

JOÃO GUILHERME FERREIRA SILVA

**ESTUDO DA INFLUÊNCIA DO GÁS DE PROTEÇÃO DA SOLDAGEM MIG/MAG
NA RESISTÊNCIA MECÂNICA DE UMA JUNTA**

Goiânia

2020

**TERMO DE CIÊNCIA E DE AUTORIZAÇÃO PARA DISPONIBILIZAR
VERSÕES ELETRÔNICAS DE TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO DE
GRADUAÇÃO NO REPOSITÓRIO INSTITUCIONAL DA UFG**

Na qualidade de titular dos direitos de autor, autorizo a Universidade Federal de Goiás (UFG) a disponibilizar, gratuitamente, por meio do Repositório Institucional (RI/UFG), regulamentado pela Resolução CEPEC nº 1204/2014, sem ressarcimento dos direitos autorais, de acordo com a Lei nº 9610/98, o documento conforme permissões assinaladas abaixo, para fins de leitura, impressão e/ou *download*, a título de divulgação da produção científica brasileira, a partir desta data.

O conteúdo dos Trabalhos de Conclusão dos Cursos de Graduação disponibilizado no RI/UFG é de responsabilidade exclusiva dos autores. Ao encaminhar(em) o produto final, o(s) autor(a)(es)(as) e o(a) orientador(a) firmam o compromisso de que o trabalho não contém nenhuma violação de quaisquer direitos autorais ou outro direito de terceiros.

1. Identificação do Trabalho de Conclusão de Curso de Graduação (TCCG):

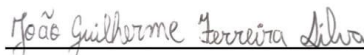
Nome completo do autor: JOÃO GUILHERME FERREIRA SILVA

Título do trabalho: **ESTUDO DA INFLUÊNCIA DO GÁS DE PROTEÇÃO DA SOLDAGEM MIG/MAG NA RESISTÊNCIA MECÂNICA DE UMA JUNTA**

2. Informações de acesso ao documento:

Concorda com a liberação total do documento [x] SIM [] NÃO¹

Independente da concordância com a disponibilização eletrônica, é imprescindível o envio do(s) arquivo(s) em formato digital PDF do TCCG.



Assinatura do autor²

Ciente e de acordo:



Assinatura do orientador²

Data: 21/12/2020

¹ Neste caso o documento será embargado por até um ano a partir da data de defesa. Após esse período, a possível disponibilização ocorrerá apenas mediante: (a) consulta ao(a)(s) autor(a)(es)(as) e ao(a) orientador(a); b) novo Termo de Ciência e de Autorização (TECA) assinado e inserido no arquivo do TCCG. O documento não será disponibilizado durante o período de embargo.

Casos de embargo:

- Solicitação de registro de patente;
- Submissão de artigo em revista científica;
- Publicação como capítulo de livro;

² As assinaturas devem ser originais sendo assinadas no próprio documento, imagens coladas não serão aceitas.

JOÃO GUILHERME FERREIRA SILVA

**ESTUDO DA INFLUÊNCIA DO GÁS DE PROTEÇÃO DA SOLDAGEM MIG/MAG
NA RESISTÊNCIA MECÂNICA DE UMA JUNTA**

Trabalho de conclusão de curso apresentado à disciplina Projeto Final de Curso, do curso de Engenharia Mecânica da Universidade Federal de Goiás, como requisito parcial para obtenção do título de Engenheiro Mecânico.

Universidade Federal de Goiás – UFG

Escola de Engenharia Elétrica, Mecânica e de Computação

Trabalho de Conclusão de Curso

Orientador: Demostenes Ferreira Filho

Goiânia

2020

Ficha de identificação da obra elaborada pelo autor, através do Programa de Geração Automática do Sistema de Bibliotecas da UFG.

SILVA, JOÃO GUILHERME FERREIRA
ESTUDO DA INFLUÊNCIA DO GÁS DE PROTEÇÃO DA
SOLDAGEM MIG/MAG NA RESISTÊNCIA MECÂNICA DE UMA
JUNTA [manuscrito] / JOÃO GUILHERME FERREIRA SILVA. - 2020.
74 f.: il.

Orientador: Prof. Dr. DEMOSTENES FERREIRA FILHO.
Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação) - Universidade
Federal de Goiás, Escola de Engenharia Elétrica, Mecânica e de
Computação (EMC), Engenharia Mecânica, Goiânia, 2020.
Bibliografia. Anexos. Apêndice.
Inclui siglas, fotografias, gráfico, tabelas, lista de figuras, lista de
tabelas.

1. Soldagem MIG/MAG. 2. Gás de proteção. 3. Propriedades
mecânicas. I. FILHO, DEMOSTENES FERREIRA, orient. II. Título.

CDU 621

JOÃO GUILHERME FERREIRA SILVA

**ESTUDO DA INFLUÊNCIA DO GÁS DE PROTEÇÃO DA SOLDAGEM MIG/MAG
NA RESISTÊNCIA MECÂNICA DE UMA JUNTA**

Trabalho de conclusão de curso apresentado à disciplina Projeto Final de Curso, do curso de Engenharia Mecânica da Universidade Federal de Goiás, como requisito parcial para obtenção do título de Engenheiro Mecânico.


Trabalho aprovado. Goiânia, 21 de dezembro de 2020.

BANCA EXAMINADORA



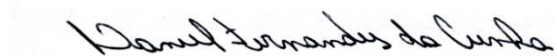
Profº. Dr. Demostenes Ferreira Filho

Orientador – Universidade Federal de Goiás



Profº. Dr. Kléber Mendes de Figueiredo

Convidado 1 – Universidade Federal de Goiás



Profº. Dr. Daniel Fernandes da Cunha

Convidado 2 – Universidade Federal de Goiás

Goiânia

2020

AGRADECIMENTOS

Primeiramente agradeço a Deus por ter me abençoado ao longo de toda minha graduação, sem nunca ter deixado faltar saúde, força e garra nessa caminhada.

Aos meus pais Williann e Kássia, que sempre me serviram como exemplo, acreditaram em meu potencial, me incentivaram e sempre apoiaram minhas decisões. Sem vocês nada disso seria possível.

A minha namorada, amiga e companheira Ana Elisa, que esteve presente em todos os momentos difíceis, me dando amor, carinho, incentivo e apoio emocional.

Ao meu orientador Demostenes, que me direcionou ao longo desses meses, por meio de sua vasta experiência e dedicação, doando parte do seu tempo para que fosse possível realizar este trabalho, mesmo em um momento em que as coisas eram incertas.

Aos amigos que compartilharam comigo os desafios, tristezas e vitórias da graduação. Esses momentos ficarão guardados eternamente em minha memória.

Aos professores e a Universidade Federal de Goiás, este trabalho é o resultado do empenho de vocês em construir uma sociedade melhor através do ensino.

Não existe triunfo sem perda, não há vitória sem sofrimento, não há liberdade sem sacrifício”

J.R.R Tolkien

RESUMO

A influência do gás de proteção nas propriedades mecânicas de uma junta soldada fabricada com aço carbono é o objeto de estudo desse trabalho. Considerando que, atualmente, grande parte dos processos envolvendo a soldagem MIG/MAG são feitos utilizando misturas gasosas a base de Argônio, que apresenta um custo médio por metro cúbico 80% maior quando comparado com o Dióxido de Carbono Puro (CO₂) e o tema é pouco explorado no meio científico, elaborou-se um estudo para verificar a viabilidade da aplicação do Dióxido de Carbono Puro (CO₂) como gás de proteção. Para a realização desse estudo, foram utilizados dois gases de proteção disponíveis no mercado: Dióxido de Carbono Puro (CO₂) e a mistura Ar + 25% CO₂. O metal de base utilizado foi o aço carbono estrutural de classificação ASTM-A36 e o metal de adição foi o arame de classificação ER70S-6. O método de transferência utilizado foi por curto-circuito. Os resultados deste estudo mostraram que o Dióxido de Carbono Puro (CO₂) apresenta menor estabilidade durante a soldagem, com a formação de respingos e menor qualidade do cordão de solda, sendo mais susceptível a formação de porosidade, quando comparado com a mistura Ar + 25% CO₂, utilizando os mesmos parâmetros. A caracterização macrográfica dos processos foi feita através da microscopia óptica. As propriedades mecânicas levantadas foram microdureza e resistência à tração. Embora a mistura Ar + 25% CO₂ apresente melhores propriedades, a soldagem com Dióxido de Carbono Puro (CO₂) se mostrou possível, sendo necessário a adequação de todos os parâmetros de soldagem para que se possa obter um resultado final satisfatório.

Palavras-chave: MIG/MAG, Gás de Proteção, Dióxido de Carbono Puro (CO₂), Ar + 25% CO₂, Propriedades Mecânicas.

ABSTRACT

The influence of shielding gas on the mechanical properties of a welded joint made of carbon steel is the object of study in this work. Considering that, today, most of the processes involving MIG/MAG welding are done using gas mixtures based on Argon, which has an average cost per cubic meter 80% higher when compared to Pure Carbon Dioxide (CO₂) and the theme is little explored in the scientific community, a study was carried out to verify the feasibility of applying Pure Carbon Dioxide (CO₂) as a shielding gas. To carry out this study, two types of shielding gas available on the market were used: Pure Carbon Dioxide (CO₂) and the mixture Ar + 25% CO₂. The base metal used was structural carbon steel of ASTM-A36 classification and the addition metal was ER70S-6 classification wire. The transfer method used was by short-circuit. The results of this study showed that Pure Carbon Dioxide (CO₂) has less stability during welding, with the formation of splatters and lower quality of the weld bead, being more susceptible to the formation of porosity when compared to the mixture Ar + 25% CO₂, using the same parameters. The macrographic characterization of the processes was done through optical microscopy. The mechanical properties raised were microhardness and tensile strength. Although the mixture Ar + 25% CO₂ has better properties, welding with Pure Carbon Dioxide (CO₂) proved to be possible, requiring the adequacy of all welding parameters in order to obtain a satisfactory final result.

Keywords: MIG/MAG, Shielding Gas, Pure Carbon Dioxide (CO₂), Ar + 25% CO₂, Mechanical Properties.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Processos de soldagem.....	19
Figura 2 - Esquema de soldagem MIG/MAG	20
Figura 3 - Seção transversal de uma solda	20
Figura 4 - Equipamento soldagem MIG/MAG	21
Figura 5 - Formação e transferência da gota metálica por curto circuito	23
Figura 6 - Transferência globular	23
Figura 7 - Transferência por spray	24
Figura 8 - Transferência pulsado	25
Figura 9 - Gases e misturas utilizados na soldagem MIG/MAG.....	26
Figura 10 - Formação de respingo de acordo com composição do gás de proteção.....	27
Figura 11 - Perfis de penetração típicos.....	28
Figura 12 - Relação entre a formação de fumos e a composição do gás de proteção.....	29
Figura 13 - Relação entre tenacidade e composição do gás de proteção.....	30
Figura 14 - Gráfico carga x alongamento e estricção	32
Figura 15 - Esquema ensaio de dobramento.....	33
Figura 16 - Escala comparativa entre os métodos de medição de dureza	35
Figura 17 - Junta de topo	36
Figura 18 - Disposição dos espécimes de prova na placa teste	37
Figura 19 - Dimensões dos corpos de prova: (a) dobramento e (b) tração.....	38
Figura 20 - Especificações técnicas fonte de soldagem	38
Figura 21 - Braço robótico adaptado	39
Figura 22 - Testes para diferentes configurações de DBCP e tensão utilizando CO ₂ puro	40
Figura 23 - Dados obtidos durante a soldagem com $V_o=20,5$ V e DBCP=10 mm.....	41
Figura 24 - Dados obtidos durante a soldagem com $V_o=22,5$ V e DBCP=10 mm.....	41
Figura 25 - Dados obtidos durante a soldagem com $V_o=22,5$ V e DBCP=8 mm.....	42
Figura 26 - Preparação de soldagem	43
Figura 27 - Corpos de prova após ensaio de tração.....	44
Figura 28 - Amostra após lixamento com lixa 400	45
Figura 29 - Distribuição dos pontos de medição de microdureza	45
Figura 30 - Comportamento da tensão e corrente para a mistura Ar + 25% CO ₂	46
Figura 31 - Comportamento da tensão e corrente para o CO ₂ puro.....	47
Figura 32 - Cordão de solda utilizando (a) Ar + 25% CO ₂ e (b) CO ₂ puro	48

Figura 33 - Aumento da formação de respingos na região onde houve ponteamto.....	48
Figura 34 - CP1 mistura Ar + 25% CO2 rompido e região onde havia um defeito na solda ...	49
Figura 35 - Gráfico tensão x deformação para o CP1 utilizado Ar + 25% CO2.....	50
Figura 36 - CP2 mistura Ar + 25% CO2 após o rompimento e detalhe da zona de estrição..	50
Figura 37 - Gráfico tensão x deformação para o CP2 mistura Ar + 25% CO2.....	51
Figura 38 - CP1 CO2 puro rompido e detalhe da zona de estrição	52
Figura 39 - Gráfico tensão x deformação para o CP1 com CO2 puro.....	53
Figura 40 - CP2 para o CO2 puro rompido e rompimento na região de solda.....	53
Figura 41 - Gráfico tensão x deformação para o CP2 com CO2 puro.....	54
Figura 42 - Espécimes de dobramento para mistura Ar + 25% CO2:(a) de face e (b) de raiz .	55
Figura 43 - Espécimes de dobramento para CO2 puro: (a) de face e (b) de raiz	56
Figura 44 - Macrografia do cordão de solda utilizando Ar + 25% CO2	57
Figura 45 - Macrografia do cordão de solda utilizando CO2 puro.....	58
Figura 46 - Perfil de microdureza Ar + 25% CO2	59
Figura 47 - Perfil de microdureza para CO2 puro	60

LISTA DE FIGURAS DO ANEXO A

Figura A1 - Quantidade de espécimes de acordo com a espessura	65
Figura A2 - Local de retirada dos espécimes	66
Figura A3 - Espécime de flexão de face e raiz	67
Figura A4 - Espécime de tensão de seção reduzida.....	68

LISTA DE FIGURAS DO APÊNDICE A

Figura AP1 - Plano de Trabalho	69
Figura AP2 - Cronograma do Plano de Trabalho	70

LISTA DE FIGURAS DO APÊNDICE B

Figura BP1 - Tabela com os valores de largura para solda feita com Ar + 25% CO2.....	71
Figura BP2 - Tabela com os valores de largura para solda feita com CO2 puro	71

LISTA DE FIGURAS DO APÊNDICE C

- Figura CP1 - Tabela com os valores de dureza para solda feita com Ar + 25% CO₂.....72
- Figura CP2 - Tabela com os valores de dureza para solda feita com CO₂ puro.....72

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Corrente de transição.....	24
Tabela 2 - Propriedades ASTM-A36 segundo ABNT NBR 7007	35
Tabela 3 - Composição química de acordo com fabricante (% em peso)	36
Tabela 4 - Parâmetros finais de soldagem	42
Tabela 5 - Resumo dos resultados para o ensaio de tração	54
Tabela 6 - Dimensões do cordão de solda para os diferentes gases de proteção.....	58

LISTA DE SÍMBOLOS

- AWS* – *American Welding Society*
- MAG* – *Metal Active Gas*
- MIG* – *Metal Inert Gas*
- GMAW* – *Gas Metal Arc Welding*
- LAMAF* – *Laboratório de Materiais e Processos de Fabricação*
- UFG* – *Universidade Federal de Goiás*
- CO2* – *Dióxido de Carbono*
- Ar* – *Argônio*

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	15
1.1 CONTEXTUALIZAÇÃO.....	15
1.2 MOTIVAÇÃO E JUSTIFICATIVA.....	16
1.3 OBJETIVOS	16
1.3.1 MACROS.....	16
1.3.2 ESPECÍFICOS	17
1.4 ESTRUTURA DO TRABALHO.....	17
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	18
2.1 SOLDAGEM.....	18
2.2 SOLDAGEM MIG/MAG	19
2.3 EQUIPAMENTO	21
2.4 MODOS DE TRANSFERÊNCIA METÁLICA.....	22
2.4.1 CURTO-CIRCUITO	23
2.4.2 GLOBULAR.....	23
2.4.3 SPRAY	24
2.4.4 PULSADO	25
2.5 GÁS DE PROTEÇÃO	25
2.5.1 DIÓXIDO DE CARBONO.....	27
2.5.2 MISTURAS.....	28
3. PROCESSOS DE AVALIAÇÃO DA SOLDA	31
3.1 DEFINIÇÃO	31
3.2 ENSAIO DE TRAÇÃO	32
3.3 ENSAIO DE DOBRAMENTO.....	33
3.4 ENSAIO METALOGRÁFICO	33
3.5 ENSAIO DE DUREZA.....	34
4. MATERIAIS E MÉTODOS	36

4.1 MATERIAIS	36
4.2 MÉTODOS	37
4.2.1 ESPÉCIMES DE PROVA	37
4.2.2 PROCEDIMENTO DE SOLDAGEM	38
4.2.3 ENSAIO DE TRAÇÃO	43
4.2.4 ENSAIO DE DOBRAMENTO.....	44
4.2.5 ENSAIO MACROGRÁFICO	44
4.2.6 MICRODUREZA VICKERS	45
5. RESULTADOS E DISCUSSÃO	46
5.1 COMPORTAMENTO DE TENSÃO E CORRENTE.....	46
5.2 QUALIDADE DO CORDÃO DE SOLDA.....	47
5.3 ENSAIO DE TRAÇÃO	49
5.4 ENSAIO DE DOBRAMENTO.....	54
5.5 MACROGRAFIA DO CORDÃO DE SOLDA	56
5.6 ENSAIO DE DUREZA.....	59
5.7 CUSTOS ASSOCIADOS AO GÁS DE PROTEÇÃO	60
6. CONCLUSÃO	61
7. PROPOSTAS PARA TRABALHOS FUTUROS.....	62
REFERÊNCIAS	63
ANEXO A	65
APÊNDICE A	69
APÊNDICE B	71
APÊNDICE C	72

1. INTRODUÇÃO

1.1 CONTEXTUALIZAÇÃO

A história da soldagem se inicia em épocas remotas, tendo sido encontrado objetos com mais de 3000 anos de idade que passaram por esse processo. Inicialmente, artefatos eram fabricados utilizando a brasagem e a soldagem por forjamento. O primeiro consiste no aquecimento de uma liga metálica de cobre e zinco até seu ponto de fusão, sendo adicionada ao ponto em que se deseja unir as peças e aguardando o seu resfriamento. Já o segundo método consiste no aquecimento das peças até que se tornem incandescentes, posicionando-as e iniciando o martelamento até que ocorra a união dos materiais (Marques, Modenesi e Bracarense, 2009).

Em 1885 surgiu a primeira patente de um processo de soldagem na Inglaterra. Esse processo era baseado em um arco elétrico estabelecido entre a peça e um eletrodo de carvão. Seus inventores se chamavam Nikolas Bernados e Stanislav Olszewsky. Rapidamente surgiram novas patentes relacionadas, como a soldagem a arco com eletrodo metálico nu, soldagem por gás, resistência e aluminotermia. Outra técnica que chamou bastante atenção e viria a ser amplamente utilizada em todo o mundo após sucessivos aprimoramentos foi a soldagem a arco com eletrodo revestido.

Até então, a soldagem era um procedimento secundário, com utilização apenas para reparos emergenciais. Com a eclosão da 1ª Guerra Mundial, os processos de fabricação exigiam maior rapidez e produção, fazendo com que tal método até então subaproveitado, se tornasse amplamente difundido. Desde então, a soldagem se tornou alvo de grande interesse humano e passou a ser estudada em todo o mundo.

Nesse contexto, o processo MIG/MAG ganhou enorme relevância, estando presente em todos os segmentos da indústria, o que se justifica pelo custo relativamente baixo aliado a uma alta produtividade, diversidade quanto a posição de soldagem, grande versatilidade quanto ao tipo e espessuras de material, altas taxas de deposição, facilidade no treinamento do soldador e a grande facilidade de automação. É válido ressaltar que a automação da soldagem MIG/MAG através de robôs se tornou uma das bases atuais da indústria 4.0, sendo utilizada principalmente na indústria automobilística e aeroespacial.

Com a mundialização dos mercados, diversas empresas procuram por novas estratégias para se tornarem mais competitivas, seja desenvolvendo novas técnicas, adquirindo novos equipamentos ou até mesmo buscando maximizar a eficiência dos processos já existentes. Dentro dessa busca, o uso de diferentes gases de proteção, em virtude das variações de preço de cada tipo, exerce influência na qualidade e no aspecto visual de uma solda, além de suas propriedades mecânicas, podendo servir como importante elemento na redução dos custos de produção, de acordo com Boiko e Avisans (2013).

No entanto, segundo Canto (1990), antes de adotar uma nova atmosfera de proteção, é preciso entender como ela se relacionará com o material, uma vez que seus constituintes podem servir como um meio de contaminação da junta soldada, funcionando como um meio de fragilização, principalmente quando grandes quantidades de contaminantes são solubilizadas no metal fundido e acabam sendo liberadas durante o processo de solidificação da poça de fusão, causando descontinuidades como as porosidades. Apesar da importância desse estudo para a indústria, ainda se trata de um tema pouco explorado no meio científico e, portanto, tem-se a motivação do presente trabalho.

1.2 MOTIVAÇÃO E JUSTIFICATIVA

Conforme referido, o processo MIG/MAG é amplamente utilizado no contexto industrial atual, o que faz dele o foco principal desse trabalho. Atualmente, grande parte das empresas trabalham utilizando como gás de proteção a mistura 75% Argônio + 25% CO₂, também conhecida comercialmente como gás Atal, mesmo ela apresentando um valor médio de reposição de R\$18,00 por metro cúbico, enquanto o CO₂ puro pode ser encontrado por R\$10,00 o metro cúbico nas principais lojas de suprimentos para solda em Goiânia-GO.

Portanto, o maior entendimento sobre a influência do gás de proteção utilizado no processo de soldagem pode permitir que a indústria reduza seus custos de produção e ofereça um produto de mesma qualidade, durabilidade e menor preço para o consumidor final.

1.3 OBJETIVOS

1.3.1 MACROS

Este trabalho tem como objetivo principal elaborar um estudo experimental sobre a influência do gás de proteção na resistência mecânica de uma junta soldada feita de aço carbono, a fim de avaliar a viabilidade da utilização do Dióxido de Carbono Puro (CO₂) para soldagem.

1.3.2 ESPECÍFICOS

Para realização dos experimentos, será utilizado o procedimento de soldagem do tipo MIG/MAG utilizando diferentes tipos de gases de proteção: Dióxido de Carbono Puro (CO₂) e a mistura Ar + 25% CO₂; o material utilizado na fabricação das juntas será o aço carbono ASTM-A36; a validação dos resultados obtidos nos ensaios destrutivos (tração, dobramento e metalográfico) será feita baseada nas especificações de procedimento de soldagem da norma American Society Welding - AWS D1.1 Structural Welding Code; será traçado o perfil de dureza da região soldada; será verificada a relação do gás de proteção utilizado no procedimento de soldagem e as características mecânicas da junta.

1.4 ESTRUTURA DO TRABALHO

É exposto no capítulo 2 informações gerais sobre o processo de soldagem, que é a área de atuação do estudo. O capítulo 3 mostra os ensaios que serão utilizados para avaliar a solda no corpo de prova. No capítulo 4, apresenta-se os materiais bem como os equipamentos e métodos utilizados no procedimento experimental. Ademais, no capítulo 5 são mostrados os resultados obtidos experimentalmente e a análise destes. Por fim, tem-se a conclusão, propostas para trabalhos futuros, referências, anexos e apêndices deste trabalho.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 SOLDAGEM

O termo soldagem pode se referir a inúmeros processos diferentes quando inserido no contexto da fabricação e recuperação de peças, estruturas e materiais. O conceito clássico relaciona a soldagem com um processo de união. No entanto, segundo Marques, Modenesi e Bracarense (2009), atualmente processos de soldagem também são utilizados para deposição de materiais sobre superfícies a fim de introduzir revestimentos com características especiais ou então a recuperação de zonas desgastadas.

Abaixo são apresentados alguns conceitos encontrados na literatura acerca do termo soldagem:

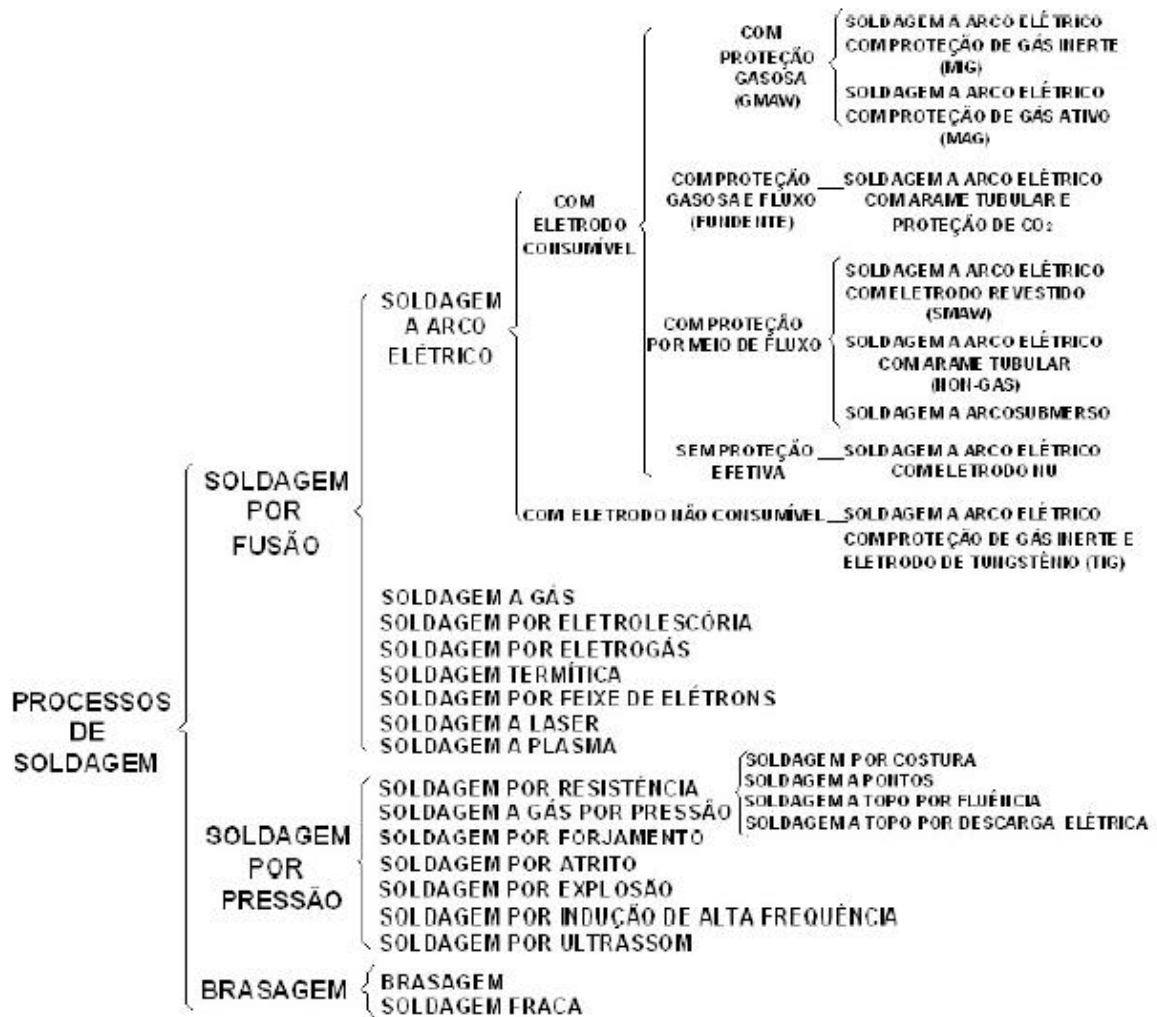
- “Operação que visa obter a união de duas ou mais peças, assegurando na junta a continuidade das propriedades físicas e químicas”.
- “Processo de união de metais por fusão”. (Não apenas os metais são soldáveis como também é possível se soldar sem fusão, como no caso do forjamento).

A Associação Americana de Soldagem (AWS) apresenta definição própria para o termo, como “Processo de união de materiais usado para obter coalescência (união) localizada de metais e não-metais, produzida por aquecimento até uma temperatura adequada, com ou sem a utilização de pressão e/ou material de adição”. É importante ressaltar que soldagens industriais comumente utilizam como fonte a energia elétrica, porém essa fonte de energia pode ser química, mecânica ou óptica, sendo o material aquecido pelo calor resultante do processo.

No quesito resistência mecânica, as soldas devem apresentar resistência maior ou igual ao material soldado. Segundo ESAB (2005), para que seja possível obter tais resultados, deve-se escolher o material de adição com propriedades iguais ou superiores ao metal de base.

Por apresentar uma vasta aplicação, os processos de soldagem utilizados atualmente se apresentam em grande quantidade e podem ser agrupados de acordo com diversos fatores como a aplicação de pressão, fusão e outros, de acordo com a Fig. 1.

Figura 1 – Processos de soldagem



Fonte: NERIS (2012).

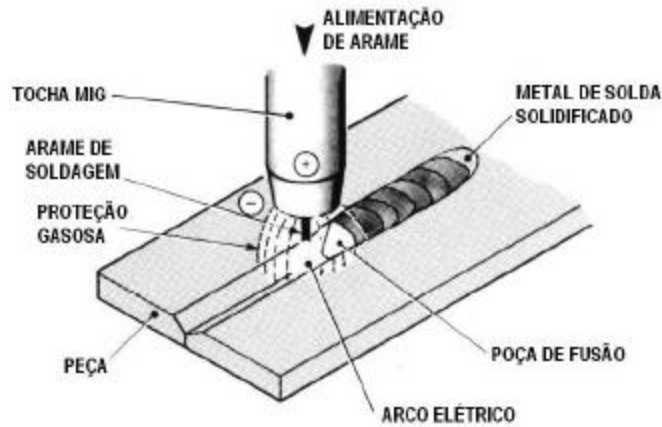
Como objeto de estudo deste trabalho, a soldagem com proteção gasosa do tipo MIG/MAG será utilizada para o experimento.

2.2 SOLDAGEM MIG/MAG

Segundo Marques, Modenesi e Bracarense (2009), a soldagem a arco elétrico com proteção gasosa (Gas Metal Arc Welding – GMAW), também conhecida como Metal Inert Gas (MIG) e Metal Active Gas (MAG) é um processo em que a união das peças metálicas é resultante do aquecimento por meio de um arco elétrico estabelecido entre o material e um eletrodo metálico nu, também chamado de arame, com alimentação contínua, conforme mostrado na Fig. 2. A proteção gasosa tem como função proteger a poça de fusão contra contaminação atmosférica. No caso de a proteção gasosa ser provida por um gás inerte, ou seja, sem interação com a poça de fusão, o processo é denominado MIG e os gases comercialmente

utilizados são o Argônio (Ar) e Hélio (He) na forma pura ou então em mistura. Para gases ou misturas ativas, os mais usuais são Dióxido de Carbono Puro (CO₂) e misturas com Argônio e Oxigênio (O₂) e é chamado MAG.

Figura 2 – Esquema de soldagem MIG/MAG



Fonte: ESAB (2005).

Segundo Neris (2012), em ambos os processos geralmente o metal de adição possui a mesma composição química do metal de base.

Na Fig. 3 é representado a seção transversal de uma solda e as regiões de interesse deste estudo. O metal de base (MB) é a porção de material inicial. A zona fundida (ZF) de uma solda é o resultado da soma entre o metal de adição (arame) e a parte fundida do metal de base. Já a zona termicamente afetada (ZTA) é aquela que tem sua microestrutura alterada devido a influência do calor da soldagem. Também são mostrados os termos técnicos que definem as partes de um cordão de solda.

Figura 3 – Seção transversal de uma solda



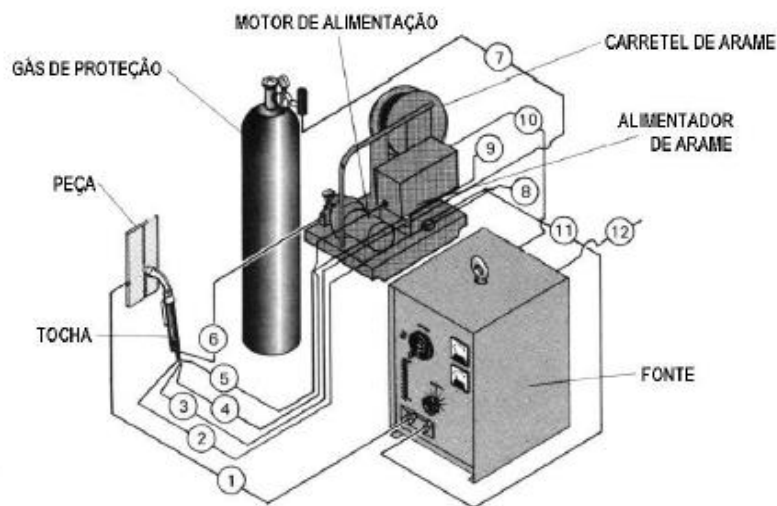
Fonte: MARQUES, MODENESI e BRACARENSE (2009).

Em certas aplicações, como em chapas de grande espessura, a zona fundida pode ser resultado de uma sequência de deposição em camadas, que individualmente recebem o nome de passe de solda. Para aplicações em chapas finas, um único passe pode ser suficiente. O termo cordão pode ser utilizado em alguns casos para designar a solda como um todo e em outros, apenas o passe.

2.3 EQUIPAMENTO

O equipamento necessário para a realização da soldagem com gás de proteção é composto por vários elementos, conforme mostrado na Fig. 4.

Figura 4 – Equipamento soldagem MIG/MAG



Fonte: ESAB (2005).

Onde:

1. Retorno
2. Refrigeração da tocha
3. Gás de proteção
4. Gatilho da tocha
5. Água de refrigeração para a tocha
6. Conduíte do arame
7. Gás de proteção vindo do cilindro
8. Saída de água de refrigeração

9. Entrada de água de refrigeração
10. Entrada de 42V (corrente alternada)
11. Cabo de solda (alimentação)
12. Conexão para a fonte primária (220/380/440V)

Segundo ESAB (2005), a tocha tem como função guiar o arame e o gás de proteção para a região de soldagem, além de estabelecer contato elétrico com o arame. A depender do tipo de aplicação, diferentes tochas são utilizadas, podendo variar desde tochas mais robustas para pesados ciclos de trabalho com altas correntes até tochas leves para soldagem com baixa corrente e fora de posição. Tochas refrigeradas a água ou secas (gás de proteção exerce a função de refrigeração) estão disponíveis para ambas as aplicações.

O motor de alimentação realiza a função de puxar o arame do carretel para leva-lo até a tocha. O módulo de controle mantém a velocidade de alimentação constante, que depende da aplicação e deve ser pré-determinada pelo operador. O sinal é controlado a partir do gatilho presente na tocha.

O gás de proteção, a água responsável pela refrigeração (quando presente) e a fonte de soldagem são controlados pelo módulo de controle. O controle dos fluxos de gás e água são feitos através de válvulas solenóides e são coordenados com o fluxo de corrente elétrica, permitindo o pré e pós-fluxo de gás, de acordo com a necessidade.

Quanto a fonte de soldagem, quase todas as soldas com o processo MIG/MAG são executadas com polaridade reversa, sendo a tocha o polo positivo e o negativo, a peça. Essa configuração permite uma maior penetração da solda no material.

2.4 MODOS DE TRANSFERÊNCIA METÁLICA

Após a fusão do arame-eletrodo, o metal líquido precisa ser transferido para a poça de fusão onde formará o cordão de solda. Esse processo é conhecido como transferência metálica. A forma como esse processo ocorre possui grande relevância, uma vez que influenciará na quantidade de respingos gerados, aplicabilidade de determinadas posições de soldagem, estabilidade do arco elétrico e quantidade de gases que será absorvida pelo metal fundido.

De acordo com Marques, Modenesi e Bracarense (2009), existem quatro modos de transferência, que podem ser por curto-circuito, globular, spray e pulsado, que dependem da corrente e tensão de soldagem, mas também são influenciados pelo gás de proteção utilizado. A escolha por um modo ou outro deve levar em conta a operação, uma vez que cada um destes possui sua característica de operação, acabamento do cordão, penetração, produtividade, corrente e geração de respingo.

2.4.1 CURTO-CIRCUITO

A transferência por curto-circuito é caracterizada pela passagem do material para a poça de fusão no momento em que há o contato com o arame-eletrodo, ou seja, a passagem do metal de adição não ocorre através do arco elétrico. Devido a instabilidade do arco, pode apresentar intensa geração de respingos, mas que podem ser limitados através da seleção correta de parâmetros de soldagem. Para que seja possível esse tipo de transferência, são utilizadas tensões baixas de soldagem. Trata-se do método mais utilizado pela indústria. Na Fig. 5 é mostrado a formação da gota metálica ao longo do tempo.

Figura 5 – Formação e transferência da gota metálica por curto circuito

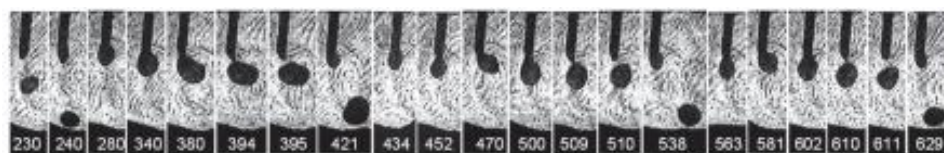


Fonte: SCOTTI e PONOMAREV (2008).

2.4.2 GLOBULAR

No modo de transferência globular, as gotas de metal fundido, que apresentam tamanho maior que o diâmetro do arame-eletrodo, são transferidas pela ação da gravidade até a poça de fusão, conforme mostrado na Fig. 6. Devido ao seu mecanismo de ação, esse tipo de transferência não permite a soldagem sobre cabeça, sendo seu uso não comum na soldagem de estruturas metálicas. É executável com valores intermediários de tensão e corrente.

Figura 6 – Transferência globular

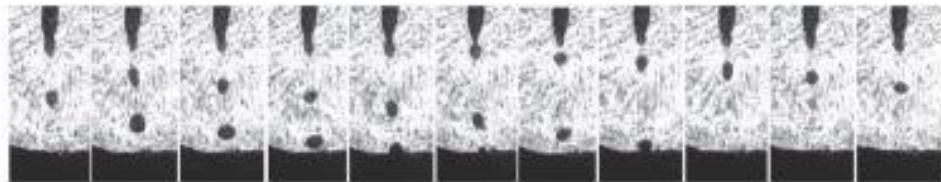


Fonte: SCOTTI e PONOMAREV (2008).

2.4.3 SPRAY

Ao elevar a corrente de soldagem, o tamanho médio das gotas de metal líquido diminui. Ao passar pela corrente de transição, o modo como as gotas se transferem para a peça passa de globular para o chamado spray ou aerossol, mostrado na Fig. 7. Dessa forma, as gotas são expulsas do arame-eletrodo de maneira similar a um spray, com partículas de tamanho próximo ao diâmetro do eletrodo e em grande número. A ação da força eletromagnética é responsável por essa característica, o que contribui para não geração de respingo e consequentemente um acabamento superficial suave e regular do cordão de solda. Por requerer correntes relativamente elevadas, não é possível soldar chapas finas com este método de transferência.

Figura 7 – Transferência por spray



Fonte: SCOTTI e PONOMAREV (2008).

A Tabela 1 apresenta valores de corrente de transição para determinadas configurações de soldagem. Esse tipo de transferência metálica só ocorre com alguns tipos de gases ou misturas de gases de proteção. Como as forças eletromagnéticas envolvidas no processo se opõem à força gravitacional, é possível a soldagem em qualquer posição apesar de não ser recomendado a soldagem fora da posição plana, já que a gota, por ter um tamanho elevado, torna difícil o controle da poça de fusão.

Tabela 1 – Corrente de transição

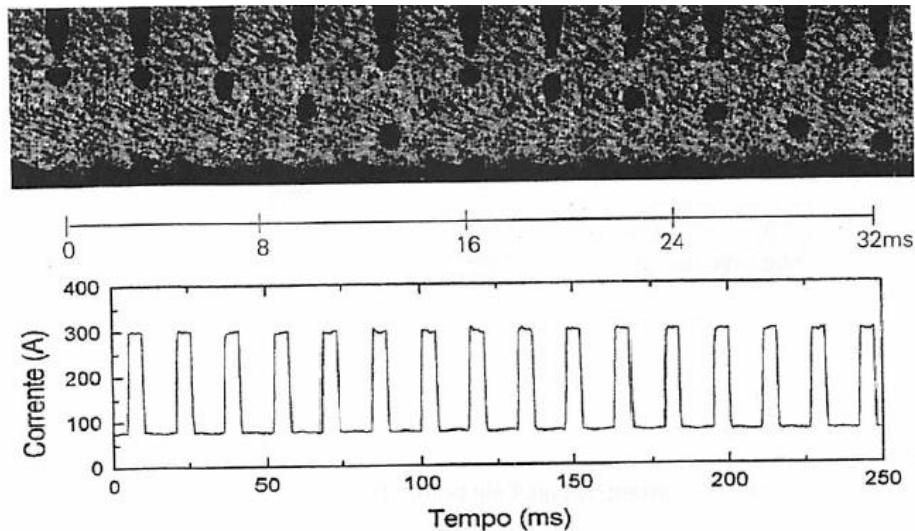
Material	Diâmetro do arame (mm)	Gás de proteção	Corrente de transição (A)
Aço carbono	0,8	Argônio 2% Oxigênio	150
	1,0	Argônio 2% Oxigênio	165
	1,2	Argônio 2% Oxigênio	220
	1,6	Argônio 2% Oxigênio	275
Aço inoxidável	0,8	Argônio 2% Oxigênio	170
	1,2	Argônio 2% Oxigênio	225
	1,6	Argônio 2% Oxigênio	285
Alumínio	0,8	Argônio	95
	1,2	Argônio	135
	1,6	Argônio	180
Cobre desoxidado	0,8	Argônio	180
	1,2	Argônio	210
	1,6	Argônio	310
Bronze silício	0,8	Argônio	165
	1,2	Argônio	205
	1,6	Argônio	270

Fonte: MARQUES, MODENESI e BRACARENSE (2009).

2.4.4 PULSADO

A transferência do tipo arco pulsado se assemelha ao modo globular, porém mais estável e uniforme. Esse método é obtido através da utilização de fontes eletrônicas, uma vez que se torna possível introduzir perturbações na corrente de soldagem. Essa perturbação é caracterizada por dois níveis de corrente, sendo o mais baixo usado para sustentar o arco e impedir a transferência do metal. No momento em que se aplica o pulso e a corrente atinge seu pico, acima da corrente de transição e em certo intervalo de tempo, a gota se desprende do arame-eletrodo e vai em direção à poça de fusão, conforme mostrado pela Fig. 8. Como esse modo permite a utilização de níveis mais baixos de corrente e conseqüentemente menor entrada de calor, torna possível sua utilização na soldagem de chapas finas e fora da posição plana.

Figura 8 – Transferência pulsado



Fonte: MARQUES, MODENESI e BRACARENSE (2009).

A otimização dos parâmetros desse tipo de transferência metálica se torna difícil visto a nova variável introduzida no processo. Para cada pulso é desejável que ocorra a transferência de apenas uma gota.

2.5 GÁS DE PROTEÇÃO

O objetivo do gás de proteção é evitar a contaminação da poça de fusão, expulsando o ar atmosférico da região de soldagem. Quando em grandes quantidades, o nitrogênio e o oxigênio presentes no ar atmosférico podem ficar aprisionados no metal, causando porosidades. Além disso, esses elementos (principalmente oxigênio) podem se combinar com outros

presentes no metal, produzindo inclusões. Tais recorrências afetam negativamente as características de uma junta soldada, como a redução da resistência mecânica, e por isso devem ser evitadas.

Segundo ESAB (2005), é importante conhecer as propriedades básicas do gás ou mistura de gases utilizados no processo de soldagem, uma vez que a interação entre ele e o metal de base tem influência direta no resultado final. Entre tais propriedades, encontram-se as propriedades térmicas a temperaturas elevadas, reação química do gás com os vários elementos presentes no arame de solda e metal de base e o efeito causado no modo de transferência de metal.

A energia térmica transferida à solda bem como a tensão estabelecida no arco é influenciada diretamente pela condutividade térmica do gás. Para manter a estabilidade do arco elétrico, maiores níveis de tensão de soldagem são necessários quando a condutividade térmica aumenta. Dessa maneira, não só o cordão de solda como a microestrutura da zona termicamente afetada será diretamente impactada pela escolha do gás de proteção.

Na Fig. 9 são apresentados diversos gases e combinações, seu comportamento químico e aplicações.

Figura 9 – Gases e misturas utilizados na soldagem MIG/MAG

Gás ou mistura	Comportamento químico	Aplicações
Argônio	Inerte	Quase todos os metais, exceto aço
Hélio	Inerte	Al, Mg, Cu e suas ligas. Alta penetração
Ar + He (20 - 50%)	Inerte	Idem He, mas melhor que 100% He
Nitrogênio	—	Cobre, maior energia de soldagem
Ar + 20-30% N ₂	--	Idem N ₂ , mas melhor que 100% N ₂
Ar + 1 - 2% O ₂	Ligeiramente oxidante	Aços inoxidáveis e algumas ligas de Cu
Ar + 3 - 5% O ₂	Oxidante	Aços carbono e alguns aços de baixa liga
CO ₂	Oxidante	Aços carbono e alguns aços de baixa liga
Ar + 20-50% CO ₂	Oxidante	Aços
Ar + CO ₂ + O ₂	Oxidante	Aços

Fonte: MARQUES, MODENESI e BRACARENSE (2009).

Segundo Silva e Dutra (2007), o tipo de gás de proteção escolhido terá certa influência, mas é importante salientar que o resultado final do processo depende de todas as variáveis e configurações do procedimento, como os parâmetros de soldagem.

De acordo com Modenesi (2000), para se estimar o custo por hora de arco aberto para cada um dos gases, a Eq. 1 deve ser utilizada. Essa estimativa não leva em conta possíveis vazamentos do sistema e considera que o fluxo de gás tenha a mesma duração do arco.

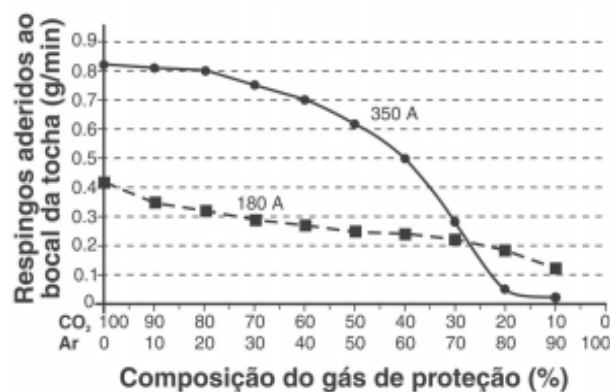
$$C_h = \dot{V}_{gás} \times P_{R\$/m^3} \times 3600 \quad (1)$$

Em que $\dot{V}_{gás}$ é a vazão volumétrica por segundo e $P_{R\$/m^3}$ é o custo por metro cúbico do gás na região.

2.5.1 DIÓXIDO DE CARBONO

O Dióxido de Carbono Puro (CO₂) se apresenta como o gás mais barato utilizado na soldagem MIG/MAG. Em temperatura ambiente, apresenta características de gás inerte, porém em altas temperaturas se torna um gás ativo, se dissociando para formar Monóxido de Carbono (CO) e Oxigênio (O₂), gerando uma proteção oxidante. De acordo com Silva e Dutra (2007), ao passar através do arco elétrico, ele o constringe, causando uma redução da área de interface arco-gota, quando comparado com outras misturas pobres em CO₂. Tal efeito se deve a maior condutividade térmica do gás, que origina forças na gota com sentido contrário ao seu destacamento e por isso tende a levar ao modo de transferência por curto-circuito. No entanto, como já citado, os modos de transferência são dependentes principalmente da variável corrente elétrica. A existência de tais forças também explica a maior tendência a respingos, conforme o aumento do teor de CO₂ na atmosfera de proteção, conforme mostrado na Fig. 10.

Figura 10 – Formação de respingo de acordo com composição do gás de proteção



Fonte: SILVA, DUTRA (2007).

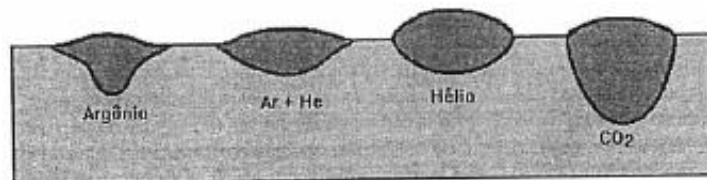
Quando se trabalha com gases ricos em CO₂, outro fator relacionado com respingos é o efeito explosivo causado pela expansão repentina após a formação de gases de oxidação. Esse fato, em geral, explica a necessidade de limpeza adicional devido à adesão de respingos ao bocal, tornando o procedimento mais demorado; pior acabamento do cordão de solda e a

possibilidade de contaminação da poça de fusão devido a perturbação do fluxo de gás. Por esse motivo, pode-se ter uma falsa economia no processo quando se utiliza o Dióxido de Carbono Puro (CO₂).

Quando aplicado o modo de transferência curto-circuito, ocorre um aumento da potência gerada. Sendo assim, para uma mesma corrente, necessita-se de maiores tensões. Isso se traduz em uma maior fusão entre o metal de solda fundido e o metal de base devido a maior fluidez da poça. A maior quantidade de CO₂ provoca oxidação do Silício (Si) presente nos materiais e, sendo esta uma reação exotérmica, contribui para o aumento da temperatura local e a fluidez do metal fundido.

Apesar da relação entre profundidade de penetração do cordão de solda e os mecanismos de penetração envolvidos no processo MIG/MAG não terem sido completamente desvendados, é possível relacioná-los com o gás de proteção, conforme mostrado na Fig. 11. Segundo Vaidya (2002), isso ocorre devido a tendência de misturas com alta porcentagem de Argônio em relação ao Dióxido de Carbono causarem transferência por escoamento de gotículas, que possui maior eficiência de fusão na porção central do cordão enquanto que crescentes porcentagens de CO₂ levam a uma transferência por curto-circuito, alterando o perfil transversal do metal de solda.

Figura 11 – Perfis de penetração típicos



Fonte: MARQUES, MODENESI e BRACARENSE (2009).

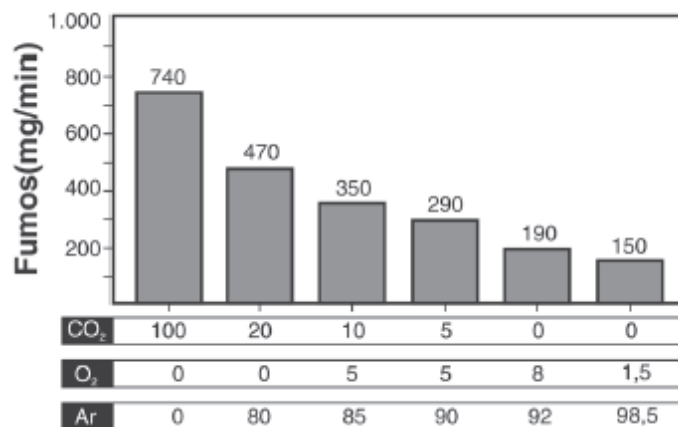
2.5.2 MISTURAS

De acordo com Canto (1990), quando se utilizam misturas de gases como atmosfera de proteção, estas geralmente têm como base o Argônio, um gás quimicamente inerte que pode ser usado para soldar grande variedade de materiais, inclusive altamente reativos como Zircônio e Titânio. Uma de suas vantagens está na capacidade de proteção efetiva do cordão de solda em soldagens nas posições plana e horizontal, uma vez que é mais pesado que o ar atmosférico. Além disso, é capaz de promover excelente estabilidade do arco, boa penetração e conformação do cordão. É ideal para soldagem em materiais de baixa condutividade térmica e peças de pequena espessura.

Com os avanços da indústria, misturas de Argônio e CO₂ em proporções adequadas se tornaram comuns por proporcionar benefícios ao processo de soldagem, unindo características dos dois gases. No geral, a concentração de CO₂ na mistura varia de 3 a 50% em volume. Quando comparado com o CO₂ puro, essas misturas propiciam maior tenacidade do metal de solda, escória mínima, melhor aparência do cordão, melhora da estabilidade do arco e maiores velocidades de soldagem. Se tratando de desvantagens, tem-se a diminuição da penetração, da taxa de deposição de material e o custo mais elevado quando comparado com outros gases, como o CO₂, o que torna todo o processo mais oneroso.

No trabalho comparativo feito por Silva e Dutra (2007), foi possível determinar a correlação entre a composição química do gás de proteção e a taxa de geração de fumos, o que pode ser utilizado para minimizar os danos à saúde de soldadores devido ao ambiente insalubre, principalmente quando se trabalha em locais confinados. Essa relação é apresentada na Fig. 12.

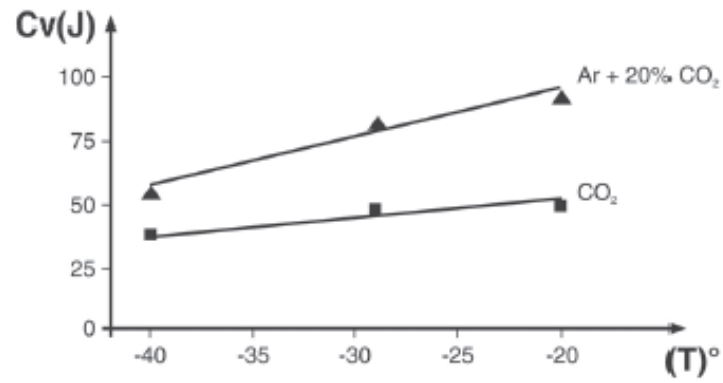
Figura 12 – Relação entre a formação de fumos e a composição do gás de proteção



Fonte: SILVA, DUTRA (2007).

No mesmo estudo, ficou demonstrado a influência sobre a tenacidade do material, que decresce à medida que se aumenta o teor de CO₂ na atmosfera de proteção, como pode ser visto na Fig. 13. Ambos os resultados são explicados pela diminuição do potencial de oxidação conforme se diminui a quantidade de CO₂ no gás de proteção, uma vez que menos elementos de liga são perdidos no processo.

Figura 13 – Relação entre tenacidade e composição do gás de proteção



Fonte: SILVA, DUTRA (2007).

Portanto, a escolha do gás de proteção deve levar em conta as características do material a ser soldado, bem como a necessidade de cada aplicação.

3. PROCESSOS DE AVALIAÇÃO DA SOLDA

3.1 DEFINIÇÃO

O processo de avaliação da solda tem importância vital na indústria, uma vez que é preciso garantir que a soldagem executada atenda aos requisitos de sua aplicação, incluindo a capacidade de resistir aos esforços mecânicos aos quais está submetida, para evitar acidentes e falhas catastróficas.

Segundo Souza (1982), a determinação das propriedades mecânicas de um material é realizada a partir de diversos tipos de ensaios, que deverão ser escolhidos de acordo com a ocasião, ou seja, a depender do tipo de esforço submetido, características do material e as propriedades que se deseja obter. Usualmente os ensaios são classificados em duas categorias:

- **Destrutivos:** são aqueles que promovem a destruição e conseqüente inutilização do material. Como exemplo tem-se o ensaio de tração, dobramento, fadiga e torção.
- **Não destrutivos:** são utilizados para detecção de defeitos internos e externos dos materiais e geralmente são realizados em peças prontas. Os ensaios deste tipo mais comuns são os raios X, ultrassom e líquido penetrante (detecção de defeitos externos).

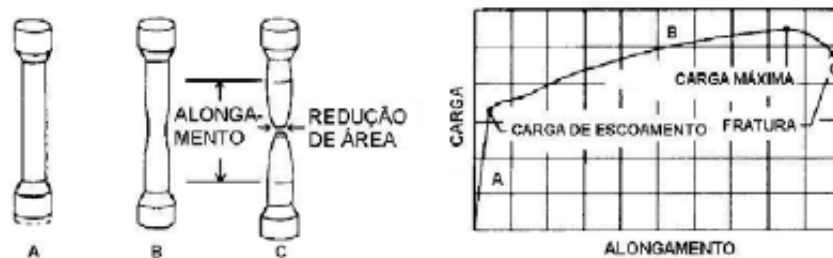
Após a revolução industrial, os processos de fabricação passaram a afetar a sociedade em geral e não apenas os indivíduos relacionados diretamente com os produtos desta. Dessa forma, criou-se a necessidade de regulamentar as etapas de fabricação, criando regras que visam minimizar a chance de sérios acidentes com perdas materiais e, eventualmente, humanas e danos ao meio ambiente. Além disso, é preciso garantir uma maior uniformidade, rastreabilidade e controle das operações de soldagem. Para isso, esses processos são regulados por diferentes códigos, cada um relacionado a uma área de fabricação. No presente trabalho, será utilizado a norma American Society Welding - AWS D1.1 Structural Welding Code, que trata de estruturas soldadas de aço carbono e de baixa liga, para validação dos resultados experimentais. Os ensaios realizados serão de tração, dobramento e metalográfico.

3.2 ENSAIO DE TRAÇÃO

O ensaio de tração é um dos mais importantes ensaios realizado a fim de determinar características quantitativas dos materiais, devido a sua facilidade de realização e reprodutividade dos resultados.

Conforme Souza (1982), o procedimento consiste na aplicação de carga axial de tração em um corpo de prova com dimensões padronizadas por normas específicas até que ocorra a ruptura. As informações de esforço e deformação são registradas em um gráfico, conforme Fig. 14. Como o ensaio é realizado utilizando baixas velocidades de aplicação de carga e o corpo de prova tem seção transversal inicial constante, a resistência do material é obtida satisfatoriamente.

Figura 14 – Gráfico carga x alongamento e estrição



Fonte: ESAB (2005).

Inicialmente a aplicação de carga no corpo de prova com seção transversal constante garante a uniformidade do procedimento. Esta termina no momento em que começa a aparecer o fenômeno de estrição, no caso de materiais dúcteis, resultante da carga máxima suportada pelo material. Em termos gerais, a ruptura acontece na zona mais estreita do material mas no caso de defeitos internos, a ruptura pode ocorrer fora dessa região.

A partir do gráfico obtido experimentalmente, são obtidos os valores do limite de resistência à tração e o limite de ruptura do material.

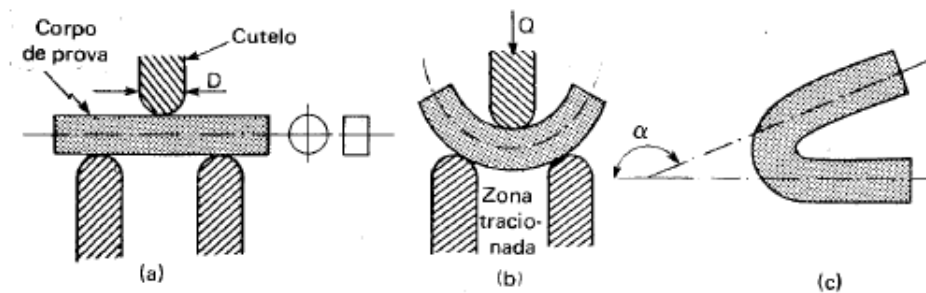
O limite de resistência à tração corresponde ao ponto de máxima carga atingida durante o ensaio. Essa tensão máxima é atingida após o escoamento do material, uma vez que ocorre o encruamento. O metal resiste cada vez mais aos esforços de tração, necessitando de maiores tensões para se deformar.

O limite de ruptura ocorre no ponto onde há o rompimento do material, sendo um ponto de menor tensão quando comparado ao limite de resistência, uma vez que ocorre a diminuição da área da seção transversal do corpo de prova.

3.3 ENSAIO DE DOBRAMENTO

Segundo Souza (1982), o ensaio de dobramento é largamente utilizado em laboratórios e indústrias e fornece uma indicação qualitativa da ductilidade de um material. Esse ensaio também é realizado para qualificação de soldadores e de processos de solda. A realização desse ensaio consiste na aplicação de um esforço de flexão em um corpo de prova de eixo retilíneo e seção transversal constante, assentado em dois apoios cuja distância deve ser determinada em função do tamanho do corpo de prova. Um cutelo é responsável pela aplicação do esforço de flexão até que o corpo de prova atinja o ângulo de dobramento (α) especificado, conforme Fig. 15.

Figura 15 – Esquema ensaio de dobramento



Fonte: SOUZA (1982).

O diâmetro D do cutelo é definido de acordo com a severidade desejada no ensaio e leva em consideração a espessura ou diâmetro do corpo de prova. Para ensaios onde se deseja maior severidade, faz-se necessário menores diâmetros de cutelo.

O esforço de flexão deve ser aplicado até que se obtenha o ângulo de dobramento (α) especificado em 180° para solda. Após esse procedimento, uma inspeção visual deve ser realizada na zona tracionada do corpo de prova, devendo atender aos critérios de AWS D1.1.

3.4 ENSAIO METALOGRÁFICO

Segundo Colpaert (2008), Metalografia é o estudo da morfologia e estrutura dos metais. O ensaio metalográfico tem como função relacionar a estrutura do material resultante do processo de fabricação às suas propriedades físicas e mecânicas.

Exames metalográficos são divididos de acordo com o tipo de observação, sendo: macroscópica (Macrografia) e microscópica (Micrografia). Na observação macroscópica a análise é feita através de lupas ou microscópios estéreos, podendo também ser feita a olho nu. O exame microscópico é realizado através de microscópios ópticos que possibilitam um aumento de até 1400 vezes.

A observação através de microscópio óptico exige que a superfície esteja perfeitamente plana e perpendicular ao eixo óptico do microscópio, uma vez que o campo focal é reduzido. Dessa forma, é preciso que a amostra passe por um processo de preparação antes de se submeter ao ensaio. As etapas de preparação são:

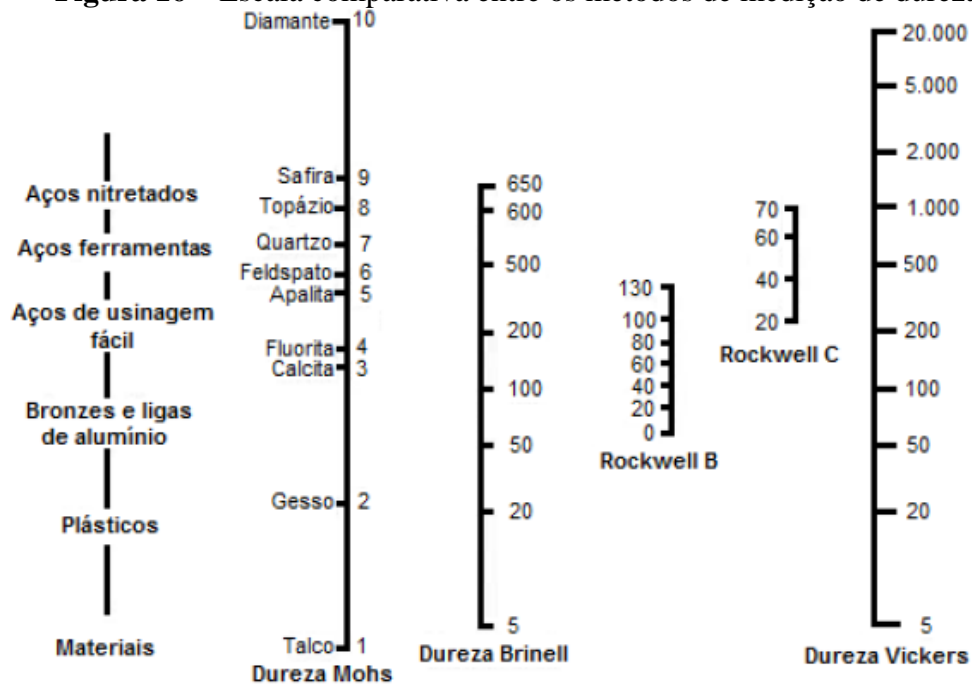
1. Corte: a amostra deve ser cortada sem que o processo de corte provoque alterações em sua estrutura.
2. Embutimento metalográfico: nessa etapa, a amostra é embutida em plástico ou resina para facilitar o manuseio e permita maior firmeza durante o lixamento.
3. Lixamento: tem como função eliminar irregularidades presentes na amostra, deixando a superfície com a menor rugosidade possível.
4. Polimento: etapa cuja função é eliminar possíveis vestígios de marcas deixadas pela etapa de lixamento.
5. Ataque químico: etapa final de preparação que consiste em usar um reagente ácido visando a corrosão da superfície, permitindo a visualização da microestrutura.

3.5 ENSAIO DE DUREZA

Para Souza (1982), dureza é a propriedade de um material no estado sólido que permite a ele resistir à deformação plástica localizada sendo um risco ou impressão. Ela expressa a resistência a deformações permanente e é diretamente relacionada com a força de ligação dos átomos. Para os metais, essa energia é alta. A aplicação desse ensaio no caso dos cordões de solda tem como objetivo avaliar a presença de regiões endurecidas na junta soldada.

A dureza por risco consiste na comparação da capacidade de um material riscar outro. Entre os ensaios por risco, a dureza Mohs é a mais conhecida, resumindo-se a uma escala de 10 minerais padrões organizados de tal forma que o mais duro, ou seja, o diamante, risca todos os outros, como mostrado na Fig. 16.

Figura 16 – Escala comparativa entre os métodos de medição de dureza



Fonte: GARCIA, SPIM e SANTOS (2012).

A dureza por penetração é baseada em um penetrador que, ao ser forçado sobre a superfície do material de interesse, sob condições controladas de carga e taxa de aplicação, faz uma impressão. Quanto mais macio, maior e mais profunda será essa impressão e, conseqüentemente, menor será o índice de dureza do material. Os principais ensaios desse tipo são Brinell, Rockwell e Vickers.

4. MATERIAIS E MÉTODOS

4.1 MATERIAIS

O material escolhido como metal de base foi o aço estrutural ASTM-A36, disponibilizado na forma de chapa com 3 *mm* de espessura. As especificações para esse aço são apresentadas na Tabela 2, conforme a norma ABNT NBR 7007, responsável por estabelecer os requisitos para as barras e perfis estruturais laminados a quente, de aço-carbono ou de aço microligado, empregados em estruturas de aço.

Tabela 2 – Propriedades ASTM-A36 segundo ABNT NBR 7007

Limite de escoamento	mín. 250 Mpa
Resistência à Tração	400-550 Mpa
Módulo de Elasticidade	200 Gpa

Fonte: Próprio Autor.

Para confecção dos corpos de prova de acordo com a norma AWS D1.1, a chapa foi cortada em amostras menores para posteriormente serem soldadas formando uma junta de topo do tipo I com espaçamento de 1,2 *mm*, conforme Fig. 17.

Figura 17 – Junta de topo



Fonte: MARQUES, MODENESI e BRACARENSE (2009).

Como metal de adição foi selecionado o arame eletrodo AWS ER70S-6 com diâmetro de 1 *mm*. Para proteção gasosa, os gases utilizados foram Dióxido de Carbono Puro (CO₂) e a mistura Ar + 25% CO₂ com vazão constante de $2,1 \times 10^{-4} \text{ m}^3/\text{s}$ (12,5 *l/min*).

A Tabela 3 apresenta a constituição química do aço e arame-eletrodo, conforme informado pelos fabricantes.

Tabela 3 – Composição química de acordo com fabricante (% em peso)

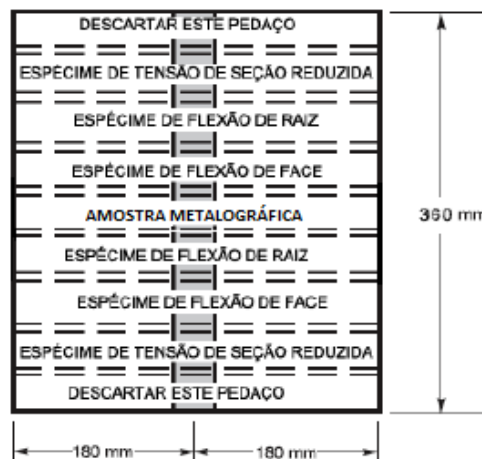
Elementos químicos	Metal de Base	Metal de Adição
	ASTM A36	AWS ER70S-6
C	0,1100	0,095
Si	0,0150	0,975
Mn	0,3880	1,478
P	0,0130	0,012
S	0,0760	0,011
Al	0,0360	-
Cu	0,0060	-
Ni	0,0040	-
Cr	0,0170	-
Mo	0,0010	-
Nb	0,0002	-
Ti	0,0010	-
N	0,0015	-

Fonte: Próprio Autor.

4.2 MÉTODOS

4.2.1 ESPÉCIMES DE PROVA

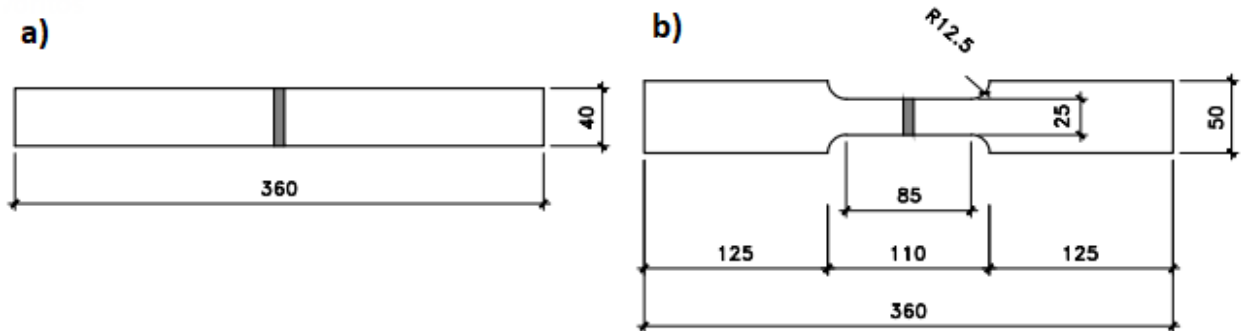
Conforme descrito no Anexo A, a norma AWS D1.1 determina a quantidade e dimensões dos espécimes de prova com base na espessura (e) do material. Sendo assim, a partir da Fig. A1, para $e = 3 \text{ mm}$, tem-se 2 espécimes para cada um dos ensaios, sendo tração de seção reduzida, dobramento de raiz e face, totalizando 6 corpos de prova para cada um dos gases de proteção utilizados, além da amostra para metalografia. O local de retirada dos espécimes na placa teste são mostrados na Fig. 18. Cada placa teste foi fabricada a partir da união de duas chapas com dimensões $180 \times 360 \text{ mm}$.

Figura 18 – Disposição dos espécimes de prova na placa teste

Fonte: AWS D1.1 (2010), adaptado.

As dimensões finais dos espécimes de prova de tração, que teve sua parte útil usinada utilizando fresadora, e dobramento são apresentadas na Fig. 19, conforme especificado pela norma AWS D1.1.

Figura 19 – Dimensões dos corpos de prova: (a) dobramento e (b) tração



Fonte: Próprio Autor.

4.2.2 PROCEDIMENTO DE SOLDAGEM

Após a preparação das chapas que irão compor as juntas, a soldagem foi realizada no Laboratório de Materiais e Processos de Fabricação (*LAMAF*) da Universidade Federal de Goiás (*UFG*) através do processo MAG convencional utilizando a fonte de soldagem DIGIPlus A7 450. As especificações técnicas do equipamento são apresentadas na Fig. 20.

Figura 20 – Especificações técnicas fonte de soldagem

Características	450
Tensão de alimentação trifásica	220/380/440
Tensão em vazio (configurável de fábrica)	50/68/85 V
Corrente a 100 % de fator de carga	280 A
Potência nominal	10 kVA
Faixa de corrente	5- 450 A
Corrente nominal por fase (220/380/440)	26/15/13 A
Ripple de corrente	8 A
Fator de Potência	0.94

Fonte: Manual DIGIPlus.

Para que fosse possível manter os mesmos parâmetros durante os procedimentos de soldagem utilizou-se um braço robótico YASKAWA Motoman HP20D, mostrado na Fig. 21, e controlador DX100. A programação do robô foi feita para que as operações de solda fossem completadas em um único passe.

Figura 21 – Braço robótico adaptado



Fonte: Próprio Autor.

Durante a execução das soldas, os valores instantâneos de corrente e tensão de soldagem foram obtidos através de um sensor de corrente HAT 200-S e foram compilados por meio do software de processamento de dados LabVIEW, adotando uma frequência de aquisição de 5000 Hz.

O experimento se baseou nos parâmetros adotados na dissertação de Pereira (2016), que utiliza a mistura Ar + 25% CO₂, de forma a garantir a penetração total no material. Essa configuração resultou em uma corrente média de 162 A. Como os gases de proteção utilizados apresentam diferentes características, mesmos parâmetros de soldagem resultam em diferentes valores de corrente. Sendo assim, de acordo com Meneses, Leal e Scotti (2016), quando utilizado o Dióxido de Carbono Puro (CO₂) como atmosfera de proteção, é preciso reduzir a distância bico de contato peça (DBCP) até que seja possível manter a mesma corrente média para ambos os casos. Com essa abordagem metodológica, é possível comparar os resultados. Além disso, visando aumentar a estabilidade do arco elétrico para o modo de transferência por curto-circuito, a tensão foi ligeiramente aumentada.

Portanto, antes de iniciar a soldagem das chapas, testes preliminares foram realizados a fim de determinar a combinação mais adequada ao propósito deste trabalho, como mostra a Fig. 22.

Figura 22 – Testes para diferentes configurações de DBCP e tensão utilizando CO₂ puro



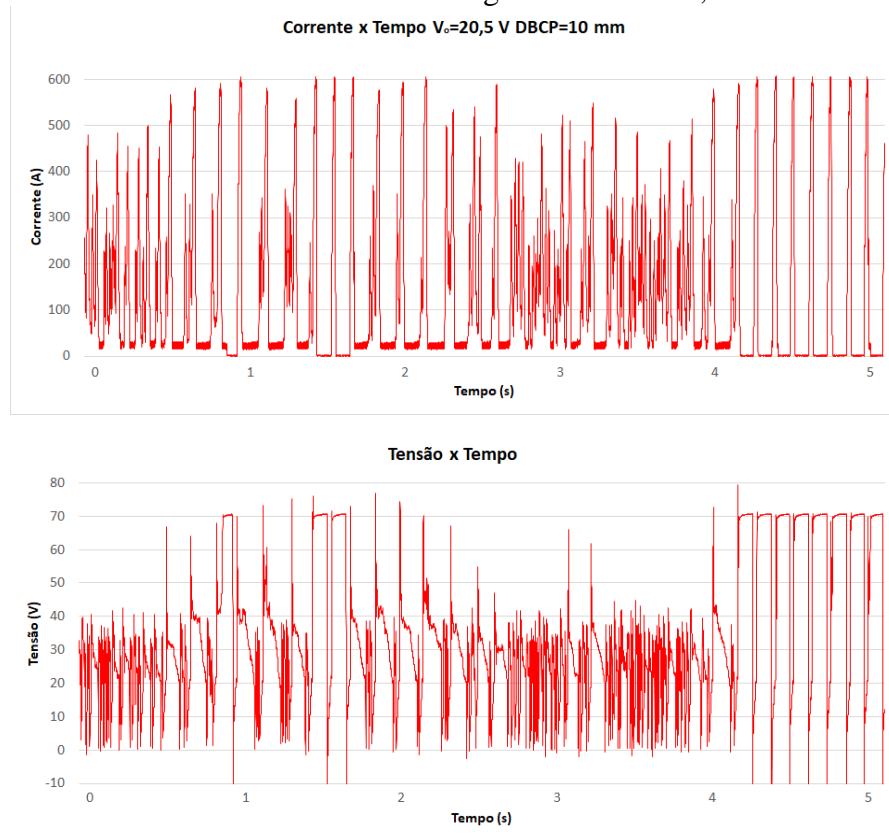
Fonte: Próprio Autor.

No primeiro teste, a tensão foi mantida em 20,5 V, enquanto a DBCP foi diminuída para 10 mm. Nessa configuração, a corrente média ficou em cerca de 128 A, mostrando grande instabilidade do arco elétrico e intensa geração de respingos. Além disso, o cordão de solda resultante não apresentava uniformidade ao longo do seu comprimento. Os dados para esse teste são mostrados na Fig. 23.

Na segunda tentativa, a tensão foi aumentada para 22,5 V, mantendo a mesma DBCP do teste anterior, 10 mm, conforme Fig. 24. O aumento de tensão teve como objetivo aumentar a estabilidade do arco elétrico, baseado nos resultados de Meneses, Leal e Scotti (2016). Essa alteração resultou em uma solda uniforme com uma menor quantidade de respingos, com corrente média de 147 A. No entanto, para que fosse possível realizar a comparação entre os gases de proteção, era preciso alcançar os 162 A de corrente média durante o processo e assim foi feito mais um teste.

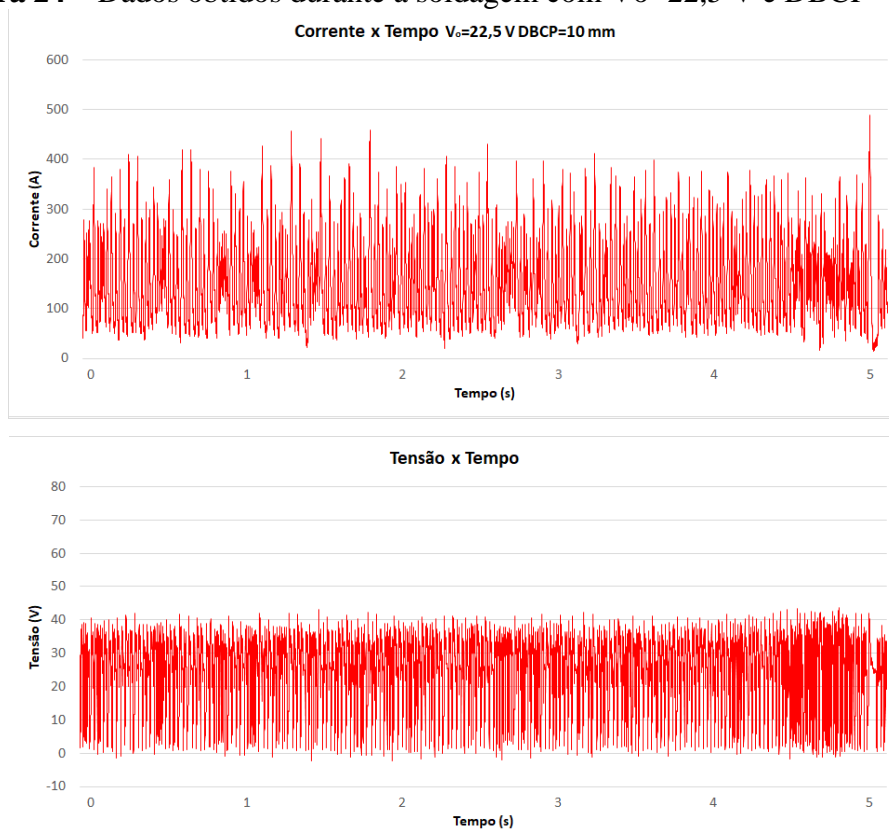
Na terceira tentativa, a tensão foi mantida em 22,5 V e a DBCP foi configurada para 8 mm. Dessa forma, atingiu-se a corrente média desejada, com o cordão de solda se mostrando uniforme ao longo de sua extensão e baixa geração de respingos. Os dados são mostrados na Fig. 25.

Figura 23 – Dados obtidos durante a soldagem com $V_o=20,5$ V e DBCP=10 mm



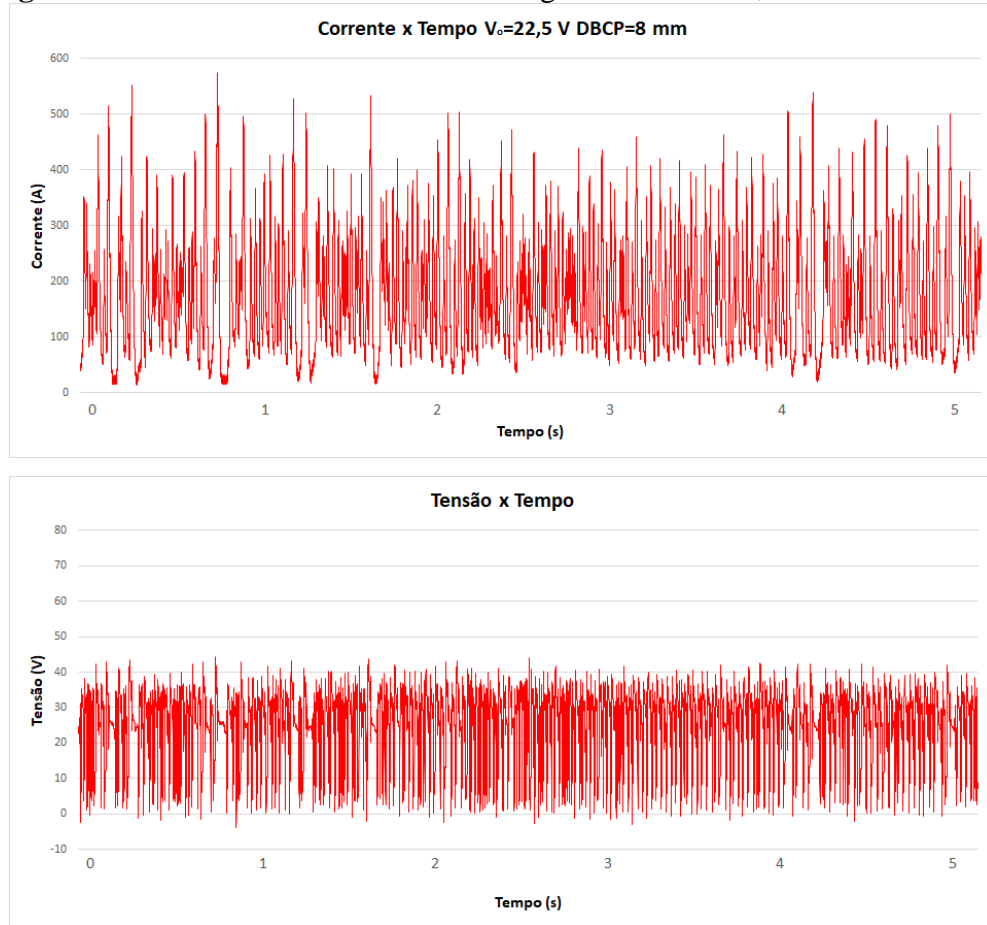
Fonte: Próprio Autor.

Figura 24 – Dados obtidos durante a soldagem com $V_o=22,5$ V e DBCP=10 mm



Fonte: Próprio Autor.

Figura 25 – Dados obtidos durante a soldagem com $V_o=22,5$ V e DBCP=8 mm



Fonte: Próprio Autor.

Ao final de três tentativas, encontrou-se um parâmetro mais próximo ao utilizado para o Ar + 25% CO₂. Os parâmetros finais utilizados para soldar as chapas teste são apresentados na Tabela 4.

Tabela 4 – Parâmetros finais de soldagem

Parâmetros	CO ₂ Puro	Ar-25%CO ₂
U _s (V)	22,50	20,50
DBCP (mm)	8,00	12,00
I _m (A)	162,00	
V _a (cm/min)	649,80	
V _s (cm/min)	60,00	
Vazão (l/min)	12,60	

Fonte: Próprio Autor.

Onde U_s, DBCP, I_m, V_a e V_s, são, respectivamente, tensão, distância bico de contato peça, corrente média, velocidade de alimentação do arame-eletrodo e velocidade de soldagem.

Para preparação das juntas, as chapas menores foram colocadas em posição ligeiramente angulada, de modo que, após a soldagem, a deformação térmica resultante deixasse a placa de

testes o mais plana possível. Além disso, visando manter a distância entre as chapas de $1,2\text{ mm}$ e evitar a abertura destas durante o processo, antes do procedimento, foi preciso adicionar pontos de soldas no material, distanciados a cada 40 mm , como pode ser visto na Fig. 26.

Figura 26 – Preparação de soldagem



Fonte: Próprio Autor.

Para a chapa teste feita com Dióxido de Carbono Puro (CO_2), uma inspeção visual seguida de lixamento da raiz foi realizada a fim de eliminar os pontos onde haviam sido detectados não uniformidade do reforço de raiz.

4.2.3 ENSAIO DE TRAÇÃO

O ensaio de tração foi realizado utilizando a máquina universal de ensaios SHIMADZU UH-F600kN X, configurada com velocidade de $5\text{ mm}/\text{min}$ para realização do ensaio.

Conforme especificado em AWS D1.1, o comprimento da seção de aderência foi selecionado de forma a contemplar a distância mínima de pelo menos dois terços do tamanho das alças do corpo de prova de seção reduzida. Na Fig. 27 é possível observar os corpos de prova após serem submetidos ao ensaio de tração.

Figura 27 – Corpos de prova após ensaio de tração



Fonte: Próprio Autor.

4.2.4 ENSAIO DE DOBRAMENTO

Para realização do ensaio de flexão guiado, o equipamento utilizado foi o mesmo do ensaio de tração, porém configurado para realizar a deformação plástica dos corpos de prova.

A configuração do ensaio, seguindo as orientações de AWS D1.1, foi feita com diâmetro do cutelo de 50 mm e distância entre os apoios de 73 mm. O ângulo de dobramento foi de 180°.

4.2.5 ENSAIO MACROGRÁFICO

Nessa análise, utilizou-se uma amostra retirada da porção central de cada uma das placas teste, como mostrado na Fig. 18 do item 4.2. Essas amostras foram preparadas pela prática metalográfica convencional que consiste no embutimento em baquelite conforme mostrado na Fig. 28, utilizando a embutidora metalográfica Fortel EFD 30, e posterior lixamento na sequência 80, 320, 400, 600 e 2000, feito através da politriz metalográfica TecLago PL02E. Após esse processo, foi feito o polimento utilizando alumina em suspensão de 1,0 e 0,05 μm e ataque químico superficial reagente com Nital 5%, a fim de observar precisamente o centro do cordão de solda, a zona afetada pelo calor e o metal de base, objeto da análise. A aquisição de imagens foi realizada pelo microscópio ZEISS Axio Imager.

Figura 28 – Amostra após lixamento com lixa 400

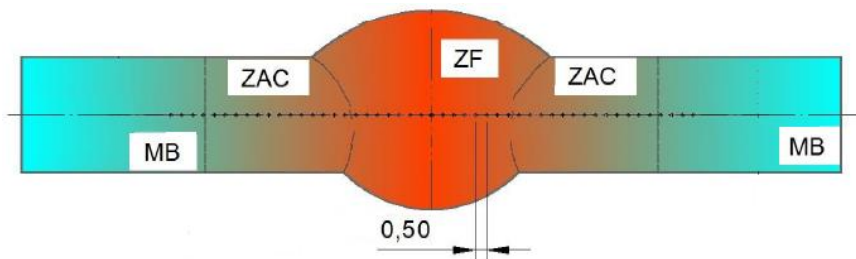


Fonte: Próprio Autor.

4.2.6 MICRODUREZA VICKERS

O equipamento utilizado para obtenção da microdureza foi o microdurômetro digital de bancada Mitutoyo HM-200 Series, através do método Vickers, com carga aplicada de 1,0 Kgf. Para que fosse possível traçar o perfil de microdureza, percorreu-se a linha central da chapa, no sentido transversal, partindo do centro em direção a extremidade da peça, com espaçamento de 0,5 mm entre cada medida, obtendo um grande número de valores, representando todas as regiões da solda, sendo elas o metal de base (MB), a zona afetada pelo calor (ZAC) e a zona fundida (ZF), conforme mostrado na Fig. 29. Os valores médios de microdureza são apresentados no Apêndice C.

Figura 29 – Distribuição dos pontos de medição de microdureza



Fonte: Próprio Autor.

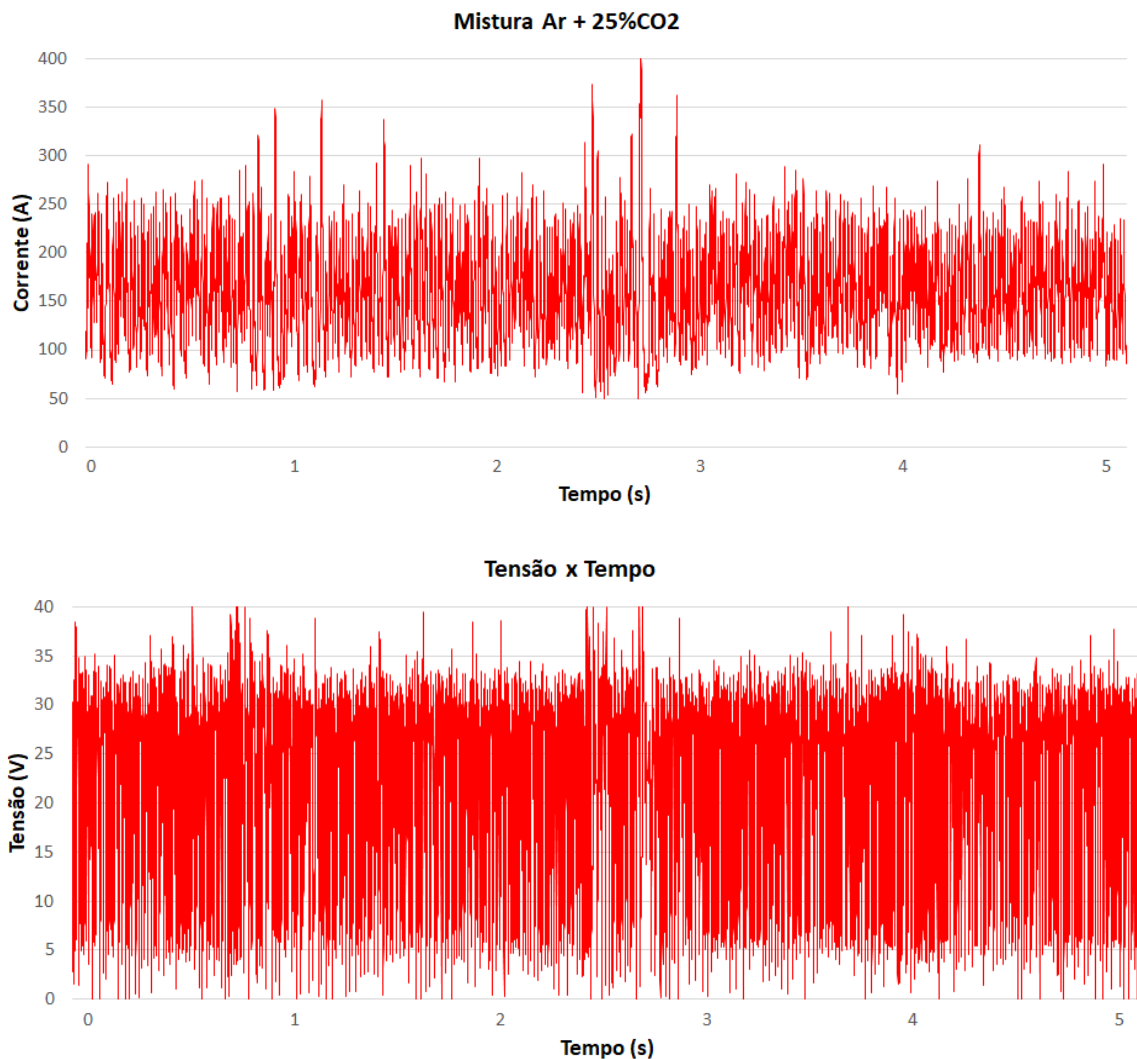
Com as medidas de microdureza em mãos, utilizou-se o Microsoft Excel (2016) para analisar a distribuição dos dados e gerar a curva que representa o perfil de microdureza da junta soldada.

5. RESULTADOS E DISCUSSÃO

5.1 COMPORTAMENTO DE TENSÃO E CORRENTE

Os valores instantâneos de corrente e tensão obtidos durante a soldagem com a mistura Ar + 25% CO₂ podem ser vistos na Fig. 30. Analisando os gráficos, é possível perceber que o processo apresenta estabilidade, oscilando dentro de uma faixa aproximadamente constante de tensão e corrente. De acordo com Scotti e Ponomarev (2008), a frequência de curtos-circuitos clássica deve variar entre 20 a 200 vezes por segundo. A partir da análise computacional dos dados, em que a tensão de referência para curto-circuito foi de 10 V, a frequência obtida para esse gás de proteção foi de 107,6 Hz.

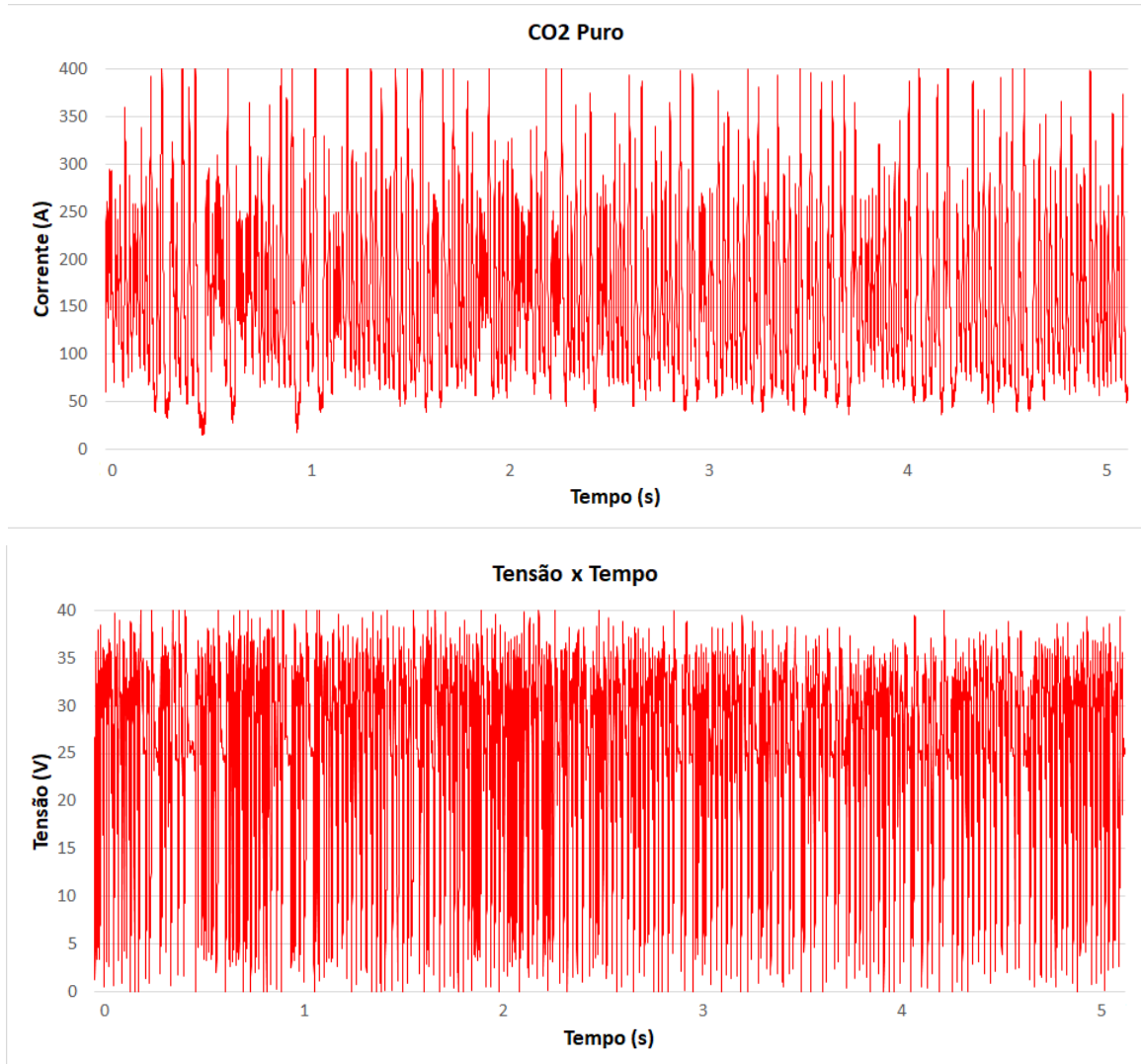
Figura 30 – Comportamento da tensão e corrente para a mistura Ar + 25% CO₂



Fonte: Próprio Autor

Comparando com os gráficos da soldagem utilizando Dióxido de Carbono Puro (CO_2), mostrados na Fig. 31, percebe-se que esse gás de proteção torna o procedimento mais instável, o que é explicado pela menor frequência de curto-circuito, calculada em 52,2 Hz.

Figura 31 – Comportamento da tensão e corrente para o CO_2 puro



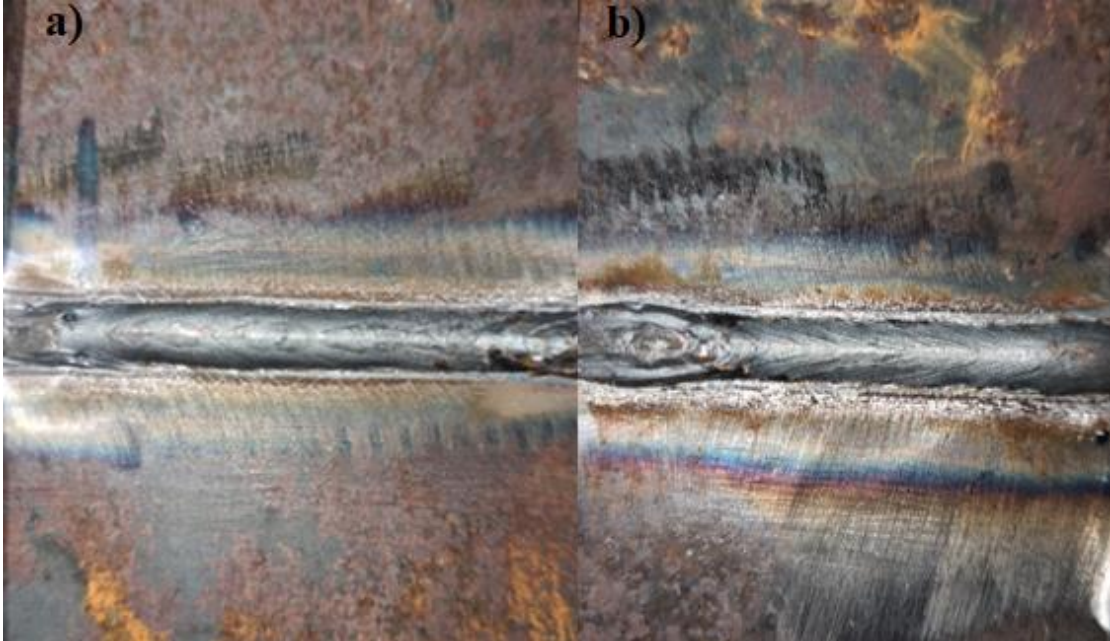
Fonte: Próprio Autor

5.2 QUALIDADE DO CORDÃO DE SOLDA

Para a mistura Ar + 25% CO_2 , o cordão de solda apresentou largura média de 7,2 mm. Foram feitas 18 medidas ao longo do comprimento da chapa-teste, com desvio padrão de 0,0209 mm. Dessa forma, tem-se uma grande uniformidade ao longo do seu comprimento. Os valores de largura são apresentados no Apêndice B. As maiores variações ocorreram nas regiões onde se localizavam os pontos de solda utilizados na preparação do experimento. Verifica-se também que não houve geração de respingos. Já o Dióxido de Carbono Puro (CO_2) resultou em um

cordão uniforme com largura média de $6,7\text{ mm}$ e desvio padrão de $0,0250\text{ mm}$. Seu acabamento se mostrou mais grosseiro em relação à mistura Ar + 25% CO₂, com a formação de estrias que apontam na direção de soldagem. A Fig. 32 mostra o comparativo entre o resultado final para os diferentes gases.

Figura 32 – Cordão de solda utilizando (a) mistura Ar + 25% CO₂ e (b) CO₂ puro



Fonte: Próprio Autor

Na solda com Dióxido de Carbono Puro (CO₂), as regiões onde inicialmente houve o ponteamto apresentaram um aumento substancial da formação de respingos, como mostrado na Fig. 33, embora estes tenham se formado ao longo de todo o comprimento da chapa teste, mesmo com a menor distância entre o bico de contato e a peça.

Figura 33 – Aumento da formação de respingos na região onde houve ponteamto



Fonte: Próprio Autor

5.3 ENSAIO DE TRAÇÃO

Após a preparação dos corpos de prova (CP), estes foram submetidos ao ensaio de tração. O primeiro CP, soldado com a mistura Ar + 25% CO₂, rompeu na região da solda, mostrado na Fig. 34. Analisando a região onde ocorreu o rompimento, foi possível identificar uma porosidade na solda através de uma inspeção visual.

Segundo Marques, Modenesi e Bracarense (2009), porosidades são definidas como bolhas de gás que ficam aprisionadas no metal de solda a partir do momento que ocorre a solidificação da poça de fusão. Esse fenômeno ocorre devido a reação do Carbono com o Óxido de Ferro, liberando Monóxido de Carbono e contribuindo para a formação de cavidades sem preenchimento de solda.

Figura 34 – CP1 mistura Ar + 25% CO₂ rompido e região onde havia um defeito na solda

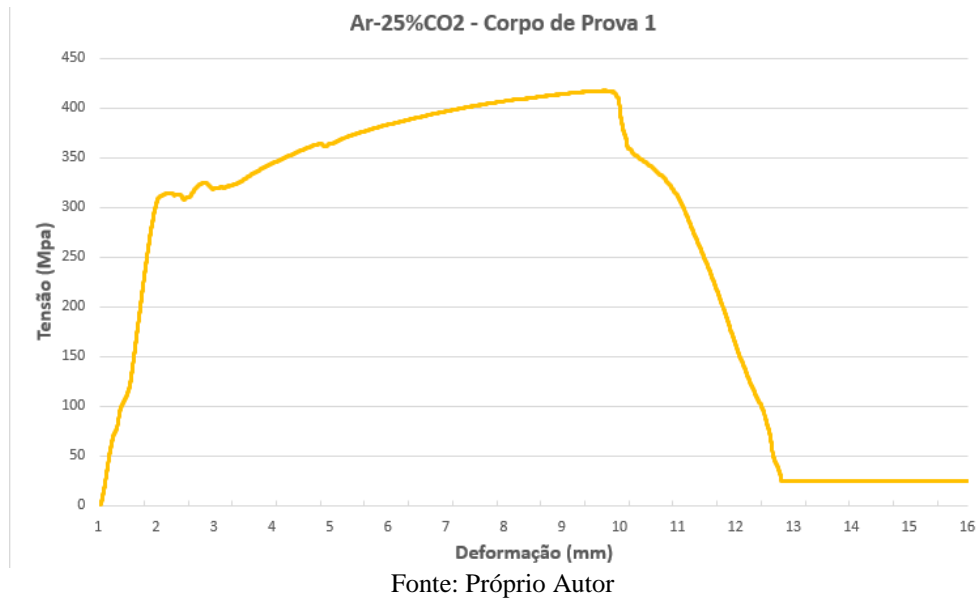


Fonte: Próprio Autor

O gráfico da tensão x deformação resultante desse ensaio é apresentado na Fig. 35. Os seguintes resultados puderam ser obtidos:

- Tensão máxima: 417,683 Mpa
- Força máxima: 31,326 kN
- Tensão de escoamento: 326,669 Mpa

Figura 35 – Gráfico tensão x deformação para o CP1 utilizado Ar + 25% CO2



O segundo corpo de prova desenvolveu a zona de estrição em uma região próxima da solda, com rompimento ocorrendo no metal de base, conforme Fig. 36. Observa-se o tipo de fratura apresentado, típico de materiais dúcteis, conhecida por taça e cone.

Figura 36 – CP2 mistura Ar + 25% CO2 após o rompimento e detalhe da zona de estrição



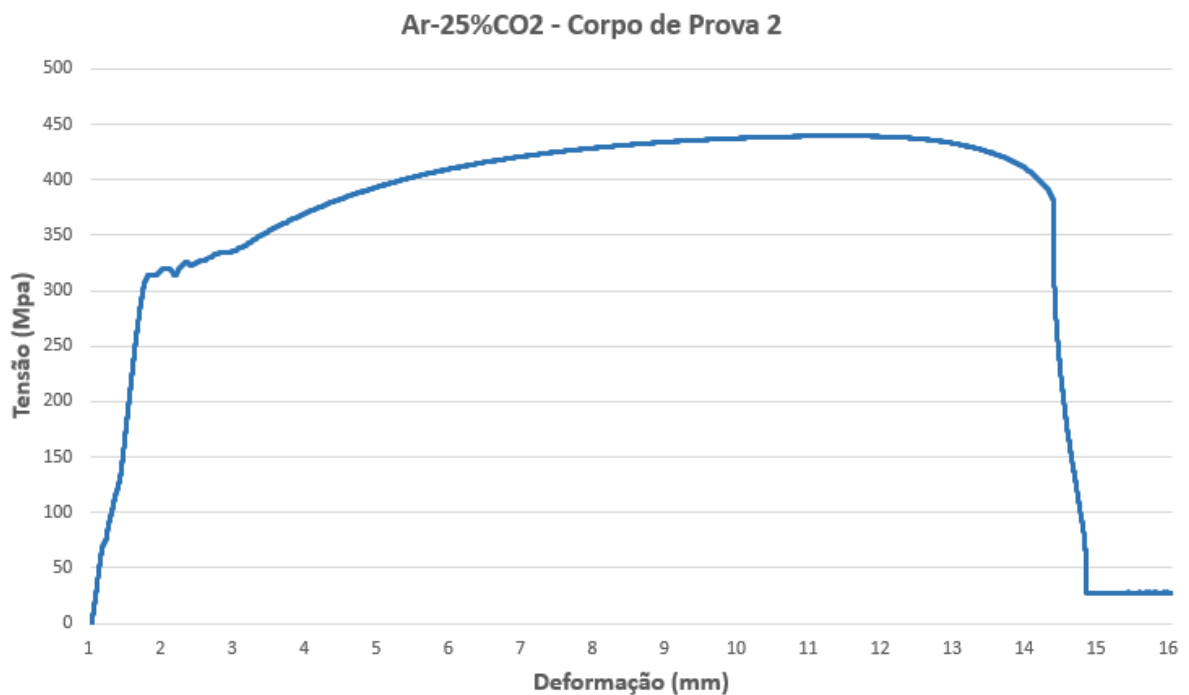
Fonte: Próprio Autor

Desse teste, as seguintes informações puderam ser obtidas:

- Tensão máxima: 439,727 Mpa
- Força máxima: 32,979 kN
- Tensão de escoamento: 335,257 Mpa

O critério de aceitação para o teste de tração de seção reduzida, segundo a norma AWS D1.1, é de que a resistência à tração não deve ser menor que o mínimo de faixa de tensão especificada para o metal de base. Dessa maneira, o resultado do teste atende ao requisito, uma vez que é superior ao valor mínimo de 400 Mpa exigido para o aço ASTM-A36. O gráfico tensão x deformação desse ensaio é mostrado na Fig. 36.

Figura 37 – Gráfico tensão x deformação para o CP2 mistura Ar + 25% CO₂



Fonte: Próprio Autor

Com relação ao ensaio de tração para os espécimes fabricados usando Dióxido de Carbono Puro (CO₂), o primeiro corpo de prova teve rompimento a partir do metal de base, como pode se observar na Fig. 38.

Figura 38 – CP1 CO2 puro rompido e detalhe da zona de estrição



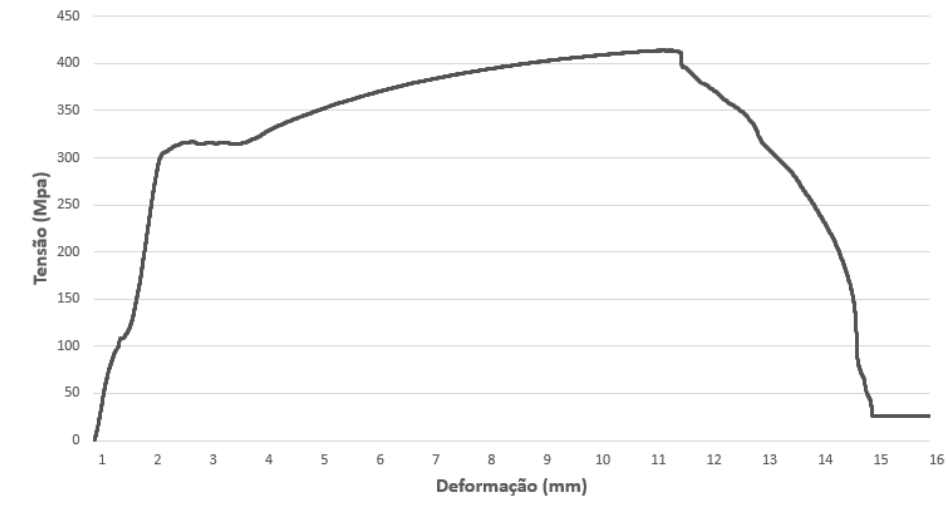
Fonte: Próprio Autor

Na Fig. 39 é mostrado o gráfico da tensão x deformação resultante desse ensaio. Abaixo são apresentados os resultados obtidos:

- Tensão máxima: 413,929 Mpa
- Força máxima: 31,044 kN
- Tensão de escoamento: 324,023 Mpa

Embora a tensão máxima obtida nesse ensaio seja 6,2% menor do que o maior valor de tensão apresentado pela mistura Ar + 25% CO₂, esse resultado é considerado válido, de acordo com o critério definido por AWS D1.1.

Figura 39 – Gráfico tensão x deformação para o CP1 com CO2 puro
CO2 Puro - Corpo de Prova 1



Fonte: Próprio Autor

Semelhante ao que ocorreu com o primeiro corpo de prova da mistura Ar + 25% CO₂ submetido à tração, a segunda análise da solda com Dióxido de Carbono Puro (CO₂) apresentou rompimento na região de solda, conforme Fig. 40. Esse evento pode ter ocorrido pela presença de regiões com falta de fusão na raiz da solda. Tal similaridade dos resultados para os dois gases de proteção reforça a necessidade de uma investigação sobre a variação dos parâmetros de soldagem para eliminar totalmente faltas de penetração e outros defeitos de soldagem.

Figura 40 – CP2 para o CO2 puro rompido e rompimento na região de solda

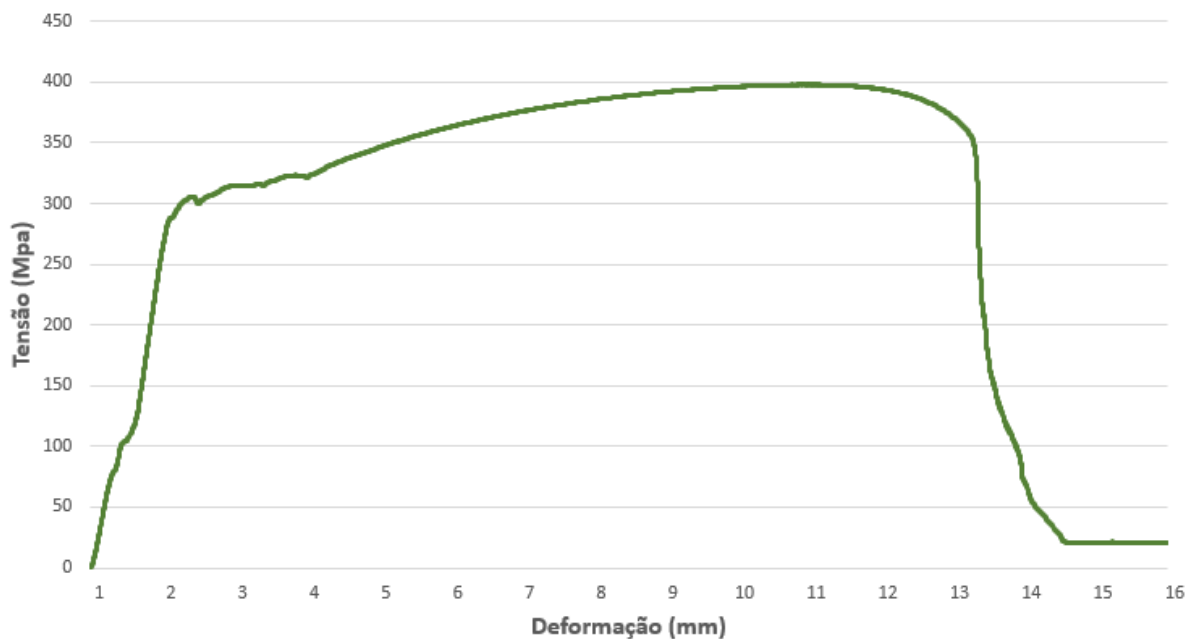


Fonte: Próprio Autor

Os resultados desse ensaio podem ser obtidos na Fig. 41:

- Tensão máxima: 397,872 Mpa
- Força máxima: 29,840 kN
- Tensão de escoamento: 322,990 Mpa

Figura 41 – Gráfico tensão x deformação para o CP2 com CO2 puro
CO2 Puro - Corpo de Prova 2



Fonte: Próprio Autor

O resumo dos resultados obtidos através do ensaio de tração para os dois gases de proteção pode ser visto na Tabela 5.

Tabela 5 – Resumo dos resultados para o ensaio de tração

Gás de proteção	Corpo de prova	Tensão máxima (Mpa)	Força máxima (kN)	Tensão de escoamento (Mpa)	Zona de rompimento
Mistura Ar + 25%CO2	CP1	417,683	31,326	326,669	Solda
	CP2	439,727	32,980	335,257	Metal de base
Dióxido de Carbono Puro	CP1	413,929	31,045	324,023	Metal de base
	CP2	397,872	29,840	322,990	Solda

Fonte: Próprio Autor

5.4 ENSAIO DE DOBRAMENTO

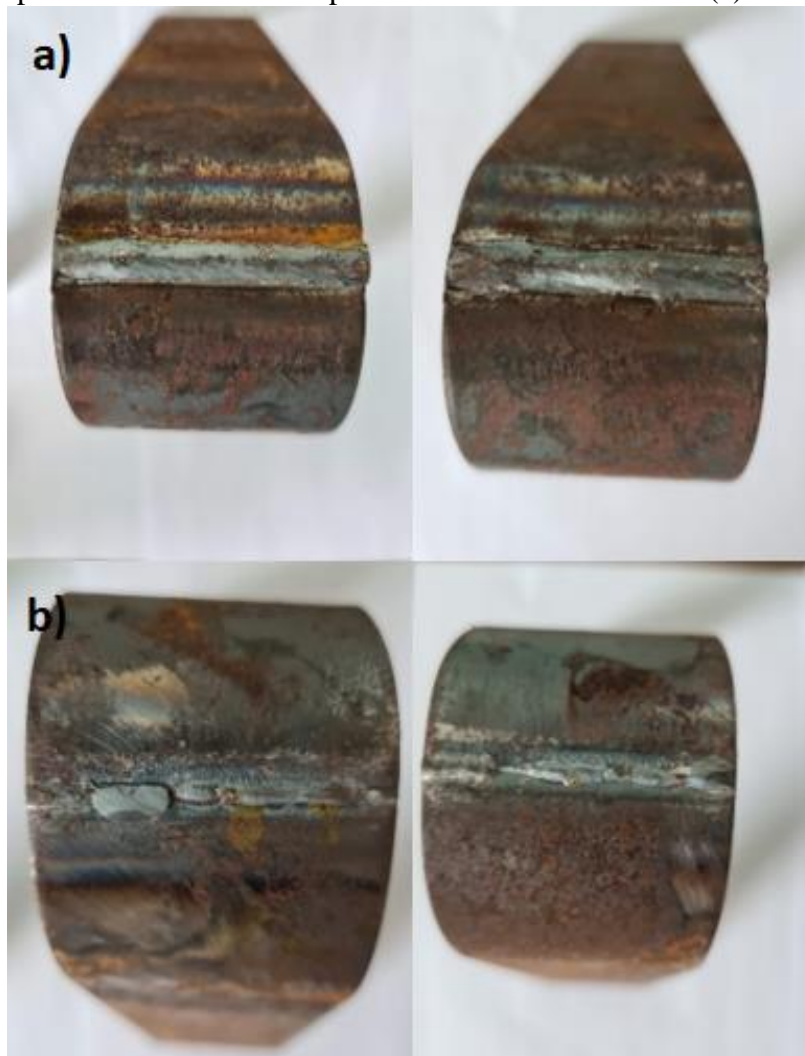
Segundo a norma AWS D1.1, os espécimes submetidos ao ensaio de dobramento não devem conter trincas ou fissuras que excedam as seguintes dimensões:

- 3 mm medido em qualquer direção na superfície;
- 10 mm - a soma das maiores dimensões de todas as descontinuidades excedendo 1 mm, mas menor que ou igual a 3 mm;
- 6 mm - a trinca de canto máxima, exceto quando essa trinca de canto resulta de inclusão visível de escória ou outro tipo de descontinuidade de fusão, deve ter no máximo 3 mm;

Espécimes com trincas de canto que excedam 6 mm sem evidência de inclusão de escória ou outro tipo de descontinuidade de fusão devem ser desconsiderados, e um espécime de teste substituto da ligação soldada original deve ser testado.

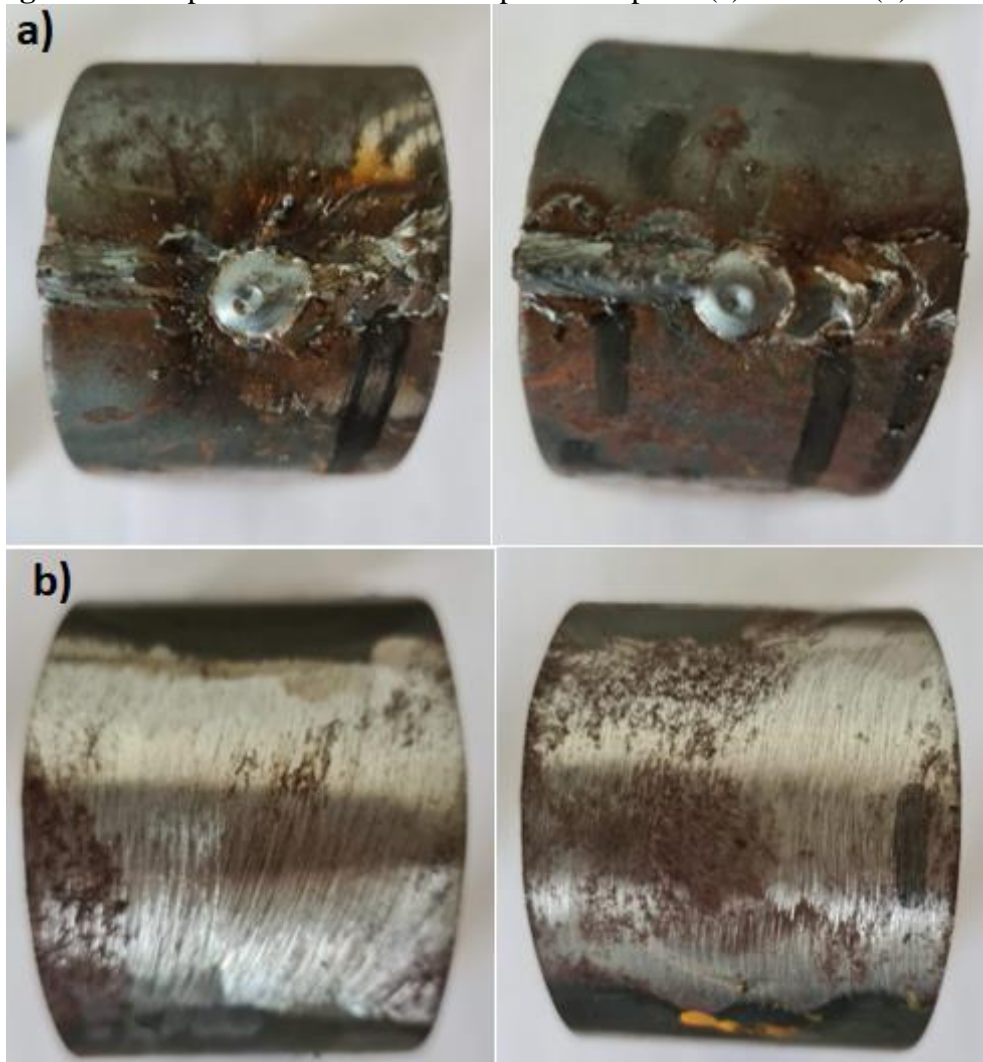
O exame visual sobre cada um dos corpos de prova não revelou quaisquer indícios de trincas ou fissuras sobre a zona tracionada, revelando uma boa qualidade da solda realizada. Nas Fig. 42 e 43 é possível observar a integridade dos corpos de prova após o ensaio.

Figura 42 – Espécimes de dobramento para mistura Ar + 25% CO₂: (a) de face e (b) de raiz



Fonte: Próprio Autor

Figura 43 – Espécimes de dobramento para CO2 puro: (a) de face e (b) de raiz



Fonte: Próprio Autor

5.5 MACROGRAFIA DO CORDÃO DE SOLDA

Na Fig. 44 é apresentado a macrografia do cordão de solda resultante da mistura Ar + 25% CO₂. Não foram observadas descontinuidades na amostra. Na zona fundida é possível observar o crescimento de grãos em direção à interface com a zona afetada pelo calor (ZAC).

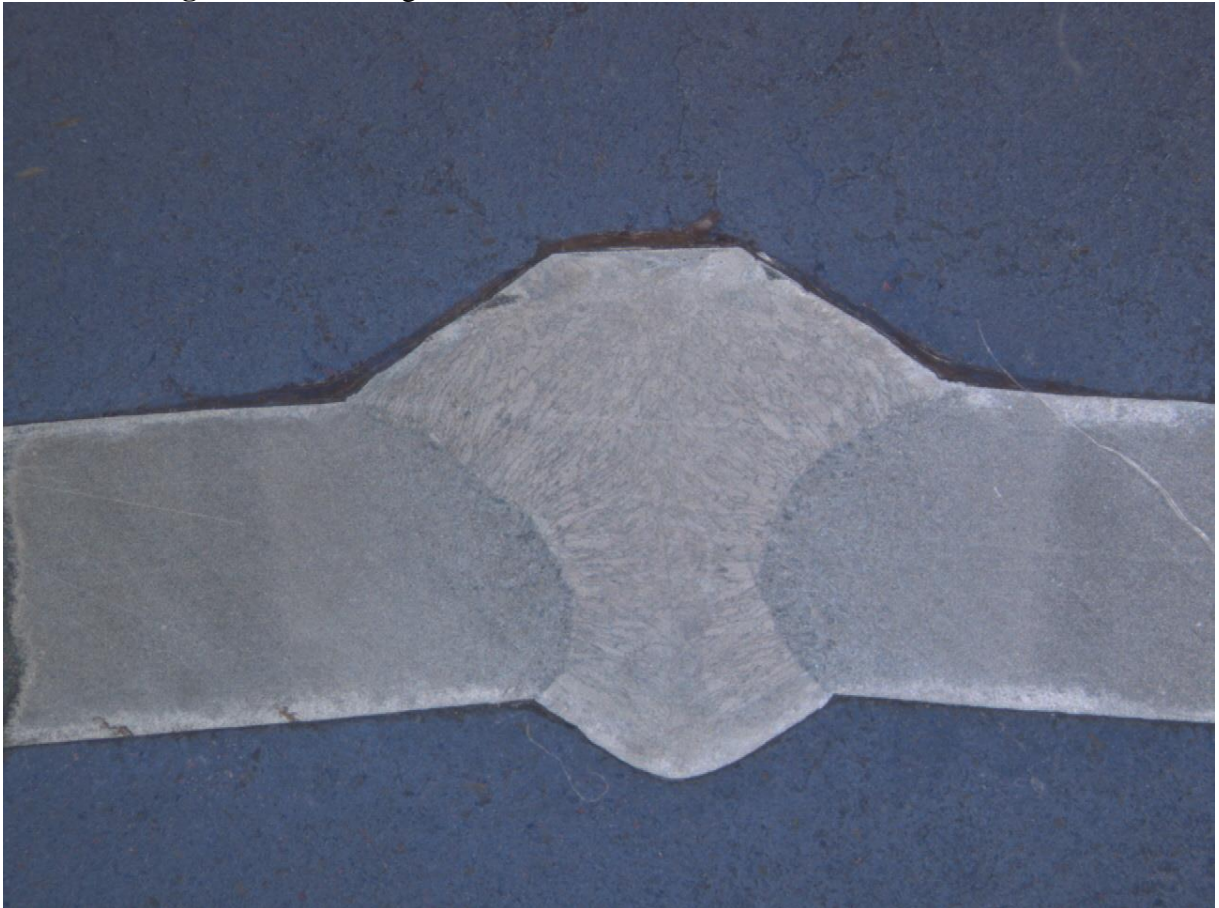
Para esse ensaio, a norma AWS D1.1 condiciona os seguintes requisitos para aceitação após inspeção visual:

- Nenhuma trinca;
- Fusão completa entre camadas adjacentes de metal de solda e entre metal de solda e metal base;
- Nenhuma mordedura excedendo 1 mm;
- Soldas devem ter fusão até a raiz da junta, mas não necessariamente além;

- Para porosidade de 1 mm ou maior, o acumulado não deve exceder 6 mm;
- Nenhuma escória acumulada, da qual a soma da maior dimensão não deve exceder 6 mm.

Como não são observadas descontinuidades, esse teste se mostrou de acordo com a norma.

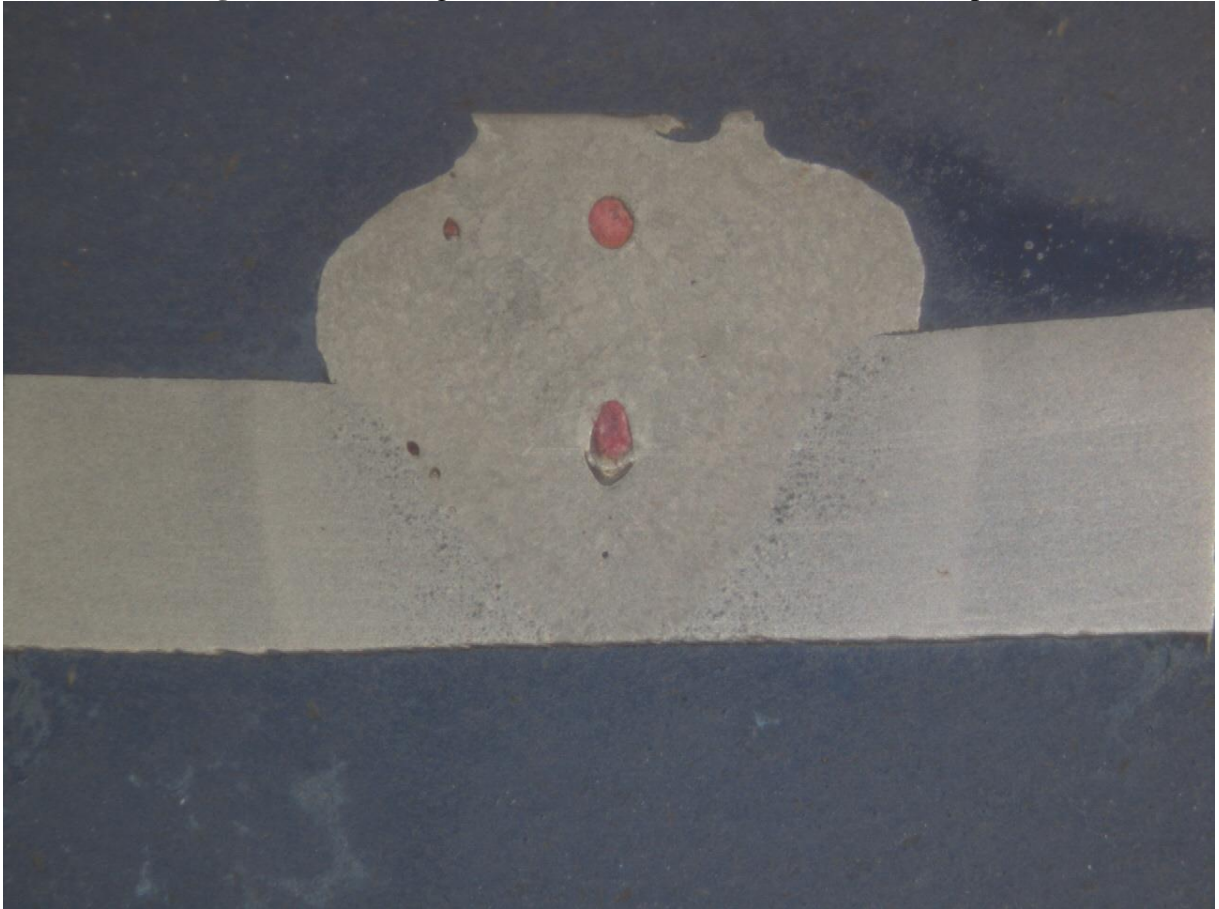
Figura 44 – Macrografia do cordão de solda utilizando Ar + 25% CO₂



Fonte: Próprio Autor

Quando comparado ao cordão de solda feito com a mistura Ar + 25% CO₂, a macrografia para o Dióxido de Carbono Puro (CO₂) revela o diferente comportamento para o perfil de penetração, conforme Fig. 45. Também é possível observar porosidades na solda, tanto no centro do perfil quanto próxima da interface com a ZAC. Como o valor acumulado desses defeitos se mostrou inferior a 6 mm, a macrografia para o Dióxido de Carbono Puro (CO₂) está de acordo com os requisitos de AWS D1.1.

Figura 45 – Macrografia do cordão de solda utilizando CO₂ puro



Fonte: Próprio Autor

Através da Tabela 6 é possível obter os valores da largura da face da solda, altura do reforço e penetração, bem como o comprimento médio da zona afetada pelo calor para os dois gases de proteção. Não foram detectadas variações significativas desses parâmetros.

Tabela 6 – Dimensões do cordão de solda para os diferentes gases de proteção

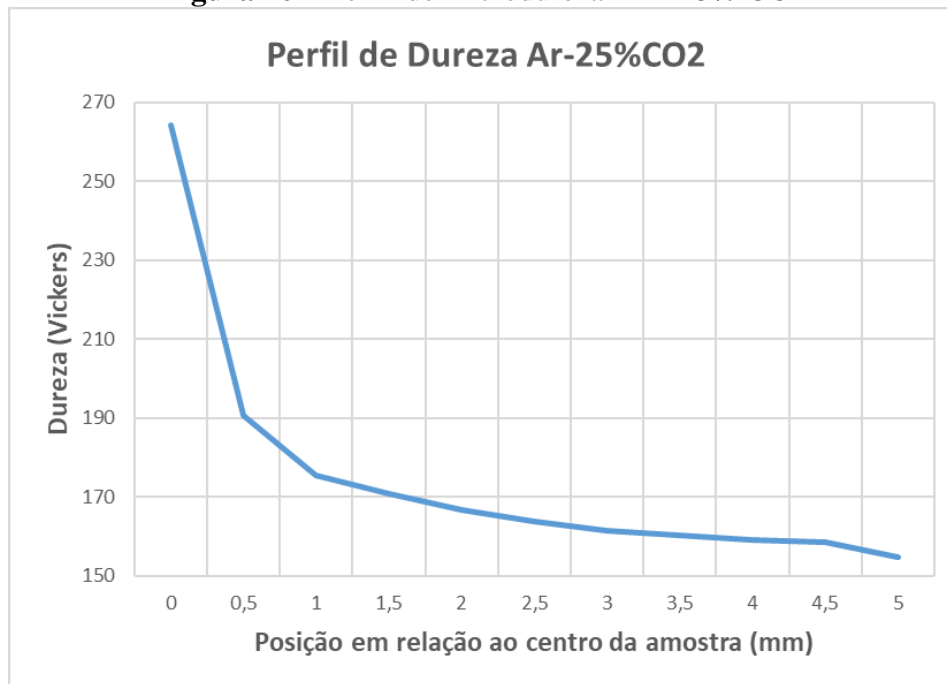
Gás de proteção	Largura face (mm)	Largura raiz (mm)	Altura do reforço (mm)	Zona afetada pelo calor (mm)
Mistura Ar + 25%CO ₂	6,797	3,398	1,786	3,393+3,262
Dióxido de Carbono Puro	6,787	1,895	2,017	2,058+2,156

Fonte: Próprio Autor

5.6 ENSAIO DE DUREZA

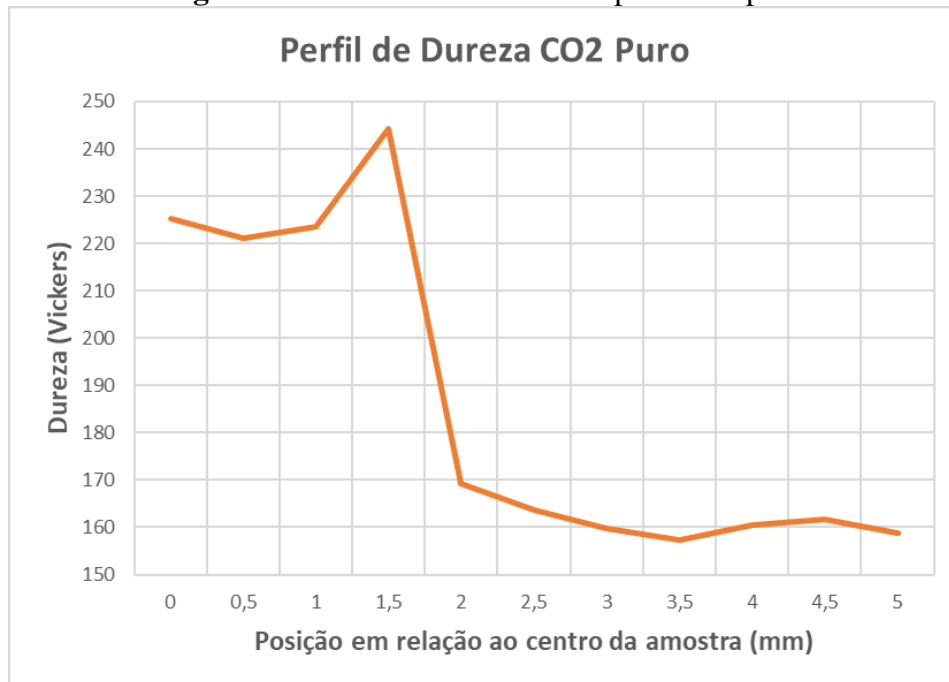
A tendência do comportamento da microdureza nas diferentes regiões mostra que a dureza da zona fundida é maior do que nas demais regiões da amostra, atingindo um valor máximo de 264,2 HV para a mistura Ar + 25% CO₂, conforme Fig. 46. Esse resultado está de acordo com os resultados obtidos no trabalho de Serna-Giraldo e Padovese (2010) e é justificado pela microestrutura típica do cordão de solda, que consiste em uma estrutura de solidificação acicular.

Figura 46 – Perfil de microdureza Ar + 25% CO₂



Fonte: Próprio Autor

A solda com Dióxido de Carbono Puro (CO₂) obteve uma dureza no centro da zona fundida de 225,8 HV, como mostra a Fig. 47, enquanto na região da zona afetada pelo calor o valor foi máximo, com 244,2 HV. A explicação para esse fenômeno, de acordo com John, Paulraj e Mathew (2016), refere-se à tendência para diminuição da dureza no centro do cordão de solda conforme se aumenta o teor de dióxido de carbono no gás de proteção, uma vez que ele contribui para que importantes elementos de liga como Manganês, Cobre e Níquel sejam perdidos por oxidação durante o processo de soldagem devido a maior temperatura na zona fundida, fruto de sua maior condutividade térmica.

Figura 47 – Perfil de microdureza para CO₂ puro

Fonte: Próprio Autor

5.7 CUSTOS ASSOCIADOS AO GÁS DE PROTEÇÃO

Embora a operação de soldagem envolva inúmeros aspectos que irão compor seu custo final, a determinação dos custos associados ao gás de proteção deve ser levada em conta. A partir da Eq. 1, utilizando a vazão volumétrica de $2,1 \times 10^{-4} \text{ m}^3/\text{s}$ e os valores médios de reposição dos gases, tem-se a cifra de R\$7,56 por hora de arco aberto quando utilizando o Dióxido de Carbono Puro (CO₂) enquanto para a mistura Ar + 25% CO₂ esse valor é 80% maior, atingindo R\$13,61. No entanto, é preciso se atentar que, pelo fato de resultar em maior geração de respingos, pode-se ter uma falsa economia no processo quando se utiliza o Dióxido de Carbono Puro (CO₂), caso a aplicação exija a limpeza do local após a operação de soldagem.

6. CONCLUSÃO

O processo de soldagem MIG/MAG utilizando como gás de proteção a mistura Ar + 25% CO₂ alcançou os maiores valores de tensão de ruptura. Esse método de soldagem apresentou custo por hora de arco aberto 80% superior e maior estabilidade com frequência de curto-circuito de 107,6 Hz observada na Fig. 30, resultando em um cordão de solda uniforme em toda a sua extensão, sem a geração de respingos.

Apesar de preencher os requisitos mínimos previstos em AWS D1.1, o Dióxido de Carbono Puro (CO₂) atingiu uma tensão máxima 6,2% menor quando comparado com a mistura Ar + 25% CO₂ e se mostrou instável durante a soldagem, de acordo com a menor frequência de curto-circuito, que atingiu o valor de 52,2 Hz. Apresentou porosidades na solda que puderam ser observadas na macrografia da Fig. 45. Esse processo resultou em grande quantidade de respingos.

Os testes mostraram que os dois gases de proteção resultaram em corpos de prova que, ao serem submetidos ao ensaio de tração, alcançaram resistência mecânica superior ao valor mínimo exigido para o metal de base, condição de aceitação do ensaio de acordo com AWS D1.1.

O ensaio de dobramento revelou que todos os corpos de prova não apresentavam trincas e descontinuidades, sendo aprovados, seguindo os critérios de AWS D1.1.

Os objetivos deste trabalho foram atingidos, uma vez que foi demonstrado que é possível realizar a soldagem MIG/MAG utilizando o Dióxido de Carbono Puro (CO₂) como proteção gasosa, obtendo valores próximos de resistência mecânica, porém com menor dureza do cordão de solda, quando comparado com a mistura Ar + 25% CO₂. Também foi constatado que há uma forte necessidade de alterações dos demais parâmetros envolvidos no processo para que se possa atingir uma junta soldada totalmente isenta de defeitos.

7. PROPOSTAS PARA TRABALHOS FUTUROS

Como proposta para trabalhos futuros, deve-se otimizar os parâmetros de soldagem para o aço carbono estrutural ASTM-A36 utilizando o Dióxido de Carbono Puro (CO₂) como atmosfera de proteção, realizando um estudo sobre a microestrutura final da junta e a relacionando com os resultados de ensaios mais detalhados, além do ensaio de dureza e tração.

Outra sugestão é a realização de um levantamento sobre a quantidade de respingos gerados de acordo com o gás de proteção, determinando a quantidade e o custo do material que é perdido por meio desse fenômeno.

Por fim, faz-se importante a realização de um estudo sobre a influência dos gases de proteção sobre os modos de transferência metálica e a qualidade do cordão de solda resultante.

REFERÊNCIAS

- AMERICAN WELDING SOCIETY. **AWS D1.1/D1.1M Structural Welding Code-Steel**. Miami, 2010.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7007: Aço-carbono e aço microligado para barras e perfis laminados a quente para uso estrutural: Requisitos**. Rio de Janeiro, 2016.
- BOIKO, I., AVISANS, D. **Study on Shielding Gases for MAG Welding**. Materials Physics and Mechanics, 2013, Vol.16, No.2, pp.126-134. ISSN 1605-8119.
- CANTO, Manoel Augusto Allgayer. **Influência dos Gases de Proteção Utilizados no Processo MIG/MAG Sobre as Propriedades Mecânicas do Metal de Solda**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS). Porto Alegre, 1990.
- COLPAERT, H. **Metalografia dos Produtos Siderúrgicos Comuns**. 4ª Ed. São Paulo: Editora Blucher, 2008.
- ESAB. **Apostila de Soldagem MIG/MAG**. São Paulo: ESAB, 2005. Disponível em: <<http://www.esab.com.br/>>. Acesso em: 20 de jul. 2020.
- GARCIA, A.; SPIM, J. A.; SANTOS, C. A. **Ensaio dos Materiais**. 2ª Ed. Rio de Janeiro: LTC, 2012.
- MENESES, Valter Alves de; LEAL, Valdemar Silva; SCOTTI, Américo. **Influence of Metal Transfer Stability and Shielding Gas Composition on CO and CO₂ Emissions during Short-circuiting MIG/MAG Welding**. Soldag. insp., São Paulo, v. 21, n. 3, p. 253-268, Sept. 2016. Disponível em <http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0104-92242016000300253&lng=en&nrm=iso>. Acesso em: 30 set. 2020.
- MODENESI, Paulo José. **Estimativa de custos em soldagem** (Guia de Aula Prática), UFMG, 2000.
- MODENESI, Paulo José; MARQUES, Paulo Villani; BRACARENSE, Alexandre Queiroz. **Soldagem: Fundamentos e Tecnologia**. 3ª Ed. Minas Gerais: Editora UFMG, 2009.

MODENESI, Paulo José; MARQUES, Paulo Villani. **Soldagem: I – Introdução aos Processos de Soldagem**. Universidade Federal de Minas Gerais – Departamento de Engenharia Metalúrgica. Belo Horizonte, Minas Gerais. Novembro, 2000.

NERIS, Manoel Messias. **Soldagem**. 2012. Disponível em: <http://www.cpscetec.com.br/cpscetec/arquivos/apostila_soldagem.pdf>. Acesso em: 18 jul. 2020.

PAULRAJ, S., MATHEW J. **The role of shielding gas on mechanical, metallurgical and corrosion properties of corten steel welded joints of railway coaches using gmaw**. Advances in Science and Technology Research Journal. 2016;10(32):156-168. doi:10.12913/22998624/65119.

PEREIRA, Josemairon Prado. **Soldagem MAG com Braço Robótico de Aços ASTM A36 e CSN Civil em Perfil Estrutural Dobrado a Frio**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Universidade Estadual Paulista (UNESP). Bauru, 2016.

SCOTTI, A.; PONOMAREV, V. **Soldagem MIG/MAG: Melhor entendimento, Melhor desempenho**. São Paulo, Brasil: 2008.

SERNA-GIRALDO, C. P.; PADOVESE, Linilson R.. **Avaliação de soldagem de aço estrutural através do Ruído Magnético de Barkhausen**. Soldag. insp. (Impr.) [online]. 2010, vol.15, n.4. Disponível em: <http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0104-92242010000400004&lng=en&nrm=iso>. Acesso: 25 de nov. 2020.

SILVA, Régis Henrique Gonçalves e; DUTRA, J. C. **Fundamentos Científicos e Tecnológicos para o Desenvolvimento do Processo MIG/MAG por Curto-Circuito Controlado (CCC) Uma Revisão da Literatura. Parte 2 de 3: Formação da Gota Metálica, Gases de Proteção, Mecanismos de Penetração, Aporte Térmico e Aspectos Econômicos**. Soldagem & Inspeção, v. 12, p. 326-335, 2007.

SOUZA, Sérgio Augusto de. **Ensaio Mecânicos de Materiais Metálicos: Fundamentos Teóricos e Práticos**. 5ª Ed. São Paulo: Editora Blucher, 1982.

VAIDYA, V. **Shielding gas mixtures for semiautomatic welds**. Welding Journal. Miami, v. 81, n. 9, p.43-48, set 2002.

ANEXO A

Figura A1 – Quantidade de espécimes de acordo com a espessura

AWS D1.1/D1.1M:2010

4. QUALIFICAÇÃO

Tabela 4.2 Qualificação WPS—Soldas em Chanfro CJP: Número e Tipo de Espécimes de Teste e Faixa de Espessura e Diâmetro Qualificados (ver 4.5) (Dimensões em Milímetros)

1. Testes em Placa ^{a,b}									
Espessura (T) Nominal de Placa Testada, mm	Número de Espécimes				Espessura ^{c,d} Nominal de Placa, Cano ou Tubo Qualificada, mm		Min.	Máx.	
	Tensão de Seção Reduzida (ver Fig. 4.14)	Flexão de Raiz (ver Fig. 4.12)	Flexão de Face (ver Fig. 4.12)	Flexão Lateral (ver Fig. 4.13)					
3 ≤ T ≤ 10	2	2	2	(Note i)	3	2T			
10 < T < 25	2	-	-	4	3	2T			
25 e acima	2	-	-	4	3	Ilimitado			
2. Testes em Cano ou Tubulação ^{a,b}									
Tamanho ou Diâmetro Nominal de Cano, mm	Espessura Nominal de Parede, T, mm	Número de Espécimes				Diâmetro Nominal de Cano ou Tamanho de Tubo Qualificados, mm	Espessura ^{c,d} Nominal de Parede de Placa, Cano ou Tubo Qualificada, mm		
		Tensão de Seção Reduzida (ver Fig. 4.14)	Flexão de Raiz (ver Fig. 4.12)	Flexão de Face (ver Fig. 4.12)	Flexão Lateral (ver Fig. 4.13)		Min.	Máx.	
Canos de Teste Job Size	<600	3T IO	2	2	2	(Note i)	Diâmetro de teste e acima	3	2T
		10<T<20	2	-	-	4	Diâmetro de teste e acima	T/2	2T
		T 20	2	-	-	4	Diâmetro de teste e acima	10	Ilimitado
	600	3T IO	2	2	2	(Note i)	Diâmetro de teste e acima	3	2T
		10<T<20	2	-	-	4	600 e acima	T/2	2T
		T 20	2	-	-	4	600 e acima	10	Ilimitado
Canos de Teste Padrão	50 mm OD x 6 mm WT ou 75 mm OD x 6 mm WT	2	2	2	-	20 até 100	3	20	
	150 mm OD x 14 mm WT ou 200 mm OD x 12mm WT	2	-	-	4	100 e acima	5	Ilimitado	
3. Testes em ESW e EGW ^{a,b}									
Espessura Nominal de Placa Testada	Número de Espécimes				Espessura Nominal de Placa Qualificada		Min.	Máx.	
	Tensão de Seção Reduzida (ver Fig. 4.14)	Tensão de Metal Depositado (ver Fig. 4.18)	Flexão Lateral (ver Fig. 4.13)	Testes CVN					
T	2	1	4	(Note i)	0.5T	1.1T			

^a Todas as soldas de teste de placa, cano ou tubo devem ser inspecionadas visualmente (ver 4.9.1) e sujeitas a NDT (ver 4.9.2). Uma placa, cano ou tubo de teste deve ser requerida para cada posição qualificada.

^b Ver Figuras 4.10 e 4.11 para requisitos de teste de placa.

^c Para soldas em chanfro quadrado que são qualificadas sem goivagem por trás, a espessura máxima qualificada deve ser limitada à espessura da placa de teste.

^d Qualificação de solda em chanfro CJP em qualquer espessura ou diâmetro deve qualificar qualquer tamanho de solda de filete ou em chanfro PJP para qualquer espessura ou diâmetro (ver 4.11.3).

^e Qualificação com qualquer diâmetro de cano deve qualificar todas as larguras e profundidades d seção de caixa.

^f Quando especificado, testes CVN devem estar em conformidade com a Cláusula 4, Parte D.

^g Ver Tabela 4.1 para os detalhes de chanfro requeridos para qualificação de juntas de topo tubulares e de conexões em T-, Y-, K-.

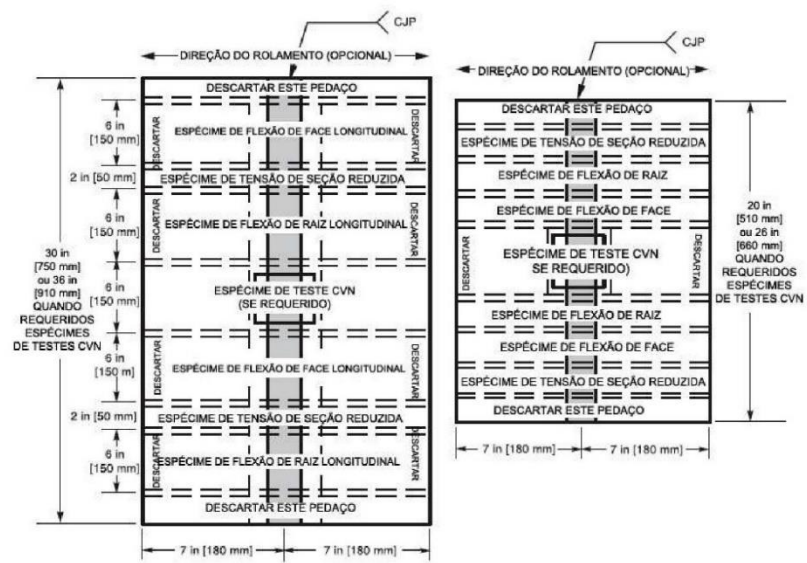
^h Ver Figura 4.9 para requisitos de placa.

ⁱ Para placa ou espessura de parede de 10 mm, um teste de flexão lateral pode ser substituído por cada um dos testes de flexão de raiz e de face requeridos.

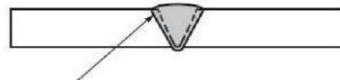
Figura A2 – Local de retirada dos espécimes

AWS D1.1/D1.1M:2010

4. QUALIFICAÇÃO



(1) ESPÉCIMES DE FLEXÃO LONGITUDINAL (2) ESPÉCIMES DE FLEXÃO TRANSVERSAL



Observações:

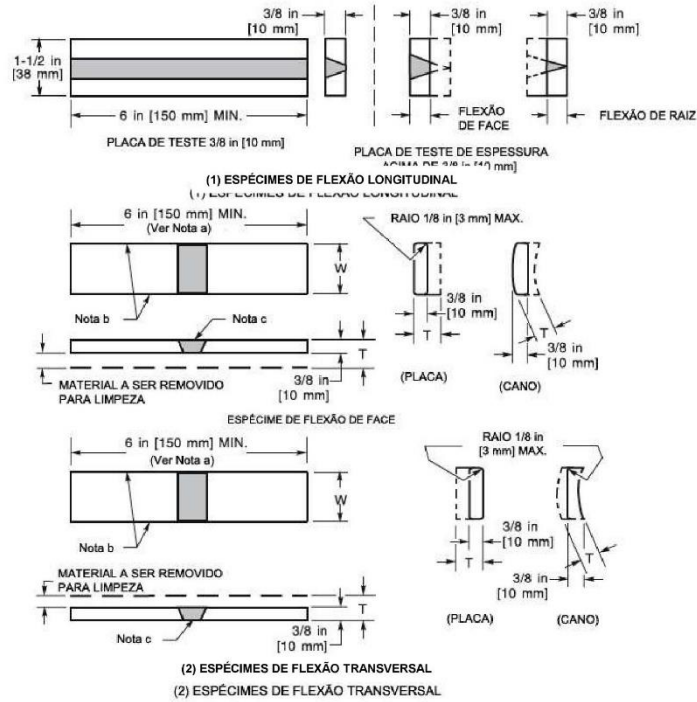
1. A configuração de chanfro mostrada é meramente ilustrativa. A forma de chanfro testada deve estar em conformidade com a forma de chanfro de produção que está sendo qualificada.
2. Quando testes CVN são requeridos, os espécimes devem ser removidos de seus locais, como mostrado na Figura 4.40.
3. Todas as dimensões são mínimas.
4. Pra placa de 3/8 in [10 mm], um teste de flexão lateral pode ser substituído por cada um dos testes de flexão de raiz e de face requeridos. Ver Figura 4.10(2) para comprimento de placa e local de espécimes.

Figura 4.11—Local de Espécimes de Teste em Placas de Teste Soldadas de Espessura de 3/8 in [10 mm] e Abaixo – Qualificação WPS (ver 4.9)

Figura A3 – Espécime de flexão de face e raiz

AWS D1.1/D1.1M:2010

4. QUALIFICAÇÃO



Dimensões	
Ligação Soldada de Teste	Largura do Espécime de Teste, W in [mm]
Placa	1-1/2 [40]
Cano ou tubo de teste ≤ 4 in em diâmetro	1 [25]
Cano ou tubo de teste > 4 in [100] em diâmetro	1-1/2 [40]

^a Um comprimento maior de espécime pode ser necessário quando usando um suporte de flexão do tipo integrado ou quando testando aço com um limite de escoamento de 90 ksi [620 MPa] ou mais.

^b Essas arestas podem ser cortadas termicamente e podem ou não ser usinadas.

^c O reforço de solda, se houver, deve ser removido por jateamento da superfície do espécime (ver 5.24.3.1 e 5.24.3.2). Se um reforço recuado é usado, essa superfície pode ser usinada a uma profundidade que não exceda a profundidade do recuo para remover o reforço; em tal caso, a espessura do espécime acabado deve ser aquela especificada acima. Superfícies de corte devem ser lisas e paralelas

Observações:

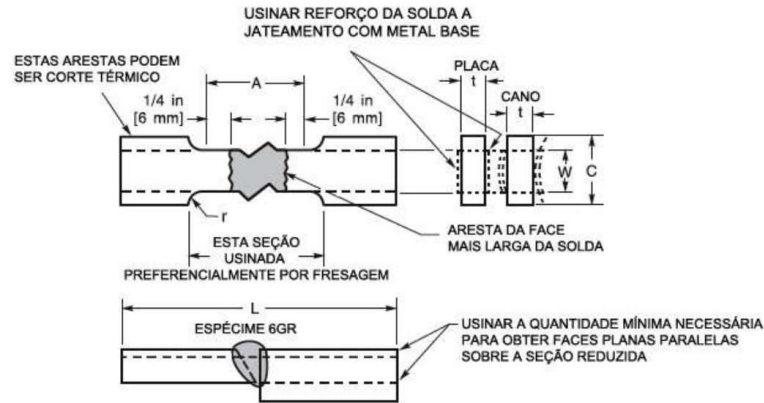
1. T = espessura da placa ou cano.
2. Quando a espessura da placa de teste é menor que 3/8 in [10 mm], a espessura nominal deve ser usada para flexões de face e raiz.

Figura 4.12 – Espécimes de Flexão de Face e Raiz (ver 4.9.3.1)

Figura A4 – Espécime de tensão de seção reduzida

AWS D1.1/D1.1M:2010

4. QUALIFICAÇÃO



Dimensões em polegadas [mm]					
	Espessura Nominal de Placa de Teste, T_p			Cano de Teste	
	$T_p \leq 1$ in [25 mm]	$1 < T_p < 1-1/2$ in [38 mm]	$T_p \geq 1-1/2$ in [38 mm]	Diâmetro de 2 in [50 mm] & 3 in [75 mm]	Diâmetro ou Cano de Tamanho de Trabalho Maior 6 in [150 mm] & 8 in [200 mm]
A – Comprimento de seção reduzida	Face mais larga da solda + 1/2 in [12 mm], 2-1/4 in [60 mm] min.			Face mais larga da solda + 1/2 in [12 mm], 2-1/4 in [60 mm] min.	
L – Comprimento geral, min ^a	Como requerido por equipamento de teste			Como requerido por equipamento de teste	
W – Largura de seção reduzida ^{b,c}	3/4 in [20 mm] min.	3/4 in [20 mm] min.	3/4 in [20 mm] min.	1/2 ± 0.01 (12 ± 0.025)	3/4 in [20 mm] min.
C – Largura da seção de aderência ^{c,d}	W + 1/2 in [12 mm] min.	W + 1/2 in [12 mm] min.	W + 1/2 in [12 mm] min.	W + 1/2 in [12 mm] min.	W + 1/2 in [12 mm] min.
t – Espessura do espécime ^{e,f}	T_p	T_p	T_p/n (Note f)	Máximo possível com faces planas paralelas dentro do comprimento A	
r – Raio de filete, min.	1/2 in [12 mm]	1/2 in [12 mm]	1/2 in [12 mm]	1/2 in [25 mm]	1/2 in [25 mm]

^a É desejável, se possível, fazer o comprimento da seção de aderência grande o suficiente para permitir que o espécime estenda até as alças uma distância igual a dois terços ou mais do comprimento das alças.
^b As extremidades da seção reduzida não devem diferir em largura por mais de 0,004 in [0,102 mm]. Além disso, também pode haver decréscimo gradual na largura a partir das extremidades para o centro, mas as larguras de qualquer das extremidades não deve ser 0,015 in [0,381 mm] maior que a largura no centro.
^c Larguras mais estreitas (W e C) podem ser usadas quando necessário. Em tais casos, a largura da seção reduzida deveria ser tão grande quanto a largura do material sendo testado permite. Se a largura do material é menor que W, os lados podem ser paralelos em todo o comprimento do espécime.
^d Para espécimes padrão do tipo placa, as extremidades do espécime devem ser simétricas com a linha de centro da seção reduzida no âmbito de 1/4 in [6 mm].
^e A dimensão t é a espessura do espécime conforme fornecido nas especificações de material aplicáveis. A espessura nominal mínima de espécimes de largura de 1-1/2 in [38 mm] deve ser 3/16 in [5 mm] exceto conforme permitido pela especificação do produto.
^f Para placas com espessura acima de 1-1/2 in [38 mm], espécimes podem ser cortados em tiras aproximadamente iguais. Cada tira deve ter espessura de pelo menos 3/4 in [20 mm]. Os resultados de teste de cada tira devem atender os requisitos mínimos.
 Observação: Devido à capacidade limitada de algumas máquinas de teste de tensão, dimensões alternadas de espécime para aços da Tabela 4.9 podem ser usadas quando aprovado pelo Engenheiro.

Figura 4.14—Espécimes de Tensão de Seção Reduzida (ver 4.9.3.4)

APÊNDICE A

Figura AP1 - Plano de Trabalho



MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
UNIVERSIDADE FEDERAL DE GOIÁS
ESCOLA DE ENGENHARIA ELÉTRICA, MECÂNICA E DE COMPUTAÇÃO



PLANO DE TRABALHO DO PROJETO FINAL

Título: Estudo da influência do gás de proteção da soldagem MIG/MAG na resistência mecânica de uma junta

Dados	João Guilherme Ferreira Silva		
Nº de Matrícula	201503620		
Telefone	(62) 9 9679-7120		
E-mail	joao.guilherme96@outlook.com		
Orientador(a):	Demóstenes Ferreira Filho		
Curso:	Eng. Elétrica ()	Eng. de Computação ()	Eng. Mecânica (x)
Certif. Estudos	Não (x) Sim ()		

Resumo

A soldagem MIG/MAG tem sido cada vez mais utilizada nas mais diversas áreas e aplicações por apresentar custo relativamente baixo, produtividade elevada, possibilidade de automação do processo e grande versatilidade quanto ao tipo de material e espessuras. Sendo assim, o maior entendimento sobre a influência do gás de proteção utilizado no processo de soldagem permite que a indústria utilize o método com maior eficiência e confiança. Para tal será utilizado aço ASTM-A36 e 2 diferentes tipos de gás de proteção, sendo o primeiro Gás Carbônico (CO₂) puro e o segundo composto por uma mistura de 75% Argônio (Ar) e 25% CO₂, analisados em 3 diferentes velocidades de solda.

O processo de soldagem será realizado através de robô e as amostras serão submetidas à ensaios de tração, dobramento e metalográfico de forma a determinar uma possível influência do gás de proteção na resistência mecânica da junta e estabelecer conexão com as propriedades químicas, físicas e mecânicas do material, analisando os efeitos da solda no metal de base.

I. Objetivos

Os objetivos macros deste projeto são:

- Estudar a influência do gás de proteção na soldagem de um material;
- Capacitar o aluno na realização de ensaios mecânicos.

Os objetivos específicos do presente projeto são:

- Compreender o funcionamento da soldagem MIG/MAG;
- Realizar planejamento de ensaio experimental;
- Análise resultados de ensaios mecânicos.

II. Metodologia

A metodologia utilizada neste projeto será:

- Revisão bibliográfica sobre soldagem MIG/MAG;
- Familiarização com os equipamentos que serão utilizados nos experimentos;
- Realização dos ensaios experimentais;
- Análise de resultados;
- Verificar a influência do gás de proteção na qualidade da junta soldada de um aço carbono;
- Redação do trabalho final de curso.

Figura AP2 - Cronograma do Plano de Trabalho



MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
UNIVERSIDADE FEDERAL DE GOIÁS
ESCOLA DE ENGENHARIA ELÉTRICA, MECÂNICA E DE COMPUTAÇÃO



III. Cronograma.

O cronograma das atividades a serem realizadas é apresentado na Tabela 1.

Tabela 1 – Cronograma das atividades.

Etapas do Projeto	MAR	ABR	MAI	JUN
1) Revisão bibliográfica sobre soldagem MIG/MAG	X			
2) Familiarização com os equipamentos que serão utilizados nos experimentos		X		
3) Realização dos ensaios experimentais		X	X	
4) Análise de resultados			X	
5) Redação do trabalho final de curso			X	X

Goiânia, 10 de março de 2020.

João Guilherme Ferreira Silva
Matrícula: 201503620

Demostenes Ferreira Filho
Orientador

APÊNDICE B

Figura BP1 – Tabela com os valores de largura para solda feita com Ar + 25% CO2

Ar-25%CO2	
Medição	Largura
1	7,24
2	7,24
3	7,20
4	7,22
5	7,20
6	7,20
7	7,24
8	7,20
9	7,18
10	7,18
11	7,20
12	7,18
13	7,20
14	7,18
15	7,20
16	7,20
17	7,22
18	7,18
Média	7,20
Desvio	0,0209

Fonte: Próprio Autor.

Figura BP2 – Tabela com os valores de largura para solda feita com CO2 puro

CO2 Puro	
Medição	Largura
1	6,72
2	6,70
3	6,74
4	6,74
5	6,74
6	6,72
7	6,70
8	6,66
9	6,70
10	6,70
11	6,70
12	6,72
13	6,66
14	6,68
15	6,70
16	6,72
17	6,68
18	6,68
Média	6,70
Desvio	0,0250

Fonte: Próprio Autor.

APÊNDICE C

Figura CP1 – Tabela com os valores de dureza para solda feita com Ar + 25% CO2

Ar-25%CO2	
Posição	Dureza
0	264,2
0,5	190,6
1	175,3
1,5	170,8
2	166,8
2,5	163,8
3	161,4
3,5	160,2
4	159,1
4,5	158,4
5	154,8

Fonte: Próprio Autor.

Figura CP2 – Tabela com os valores de dureza para solda feita com CO2 puro

CO2 Puro	
Posição	Dureza
0	225,2
0,5	221,2
1	223,6
1,5	244,2
2	169,2
2,5	163,6
3	159,8
3,5	157,2
4	160,4
4,5	161,8
5	158,8

Fonte: Próprio Autor.