente de soldagem ou da vazão do gás e também uma diminuição na velocidade de deslocamento da tocha em relação a abertura do arco principal. Uma outra forma de minimizar esses defeitos nos cordões de solda é utilizar chapas de sacrifício no início da abertura do cordão e no final. Assim, os defeitos de abertura e de interrupção do arco estarão nas chamadas orelhas ou chapas de sacrifício, as quais serão descartadas e, desse maneira, se obtém uma junta soldada com alta qualidade superficial [19].

O método *keyhole* é aplicado na soldagem de aços estruturais, como o DP600, em automóveis, aviões, foguetes e, possivelmente, em soldagem espacial [26].

2.4 Tensões Residuais

As tensões residuais são tensões contidas no interior do componente, oriundas de algum processo térmico ou mecânico, ou seja, são tensões internas em equilíbrio no componente sem este estar submetido a algum carregamento ou de qualquer tipo de gradiente de temperatura [27].

Segundo MELO [28], o conhecimento da natureza das tensões, seja trativa ou compressiva, pode-se determinar o comportamento da estrutura do material quanto à fadiga. As tensões trativas são deletérias à materiais submetidos a trabalhos cíclicos, pois beneficia a propagação de trincas, levando o material a falhar por fadiga. Por outro lado, as tensões de natureza compressivas são benéficas, por dificultar a nucleação e a propagação de trincas, reduzindo a tensão total na superfície da peça, conforme a Figura 12 [29].

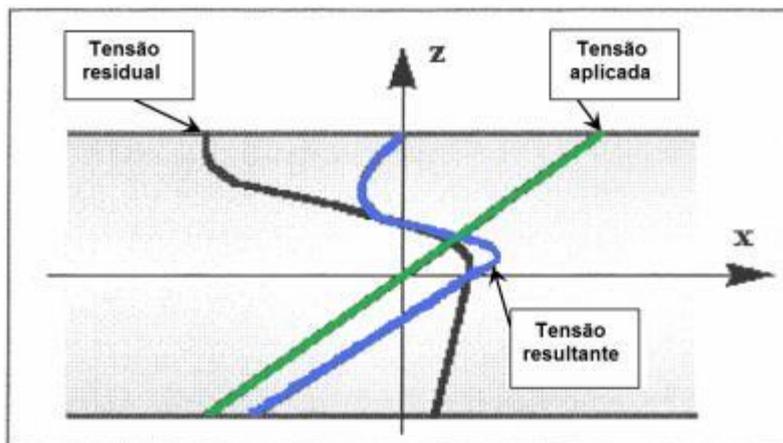


Figura 12: Representação da diminuição do valor de tensão aplicada devido à presença de tensão residual de natureza compressiva [30].

Comumente, as tensões residuais são classificadas em três tipos quanto a área de abrangência, são eles:

1) Macroscópica ou Tipo I:

São tensões praticamente uniformes e se expandem ao longo de vários grãos, e são auto-equilibrantes. Se houver alguma perturbação no arranjo de equilíbrio de forças

e momento, altera seu estado e as tensões sofrerão um rearranjo e se equilibrarão. Ocorre em materiais que sofreram laminação, gradiente térmico, têmpera [30].

2) Microscópica ou Tipo II:

São tensões quase uniformes e se expandem em um ou alguns grãos, no interior de uma fase ou entorno de um precipitado. Normalmente encontrada entre fases e partículas precipitadas e a matriz [5].

3) Submicroscópica ou Tipo III:

São tensões heterogêneas e se expandem nas dimensões interatômicas dos grãos [31].

Para se obter o estado total de tensões residuais em um determinado local, pratica-se o princípio de superposição em cada ponto (x,y, z), conforme na Figura 13, onde nota-se que, as tensões macroscópicas são as médias das combinações das tensões microscópicas e submicroscópicas de uma determinada região [5].

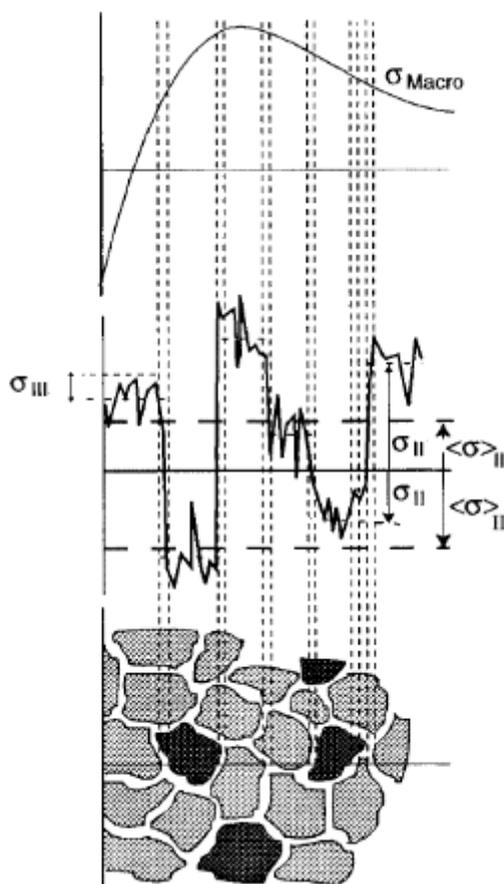


Figura 13: Superposição dos três tipos de tensões residuais [27].

Como relatado por NORCINO [27], as tensões residuais podem ser geradas por:

a) Efeito mecânico

São causadas por um gradiente de deformação plástica em razão de uma ação mecânica. Em muitos casos as tensões residuais têm uma natureza compressiva nas camadas superficiais, que ocorrem quando as tensões ultrapassam o limite de elasticidade, deformando plasticamente o material, endurecendo-o

b) Efeito térmico sem transformação de fase

A tensão residual depende da temperatura e do coeficiente de expansão do material. A superfície se deforma plasticamente por compressão durante o aquecimento, e ao resfriar não consegue voltar a posição inicial, gerando uma tensão de caráter trativo.

c) Efeito térmico com transformação de fase

A tensão é oriunda de uma mudança volumétrica heterogênea da formação de uma nova fase. O calor incidido no material promovendo uma mudança de fase na microestrutura, leva a camada externa a contração, gerando uma tensão superficial de natureza trativa e na camada subsuperficial tensões de caráter compressivas.

2.4.1 Tensões Residuais em Soldagem

O ciclo térmico de soldagem influencia na geração das tensões residuais, devido ao aquecimento em uma região localizada, com mudança de fase na zona termicamente afetada (ZTA) a zona fundida (ZF), além de um resfriamento não uniforme da peça, acompanhado de gradientes térmicos que surgem entre a superfície e o núcleo da junta. Este aporte de calor induzido na peça faz com que a mesma dilate e sofra uma deformação plástica e elástica, que se dificultada pelas regiões adjacentes resultam em mudanças permanentes de forma e de suas dimensões (distorções). Desta forma, tensões internas (tensões residuais) de natureza compressiva ou trativa são geradas na peça [5,12].

A Figura 14 representa a superposição das tensões residuais de diferentes origens resultantes de um processo de soldagem de arco convencional.

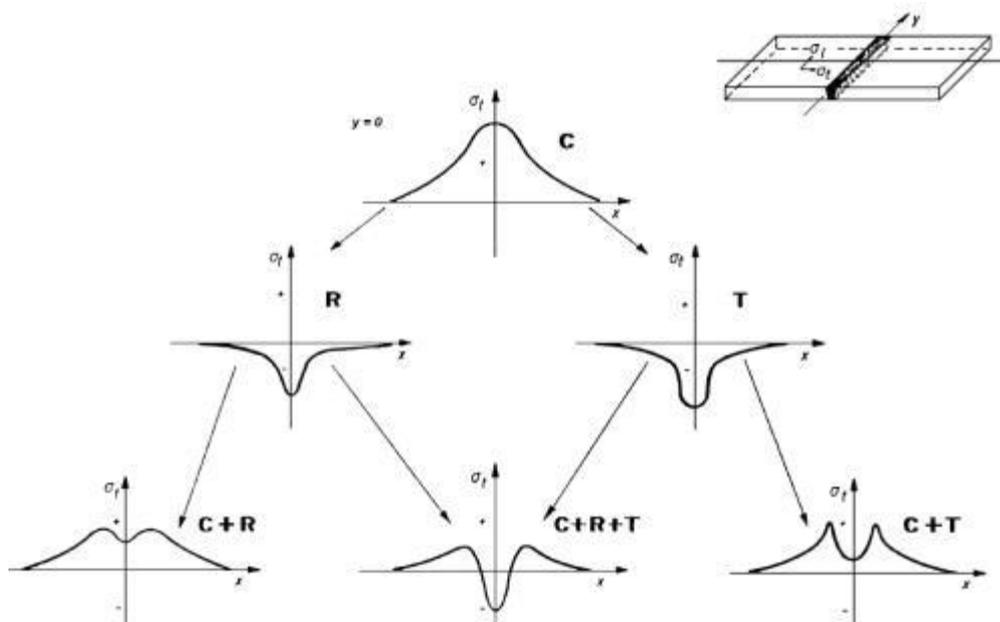


Figura 14: Distribuição de tensões residuais superpostas geradas por um arco convencional: (C) Contração, (T) Transformação de fase e (R) Resfriamento intenso na superfície [5].

2.4.2 Métodos de medição de tensões residuais

Whiters *et al.* [31] relata que a medição das tensões residuais se baseia em técnicas destrutivas ou não destrutivas.

Os métodos destrutivos mais utilizados são:

- ✓ Método do furo cego;
- ✓ Método do anel;
- ✓ Método do contorno.

Os métodos não destrutivos:

- ✓ Método de difração de raios X;
- ✓ Método de difração de nêutrons;
- ✓ Método de ultrassom;
- ✓ Método magnético.

A Tabela 2 apresenta uma comparação entre os métodos mais aplicados para medição de tensões residuais e suas principais características [28].

Tabela 2: Comparação entre os métodos de medição de tensões residuais [28 modificado].

Descrição	Métodos			
	Furo Cego	Raios-X	Ultrassom	Magnético
Hipóteses básicas	Tensão biaxial e uniforme superfície do furo	Padrão: Material policristalino de grãos finos, isotrópico e homogêneo	Material isotrópico e homogêneo, tensão homogênea no caminho acústico entre transmissor e receptor	Material ferromagnético
Tipo de tensões residuais analisadas	Macroscópica	Macroscópica Microscópica	Macroscópica Microscópica Submicroscópica	Macroscópica Microscópica Submicroscópica
Parâmetros medidos	Deformação ou deslocamento superficial	Mudança no espaçamento interplanar do material policristalino	Varição da velocidade da onda ultrassônica	Amplitude do Ruído Barkhausen ou permeabilidade magnética
Área de análise mínima (uso padrão)	0,5 mm ²	0,5 mm ²	0,1 mm ² (método de alta frequência) 30 mm ² (método convencional)	1 mm ² (método Barkhausen) 100 mm ² (método permeabilidade magnética)
Mínima profundidade de análise	20 μm	Dezenas de micrometros	15 μm a 300 μm	100 μm
Incerteza típica	± 20 MPa	± 20 MPa	± 10 a 20 MPa	± 10 a 20 MPa

2.4.3 Tensometria por difração de raios-X

A tensometria de difração de raios-X é um método baseado na medição das distâncias interplanares da rede cristalina, através de um feixe monocromático de raios-X, como mostrado na Figura 15 [31].

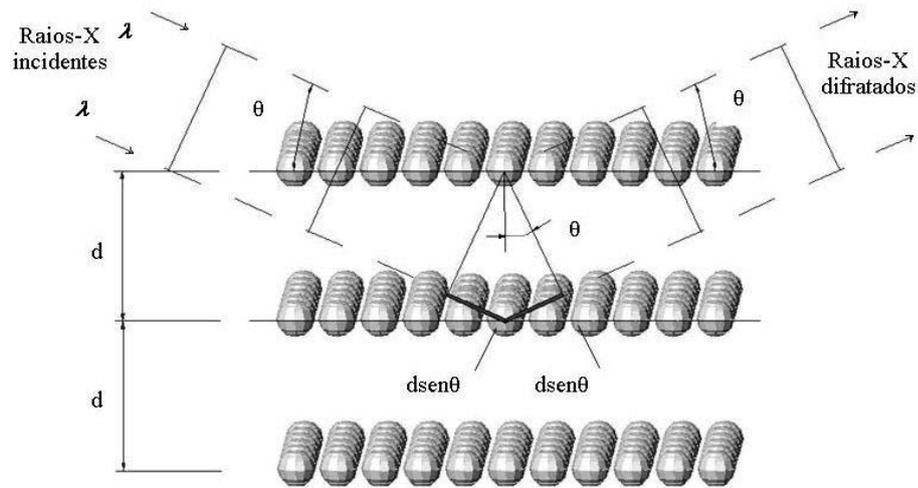


Figura 15: Modelo esquemático dos raios – X incidentes e difratados na rede cristalina do material [29]

Nesta técnica, quando as distâncias entre os planos são bem definidas, pode-se determinar o valor das tensões aplicadas e residuais do material, por intermédio da lei de Bragg - Equação (1) [27]:

$$n \cdot \lambda = 2 \cdot d \cdot \text{sen} \theta \quad (1)$$

Onde:

n: números inteiros

λ : comprimento de onda;

d: distância interplanar;

θ : ângulo entre o feixe incidente e o plano refrator.

A variação das distâncias interplanares implica na mudança do ângulo de difração, tendo em vista que o comprimento de onda é constante, por se tratar de um feixe monocromático. Logo, quanto maior for o ângulo de difração, maior será a precisão.

Com base teoria de difração de raios-X em materiais cristalinos, ao diferenciar a Equação (1), obtem-se a Equação (2):

$$\varepsilon = \frac{\Delta d}{d} = -\cot g\theta \cdot \Delta\theta \quad (2)$$

Sabe-se que, pela Lei de Hooke, a teoria da elasticidade dos materiais sólidos tem-se as seguintes relações entre tensões e deformações para estado triaxial, nas Equações (3), (4) e (5):

$$\varepsilon_1 = \frac{\sigma_1}{E} - \nu \frac{(\sigma_2 + \sigma_3)}{E} \quad (3)$$

$$\varepsilon_2 = \frac{\sigma_2}{E} - \nu \frac{(\sigma_1 + \sigma_3)}{E} \quad (4)$$

$$\varepsilon_3 = \frac{\sigma_3}{E} - \nu \frac{(\sigma_1 + \sigma_2)}{E} \quad (5)$$

Onde:

$\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$: Tensões principais;

$\varepsilon_1, \varepsilon_2, \varepsilon_3$: Deformações principais;

E: Módulo de elasticidade do material.

ν : Coeficiente de Poisson

A Figura 16, mostra o modelo do estado plano de tensões e para a adequação ao estado real, usa-se as coordenadas polares.

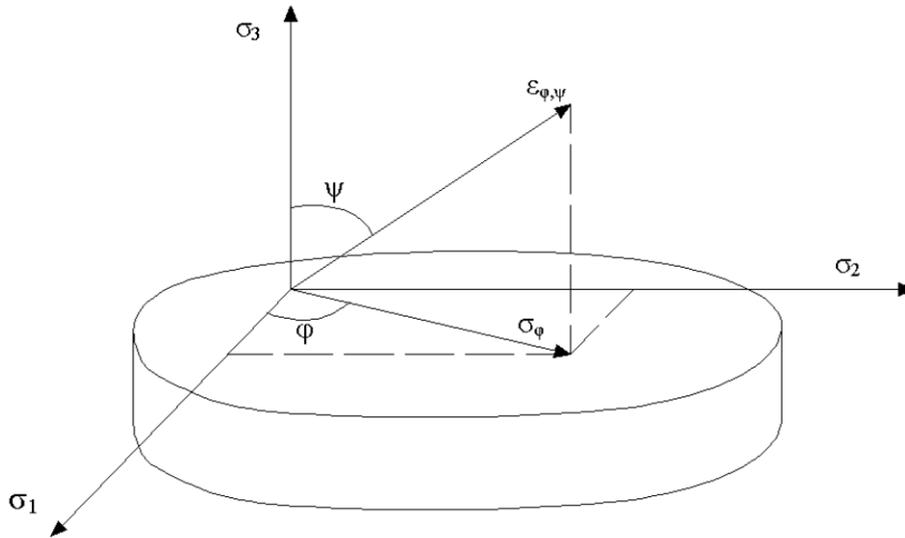


Figura 16: Modelo do estado plano de tensões [6].

A tensão na direção perpendicular a superfície (σ_3) é nula por ser uma medição superficial. Então, a equação da deformação pode ser escrita pela Equação (6):

$$\varepsilon_{\phi,\psi} = \frac{(1+\nu)}{E} \sigma_{\phi} \cdot \text{sen}^2 \psi - \frac{\nu}{E} (\sigma_1 + \sigma_2) \quad (6)$$

A tensão (σ_{ϕ}) pode ser determinada pela Equação (7):

$$\sigma_{\phi} = \frac{E}{(1+\nu)} \frac{\text{cotg} \theta_0 (\theta_{\phi,\psi,2} - \theta_{\phi,\psi,1})}{\text{sen}^2 \psi_2 - \text{sen}^2 \psi_1} \quad (7)$$

Mas para determinar qualquer componente de tensão é necessário conhecer os ângulos de reflexão do plano cristalino (ϕ_1 e ϕ_2).

O cálculo final da tensão pode ser obtido pela Equação (8):

$$\sigma_{\phi} = \frac{E}{(1+\nu)} \text{cotg} \theta_0 \cdot K \{ (L_{50} - L_0) - \Delta L_{\text{calib}} \} \quad (8)$$

Onde:

E: Módulo de elasticidade do material;

ν : Coeficiente de Poisson;

θ_0 : Valor do ângulo de Bragg para o material sem tensão residual;

K: Fator de escala do equipamento;

L_{50} e L_0 : Distância entre as intensidades máximas dos feixes difratados em relação à linha de referência;

ΔL_{calib} : Diferença entre L_{50} e L_0 para os feixes difratados pelo material de calibração (sem tensões residuais).

Capítulo 3

3 Materiais e Métodos

3.1 Material

O material utilizado, para este trabalho de estudo, foi o aço DP600 (*Dual-Phase: Ferrita + Martensita*), fornecido pela USIMINAS em forma de chapa de 4,15 mm de espessura com dimensões iniciais de 625 x 510 mm. A composição química do material está indicada na Tabela 3. As propriedades mecânicas estabelecidas pela norma SAE J2745 [8] e obtidas através de ensaios em laboratório estão mostradas na Tabela 4.

Tabela 3: Composição química do aço AHSS DP600 de 4,15mm (em % de peso) [8].

C	Si	Mn	P	S	Al	Cu	Cr	Ni
0,0485	1,03	1,17	0,015	0,001	0,040	0,01	0,07	0,02

Tabela 4: Propriedades mecânicas do aço DP600 [8].

	$\sigma_{L.E.}$ (MPa)	$\sigma_{L.R.}$ (MPa)
Norma SAE J27	340 - 440	> 600
Laboratório	330	550

3.2 Métodos

3.2.1 Corte

O corte dos corpos de prova foi feito em dois processos, inicialmente pelo processo de corte a plasma e posteriormente, por corte mecânico. Não foi realizado corte das amostras por um método somente, em virtude de minimizar a formação de uma zona termicamente afeta de grande extensão (ZTA) na região onde foram realizadas as soldagens.

O corte inicial das amostras foi realizado por plasma no Laboratório de Tecnologia Mecânica - LTM, do Departamento de Engenharia Mecânica da UFF, utilizando Argônio (Ar) como gás de plasma, em virtude da grande quantidade de amostras com intuito de economizar tempo.

Em 1955, foi introduzido o método de corte a plasma, cujo princípio de funcionamento é bem semelhante ao de soldagem a plasma, substituído outros métodos de corte, como corte por serras, prensas, tesouras e corte com chama e adição de pós [12]. O corte a plasma apresenta vantagens como: excelente acabamento em uma superfície, precisão dimensional, pouca ou nenhuma distorção, e velocidade relativamente elevada.

O presente trabalho foi utilizado um sistema semiautomático e o ar comprimido como gás de plasma, conforme a Figura 17. As dimensões de corte estão apresentadas na Figura 18.

As amostras foram cortadas no sentido da laminação da chapa e as soldas foram realizadas no sentido transversal à laminação.

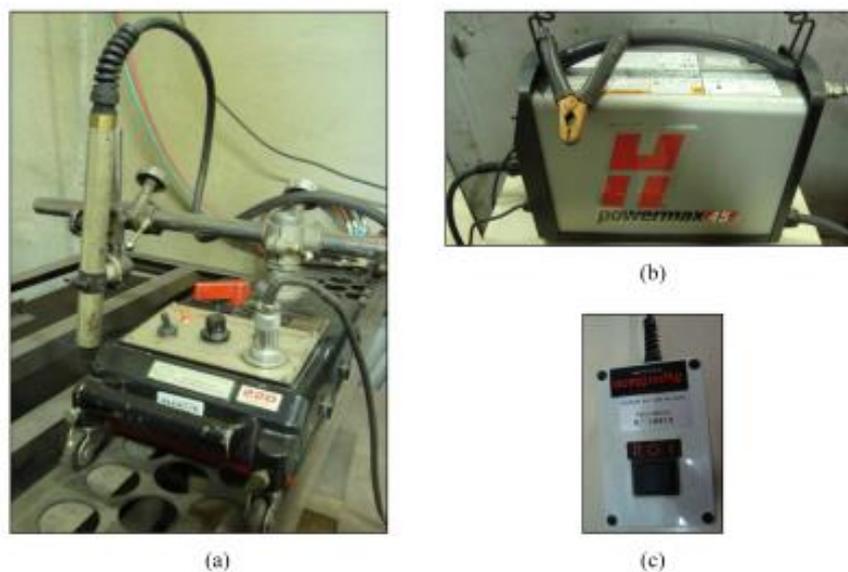


Figura 17: Sistema de corte a plasma semiautomático: (a) montagem da tocha de plasma, (b) módulo de plasma, (c) controle da parte móvel da tocha.

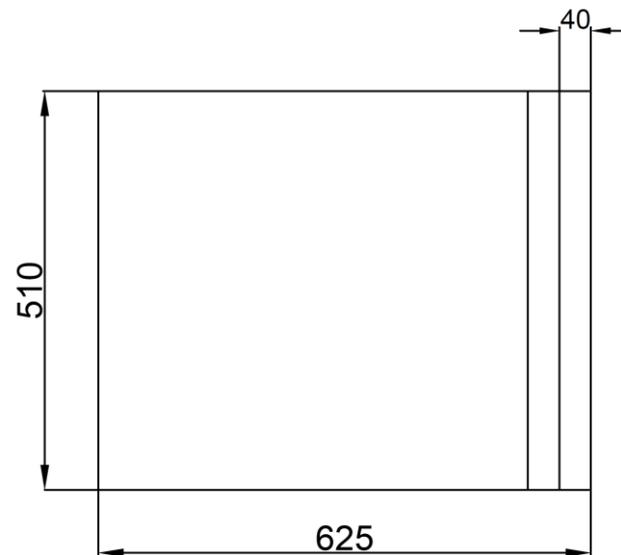


Figura 18: Esquema de corte a plasma das chapas (unidades em mm).

O segundo corte das amostras foi realizado mecanicamente no Laboratório de Tecnologia Mecânica - LTM, do Departamento de Engenharia Mecânica da UFF, utilizando um serra de fita, Manrod, modelo: MR-275 (Figura 19), aplicando fluido de corte para resfriamento. Assim, obtém-se uma ZTA de extensão reduzida, além do corte apresentar uma boa qualidade superficial. Dessa maneira, esse processo foi especificado para o corte das chapas na região onde foram realizadas as soldagens, conforme detalhado na Figura 20.



Figura 19: Serra de fita utilizada para o segundo corte.

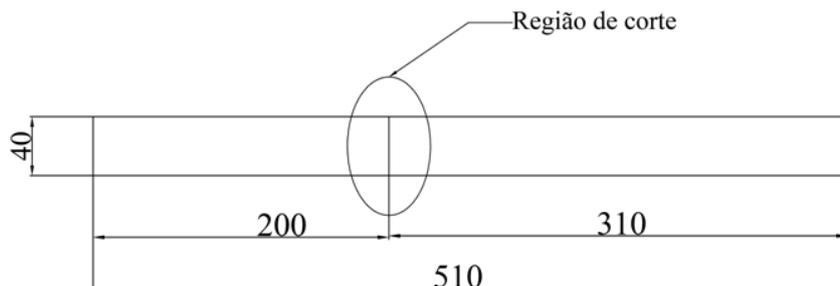


Figura 20: Esquema de corte mecânico das chapas (unidades em mm).

3.2.2 Soldagem MIG/MAG

As soldagens das amostras foram realizadas na White Martins através de dois processos: GMAW e PAW. Em ambos os processos, os parâmetros foram estudados de tal forma a garantir um cordão isento de defeitos visuais. Dessa maneira, alguns testes preliminares foram realizados e os parâmetros finais estão descritos a seguir.

Primeiramente, foi necessária uma limpeza na junta a ser soldada, pois as amostras apresentavam camadas de oxidação na superfície. Esse procedimento é realizado com a finalidade de evitar uma inclusão dessas impurezas na junta soldada e/ou desestabilização do arco, causando defeitos no cordão de solda, como porosidade.

Para o processo GMAW foi utilizado duas misturas de gases de proteção: 92% de Ar + 8% CO₂ (condição 1) e 75% Ar + 25% CO₂ (condição 2), sendo os demais parâmetros iguais para ambas as condições, conforme apresentado na Tabela 5. O eletrodo utilizado foi o ER70S6 [32] com velocidade de alimentação de 6,4 mm/s. A composição química do eletrodo, conforme a norma AWS SFA-5.18, está representada na Tabela 6.

Tabela 5: Parâmetros de soldagem utilizados no processo MIG.

Tensão (V)	Corrente (A)	Velocidade de soldagem (mm/s)	Vazão do gás de proteção (l/ min)
17,2	140	6,4	12

Tabela 6: Percentual de composição química do eletrodo ER70S6 (em % de peso) [32].

C	Si	Ni	Mo	Cu	S
0,06-0,015	0,80-1,15	0,15 máx	0,15 máx	0,5máx	0,035 máx
Cr	Mn	P	V	Outros	Fe
0,15 máx	1,4 – 1,85	0,025 máx	0,03 máx	0,5máx	Balanço

A soldagem foi realizada em ambos os lados das amostras, para garantir total penetração da junta. O processo de soldagem semiautomático foi realizado na máquina Fronius, modelo: *TransSteel 5000 MV* e com o cabeçote, modelo *VR 5000 4R/W/E Syn* (Figura 21) aplicando o modo de transferência por curto-circuito, com a corrente contínua e polaridade direta. Ao total foram obtidas 4 amostras de cada condição com dimensões de 40 x 510 mm.

**Figura 21:** Fonte Fronius utilizada na soldagem MIG/MAG

3.2.3 Soldagem a plasma

O objetivo desse trabalho é comparar, no âmbito das tensões residuais, o processo convencional GMAW, largamente utilizado na indústria automobilística, com o processo de soldagem a plasma, que mesmo oferecendo uma alta produtividade não é muito difundido.

O sistema automatizado utilizado para a soldagem a plasma está representado na Figura 18. Ele é composto por um robô Motoman SSF2000 com uma fonte de soldagem EWM Tetrix 400, um módulo de plasma ROB Control e a tocha PWM 400, além do *chiller* para resfriamento da tocha. Todo o sistema foi gerenciado pelo *software* Tetrix PCT 300, que limita a corrente de soldagem em 260 A (Figura 22).

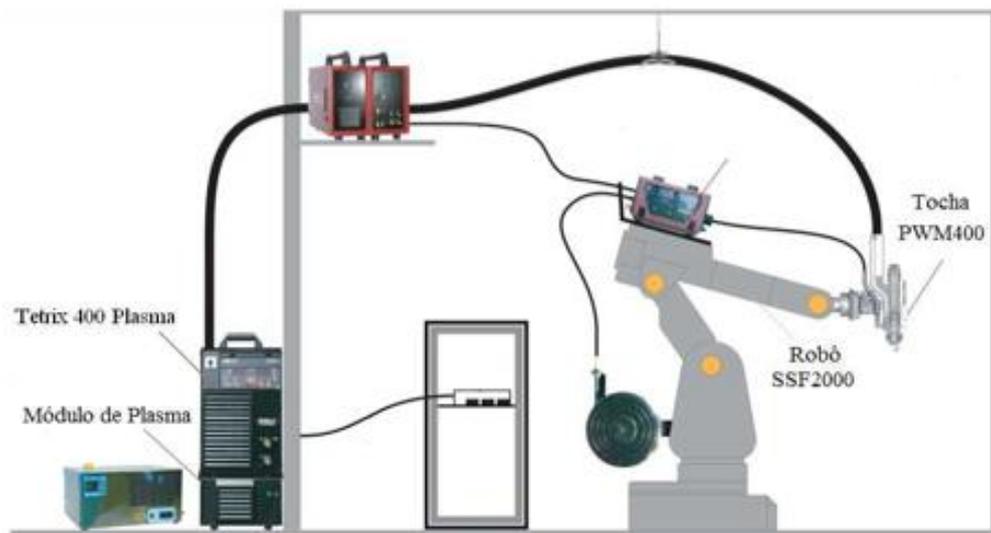


Figura 22: Sistema de soldagem a plasma White Martins [5].

Como as amostras apresentavam camadas superficiais de óxidos e outras impurezas, antes da soldagem, foram limpas, conforme descrito na seção anterior.

Os parâmetros de soldagem das juntas podem ser observados na Tabela 8. A velocidade soldagem utilizada foi 3,67 mm/s, resultando em 4 amostras, com dimensões aproximadas de 40 x 510 mm. Os valores de tensões são obtidos na confecção das juntas, pois esse parâmetro é definido pelo software durante o processo de soldagem e depende dos demais parâmetros.

Tabela 7: Parâmetros de soldagem das juntas.

Espessura da chapa (mm)	Corrente (I)	Vazão do gás de Plasma (l/min)	Abertura do <i>keyhole</i> (s)	Vazão do gás de proteção (l/min)
4,15	145	3,7	4,5	11

Como descrito no Capítulo 2, o parâmetro tempo de abertura do *keyhole* é de grande importância na soldagem a plasma e por essa razão foram necessários ensaios preliminares para a determinação desse tempo, que está diretamente relacionado aos demais parâmetros (corrente e vazão do gás de plasma). A vazão do gás de proteção (Ar) foi estabelecida inicialmente e não foram necessárias alterações durante os testes.

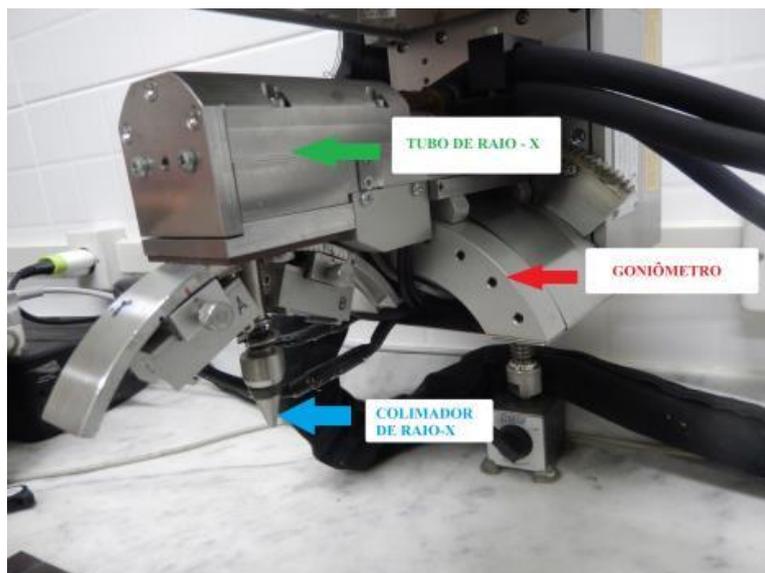
3.2.4 Análise de tensões residuais

As tensões residuais superficiais foram medidas e analisadas nas direções transversal e longitudinal das amostras, na superfície do cordão de solda, no Laboratório de Análise de Tensões – LAT, do Departamento de Engenharia Mecânica da UFF.

Foi utilizada a técnica da tensometria por difração de raios-X para a medição das tensões residuais, pelo método $\text{sen}^2\psi$, utilizando radiação $\text{CrK}\alpha$ ($\lambda_{\text{CrK}\alpha} = 2,29092\text{\AA}$) e difratando o plano (211) da ferrita. Foi usado um analisador de tensões da marca *XStress3000* (Figura 23), fabricado pela *Stresstech*.



(a)



(b)

Figura 23: Analisador de tensões X-Stress3000: (a) Equipamento completo; (b) Sistema de medição.

As amostras foram medidas em ambos os lados da chapa nas direções transversal (T) e longitudinal (L) ao cordão nas regiões da zona termicamente afetada (ZTA) e metal de solda (MS) e metal de base (MB). Para cada condição foi levantado um perfil de tensões residuais: transversal e longitudinal. As Figuras 24 e 25 detalham os pontos de medidas com relação a cada amostra.

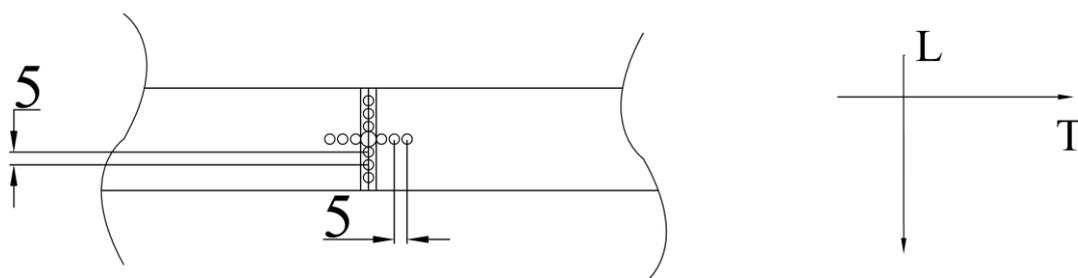


Figura 24: Pontos de medição dos perfis (L) longitudinal e (T) transversal (unidades em mm).

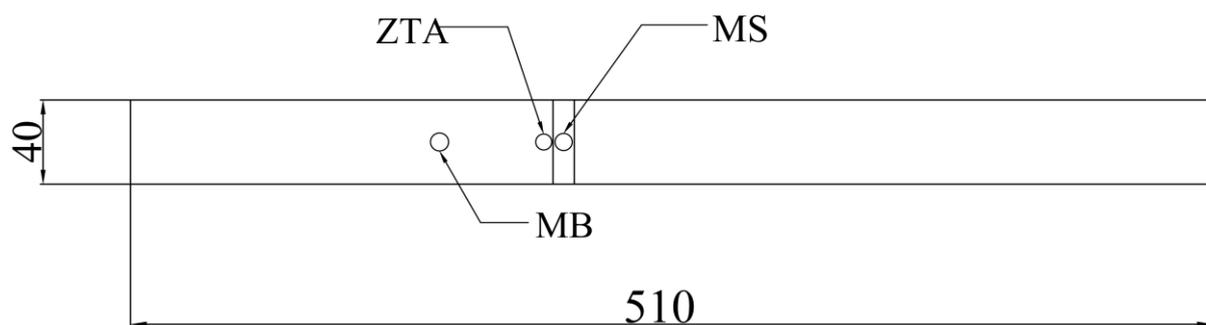


Figura 25: Posições de medidas das tensões residuais nas diferentes regiões das juntas (unidades em mm).

Capítulo 4

4 Resultados e discussões

Primeiramente foram medidas as tensões residuais (TR) no metal de base, obtendo uma média de -144 MPa com uma natureza compressiva no transversal (sentido de laminação da chapa) e de -142 MPa na longitudinal, com erro de aproximadamente 15 MPa.

A soldagem GMAW foi realizada em dois passes para garantir a penetração total na junta. Posteriormente, as tensões residuais foram analisadas em todas as amostras em duas regiões: ZTA e metal do solda (MS), nas direções longitudinal (L) e transversal (T) ao cordão nos dois passes.

A Tabela 8 mostra os valores obtidos das tensões residuais na ZTA. As Figuras 26 e 27 apresentam os valores na direção transversal na ZTA e as Figuras 28 e 29 na longitudinal.

Tabela 8: Tensões residuais na ZTA.

		Tensões Residuais (MPa)			
		1° Passe		2° Passe	
		Amostras	L	T	L
Condição 1	1	-167 ± 14	112 ± 10	108 ± 7	83 ± 10
	2	331 ± 13	94 ± 4	166 ± 12	47 ± 1
	3	250 ± 5	68 ± 10	173 ± 18	202 ± 12
	4	280 ± 12	127 ± 10	73 ± 9	96 ± 10
Condição 2	5	144 ± 5	57 ± 10	-47 ± 18	-174 ± 4
	6	82 ± 4	128 ± 30	-90 ± 9	-134 ± 8
	7	7 ± 4	136 ± 7	-62 ± 6	-66 ± 3
	8	158 ± 11	179 ± 25	36 ± 6	192 ± 1

Analisando os gráficos das Figuras 26 e 27, as quais mostram os valores das tensões residuais obtidos na ZTA na direção transversal no primeiro passe (Figura 26) e no segundo passe de soldagem (Figura 27), observa-se que as tensões residuais no primeiro passe foram trativas em ambas as condições com uma média de 100 MPa na primeira condição e 125 MPa na segunda condição. Já no segundo passe de soldagem,

como mostrado na Figura 27, as tensões apresentaram uma variação quanto à condição de soldagem. Na primeira condição, as tensões foram trativas com uma média de 107 MPa e na segunda, foram compressivas com uma média de - 46 MPa, exceto na amostra 8, a qual apresentou uma natureza trativa de 192 MPa, possivelmente recorrente de alguma heterogeneidade metalúrgica.

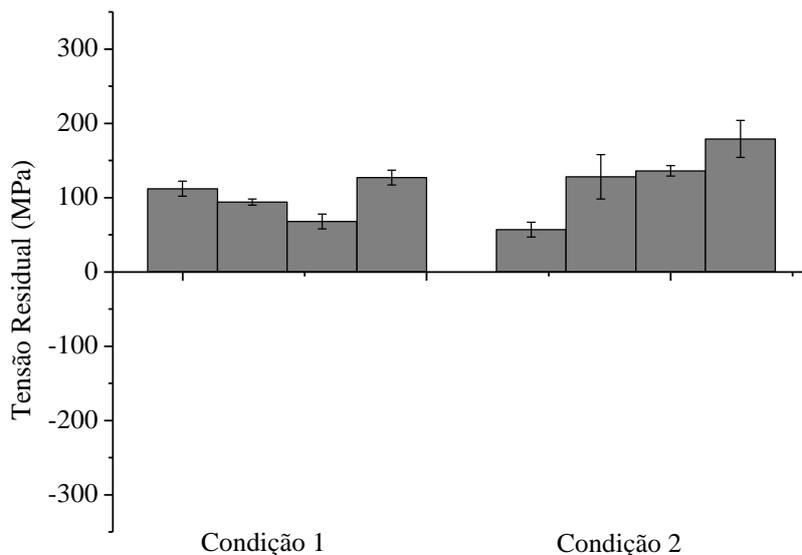


Figura 26: Tensões residuais na ZTA Transversal - 1º passe.

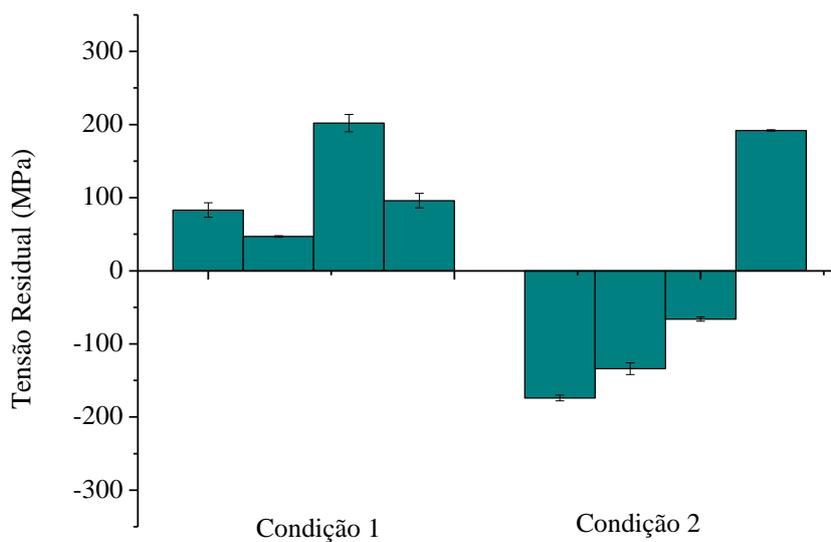


Figura 27: Tensões residuais na ZTA Transversal - 2º passe.

Observa-se nas Figuras 28 e 29 que, na direção longitudinal, as tensões apresentam uma tendência trativa em ambas as condições. Contudo, na condição 1 observa-se maiores valores em tração (média de 174 MPa) no primeiro passe. Considerando que a velocidade de soldagem foi mantida constante em ambas as condições em todos os passes, o principal parâmetro de influência nos resultados seria a composição química dos gases de proteção que resultam em diferentes aportes térmicos. No segundo passe, as tensões apresentam a mesma característica do sentido transversal, ou seja, na condição 1 as TR's foram trativas com uma média de 130 MPa e, na segunda condição de soldagem, foram compressivas com uma média de 41 MPa, exceto a amostra 8, a qual apresentou um valor de 36 MPa trativo. As tensões residuais trativas são deletérias pois podem propiciar uma menor vida em serviço dos componentes. Por outro lado, tensões residuais do tipo compressivas são benéficas, principalmente quando os componentes soldados são submetidos a esforços cíclicos, porque evitam a nucleação e propagação de trincas.

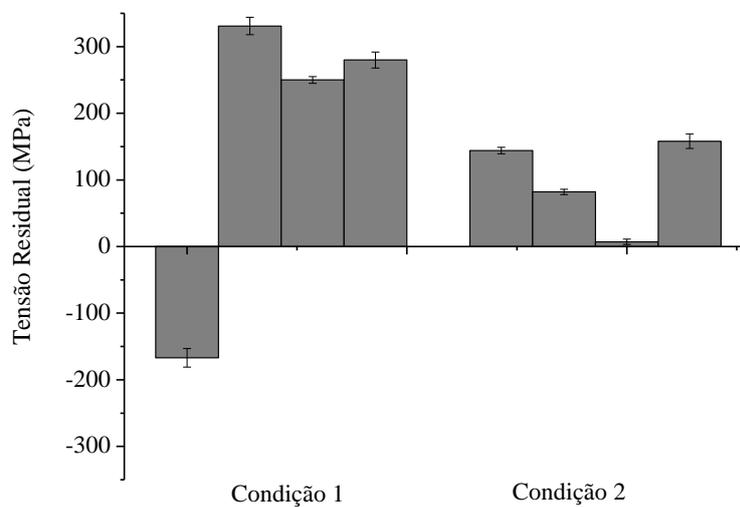


Figura 28: Tensões residuais na ZTA Longitudinal - 1º passe.

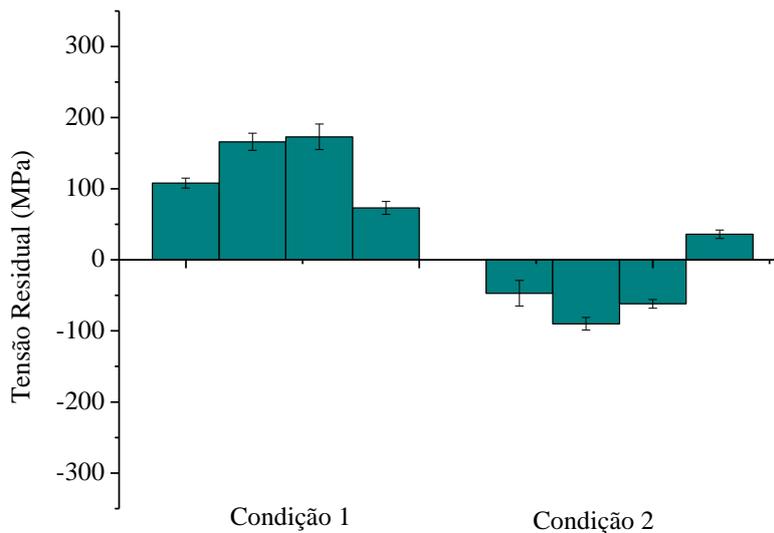


Figura 29: Tensões residuais na ZTA Longitudinal - 2° passe.

Com relação ao metal desolda, a Tabela 9 apresenta os valores das tensões residuais nas direções longitudinais e transversais. As Figuras 30 a 33, mostram os valores de tensão residual para os passes 1 e 2.

Tabela 9: Tensões residuais no metal de solda (MS).

		Tensões Residuais (MPa)			
		1° Passe		2° Passe	
		L	T	L	T
Condição 1	Amostras				
	1	-129 ± 13	-154 ± 15	227 ± 29	197 ± 12
	2	330 ± 18	165 ± 19	110 ± 20	106 ± 23
	3	298 ± 22	-38 ± 1	91 ± 8	8 ± 7
	4	262 ± 6	-32 ± 26	20 ± 10	290 ± 2
Condição 2	5	277 ± 10	-66 ± 4	-136 ± 15	-329 ± 4
	6	64 ± 7	-208 ± 14	67 ± 5	-85 ± 9
	7	77 ± 5	-84 ± 10	-262 ± 5	-39 ± 1
	8	5 ± 2	-170 ± 14	-36 ± 3	-106 ± 3

Analisando a Figura 30, nota-se uma característica compressiva em ambas as condições de soldagem para o primeiro passe, com um valor médio maior na condição 2. Entretanto, no segundo passe, conforme apresentado na Figura 31, fica evidente que na condição 1, a mistura com menor percentual de CO₂, as tensões tiveram uma característica trativas com uma média de 150 MPa e na segunda condição, uma média de

-140 MPa compressiva. Conforme apresentado por MARQUES [12], o ciclo térmico de soldagem influencia na geração das tensões residuais, devido ao aquecimento em uma região localizada, com mudanças de fase, além de um resfriamento não uniforme da peça, acompanhado de gradientes térmicos que surgem entre a superfície e o núcleo da junta. Desta forma, os padrões de TR são resultados direto das interações entre os passes, ou seja, o segundo passe interfere na geração de TR do primeiro passe o que poderia explicar a diferença na natureza das tensões nos passes para a condição 1.

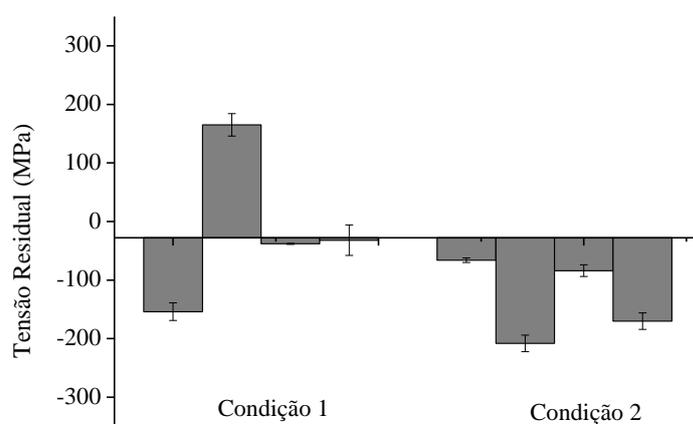


Figura 30: Tensões residuais no MS Transversal - 1º passe.

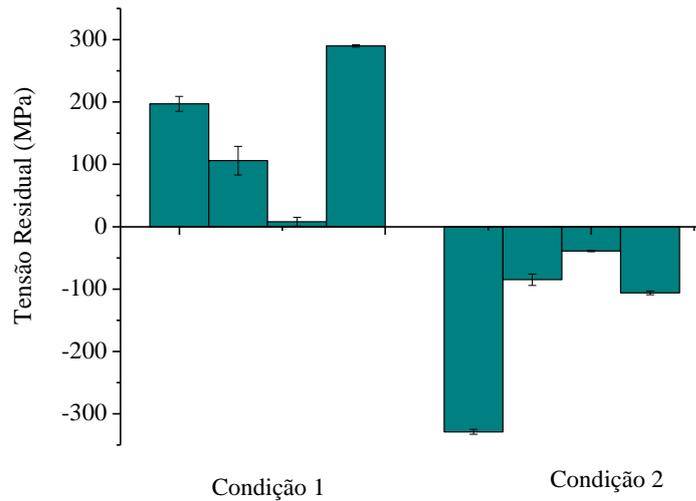


Figura 31: Tensões residuais no MS Transversal - 2º passe.

Na direção longitudinal do MS observa-se que as tensões tiveram mesmo comportamento apresentado na direção longitudinal da ZTA para ambos os passes: natureza trativa no primeiro passe (Figura 32), sendo o valor médio na condição 1 maior (190 MPa) que o apresentado na condição 2 (106 MPa) e segundo passe (Figura 33) com tendência compressiva para a condição 2.

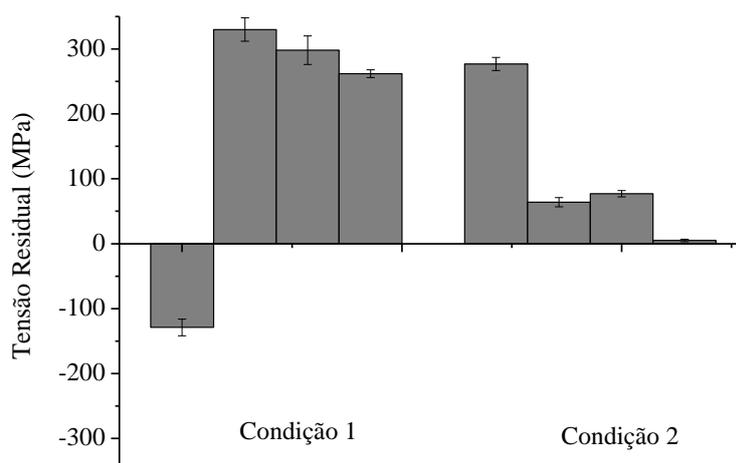


Figura 32: Tensões residuais no MS Longitudinal - 1º passe.

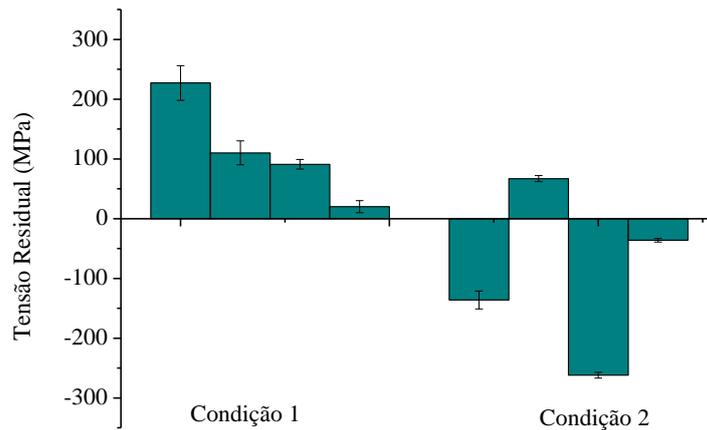


Figura 33: Tensões residuais no MS Longitudinal - 2º passe

Com o intuito de detalhar melhor o comportamento das tensões residuais, foram obtidos perfis para cada condição, nas direções transversal e longitudinal ao cordão. Analisando a Figura 34, nota-se um padrão bem semelhante ao apresentado na literatura, onde o metal de solda encontra-se compressivo e as ZTA's em tração para o primeiro passe, em ambas as condições. Entretanto, na Figura 35, que representa o perfil dos valores das tensões residuais no segundo passe, pode-se observar o diferente comportamento na região central do cordão de solda. Para a condição 1, temos um caráter trativo no MS, que pode ser resultante de uma contração de resfriamento maior do que o apresentado na condição 2.

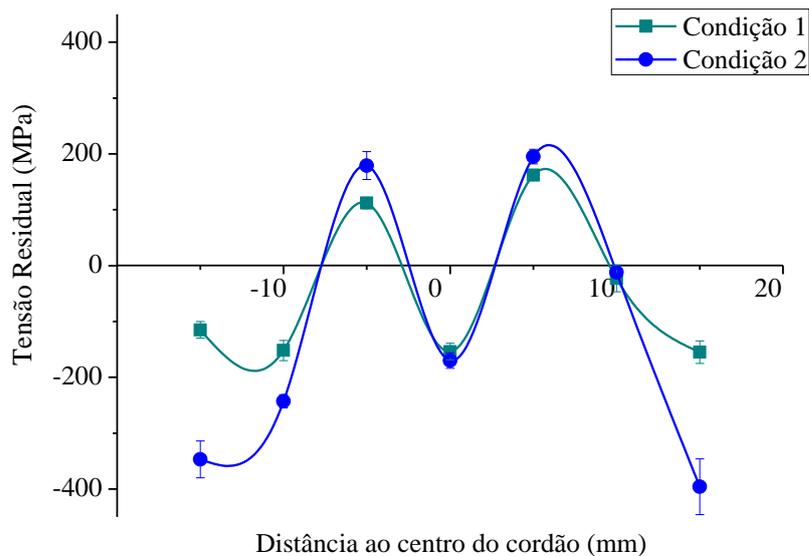


Figura 34: Perfil transversal das amostras - 1º passe.

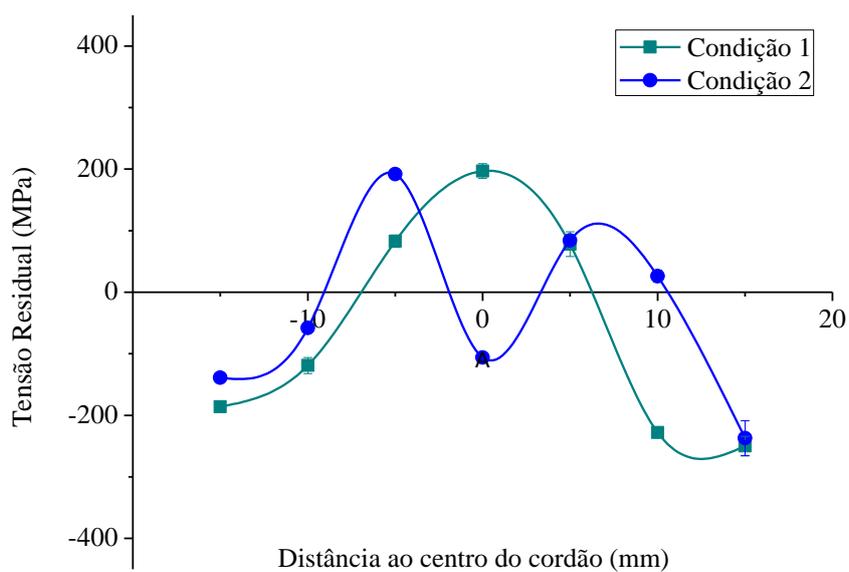


Figura 35: Perfil transversal das amostras - 2º passe.

Na direção longitudinal no metal de solda, as tensões apresentaram um perfil aleatório quando se altera a condição de soldagem, conforme pode ser observado nas Figuras 36 e 37. Entretanto, pode-se notar que para o segundo passe os valores de TR's são menores na condição 2.

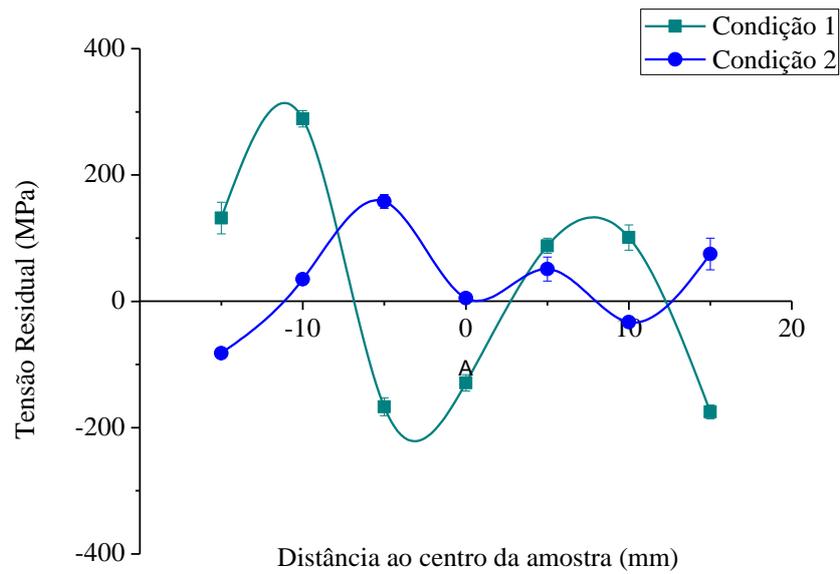


Figura 36: Perfil longitudinal das amostras - 1º passe.

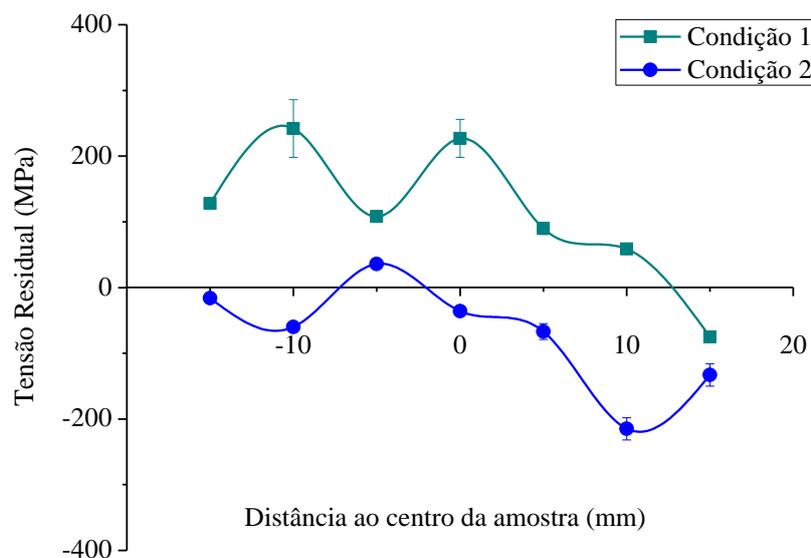


Figura 37: Perfil longitudinal das amostras - 2º passe.

A Figura 38 apresenta duas amostras, cada uma soldada por uma condição. Nota-se que, a geometria do cordão de solda da amostra soldada pela condição 2 é mais estreita do que a amostra soldada pela condição 1, característica diretamente ligada a quantidade de CO₂ introduzida na mistura. Conforme a literatura, obtém-se maiores

penetrações com cordões mais estreitos quando aumentamos a quantidade de CO₂ na mistura Ar-CO₂.

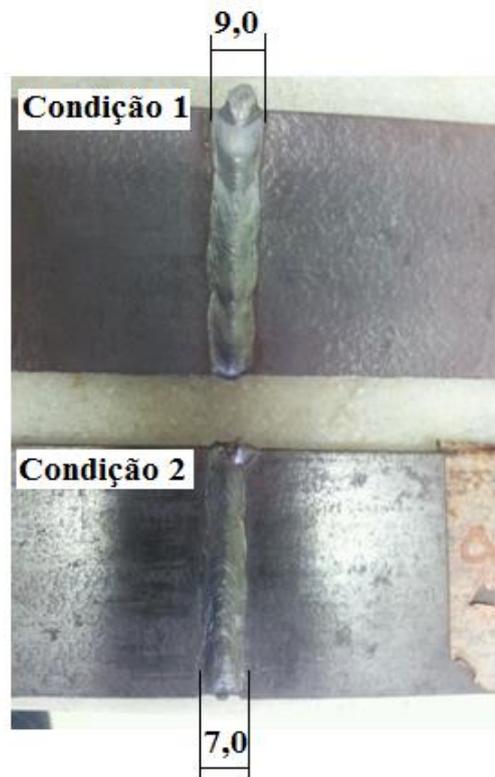


Figura 38: Amostras soldadas por GMAW nas condições 1 e 2 (unidades em mm).

A soldagem a plasma foi realizada de forma autógena, dessa forma se torna inviável uma comparação de perfis entre os passes do processo GMAW. Entretanto, as Figuras 41 e 42 mostram o perfil das TR's no sentido longitudinal e transversal no topo da junta soldada a plasma. É possível observar um comportamento trativo na região da zona fundida na transversal ao cordão de solda e compressiva na longitudinal.

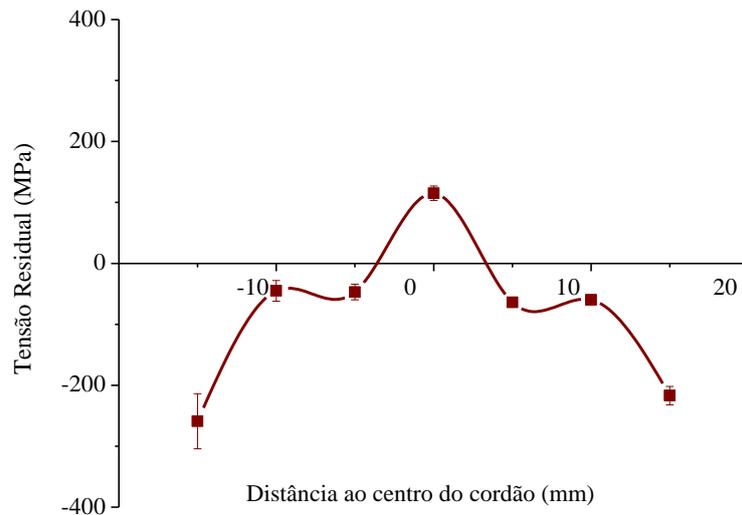


Figura 39: Perfil das tensões residuais na direção transversal soldada a PAW.

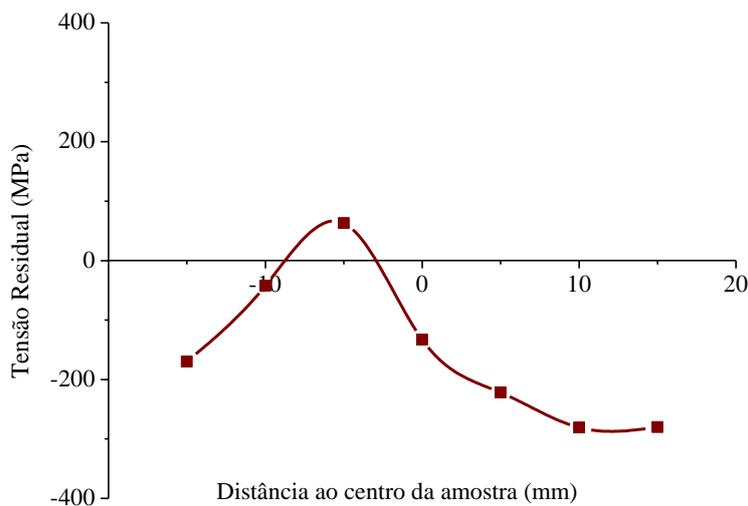


Figura 40: Perfil das tensões residuais na direção longitudinal soldada a PAW.

Conforme o objetivo do trabalho e o perfil apresentado anteriormente foi decidido que a comparação entre os valores de TR's seriam feitos com base na região do metal de solda, ou zona fundida para a soldagem plasma. Assim, as Figuras 41 e 42 mostram os valores médios obtidos para cada condição em ambos os passes da soldagem.

Com base na Figuras apresentadas, a condição 2 seria a mais benéfica com relação as tensões residuais para a juntas soldadas, pois apresenta valores médios em compressão em ambos os passes. Com relação a soldagem a plasma, as tensões trativas

na região do metal de solda podem ser resultantes da concentração de calor em uma região muito restrita aliada as altas velocidades de soldagem, que podem ter resultado um resfriamento mais intenso. Contudo, não se pode fazer uma comparação direta dos processos tendo em vista que, trabalham com parâmetros bem diferentes além do processo de soldagem plasma ter sido realizado de forma autógena. Na direção longitudinal, ao contrário da tendência trativa da soldagem GMAW, a soldagem a plasma resultou valores médios em compressão, o que pode caracterizar uma vantagem do processo.

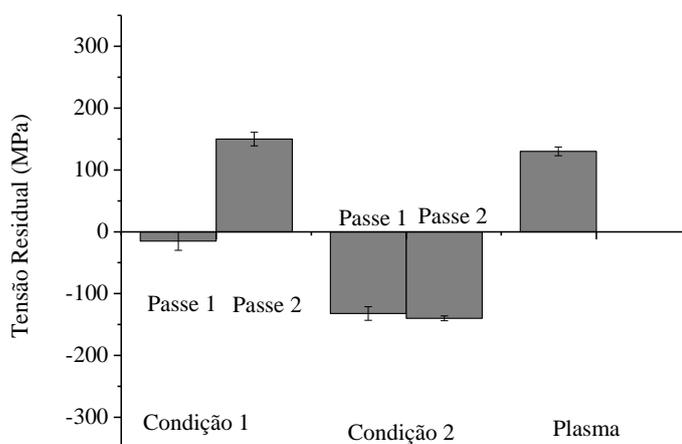


Figura 41: Tensões residuais transversais nas amostras soldadas nas duas condições de GMAW e uma em PAW.

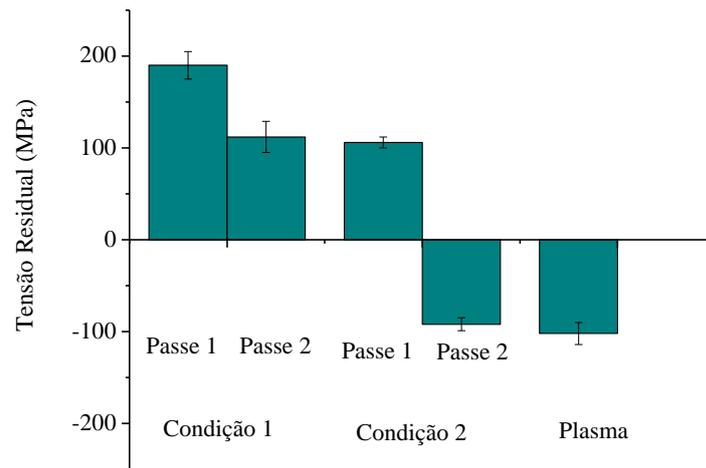


Figura 42: Tensões residuais longitudinais nas amostras soldadas nas duas condições de GMAW e uma em PAW.

Capítulo 5

5 Conclusão

O presente trabalho, que teve por objetivo analisar as tensões residuais proveniente da soldagem MIG/MAG e Plasma de um aço DP600 permite as seguintes conclusões:

1. As tensões residuais na ZTA apresentaram um caráter trativo em ambas as direções na condição 1 do processo GMAW. Porém na condição 2, somente no segundo passo resultou em tensões residuais de natureza compressiva. Um dos motivos para essa mudança significativa no comportamento das tensões, pode ter sido pela grande interação do calor gerado na soldagem do segundo passe com o primeiro passe na condição 2.
2. Na região do metal de solda, obteve-se uma tendência trativa na condição 1 em ambas as direções. Por outro lado, as TR's provenientes da condição 2 mostraram uma natureza compressiva, com exceção da direção longitudinal no primeiro passe.
3. Analisando os dados de forma mais abrangentes pode-se notar que a condição 2, onde têm-se maior quantidade de CO₂, apresentou uma tendência compressiva o que seria benéfico à junta, com relação as tensões residuais. Contudo, a condição 1 apresenta um padrão trativo, que poderia ser prejudicial. Dessa forma, a composição do gás de proteção é um parâmetro que influencia diretamente a natureza e magnitude das tensões.
4. O processo de soldagem a plasma apresentou um perfil transversal de tensões residuais com altos valores em tração na região da zona fundida e, na direção longitudinal uma tendência compressiva, características bem diferentes do processo GMAW.

Capítulo 6

6 Trabalhos futuros

1. Analisar, através de microscopia óptica, todas as condições de soldagem para determinar as diferenças microestruturais entre as mesmas, que podem ter influenciado no perfil das tensões residuais.
2. Analisar as propriedades mecânicas das amostras para verificar as possíveis modificações na resistência do material.
3. Realizar perfis longitudinais na região da ZTA das amostras.
4. Analisar as tensões residuais na raiz das juntas soldadas a plasma.
5. Levantar perfis em profundidade das tensões residuais para analisar o comportamento das mesmas, nas camadas subsuperficiais das juntas.

Referências Bibliográficas:

- [1] FARABI, N.; CHEN, D.L.; ZHOU, Y.; “Microstructure and mechanical properties of laser welded dissimilar DP600/DP980 dual-phase steel joints”, *Journal of Alloys and Compounds*, n.509, pp. 982-989, 2010.
- [2] WOLFF, M.A.; *Soldabilidade dos aços Dual-Phase 600 e 800 via processo de soldagem a pontos média frequência corrente contínua (MFDC) e corrente alternada (AC)*, Dissertação de M.Sc.; UFU, Uberlândia, MG, Brasil, 2008.
- [3] FARABI, N.; CHEN, D.L.; ZHOU, Y.; “Microstructure and mechanical properties of laser welded DP600 steel joints”, *Journal of Materials Science and Engineering*, n.527, pp. 1215-1222, 2011.
- [4] AVRAMOVIC – CINGARA, G., OSOSKOV, Y., JAIN, M.K., WILKINSON, D.S.; “Effect of martensite distribution on damage behaviour in DP600 dual phase steels”, *Materials Science and Engineering A*, n.516, pp. 7-16, 2009.
- [5] CHUVAS, T. C., *Estudo da influência dos parâmetros de tratamento de alívio das tensões residuais por vibração mecânica em juntas soldadas a plasma*, Dissertação de M.Sc.; UFF, Rio de Janeiro, RJ, Brasil, 2012.
- [6] CHEMIN FILHO, R.A.; *Estudo da fratura de aços de nova geração DP600 através da variação de pressão no prensa-chapas*, Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica), UFPR, Curitiba, PR, Brasil, 2011.
- [7] GORNI, A. A., “Aços avançados de alta resistência: microestrutura e propriedades mecânicas”, *Corte & Conformação de Metais*, pp. 26-57, 2008.
- [8] SOCIETY OF AUTOMATIVE ENGINEERS. **J2745**: Surface vehicle recommended practice: Categorization and Properties of Advanced High Strength Automotive Sheet Steels. 2007.
- [9] ESAB. Manual de referências bibliográficas. Disponível em: http://www.esab.com.br/br/pt/education/apostilas/upload/1901104rev0_apostilasoldagemmigmag_low.pdf. Acessado em: 03. jun. 2015.
- [10] JUNIOR, J.G., *Novos métodos de controle da soldagem MIG/MAG*, Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica), EFSC, Florianópolis, SC, Brasil, 2002.
- [11] DOBIGNIES, A.A., *Estudo do rendimento de deposição de material na soldagem MIG/MAG em condições de transferência metálica por curto-circuito forçado*, Dissertação de M.Sc.; UFPR, Curitiba, PR, Brasil, 2008.
- [12] MARQUES, P. V., MODENESI, J. P., BRACARENSE, A. Q.; *Soldagem: Fundamentos e Tecnologia*, 2 ed. Minas Gerais, UFMG, 2007.

- [13] FBTS. Manual de referências bibliográficas. Disponível em: http://www.fbts.org.br/quantum/cursos/000071/downloads/M1_D4_T4_MIG%20MAG.pdf. Acessado em: 05. jun. 2015.
- [14] AURES, J.E.V., *Avaliação de processos MIG/MAG derivativos utilizando-se simulador de soldagem de dutos por retificação*, Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica), UNB, Brasília, DF, Brasil, 2013.
- [15] WHITE MARTINS,
http://www.soldaautomatica.com.br/index_arquivos/Arquivos/PDF%207-WHITE%20MARTINS%20Processo%20MIG-MAG.pdf. Acessado em: 06. jun. 2015.
- [16] INFOSOLDA. Manual de referências bibliográficas. Disponível em: <http://www.asmtreinamentos.com.br/asm/downloads/soldador/arquivo3.pdf>. Acessado em: 06. jun. 2015.
- [17] MUKHOPADHYAY, T.K. PAL, “Effect of shielding gas mixture on gas metal arc welding of HSLA steel using solid and flux-cored wires”, *Int J Adv Manuf Technol*, vol.29, pp. 262-268, 2006.
- [18] WANG, L.L., LU, F.G., WANG, H.P., MURPHY, A.B., TANG, X.H., “Effects of shielding gas composition on arc profile and molten pool dynamics in gas metal arc welding of steels”, *Journal of Physics D: Applied Physics*, n.47, pp. 14, 2014.
- [19] REIS, R. P., SCOTTI, A.; *Fundamentos e prática da soldagem a plasma*, Artliber Editora, 1º Edição, pp. 144, 2007.
- [20] UREÑA A., OTERO E., UTRILA M.V., MÚNEZ C.J.; “Weldability of a 2205 duplex stainless steel using plasma arc welding”, *Journal of Materials Processing Technology*, n.182, pp. 624-631, 2007.
- [21] INFOSOLDA. Manual de referências bibliográficas. Disponível em: <http://www.infosolda.com.br/artigos/processos-de-soldagem/417-solda-a-plasma.html>. Acessado em: 12. abr. 2015
- [22] WHITE MARTINS,
<http://www.praxair.com.br/~media/South%20America/Brazil/Documents/Welding%20and%20metal%20fabrication/Stargold%20DeepFlash%20PLASMA.pdf>. Acessado em: 17. abr. 2015.
- [23] LEE, W., LIN, C. , LIU, C., CHENG, C., “Effects of strain rate and welding current mode on microstructural properties of SUS 304L PAW welds”, *Journal of Materials Processing Technology*, n.183, pp. 183-193, 2007.

- [24] SILVA, S.R.; *Desenvolvimento do Processo de Soldagem Plasma – Keyhole – MAG em Tandem*, Dissertação de M.Sc.; UFPR, Curitiba, PR, Brasil, 2012.
- [25] SUN, J., WU, C.S., FENG, Y., “Modeling the transient heat transfer for the controlled pulse key-holing process in plasma arc welding”, *International Journal of Thermal Sciences*, n.50, pp. 1664-1671, 2011.
- [26] ZHANG, Y.M., ZHANG S.B., “Observation of the Keyhole during Plasma Arc Welding”, pp.53-58, fev.1999<<https://app.aws.org/wj/supplement/Zhang/ARTICLE4.pdf>>. Acesso em 12. abr. 2015
- [27] NORCINO, A.B.; *Uma Contribuição ao Estudo de Tensões Residuais no Fresamento*, Dissertação de M.Sc., UNESP, Ilha Solteira, SP, Brasil, 2013.
- [28] MELO, A.P.B.; *Avaliação de Tensões Residuais na Operação de Cunhagem em um Componente Automotivo Estampado*, Dissertação de M.Sc., UFSJ, São João del-Rei, MG, Brasil, 2014.
- [29] CINDRA FONSECA, M. P., SANTOS COSTA, W., SANTOS CHAVES, F.R., PARDAL, J.M., MARQUES JUNIOR, A.S. “Estudo das propriedades mecânicas e tensões residuais em juntas soldadas de aço ARBL bifásico usado na indústria automobilística”, *8º CIBIM-Congresso Ibero-americano de Engenharia Mecânica*, Cusco, 2007.
- [30] KULAZI, A.J., *Comportamento à fadiga do aço DP600 processado por jacto de água*, Dissertação de M.Sc.; IST, Lisboa, Portugal, 2007.
- [31] WHITERS, P.J., BHADESHIA, H.K.D.H., “Residual stress: Part 1 – Measurement techniques”, *Materials Science and Technology*, vol. 17, pp. 355-365, 2001
- [32] UNIBRAZE, <http://www.unibraze.com/DataSheets/Data70S-6.pdf>. Acessado em: 03. jun. 2015.
- [33] CARPENTER, K.R., MONAGHAN, B.J., NORRISH, J., “Influence of shielding gas on fume size morphology and particle composition for gas metal arc welding”, *ISIJ International*, vol. 48, pp. 1570-1576, 2008.
- [34] INFOSOLDA. Manual de referências bibliográficas. Disponível em: <http://www.infosolda.com.br/artigos/processos-de-soldagem/326-soldagem-a-plasma-paw.html>. Acesso em: 12. abr. 2015
- [35] JUNIOR SANTOS, M.C., *Influência da transferência metálica por curto-circuito e cmt na geometria do cordão e características da zta do dual phase dp 600*, Dissertação de M.Sc.; UFPR, Curitiba, PR, Brasil, 2012.

- [36] PRADO, E.M., *Influência das variáveis do processo MIG/MAG Convencional e Pulsado nas propriedades mecânicas de juntas soldadas com arame ER410NiMo*, Dissertação de M.Sc., UFPR, Curitiba, PR, Brasil, 2004.
- [37] WHITERS, P.J., BHADESHIA, H.K.D.H., “Residual stress: Part 2 – Nature and origins”, *Materials Science and Technology*, vol. 17, pp. 366-375, 2001
- [38] ZAHNG, Y.M., LIU, Y.C., “Control of dynamic keyhole welding process”, *Automatica*, n. 43, pp. 876-884, 2007.