



Universidade Federal da Paraíba

Centro de Tecnologia

Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica

Mestrado – Doutorado

**INFLUÊNCIA DO TEOR DE HIDROGÊNIO NO GÁS DE
PROTEÇÃO SOBRE AS PROPRIEDADES MECÂNICAS DE
JUNTAS SOLDADAS DO AÇO ASTM A-36**

RONELES DE SANTANA SILVA

JOÃO PESSOA/PB

2013.

RONELES DE SANTANA SILVA

**INFLUÊNCIA DO TEOR DE HIDROGÊNIO NO GÁS DE
PROTEÇÃO SOBRE AS PROPRIEDADES MECÂNICAS DE
JUNTAS SOLDADAS DO AÇO ASTM A-36**

Dissertação apresentada ao curso de
Pós-Graduação em Engenharia
Mecânica da Universidade Federal da
Paraíba, em cumprimento às exigências
para obtenção do Grau de Mestre.

Orientador: Professor Dr. José Hilton Ferreira da Silva

JOÃO PESSOA/PB

2013

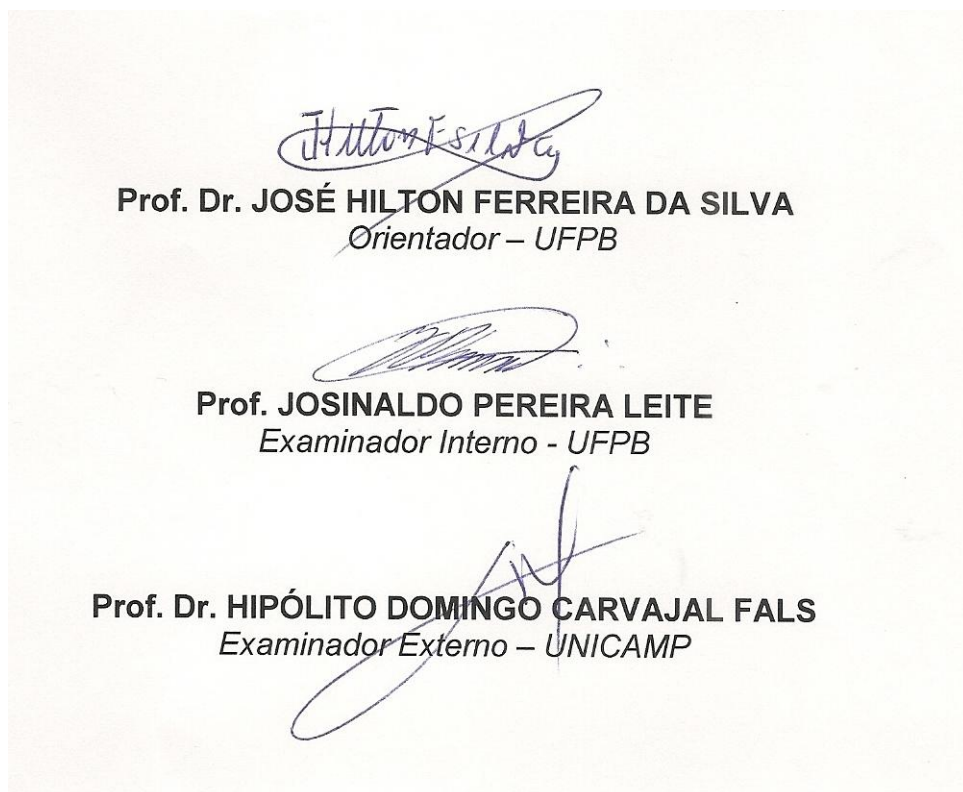
**INFLUÊNCIA DO TEOR DE HIDROGÊNIO NO GÁS DE
PROTEÇÃO SOBRE AS PROPRIEDADES MECÂNICAS DE
JUNTAS SOLDADAS DO AÇO ASTM A-36**

Por

RONELES DE SANTANA SILVA

Dissertação aprovada em 11 de dezembro de 2013

Período letivo 2013.2



AGRADECIMENTOS

À Deus, que me dá forças para continuar e vencer os obstáculos que aparecem na minha caminhada.

Aos meus pais, Severino e Neusa, que confiaram em mim, sempre me incentivando a lutar pelos meus ideais.

Aos meus irmãos: Severino Filho (Branco), Breno, Dienis, que souberam ter paciência, e me apoiaram nos momentos que mais precisei através de palavras amigas e atos carinhosos.

As minhas tias Virginia (*in memorie*) e Lourdes pela oportunidade, pelo lar, pelo carinho e a pela compreensão.

A todos os familiares e amigos que com pequenos e grandes gestos contribuíram na elaboração desse trabalho.

A minha namorada, Adelaide, por ser esta pessoa maravilhosa que apareceu na minha vida. Sempre atenciosa, paciente, amiga, companheira, carinhosa, que me incentiva a seguir em busca de meus projetos pessoais e profissionais.

Ao Professor e orientador Dr. José Hilton Ferreira da Silva, por acompanhar-me durante o processo de formação no mestrado. E pela sua grande contribuição para execução desse trabalho.

Aos técnicos Artu e Romualdo, aos amigos do mestrado, Saulo, Esdras, Professor José Gonçalves, Fabrício, José Felix, que participaram dessa caminhada, por todos os momentos de alegria e de tristeza.

Enfim, quero agradecer a todos que colaboraram de maneira direta ou indireta para construção deste sonho. Obrigado por tudo!

RESUMO

Nesse trabalho foi realizado um estudo para avaliar a influência do teor de hidrogênio do gás de proteção no comportamento das propriedades mecânicas (tenacidade, dureza, resistência a tração) de juntas soldadas do aço ASTM A-36. As juntas foram soldadas com os processos MIG/MAG e Arame tubular. Para isso utilizou-se duas misturas de gás de proteção, 75%Ar+25%CO₂ é a outra contendo hidrogênio na sua composição, 70%+25%CO₂ +5%H₂. O desenvolvimento experimental foi realizado de forma totalmente aleatória, com o auxílio de um procedimento conhecido como planejamento fatorial (PF); foram utilizados como variáveis de influencia o tipo de arame, e a composição do gás. Como variáveis de resposta foram analisadas a resistência a tração, a tenacidade e a dureza das regiões da junta soldada. Os resultados foram submetidos à análise de variância e validado para uma confiança de 90%. A técnica de microscopia eletrônica de varredura (MEV) foi usada para caracterizar os modos de fratura observados no metal de solda e na zona termicamente afetada pelo calor. Os resultados mostraram que o hidrogênio presente no gás de proteção fragilizou o metal de solda (MS), e que houve a formação de bolhas no metal de solda.

Palavras Chaves: Hidrogênio, Dureza, Tenacidade, Resistência a tração.

ABSTRACT

This is work study about Conducted, to investigate the influences of hydrogen content of the shielding gas in the behavior of mechanical properties (toughness, hardness, and tensile strength) of steel welded ASTM A36. The test specimens were welded with GMAW and FCAW. That is, we used two mixtures of shielding gas, 75% Ar +25% CO₂ in the other containing hydrogen in its composition, 70% Ar +25% CO₂ +5% H₂. The development experiment was carried out in the completely random with the aid of a procedure known as factorial design (FT), having been used for the variables influencing the type of wire, and gas composition. The replies variables were analyzed tensile strength, toughness and hardness regions of the weld. The results were submitted to analysis variance and 90% confidence interval was utilized. The technique of scanning electron microscopy (SEM) was used to characterize the fracture mode observed in the weld metal and in the thermally affected by the heat. The results showed the hydrogen present in the shielding gas brittle the weld metal, and which were observed bubble formation in the weld metal.

Key words: Hydrogen, Toughness, Stiffness, and Tensile Strength.

SUMÁRIO

CAPITULO I

1-INTRODUÇÃO	01
1.1 – Objetivos	02

CAPÍTULO II

2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	03
2.1 - Aço Estrutural	03
2.2 - Soldabilidade dos Aços	04
2.3 - Processos de Soldagens MIG/MAG e Arame Tubular	05
2.3.1 - Processo MIG/MAG	05
2.3.2 - Processo de soldagem a arco com arame tubular	06
2.4 - Influência do Gás de Proteção nas Propriedades Mecânicas	11
2.5 - Propriedades Mecânicas de Juntas Soldadas	13
2.5.1 - Resistência à tração	14
2.5.2 - Dureza	15
2.5.3 - Tenacidade	16
2.7 - O Hidrogênio	17
2.7.1 - O Uso do H ₂ na Soldagem	18
2.7.2 - Fragilização do Aço pelo Hidrogênio	19

CAPÍTULO III

3-MATERIAIS E MÉTODOS	22
3.1- Metal de Base	22
3.2 - Metal de adição	21
3.3 - Gases de proteção	24
3.4 - Equipamentos	24
3.4.1 - Fonte de Soldagem	24
3.4.2 - Sistema de aquisição de dados	25
3.5 - Planejamento Experimental	26
3.5 - Seleção dos parâmetros de soldagem	28
3.6 - Preparação da amostra para soldagem	28

3.7 - Procedimento de soldagem	30
3.9 - Obtenção dos corpos de prova e realização dos ensaios mecânicos	31
3.10 - Ensaio de Charpy	32
3.11- Ensaios de tração das juntas soldada	34
3.12 - Dureza e microdureza	35
 CAPÍTULO IV	 38
4. RESULTADOS E DISCUSSÕES	38
4.1- Definições dos parâmetros de soldagem	38
4.2 - Resultados dos ensaios de tração	42
4.2.1 - Limite de resistência (LR)	44
4.2.2 - Limite de escoamento (L_E)	45
4.2.3 - Alongamento total dos corpos de prova e coeficiente de estricção	46
4.3 - Comportamento da junta soldada quanto à tenacidade	47
4.4 - Ensaios de dureza das juntas soldadas	51
4.4.1 - Ensaio de microdureza	52
4.4.2 - Ensaios de macrodureza	53
4.5 - Análises estatísticas dos resultados	55
4.6 - Formação de poros na junta soldada	58
 CAPÍTULO V	 58
5-CONCLUSÕES	58
 REFERÊNCIAS	 59

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1 - Aço ASTM A36 laminado a quente	04
Figura 2.2 - Seções transversais típicas de arames tubulares (NORISH, 2006)	07
Figura 2.3- Representação esquemática do processo FCAW auto-protegido	08
Figura 2.4 - Esquema do processo de soldagem FCAW com proteção gasosa	09
Figura 2.5 - Curvas de Tensão-Deformação do aço 2,25Cr-1Mo na condição “Zero” hidrogenada e não-hidrogenada (SIQUARA, 2008)	21
Figura 3.1 - Célula de soldagem utilizada para soldar os corpos de provas	24
Figura 3.2 - Sistema de aquisição de dados SAP - 4.0	25
Figura 3.3- Representação esquemática do planejamento experimental adotado	27
Figura 3.4 - Esquema ilustrativo para retirada das chapas para abertura do chanfro	29
Figura 3.5 - Processos de usinagem para abertura do chanfro em forma de “U”	30
Figura 3.6 - Representação da placa pós-usinagem com chanfro em forma de “U”	30
Figura 3.7- Suporte ilustrativo para fixação das placas a serem soldada	31
Figura 3.8 - Localização dos corpos de prova na peça soldada para sua retirada dos corpos de prova.	32
Figura 3.9 - Dimensões dos corpos de prova para ensaios de charpy segundo a norma ASTM E23 no metal de base.	33
Figura 3.10 - Corpo de prova para ensaio de charpy com entalhe localizado na ZTA e no CS.	33
Figura 3.11 - Corpo de prova para ensaio de tração	34
Figura 3.12 - Equipamento utilizado no ensaio de tração	35
Figura 3.13 - Critério estabelecido para a retirada das médias de microdureza	36
Figura 3.14:- Perfil do procedimento do cálculo da dureza na junta Soldada (NACE MR0175, 2001).	37
Figura 4.1 - Condutividade térmica de gases (Tusek & Sudan, 2000)	39
Figura 4.2 - Oscilograma da tensão para o arame tubular “ <i>metal cored</i> ” usando o Ar + CO ₂	40
Figura 4.3 - Oscilograma da corrente para o arame tubular “ <i>metal cored</i> ” usando o Ar + CO ₂	40
Figura 4.4 - Oscilogramas de tensão para o arame tipo “ <i>metal cored</i> ” usando o 70%Ar+25%CO ₂ +5%H ₂ .	40

Figura 4.4 - Oscilogramas de corrente para o arame tipo “ <i>metal cored</i> ” usando o 70%Ar+25%CO ₂ +5%H ₂ .	41
Figura 4.6 - Macrografia um corpo de prova submetido ao ensaio de tração (aramé - E70C6M; gás 70%Ar + 25%CO ₂ + 5%H ₂).	42
Figura 4.7 - Modo de fraturas para o arame maciço com gás de proteção 75%Ar + 25%CO ₂ no CS.	50
Figura 4.8 - Modos de fraturas para o arame maciço com mistura de 70%Ar+25%CO ₂ +5%H ₂ .	50
Figura 4.9: Modos de fraturas para o arame tubulares tipo “ <i>Metal cored</i> ” com gás de proteção 75%Ar + 25CO ₂ .	51
Figura 4.10: Modos de fraturas para o arame tubulares tipo “ <i>Metal cored</i> ” mistura de 70%Ar+25%CO ₂ +5%H ₂ .	51
Figura 4.11 - Comportamento da microdureza por regiões para o arame tubular E70C-6M.	53
Figura 4.12 - Comportamento da microdureza por regiões para o arame Maciço ER70S-6.	54
Figura 4.13 - Bolhas provocadas pela presença do hidrogênio no gás de proteção	56

LISTA DE TABELAS

Tabela 3.1 - Composição química (% peso) do aço ASTM A-36	22
Tabela 3.2 - Propriedades Mecânicas do aço ASTM A-36	22
Tabela 3.3 - Composição química dos arames, especificações. técnicas e propriedades mecânicas	23
Tabela 4.1 - Parâmetros de soldagem para os diferentes arames e gases de proteção	38
Tabela 4.2 - Propriedades mecânicas do aço ASTM A-36	42
Tabela 4.3 - Limite de resistência à tração	43
Tabela 4.4 - Limite de escoamento	44
Tabela 4.5 - Alongamento e Estricção	45
Tabela 4.6 - Energia absorvida (Joule - J) no cordão de solda, na ZTA e no metal de base	46
Tabela 4.7 - Análise de variância para os ensaios de charpy	48
Tabela 4.8 - Resultados de dureza da junta soldada.	55

LISTA DE SÍMBOLOS

ASTM - (American for Testing and Materials)

AWS – (American Welding Society)

Ceq - Carbono Equivalente.

CC+ - Polaridade Inversa

DBCP - Distância Bico de Contato Peça

FCAW- (Flux Cored Arc Welding

GMAW - (Gas Metal Arc Welding)

HB - Dureza Rockwel.

HV - Dureza Vickers

I - Intensidade de Corrente Elétrica

L_R- Limite de resistência à tração

L_E - Limite de escoamento

MIG – (Metal Inert Gas)

MAG – (Metal Active Gas)

MS - Metal de Solda

MEV - Microscopia eletrônica de Varredura

PF - Planejamento Fatorial

SAP – Sistema de Aquisição de Dados para Soldagem

TIH - (Tungsten Inert Gas)

U- Tensão do Arco

V_a - Velocidade de Alimentação do Arame

ZTA - Zona Termicamente Afetada pelo Calor

ϵ - Alongamento total do corpo de prova

ϕ – Estricção

CS - Centro da Solda

SS_T – Soma total dos quadrados (Variedade total dos quadrados).

CAPITULO I

INTRODUÇÃO

Ao longo das últimas décadas, as indústrias têm buscado incessantemente maneiras de oferecerem produtos de melhor qualidade, pelo menor valor, para se manterem competitivas no mercado mundial. Em diversos casos, os processos de soldagem representam boa parte dos custos de fabricação de um produto, e isso justifica os constantes esforços para se obter melhorias nesta área.

Processos de soldagem de alta produção como MIG/MAG e arame tubular são atualmente utilizados em inúmeras aplicações na indústria. A facilidade de automação e os diversos tipos de materiais que podem ser soldados por este método ampliam ainda mais as suas aplicações. São grandes usuários deste processo de fabricação a indústria automotiva e de autopeças, alimentícia, construção civil, fabricação de bens de consumo, estaleiros, caldeirarias, implementos agrícolas, entre tantas outras.

A escolha do tipo de atmosfera protetora para soldagem depende de fatores como custo, efeitos fisiológicos sobre as pessoas, geração de fumos e gases, estabilidade a temperaturas elevadas, facilidade de manuseio entre outros. A solubilidade do gás no metal fundido que se quer proteger durante a soldagem, também deve ser observada, pois se uma quantidade substancial do gás entra no metal fundido pode causar liberação do gás durante a solidificação causando descontinuidades na solda produzida, como por exemplo, porosidade.

Além disso, o gás de proteção pode ser um meio de contaminação da junta soldada, como é o caso do hidrogênio, uma vez que o ele pode provoca a fragilização da junta e até mesmo o fenômeno de trincas induzidas pelo hidrogênio que é uma seria causa de falhas em juntas soldadas. Hidrogênio no aço pode, também, produzir a redução acentuada de algumas de suas propriedades mecânicas.

No entanto, apesar da importância do tema e com vários estudos realizados, com o surgimento de novos materiais e metais de adição para soldagem, faz-se necessário obter informações sobre o comportamento das juntas soldadas quando expostas à presença do hidrogênio, e quais mudanças o mesmo pode provoca nas propriedades mecânicas da junta soldada.

1.1 - Objetivos

Com ênfase no que foram expostos acima, os objetivos desta pesquisa são:

- ✓ Avaliar a influência do hidrogênio através do gás de proteção no comportamento das propriedades mecânicas (resistência à tração, tenacidade e dureza) de juntas soldadas do aço ASTM A36.
- ✓ Avaliar o efeito do teor de hidrogênio no gás de proteção no comportamento do arco elétrico e na taxa de fusão dos arames ER70S-6 e E70C-6M.
- ✓ Analisar a presença de defeitos nas juntas soldadas devidos a presença do hidrogênio no gás de proteção.

CAPITULO II

2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

2.1. Aço Estrutural

A classificação “aços estruturais” é utilizada normalmente em aplicações estáticas tais como vergalhões para reforço de concreto, barras, bem como chapas e perfis para aplicações estruturais. Os aços estruturais são de médio a baixo carbono ($C < 0,25\%$) ligado ao manganês, com teores de fósforo e enxofre controlados, sendo, em geral, laminado, em função das grandes quantidades produzidas. Podem ser obtidos, também, por forjamento (COLPAERT, 2012).

Na maioria das aplicações consideradas, a importância da resistência mecânica é de certo modo relativamente pequena, assim sendo, os aços carbono, simplesmente laminados, sem quaisquer tratamentos térmicos são plenamente satisfatórios e constituem porcentagens consideráveis dentro do grupo dos aços estruturais, como é o caso do aço A36. Para aços desse perfil, ou seja, aços carbono e de baixo a médio carbono, obtidos por laminação os limites de resistência à tração variam de 390 a 490 MPa e seu alongamento é de aproximadamente 20%. O fato do teor de carbono ser relativamente baixo se dá devido ao trabalho a quente proporcionado pela laminação que garante a ductilidade necessária, além de produzir uma homogeneidade muito boa à peça a ser trabalhada (CHIAVERINI, 2002).

Os principais requisitos para aços destinados às aplicações estruturais são (COLPAERT, 2012):

- *Tensão de escoamento*; A relação elástica entre limite de escoamento / limite de ruptura baixa é necessária para prevenir deformações plásticas generalizadas.
- *Elevada tenacidade*; A prevenção da fratura rápida ou catastrófica de estrutura de aço tem merecido atenção especial. O controle da tenacidade é fundamental na prevenção dessas fraturas.
- *Boa soldabilidade*; As mudanças das características do material na junta soldada deve ser a menor possível, exigindo o mínimo de cuidados operacionais. Esta característica é fundamental para permitir montagens rápidas, simples e confiáveis.
- *Boa conformabilidade*; Em muitos casos é necessário utilizar conformação mecânica (dobramento, calandragem etc.) para obter a estrutura desejada.

A ASTM (*American for Testing and Materials*) classifica esses aços com base em sua composição química e propriedades mecânicas, exemplos de aços estruturais segundo a ASTM são: A36, A529 e o A573.

A especificação ASTM A36 é, talvez, a manifestação mais clássica desse tipo de aço (COLPAERT, 2012). O A36 é considerado um aço carbono comum com baixo teor de carbono, bastante utilizado na construção civil, como pontes e edificações (CALLISTER, 2012). Geralmente são obtidos na condição “como laminado a quente” (COLPAERT, 2012). A Figura 2.1, ilustra a microestrutura do aço ASTM A36 na condição de laminado.

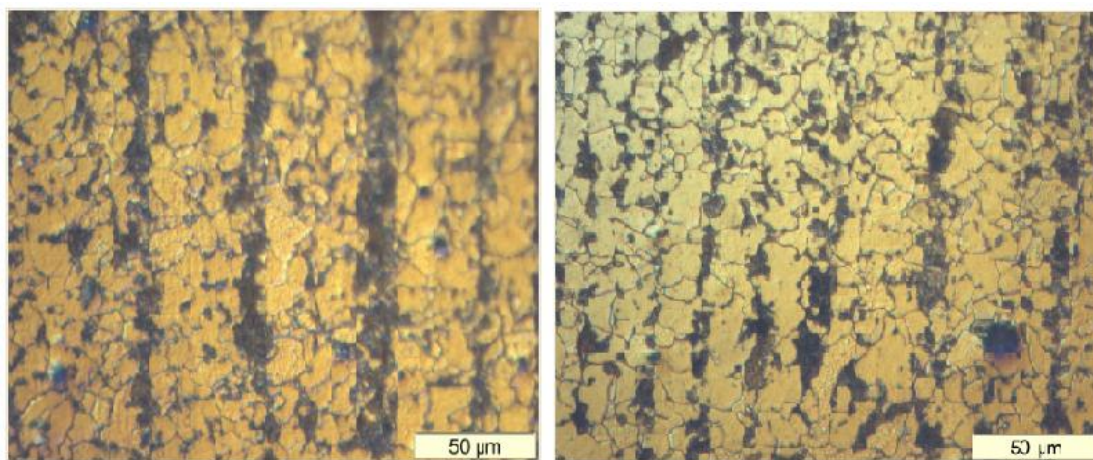


Figura 2.1. Aço ASTM A36 laminado a quente.

2.2. Soldabilidade dos Aços

A Soldabilidade pode ser definida como a capacidade de um material, metal ou liga, de se deixar soldar nas condições impostas pelo processo de fabricação, numa estrutura específica, adequada e de forma aceitável tendo desempenho satisfatório no serviço para qual se destina (QUITES 2008; AWS, 1998). Além disso, o conceito de soldabilidade engloba a resistência mecânica, tenacidade e ausência de defeitos (BRANCO *et al.* 1999).

Segundo Moreira (2008), a soldabilidade dos aços carbonos é bastante influenciada pelos teores de C e Mn e pelos níveis de impureza. Os aços carbono com percentual de até 0,15% C possuem excelente soldabilidade por não serem temperáveis. Os aços com percentual de carbono entre 0,15% e 0,30% possuem boa solubilidade, mas existe a possibilidade de endurecimento e algumas precauções devem ser tomadas.

Para determinar a soldabilidade de um material é necessário considerar os processos e os procedimentos de soldagem aplicados, além disso, é de fundamental importância que se

conheça o material a ser soldado (MODENESI, 2004). A soldabilidade dos aços ao carbono e dos aços baixa liga pode ser avaliada também com base no carbono equivalente (Ceq), adotado pelo Instituto Internacional de Soldagem (IIS) assim definido:

$$C_E = C + \frac{Mn}{6} + \frac{Cr + Mo + V}{5} + \frac{Cu + Ni}{15} \quad 2.1$$

Quando o carbono equivalente for menor que 0,40%, a soldagem pode ser executada por qualquer processo a arco e sem qualquer aquecimento. Conquanto, em relação ao carbono equivalente entre 0,40 e 0,45%, sendo a espessura menor que 30 mm, a soldagem pode ser executada sem preaquecimento, com o uso de eletrodos revestidos de baixo hidrogênio ou com proteção gasosa (QUITES 2008).

Barbedo (2011) analisou a soldabilidade do aço ASTM A36, utilizando os processos de soldagem GMAW e FCAW, e a qualidade da junta soldada. Foram verificadas em seus resultados características distintas em relação às propriedades metalúrgicas, porém os dois tiveram boa soldabilidade e resistência mecânica satisfatória.

2.3. Processos de Soldagens MIG/MAG e Arame Tubular

2.3.1. Processo MIG/MAG

A soldagem a arco gás metal (Gas Metal Arc Welding – GMAW) é um processo pelo qual a união de peças metálicas é obtida pelo coalescimento com um arco elétrico estabelecido entre um eletrodo metálico nu, consumível, e a peça de trabalho.

A proteção do arco e da região da solda, contra contaminação pela atmosfera, é feita por um gás ou mistura de gases, que podem ser inertes ou ativos. No Brasil, o processo é conhecido como MIG (Metal Inert Gas) ou MAG (Metal Active Gas) quando o gás usado é inerte ou ativo, respectivamente.

O processo é muito utilizado em aplicações industriais por causa de suas inúmeras vantagens. O processo de soldagem se aplica a quase todos os materiais metálicos, em uma grande variedade de espessuras (acima de 1 mm até 30 mm ou mais) sendo eficaz em todas as posições, considerado um processo econômico por apresentar velocidades de soldagem mais altas e maiores taxas de deposições quando comparado ao eletrodo revestido. Além disso, exige o mínimo de limpeza pós-solda, pela ausência da escória (BÖLMSJO *et al.* 2006).

O processo MIG/MAG é de fácil operação, podendo ser conduzido de modo semi-automático ou automatizado, além de ser conveniente para robotização (Machado, 1996).

Segundo Machado (1996), algumas vantagens da soldagem MIG/MAG, também podem ser relacionadas ao baixo conteúdo de hidrogênio, um dos elementos responsáveis pela formação e propagação de trinca induzida por hidrogênio (TIH) nos aços.

O equipamento básico para a soldagem MIG/MAG é composto por uma fonte de energia, um alimentador de arame, uma tocha de soldagem, uma fonte de gás protetor, além de cabos e mangueiras. Dispositivos auxiliares como posicionadores e sistemas de movimento da tocha também podem ser utilizados (MARQUES *et al.* 2009). Apresentam-se como consumíveis o arame, o gás de proteção e o líquido anti-respingos.

2.3.2. Processo de soldagem a arco com arame tubular

O processo de soldagem a arco com eletrodo tubular (FCAW - Flux Cored Arc Welding), coalesce os metais aquecendo-os com um arco elétrico, estabelecido entre um eletrodo tubular, contínuo, consumível, alimentado por uma bobina e uma peça de trabalho. Sendo o arco, protegido junto ao cordão de solda, pelos gases gerados na queima do fluxo contínuo, dentro do arame e/ou complementada por uma fonte externa (ORDÁÑEZ, 2004).

Esse processo começou a se desenvolver, a partir da tentativa de se associar a praticidade e qualidade do processo de soldagem, com eletrodo revestido, com a produtividade do processo MIG/MAG. Isso se deu por volta de 1954, surgindo dessa forma um processo de soldagem a arco elétrico que combinava a proteção gasosa à base de CO₂ com o uso de arames com fluxo interno, proporcionando um avanço ainda maior na qualidade do cordão de solda.

Segundo Machado (1996), o arame tubular enfrentou durante muitos anos, dificuldades para alcançar o nível de tenacidade exigido pelo metal de solda nas estruturas modernas. No entanto, desde a década de 80, alguns fabricantes resolveram os inconvenientes existentes, transformando o processo atual numa excelente alternativa para alta produtividade, com qualidade.

Há alguns anos o processo FCAW começou a ser aplicado na soldagem de dutos, com a utilização do arame tubular autoprotetido mostrando-se bastante promissor para a soldagem de dutos no campo (SILVA, 2005).

A soldagem com arames tubulares é normalmente um processo semi-automático e muito semelhante ao processo MIG/MAG, no que diz respeito a equipamentos e princípios de

funcionamento. No entanto, o processo assemelha-se ao da soldagem com eletrodo revestido, do ponto de vista metalúrgico. O processo de soldagem FCAW acumula as principais vantagens da soldagem MIG/MAG, quanto ao alto fator de trabalho do soldador, alta taxa de deposição e o alto rendimento, resultando numa grande produtividade, em relação às vantagens da soldagem com eletrodo revertido, como a alta versatilidade, possibilidade de ajuste na composição química do metal de solda e facilidade em operação no campo (MARQUES *et al.* 2011). Desta forma, as benéficas reações pirometalúrgicas, das quais o fluxo participa, são executadas sem o inconveniente do impedimento da soldagem, em posições outras que planas e horizontais, além de reduzir em muito a contaminação do mesmo, pela umidade e dejetos do ambiente (MACHADO, 1996).

A técnica de produção mais comum usada para produzir o arame tubular envolve a deformação de uma fita metálica em forma de U, onde o fluxo é adicionado. Após a adição, a fita passa por roletes de fechamento, onde toma o formato de um tubo, em seguida passa por trefilação onde se obtém o diâmetro desejado, e por fim o enrolamento em forma de bobina. (ASM HANDBOOK, 1993).

Segundo MARQUES *et al.*(2007), as complexas secções transversais de arames tubulares encontradas no mercado apresentam melhores características operacionais, devido a homogeneidade no aquecimento ao longo da mesma e maior regularidade na transferência metálica. A Figura 2.2 mostra diferentes secções para arames tubulares.

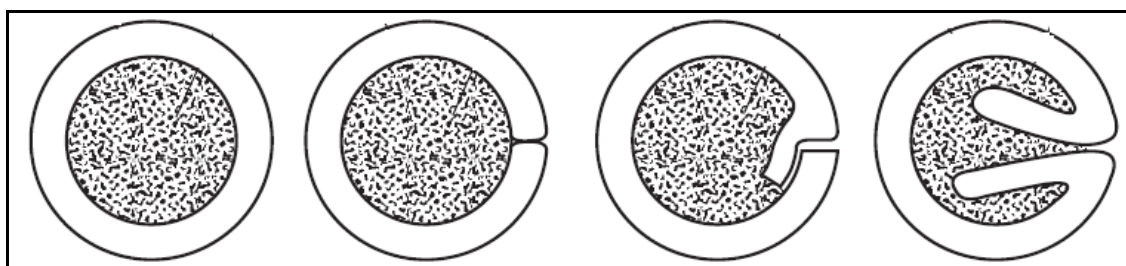


Figura 2.2. Seções transversais típicas de arames tubulares (NORRISH, 2006).

Nesse processo existem duas variáveis, uma com proteção obtida na queima do fluxo contido no arame tubular, conhecido como autoprotegido, e outra quando a proteção é complementada por uma nuvem de gás, adicionada de uma fonte externa (SILVA, 2005). A proteção fornecida pela geração de gases através do arco é mais eficaz do que quando o gás é gerado, a partir de um revestimento externo (ROBERT; MESSLER, 2004). O gás utilizado tem uma influência substancial sobre a forma de transferência de metal durante a soldagem também nesse processo.

No processo FCAW autoprotegido, os ingredientes essenciais para proteger o metal de solda está no próprio fluxo, que gera o gás necessário à proteção (ASM HANDBOOK, 1993). Segundo Araújo (2004), o gás gerado se dá através da adição de elementos químicos no fluxo, nesse caso, similar ao que acontece com eletrodos revestidos. Além disso, o fluxo é reponsável pela estabilização do arco elétrico, pela tranferência de elementos de ligas adicionais e pelo controle da escória. A Figura 2.3 mostra o esquema do processo de soldagem com eletrodo auto-protegido.

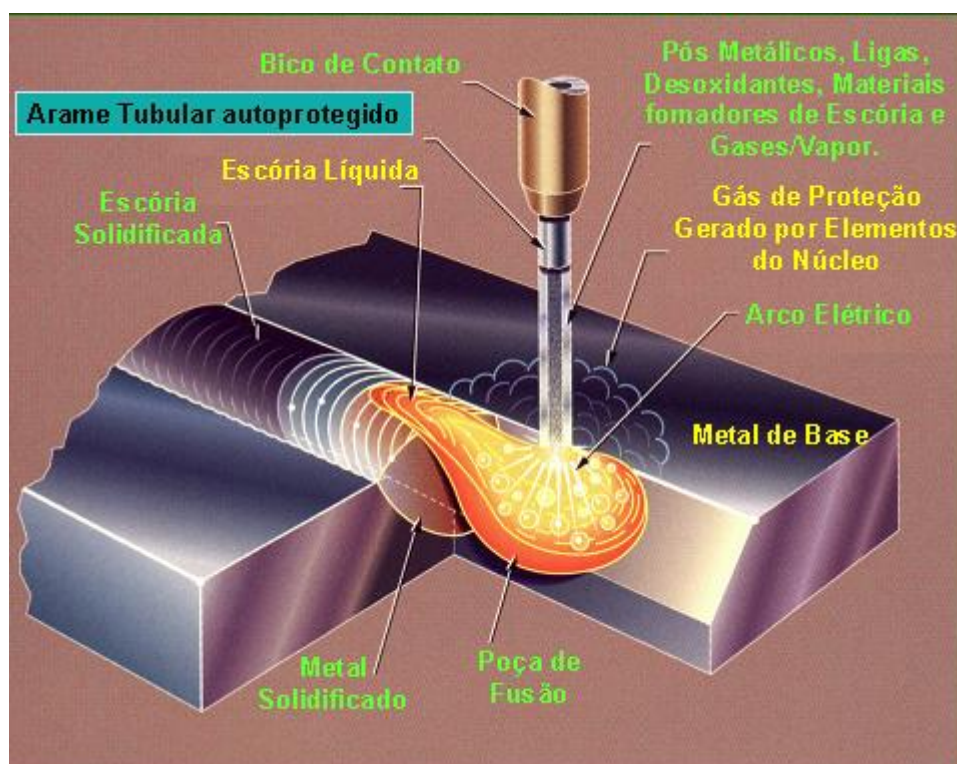


Figura 2.3- Representação esquemática do processo FCAW auto-protegido

O processo FCAW-G utiliza gás de proteção para complementar a proteção do metal depositado, sendo fornecido por uma fonte externa ao equipamento de soldagem, neste caso, a tocha utilizada no processo MIG/MAG é a mesma. O eletrodo com proteção gasosa e o fluxo interno têm função de desoxidante e de introdutor de elementos de liga, já a proteção do arco e a ionização da atmosfera ficam a cargo do gás utilizado, geralmente o dióxido de carbono ou mistura argônio e dióxido de carbono (BARBEDO, 2011). A Figura 2.4 mostra esquematicamente o processo de soldagem FCAW com proteção gasosa.

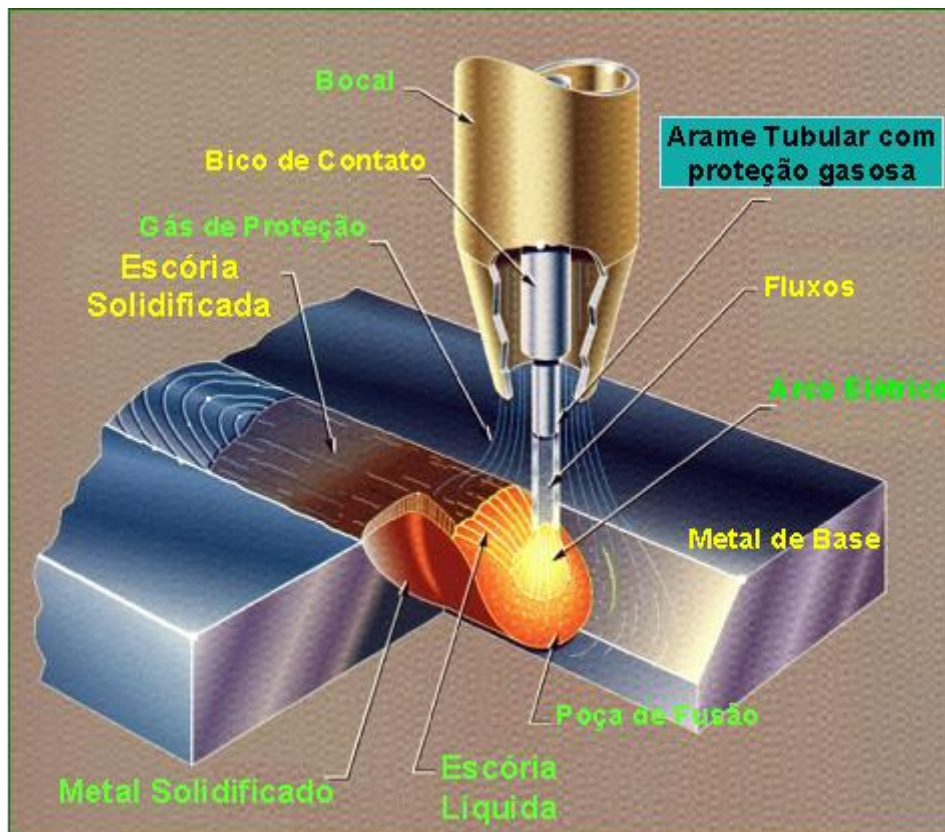


Figura 2.4- Esquema do processo de soldagem FCAW com proteção gasosa

Machado (1996), ressalta que arames autoprotégidos não podem utilizar tão efetivamente a decomposição do fluxo para formar gás de proteção, como o que acontece com eletrodo revestido. Se assim fosse, o fluxo que está no interior do consumível, provocaria alta produção de salpicos, além do metal fundido que manteria contato com a atmosfera.

Arames com proteção gasosa são bastante utilizados em soldagem de aço carbono e de baixa liga, além disso são adequados para uma grande variedade de juntas (ARAÚJO, 2004). Ainda Segundo Araujo (2004), os arames tubulares que utilizam gás de proteção estão divididos em dois tipos, o “*flux cored*”, que pode ser rutilico ou básico; e o tipo “*metal cored*”, que tem como fluxo somente pó metálico.

Os arames tubulares tipo “*metal cored*” possuem em seu interior um pó metálico, cujo enchimento contém, principalmente, pó de ferro e/ou ferro-ligas e muito pouco fluxo a base de minerais. A quantidade de escória gerada por estes arames é mínima, quase inexistente, por isso sua classificação está junto da seção ASME SFA 5.18 com arame sólido. Esse tipo de arame é mais vantajoso em soldagem mecanizada para altas velocidades (MARQUES *et.al.* 2007).

Marques *et.al.* (2007) ressaltaram que nos últimos anos foram lançados no mercado arames tipo “*metal cored*” para serem usados como proteção na soldagem de aços inoxidáveis e também para revestimentos contra desgastes.

Moreira (2008) afirmou que a condutividade elétrica de arames desse tipo se aproxima bastante da condutividade de arames sólidos (MIG/MAG) de mesmo material, ou seja, tem similares densidades e taxas de deposição.

Starling *et al.* (2011) verificaram em seu trabalho utilizando um arame tubular tipo “*metal cored*” (ASME SFA-5.18: E70C-3M) com diâmetro de 1,2 mm que, este, apresenta velocidade de fusão próxima a de arames maciços, além disso, notou que em altas correntes com uma mistura de gás de 75% Ar +25% CO₂, não se tem a ocorrência da transferência do tipo spray. De acordo com os autores, os arames do tipo “*metal cored*” requerem maiores níveis de correntes que os empregados na soldagem com arames tubulares do tipo rutilico ou básico de mesmo diâmetro, quando se desejam as mesmas características do arco.

A Associação Americana de Soldagem (AWS - American Welding Society) considera a utilização de eletrodos tubulares um segmento do processo MIG/MAG. No entanto, outras associações estrangeiras consideram como um processo de soldagem (FCAW-*Flux Cored Welding*, processo de soldagem a arco com arame tubular), mas com muita semelhança ao GMAW.

Em termos de equipamento de soldagem as mudanças a serem consideradas são poucas quando se faz a comparação entre os processos FCAW e o GMAW. A principal diferença no tocante a fonte de soldagem está no nível de densidade de corrente (Amm²) envolvido em cada processo. Para o processo GMAW, em decorrência do tipo de arame utilizado, ou seja, maciço, trabalha com densidades de correntes menores. Já o processo FCAW, por utilizar arames com fluxo interno, restringe a condução da corrente apenas na região metálica que envolve o fluxo (MOREIRA, 2008). Ainda segundo MOREIRA (2008), tal fato acontece pela presença do fluxo interno que possui pouca ou nenhuma condutividade elétrica, essa restrição à passagem da corrente elétrica faz com que a densidade de corrente e a taxa de deposição, sejam maiores no processo FCAW se comparado ao processo MIG/MAG para mesmos níveis de corrente e quando são usados arames de mesmo diâmetro.

GARCIA & SCOTTI (2010) realizaram um estudo comparativo da taxa de fusão e taxa de deposição entre esses dois processos, GMAW e FCAW. As soldagens foram realizadas utilizando-se os arames E71T-1 e ER70S-6, sob as proteções gasosas 100% CO₂ e Ar + 25% CO₂. Os autores confirmaram em seus resultados que o processo com Eletrodo Tubular apresenta maior taxa de fusão do que o processo MIG/MAG, quando comparados sobre as

mesmas condições (o mesmo nível de corrente e a mesma proteção gasosa), porém com maior consumo de material para se formar um cordão. Eles concluíram, também, que devido a maior taxa de deposição alcançada, o arame tubular permite velocidades de soldagem superiores às empregadas para arames maciços, reduzindo assim, o tempo para realização da soldagem na confecção de um cordão de mesmo volume.

BARBEDO *et al.* (2011), realizaram estudos comparativos entre esses dois processos, utilizando como metal de base o aço ASTM A-36 e seis tipos de arames, entre eles o ER70S-6 e o E70C-6M com diâmetro de 1,2 mm. Um de seus objetivos era verificar o comportamento mecânico, ou seja, a resistência mecânica entre o processo MIG/MAG e FCAW em juntas soldadas. Eles verificaram que o arame maciço produziu soldas com menor dureza; já as soldas realizadas com o E70C-6M, não apresentaram formação de escória, apenas algumas ilhas de sílica. Ainda comprovaram com ensaio de tração a integridade das juntas soldadas, mostrando que todos os corpos de prova romperam no metal de base ou na ZTA, com tensão máxima de tração acima do valor mínimo de 400 MPa.

2.4. Influência do Gás de Proteção nas Propriedades Mecânicas

Os gases de proteção utilizados nos processos de soldagem são de extrema importância, pois, além de proteger a poça de fusão da contaminação por gases da atmosfera, trazem uma influência significativa na estabilidade do arco, na geometria do cordão de solda, nas propriedades do metal e no modo de transferência do metal à poça de fusão (TESKE, 2006). Logo, o gás de proteção é uma variável muito importante na determinação da qualidade da solda e produtividade do processo.

Segundo TESKE (2006), o desenvolvimento de gases para aplicação em soldagem tem sofrido um grande impulso nos últimos anos, principalmente para aumentar a produtividade e para melhorar as características metalúrgicas da junta soldada. Atualmente, já existem misturas binárias, ternárias e até quaternárias sendo fornecida por empresas especializadas. As misturas são utilizadas para associar as características de cada gás, trazendo vantagens aos processos de soldagem.

De acordo com MACHADO (1996), os gases de proteção empregados são o argônio, Hélio, Nitrogênio, o oxigênio e o dióxido de carbono. O Hidrogênio é comumente empregado como parte integrante da mistura com outros tipos de gases como Argônio e Nitrogênio para proteção na soldagem GMAW e FCAW de aços inoxidáveis austeníticos.

De acordo com MOREIRA (2008), o uso do hidrogênio na soldagem de aços, inoxidáveis ferríticos e martensíticos deve ser evitado em razão da possibilidade de aparecimento de trincas induzidas pelo hidrogênio (TIH).

Segundo MACHADO (1996), os efeitos dos gases de proteção estão associados aos seguintes fatores:

- Modo de transferência do metal desde o eletrodo para a peça;
- Propriedades mecânico-metalúrgicas da junta soldada;
- Estabilidade do arco e operacionalidade do processo;
- Geometria e aparência da junta soldada.

Em processos como GMAW e FCAW, os gases de proteção têm uma influência importante sobre a forma de transferência de metal durante a soldagem. Por isso é tão importante à compreensão das propriedades básicas do gás que será utilizado na operação de soldagem. A melhor mistura de gás irá reduzir o custo total com mais qualidade na junta soldada (ASM HANDBOOK, 1996).

De acordo com MODENESI (2004), a seleção do gás de proteção é feita principalmente em função do tipo de metal que se quer soldar, da posição de soldagem e da espessura das peças a serem unidas.

A especificação AWS 5.32 trata de gases de proteção para soldagem e estabelece padrões para a pureza e umidade de componentes essenciais desses gases de proteção, tolerâncias para misturas de componentes e métodos para testar e registrar estas especificações, proporcionando ao usuário uma maior segurança, a fim de atender as suas necessidades.

As propriedades físicas dos gases como densidade, condutividade térmica e elétrica, potenciais de ionização, entre outras, determinam, em grande parte, as características operacionais do arco. Estas propriedades podem mudar bastante para diferentes gases (MARQUES *et al.*, 1998).

STARLING *et al.* (2011) verificaram o efeito do gás de proteção em soldas com arame tipo “*metal cored*”, para uma mesma polaridade e velocidade de alimentação. Esses autores observaram que um aumento do Teor de CO₂ no gás de proteção (soldagem com 100% CO₂ em relação á soldagem com 75%Ar+25%CO₂) resultou em uma redução da corrente média, aumento da tensão do arco, do nível de respingo é da estabilidade do processo. Os mesmos autores ainda mostraram que o aumento do teor de CO₂, afeta as características da geometria

do cordão de solda, aumentando a largura, penetração, diluição, além de afetar a microestrutura da zona fundida, resultando, principalmente, em aumento nas frações de ferrita primária e intragranular.

Estudos realizados por Hooijmans (1994) demonstraram que a adição de percentuais de hidrogênio no gás de proteção, do processo TIG, causa aumento tanto da tensão do arco quanto da quantidade de material fundido para a mesma corrente média. Para Hooijmans (1994) a diferença que é observada na tensão do arco na situação Ar puro e/ou com misturas Ar-H₂ se comprova pela grande diferença da condução térmica dos gases de proteção utilizados, sendo que, mais energia é dispensada por unidade de tempo, no caso do arco com misturas de Ar-H₂, do que quando utiliza o Ar puro, ou seja, mais energia é requerida para manter uma determinada corrente.

2.5. Propriedades Mecânicas de Juntas Soldadas

Denominam-se “Juntas” as partes da peça sobre as quais a soldagem será realizada (MACHADO, 1999). As transformações que ocorrem durante o processo de soldagem, as fases formadas durante a solidificação e as transformações de fases que ocorrem no resfriamento, determinam o desempenho da junta soldada quanto às suas propriedades mecânicas (MARTINS *et al.* 2011). Propriedades estas que devem ser bem determinadas. Em geral são especificadas por normas ou códigos para um dado projeto, normalmente avaliados por testes, para se obter informações das propriedades mecânicas, através de corpos de provas, que também são regulados por normas (ORDÓÑEZ, 2004).

Segundo ORDÓÑEZ *apud* LINNERT (1994), nas propriedades mecânicas que podem ser avaliadas na junta soldada incluem-se:

- Resistência à tração;
- Dureza, e a sua distribuição;
- Tenacidade, segundo aplique para ensaios de impacto ou avaliação de mecanismo de fratura;
- Resistência à fadiga;
- Trincamento por corrosão sob tensão;

As propriedades verificadas nesse trabalho são apenas três, resistência à tração, dureza e tenacidade.

2.5.1-Resistência à tração

Consiste na aplicação de carga de tração uniaxial crescente em um corpo de prova específico e normatizado até a ruptura. Mede-se a variação no comprimento como função da carga. Trata-se de um ensaio amplamente utilizado na indústria de componentes mecânicos, devido a vantagem de fornecer dados quantitativos das características mecânicas dos materiais, além de ser bastante utilizado em juntas soldadas verificando sua integridade quanto as propriedades mecânicas (GARCIA *et al.*2000).

Quando um corpo de prova é submetido a um ensaio de tração pode haver a construção de um gráfico tensão-deformação, pelas medidas diretas da carga e da deformação que crescem continuamente até a ruptura (ORDÓÑEZ, 2004).

As propriedades mecânicas conseguidas, por meio do ensaio de tração são as seguintes:

- Limite de resistência à tração (L_R), ou seja, tensão máxima suportada pelo material;
- Limite de escoamento (L_E), tensão que marca a transição do metal da zona de deformação elástica para a zona de deformação plástica;
- Limite de escoamento convencional (L_n), calculado por meio do gráfico tensão-deformação, quando não é possível calcular diretamente o limite de escoamento;
- Alongamento total do corpo de prova (ϵ), e expresso em porcentagem;
- Estricção (ϕ), que é expressa em %, calculada a diminuição da seção transversal do corpo de prova;

RODRIGUES (2010) verificou através de ensaio de tração as propriedades da junta soldada de aço ASTM A36. Mostrou que todos os corpos de prova romperam no metal de base comprovando a integridade da junta soldada, além disso, fica evidenciado em seus resultados, que com relação à voltagem, foi verificado um maior valor médio da resistência à tração para a tensão de 26 v e, quando utilizou uma velocidade de alimentação de 10mm/min foi obtido um maior valor médio de resistência à tração.

Estudos realizados por BABERDO, (2011), com aço ASTM A36 como metal de base utilizando dois processos de soldagem (GMAW e FCAW), verificaram que ao soldar com dois arames, o ER70S-6 e o arame “*metal cored*” E70C-6M, a tensão máxima de tração foi menor para o “*metal cored*”. Ainda segundo BARBEDO (2011), os limites de resistência à tração ficaram dentro do valor esperado, ou seja, entre 400 a 550 MPa. E que os ensaios de tração comprovaram a integridade da junta soldada, com todos os corpos de prova rompendo no metal de base e na ZTA.

2.5.2-Dureza

A dureza é a propriedade de um material para resistir a um esforço de penetração. Do ponto de vista metalúrgico, a razão principal para fazer ensaio de dureza é o fato dela estar relacionada com a resistência mecânica (QUITES 2008).

O ensaio de dureza consiste na impressão de uma pequena marca feita na superfície da peça, pela aplicação de pressão com uma ponta de penetração. Sua medida é dada como função das características da marca de impressão e da carga aplicada em cada tipo de ensaio realizado. Os métodos mais aplicados na engenharia utilizam-se de penetradores com formato padronizado e que são pressionados na superfície do material sob condições específicas de pré-cargas e cargas, causando inicialmente deformação elástica e em seguida plástica (GARCIA *et al.*2000).

A dureza na junta soldada pode apresentar vários comportamentos, que vão depender dos ciclos térmicos impostos durante a soldagem, da composição química dos metais de adição e da equivalência entre as propriedades mecânicas do metal de adição e do metal de base (ORDÓÑEZ, 2004).

A dureza por penetração geralmente é o método mais largamente utilizado e citado nas especificações técnicas, sendo os ensaios mais utilizados: Brinell, Rockwell, Vickers, Knoop, Meyer e a dureza choque shore (GARCIA *et al.*2000).

O ensaio de dureza Brinell, consiste em comprimir lentamente uma esfera de aço temperado ou de carboneto de tungstênio de diâmetro D sobre uma superfície plana do material ensaiado por meio de uma carga P, gerando uma calota esférica. A compressão da esfera na superfície do material causa uma impressão permanente, sendo a dureza calculada pelo quociente da carga pela área de contato (PADILHA, 2000).

A dureza Rockwell (HB), constitui o método mais usado para medir dureza, pois é de simples realização, não requerendo nenhuma habilidade especial. Diferentes escalas podem ser utilizadas, a partir das endentações que são diferentes cargas, dessa forma permitindo testes virtuais em todos os metais e ligas (CALLISTER, 2012). As escalas geralmente mais utilizadas são: Rockwell B (Penetrador esférico, carga de 100 kg) e Rockwell C (penetrador de diamante, carga de 150 kg) (PADILHA, 2000).

A dureza Vickers (HV) é um método bastante semelhante ao ensaio de dureza Brinell, uma vez que relaciona carga aplicada com a área superficial da impressão. O penetrador padronizado é uma pirâmide de diamante de base quadrada e com um ângulo de 136° entre faces opostas (GARCIA *et al.*2000).

TREVISAN (1998) usou o ensaio de dureza Vickers (HV), para verificar a influência do uso do hidrogênio no gás de proteção ($\text{CO}_2 + 5\%\text{H}_2$) em juntas soldadas de aço microligado (HSLA-80), segundo seus resultados, o perfil de dureza das diferentes regiões das juntas soldadas demonstraram uma dureza maior na ZF comparada a ZTA e ambas maiores que o metal de base. Observou ainda que houve um pequeno aumento na dureza de junta soldada na ZF e na ZTA com maiores níveis de hidrogênio, isto se deve ao aumento da fragilidade do material quando usou o hidrogênio no gás de proteção.

ARAUJO (2004) analisou a dureza Vickers (HV) em juntas soldadas de aço ASTM A36, soldadas com arames tubulares tipo “*metal cored*” o E70C-6M e um arame maciço ER70S-6. Verificou em seus resultados um pequeno aumento de dureza na ZF quando utilizou-se o E70C-6M em comparação ao arame maciço.

2.5.3-Tenacidade

A tenacidade é a propriedade que permite ao material suportar esforço considerável, aplicado lentamente ou subitamente. É um termo mecânico usado em vários contextos; de maneira literal é uma medida de capacidade de um material para absorver energia até a fratura. Fatores como geometria de amostra, bem como a maneira de aplicação da carga são importantes nas determinações de tenacidade. Em condições de carregamento dinâmico (alta taxa de deformação) e em circunstâncias de entalhe (ou ponto de concentração de tensão) quando se fizer presente pelo uso de um teste de impacto. Além disso, tenacidade à fratura é uma propriedade indicativa de resistência do material à fratura quando uma trinca estiver presente. (QUITES 2008 & CALLISTER, 2012).

Para um material ser tenaz ele deve exibir tanto resistência mecânica quanto ductilidade. Às vezes, materiais dúcteis são mais tenazes do que outros materiais frágeis muito embora o material frágil tenha maior limite convencional de escoamento e maior limite de resistência à tração, em virtude de falta de ductilidade, ele tem uma menor tenacidade que um material dútil (CALLISTER, 2012).

Quanto à tenacidade de juntas soldadas vários fatores podem influenciar. Segundo CASAS, (2008) as variações da microestrutura nas juntas, provocada pelos ciclos térmicos de soldagem resultam em valores diferentes de tenacidade à fratura, ou seja, refletindo na influência de diversas variáveis como propriedades mecânicas correlatas, tamanho de grão, formação de ilhas de martensita de alto carbono e tensões residuais. Ainda segundo esse autor

a perda de tenacidade da junta também pode estar associada à ação da interação com o meio, por exemplo, é fragilização por hidrogênio (CASAS, 2008).

Existem vários métodos para definir a temperatura em que acontece a transição de dútil para frágil num metal ou liga. O ensaio de impacto de Charpy é um deles, sendo o método mais comum na avaliação da resistência de um metal a fratura frágil, além de determinar sua temperatura de transição. (ORDÓÑEZ, 2004).

2.7. O Hidrogênio

Com o objetivo de discutir a influência do Hidrogênio nas propriedades dos metais e especialmente na junta soldada do aço ASTM A36, é feita uma abordagem simples das características desse elemento.

Para Rigden (2003) o átomo de Hidrogênio é a mãe de todos os átomos e moléculas, consiste apenas de um único elétron e um próton, é o elemento mais simples do universo. Porém, não se deve ignorar este elemento em detrimento de sua simplicidade. Na verdade, é a simplicidade do átomo de hidrogênio que tem permitido aos cientistas desvendar alguns dos mistérios da natureza, contribuindo para uma melhor compreensão do mundo natural.

Segundo Karshenboim *et al.*(2000), o átomo de hidrogênio tem inspirado o desenvolvimento das teorias da Física Moderna sobre a qual nossa compreensão de mundo está fundamentada. Tem sido estudado, exaustivamente, ao longo de muitas décadas, além de sua simples composição, constitui-se como o mais acessível experimentalmente. Geralmente apresenta-se na forma molecular (H_2), um gás diatômico, inflamável, incolor, inodoro, não-metálico, muito mais leve que o ar, e insolúvel em água. De todos os gases é o que tem a mais elevada condutividade térmica, entalpia elevada e está a reduzir, o que significa que se combina com o oxigênio e impede a formação de óxido (TUSEK & SUBAN, 2000).

As moléculas diatômicas do gás de hidrogênio podem ser absorvidas e dissociarem-se em superfícies metálicas produzindo hidrogênio atômico. Em consequência dessa dissociação na superfície metálica o hidrogênio pode interagir com a microestrutura do metal reagindo quimicamente e levando a alterações prejudiciais em suas propriedades mecânicas.

Segundo Vianna *et al.* 2004 , ao reagir com o metal, o hidrogênio pode também formar hidretos ou com outros elementos formar uma nova fase. O hidrogênio ao ser introduzido em materiais metálicos induz intrinsecamente efeitos fragilizantes, principalmente em aços. Isto é facilitado por apresentar diâmetro muito pequeno e de fácil mobilidade, através de difusão no estado sólido (VIANNA *et al.* 2004).

Quanto à soldagem, o hidrogênio é um elemento que facilmente promove a formação de defeitos, como trincas e poros, principalmente no caso de soldagem em aços (SCHWEDERSKY, 2012).

2.7.1. O Uso do H₂ na Soldagem

O H₂ é um exemplo de gás redutor que forma uma excelente atmosfera protetora, sendo muito utilizado em fornos para tratamento térmico e em operações de brasagem (TABAGIBA *et al.* 2012). Na soldagem o uso do H₂ é bastante indesejável para certas aplicações, principalmente em aços carbonos, pois este gás é solúvel em certo grau, em quase todos os metais, aumentando o risco de trincamento pelo hidrogênio.

No entanto este gás proporciona uma maior penetração da solda. A superfície da solda produzida por adição de H₂ ao Argônio se mostra limpa e sem óxidos (SUDAN & TUSEK, 2001). Fato também comprovado por TABAGIBA *et al.* 2012, que para misturas comerciais de Ar/H₂ produzem uma atmosfera que reduz a oxidação na superfície do metal de solda durante a soldagem.

Segundo TABAGIBA *et al.* (2012), na soldagem MIG/MAG de ligas de alto níquel, como Inconel da série 625 e 600, as dificuldades são muitas vezes encontradas devidas a lentidão da formação da poça de solda. Para esses casos, a adição de H₂ ao Ar, por produzir mais calor na poça de fusão, melhora a fluidez da solda.

Misturas de H₂ + Ar são empregadas na soldagem de aços inoxidáveis austeníticos com transferência goticular ou por curto-circuito, mas não deve ser empregada para aços ao carbono ou aços inoxidáveis martensíticos, já que esses aços são susceptíveis à trinca induzida pelo hidrogênio (SCOTTI, PONOMAREV 2008). Misturas de Ar/He são muito comuns na Europa, com teor de H₂ na faixa de 2-5%, para soldagem manual. E porcentagem acima de 5% em operação de soldagem automática, pois se consegue obter um efeito perceptível no aumento da velocidade de soldagem (TABAGIBA *et al.* 2012).

BISKUP *et al.* (2003), mostram em seus resultados que uma mistura gasosa Ar+H₂+CO₂ resulta em um aumento da velocidade de soldagem em até cerca de 26% quando comparada com argônio puro. Ligas de Ni com gás de proteção com 0,05-0,5% CO₂ e 0,1-7% de H₂ obtiveram melhores estabilidade do arco e molhamento do cordão de solda. O arco mais estável torna-se mais concentrado e o calor aumenta a penetração do cordão de solda.

Deve-se destacar que o H₂, por ser um gás redutor, age em relação à estabilidade como se fosse inerte (SCOTTI, PONOMAREV 2008).

SUDAN & TUSE (2000) realizaram estudos do efeito do Hidrogênio no gás de proteção em dois processos de soldagem, o MIG e o TIG em aço inoxidável austenítico. Para isso utilizaram seis diferentes misturas de hidrogênio em argônio, Ar+ 0,5% H_2 , Ar+ 1% H_2 , Ar + 5% H_2 , Ar + 10% H_2 , Ar + 20% H_2 . No processo MIG, esse autores afirmaram que com o aumento do teor de hidrogênio, a quantidade do material fundido aumenta, mas em comparação, a soldagem TIG é muito inferior. Outro fato observado por esses autores foi que com a adição de hidrogênio no argônio, há um aumento da resistência do arco, e consequentemente a diminuição da intensidade da corrente elétrica.

Ainda vale salientar que a adição de hidrogênio como gás proteção pode, contudo, levantar algumas dificuldades. A solubilidade do hidrogênio em metais fundidos é muito alta. A presença do hidrogênio em aço e outros metais podem produzir, além de trincas, poros, bolhas, etc. (SUDAN & TUSE, 2000).

2.7.2. Fragilização do Aço pelo Hidrogênio

Os efeitos mecânicos – metalúrgicos do hidrogênio nos metais já são conhecidos há bastante tempo. Em 1875 W. H. Johenson publicou um artigo nos anais da Real Sociedade de Londres, mostrando que o hidrogênio no ferro e no aço causava-lhes redução no limite de resistência à tração e na ductilidade (Miranda, 1994). Ainda segundo Miranda (1994), alguns efeitos que a presença do hidrogênio impõe aos metais são:

- A ductilidade do aço decresce progressivamente com o aumento no teor de hidrogênio;
- A tensão de fratura diminui com o aumento no teor de hidrogênio;
- A presença de hidrogênio no aço pode mudar o tipo de fratura de morfologia tipicamente dútil para frágil;
- A fragilização pelo hidrogênio ocorre sob a ação de tensões;
- O efeito da fragilização ocorre no intervalo de temperatura entre -100°C e 100°C, sendo o efeito máximo a temperatura ambiente;

A fragilização por hidrogênio depende do tratamento termomecânico e da microestrutura do aço. A martensítica é mais susceptível à fragilização por hidrogênio. A presença do hidrogênio no aço não o afeta, desde que não tenha sido ainda tensionado (mecanicamente, termicamente, etc.). O hidrogênio pode ser removido do aço aquecendo-o a

temperaturas superiores a ambiente, antes que seja tensionado, sendo assim assegura-lhe manutenção da ductilidade inerente a sua microestrutura.

A presença de hidrogênio pode causar a fratura frágil prematura do aço sob a ação de um carregamento estático. A perda de ductilidade provocada pelo hidrogênio foi verificada em vários estudos com hidrogenação em aços, quando comparado a condição sem hidrogênio (SANTOS, 2009; TIWARI *et al.* 2009; STROE, 2000).

Recentemente, NIBUR *et al.* (2006) ao analisar o efeito do hidrogênio no movimento e nucleação de discordâncias durante a deformação plástica em aço inoxidável austenítico, observaram diminuições de aproximadamente 20% nos seus módulos elásticos, atribuídas a presença do hidrogênio.

SAN MARCHI & ROBINSON (2007) sugerem que os efeitos do hidrogênio nas propriedades mecânicas de tração dos materiais são originados pela associação e mobilidade do hidrogênio nas discordâncias. Sendo esses efeitos capazes de modificar os processos de deformação plástica através da estabilização das trincas e da alteração da taxa de encruamento.

Com o propósito de verificar os efeitos intrínsecos do hidrogênio nas propriedades mecânicas em aços. TIWARI *et al.* (2000) propuseram uma nova técnica para o carregamento de hidrogênio. O método permite a hidrogenação a um nível muito elevado, sem causar danos à microestrutura. Em testes de tração para ambos os aços estudados os resultados demonstraram um aumento do limite de resistência, limite de escoamento, do módulo tangencial, da taxa de trabalho de endurecimento e redução da ductilidade. Ainda foi verificado que o hidrogênio influenciou os modos de fratura dúctil por dimples, reduzindo os tamanhos desses dimples quando comparados os aços livres de hidrogênio. Além disso, foi verificado que para um tempo de hidrogenação de 22 horas, a modalidade da fratura permanece predominantemente dúctil com áreas de clivagem e quase-clivagem.

Curvas de Tensão-Deformação do aço 2,25Cr-1Mo foram analisadas por SICARA (2006) nas condições de hidrogenados e não-hidrogenados. Os resultados evidenciaram que os valores de resistência e tensão de escoamento foram bem próximos. No entanto, a ductilidade diminuiu em 55% devido à fragilização ocasionada pela presença do hidrogênio. A Figura 2.5 demonstra os resultados obtidos por Sicara (2008).

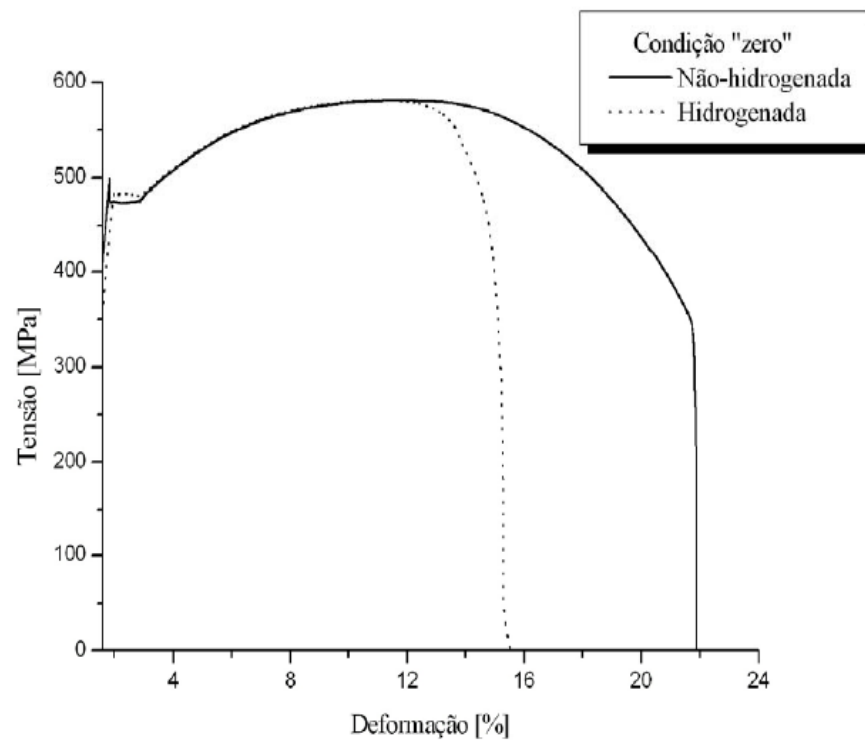


Figura 2.5. Curvas de Tensão-Deformação do aço 2,25Cr-1Mo na condição “Zero”
hidrogenada e não-hidrogenada (SIQUARA,2008).

CAPÍTULO III

MATERIAIS E MÉTODOS

Neste capítulo são apresentados e descritos todos os materiais e equipamentos empregados na soldagem dos corpos de provas, e a metodologia empregada para planejamento e execução dos experimentos.

3.1. Metal de Base

O metal de base, utilizado nesse estudo, foi o aço ASTM A-36. Trata-se de um aço estrutural de baixa liga e baixo carbono e média resistência, cuja composição química e propriedades mecânicas, fornecida pelo fabricante, são apresentadas, respectivamente, na Tabela 3.1 e na Tabela 3.2.

Tabela 3.1. Composição química (% peso) do aço ASTM A-36

Composição Química (% em peso)								
Fe	C	Si	Mn	P	S	Al	Cu	Nb
97,9	0,13	0,20	0,98	0,024	0,012	0,036	0,02	0,001
Ti	Cr	Ni	Sn	N	Ca	Pb	B	V
0,002	0,02	0,01	0,001	0,0044	0,0015	0,002	0,0002	0,004

Tabela 3.2. Propriedades Mecânicas do aço ASTM A-36

Propriedades mecânicas			
LE (MPa)	LR (MPa)	LE/LR (%)	AI (%)
312	447	70	27,5

As chapas de aço foram fornecidas pelo fabricante com dimensões de 2000 mm de comprimento por 230 mm de largura e 25 mm de espessura.

3.2. Metal de adição

Os metais de adição utilizados foram dois arames, um maciço (GMAW) e outro tubular (FCAW) do tipo “metal cored”, com diâmetros de 1,2 mm. Os dois arames são normatizados pela AWS A5. 18 como AWS ER70S-6 e AWS E70C-6M.

A seleção do metal de adição baseou-se, principalmente, na semelhança de composição química com o material de base e nas propriedades mecânicas oferecidas no certificado do fabricante do arame. A composição química dos arames, especificações técnicas, propriedades mecânicas foram fornecidas pelo fabricante e estão apresentadas na Tabela 3.3.

Tabela 3.3. Composição química dos arames, especificações técnicas e propriedades mecânicas

ER70S-6					
Composição Química (%)		Propriedades Mecânicas	Gás de proteção/ Tipo de corrente	Diâmetro	1,2 mm
				Faixa de Tensão	18-35 V
C 0,10 Si 0,90 Mn 1,50	Ar+20%CO ₂ LR.560MPa LE 470MPa Ch (+20°C) 130J	Ar+20-25%CO ₂ Ou 100%CO ₂ CC+	Faixa de corrente	120-380 A	
			Taxa de Deposição (Kg/h)	1,3-8,0	

E70C-6M					
Composição Química (%)		Propriedades Mecânicas	Gás de proteção/ Tipo de corrente	Diâmetro	1,2 mm
				Tensão	28-34 V
C 0,04 Si 0,40 Mn 1,40	L.R 570 Mpa L.E 480 Mpa A≥ 29% ChV(-30C°) 55J	Ar+20-25%CO ₂ CC+	Faixa de corrente	150-350A	
			Taxa de Deposição (Kg/h)	1,80-5,75	

3.3 Gases de proteção

Para o gás de proteção se estabeleceram duas misturas, a primeira especial contendo em sua composição 70% Ar + 25% CO₂ + 5% H₂, e a segunda uma mistura comercial contendo 75% Ar + 25% CO₂.

A mistura especial com 5% H₂ em sua composição foi utilizada para induzir altos valores de hidrogênio na junta soldada. Buscou-se criar um ambiente fragilizante e condições apropriadas para a comparação do efeito do hidrogênio nas propriedades mecânicas da junta soldada. Para cada processo foi utilizada uma vazão de 16 l/mim.

3.4. Equipamentos

3.4.1. Celular de Soldagem

Uma fonte de energia microprocessada, multiprocessos e sinérgica, modelo DIGIplus A7; desenvolvida e fabricada pelo Laboratório de Soldagem e Mecatrônica da Universidade Federal de Santa Catarina (LABSOLDA/UFSC). A Fonte trabalha com intensidade de corrente máxima de 450A, pode operar a 280A com fator de trabalho de 100%. Acoplada a fonte tem-se um cabeçote de alimentação de arame designado STA-20D-2, uma tocha refrigerada a água, modelo MB-501D com diâmetro de arame utilizável de 1 a 2,4 mm, e uma unidade resfriadora de tocha modelo UPR 7500. A Figura 3.1 mostra a célula de soldagem usada neste trabalho.



A Figura 3.1. Célula de soldagem utilizada para soldar os corpos de provas.

3.4.2. Sistema de aquisição de dados

O sistema de aquisição de dados IMC SAP-4.0, ilustrado na Figura 3.2, foi utilizado para aquisição de dados de grandezas como corrente, tensão, velocidade de arame e vazão de gás. Esse sistema permite a leitura dos valores médios dessas grandezas, além de fazer um rastreamento do processo de soldagem, de forma a observar se as variáveis de soldagem se mantiveram dentro dos valores ajustados.

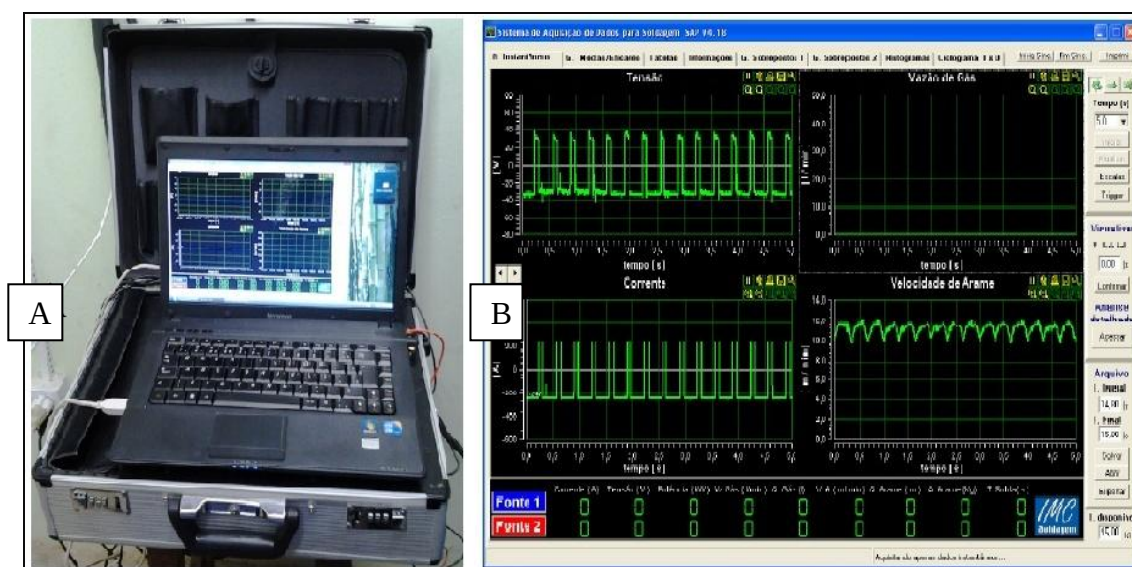


Figura 3.2 Sistema de aquisição de dados SAP - 4.0

Esse sistema permite a realização de cálculo de médias de valores eficazes e apresenta os resultados em gráficos e tabelas. Todo o cálculo das energias de soldagem foram estabelecidos com base nos dados fornecidos pelo Sistema de aquisição de dados SAP-4.0. O sistema foi configurado para obter informações de dados como, tensão, corrente, velocidade do arame, vazão do gás em intervalos de 0,2s. O intervalo de tempo entre os primeiros e últimos 5 segundos foram desconsiderados, evitando, dessa forma, irregularidades quanto ao cálculo das energias de soldagem, e à abertura e fechamento do arco, já que o mesmo foi realizado através de abas anteriores e posteriores à peça. Esse sistema portátil de monitoração de processos de soldagem permite rastrear o processo de soldagem; obter dados de produtividade; analisar a transferência metálica, e dinamizar a inspeção de soldagem.

O SAP possui uma série de funcionalidades, dentre elas tem-se: leitura instantânea das grandezas, corrente, tensão, velocidade de arame e vazão de gás para duas estações de soldagem por até 100s; leitura dos valores médios das grandezas citadas para

acompanhamento da produção e qualidade da soldagem com amostras de 1 s por até 80 h seguidas, ou em 0,1 s por 8 h; visualização das informações médias através de tabelas com informações brutas ou tratadas por cordão de solda; avaliar a regularidade da transferência metálica através de histogramas; visualização rápida através do mostrador digital das referidas variáveis, bem como, da quantidade de arame e gás consumidos, tempo soldando e potência.

3.5. Planejamento Experimental

O desenvolvimento experimental teve como objetivo principal minimizar o número de ensaios e maximizar a quantidade de informações extraídas, com um grau pré-definido de confiabilidade estatística. Assim, os ensaios para avaliar a influência do gás de proteção e do tipo de arame eletrodo sobre as propriedades mecânicas da junta soldada foram desenvolvidos de acordo com o planejamento fatorial (PF).

Planejar experimentos é definir uma sequência de coletas de dados experimentais para atingir certos objetivos. O planejamento fatorial é o mais indicado quando se deseja estudar os efeitos de duas ou mais variáveis de influências.

O estudo de um determinado fenômeno, denominado variável de saída, pode ser realizado experimentalmente pela variação de um ou mais de seus fatores de influência. Desta forma, pode-se estudar a relação entre a causa e o efeito produzido pelas variações pertinentes. Para melhor entendimento do fenômeno em questão, pode-se abordá-lo pelo estudo da interação entre as diversas causas e suas influências nos efeitos obtidos (Montgomery e Runger, 1996).

O tratamento estatístico dos resultados obtidos foi realizado pelo método de análise de variância, considerando-se um nível de significância (α) igual a 10%. Portanto, a confiabilidade dos resultados é de 90%. A Figura 3.3 apresenta esquematicamente o planejamento experimental adotado.

O desenvolvimento experimental foi realizado de acordo com a seguinte estruturação:

- ✓ Planejamento Fatorial (PF) 2^2 – total de 4 ensaios por réplica.
- ✓ Variáveis de Influência: 2 Arames (ER70S-6 e E70C-6M); 2 Gases de proteção (75% Ar + 25% CO₂ e 70% Ar + 25% CO₂ + 5% H₂).
- ✓ Variável de resposta – Propriedades mecânicas: Resistência à Tração, Tenacidade, Dureza e microdureza.
- ✓ Foram realizadas 2 réplicas para cada grupo de experimentos, totalizando 8 ensaios.

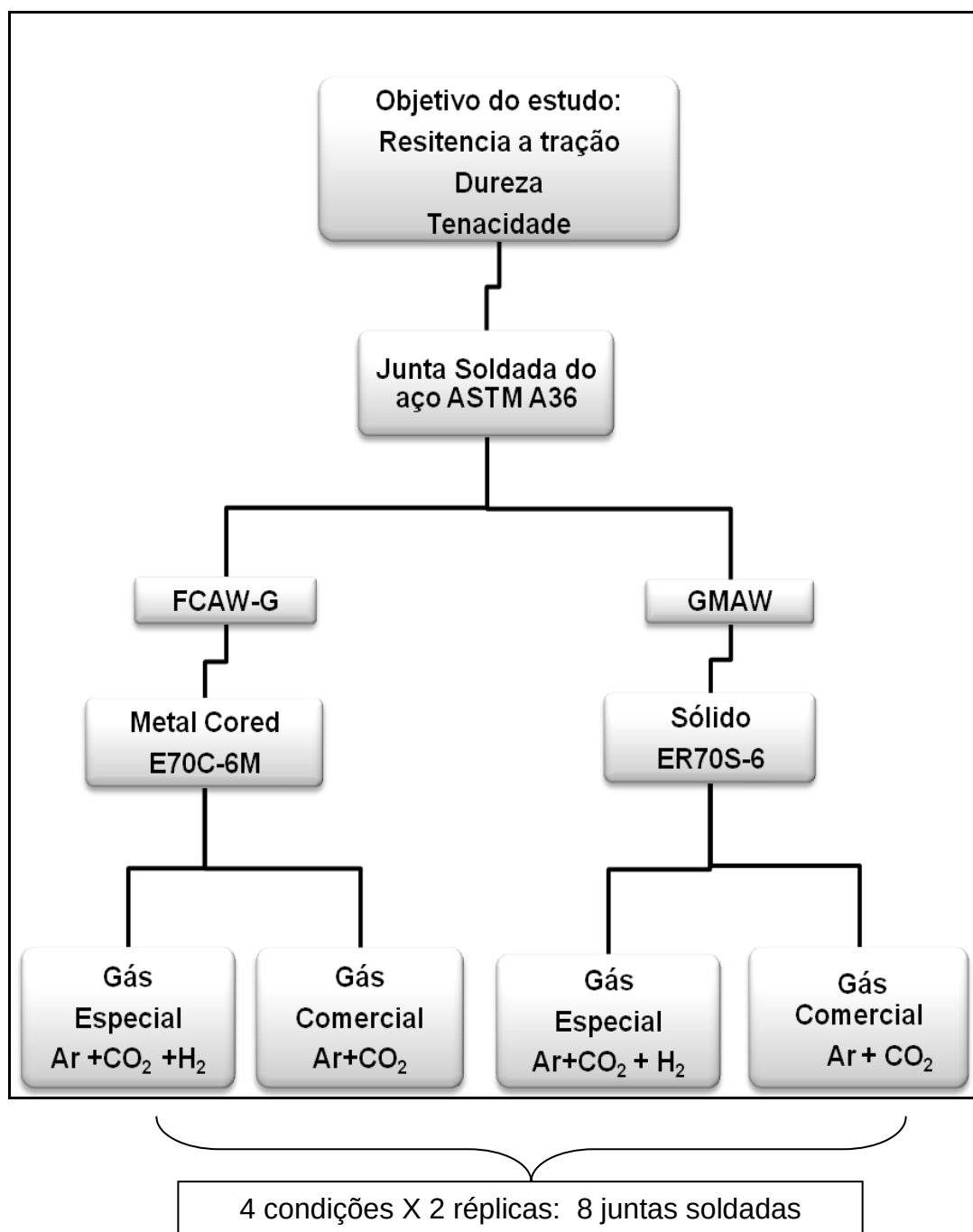


Figura 3.3. Representação esquemática do planejamento experimental adotado.

Para medir a tenacidade da junta soldada foram feitos ensaios de impacto Charpy na ZTA e no metal de solda (MS), isso significa, dois ensaios por junta, totalizando 16 ensaios.

Quanto aos ensaios de dureza na junta soldada retiraram-se as amostras de cada condição para medição de micro e macrodureza. Nesse caso foi selecionada 1 réplica em cada condição, ou seja, totalizando 4 amostras para os ensaios de dureza e microdureza.

3.6. Seleção dos parâmetros de soldagem

Os parâmetros de soldagem, corrente (I), tensão do arco (U), velocidade de alimentação do arame (v_a), distância bico de contato peça (DBCP) e velocidade de soldagem (V_s) foram definidos a partir de recomendações do fabricante dos arames, de catálogos e da literatura (Welding Handbook - AWS, 1991; Machado, 1996). As condições de soldagem foram definidas de forma a se obter um arco estável, cordões de solda homogêneos e com qualidade superficial. Com base nestes requisitos e em ensaios preliminares realizados, foi verificado que, devido às diferenças entre os arames, as condições de soldagem não poderiam ser as mesmas para os dois arames.

Pré-testes foram executados em chapas de aço ASTM A-36, na posição plana, com o objetivo de se obter a penetração ideal, com uma taxa de deposição satisfatória para retirada dos corpos de prova na junta soldada. Em seguida, foi executado um teste em chapas com chanfro em forma de “U”, com profundidade de 5 mm, 6 mm e 8 mm, buscando assim um cordão de solda com penetração acima de 10 mm. Essa penetração era justificada pela necessidade das dimensões do corpo de prova para ensaios Charpy 10 mm x 10 mm. Para verificação da penetração do cordão de solda, amostras eram retiradas da junta soldada, lixadas, polidas e, em seguida, atacadas com Nital a 2%.

3.7. Preparação da amostra para soldagem

Para a realização das soldas, as chapas de aço ASTM A-36 foram cortadas com dimensões de 65 mm x 25 mm x 230 mm, por meio de uma serra de fita modelo SBS-10188. O próximo corte foi feito com uma máquina de eletroerosão modelo CNC EDM AR 1300 a fio deixando as placas com dimensões de 12 mm x 62 mm x 115 mm. A Figura 3.3 ilustra como foram obtidas as placas para abertura dos chanfros. Ainda para que as placas ficassem uniformes e com faces paralelas, se fez necessário a usinagem de suas faces laterais utilizando uma Fresadora Ferramenteira, modelo FVF 2500.

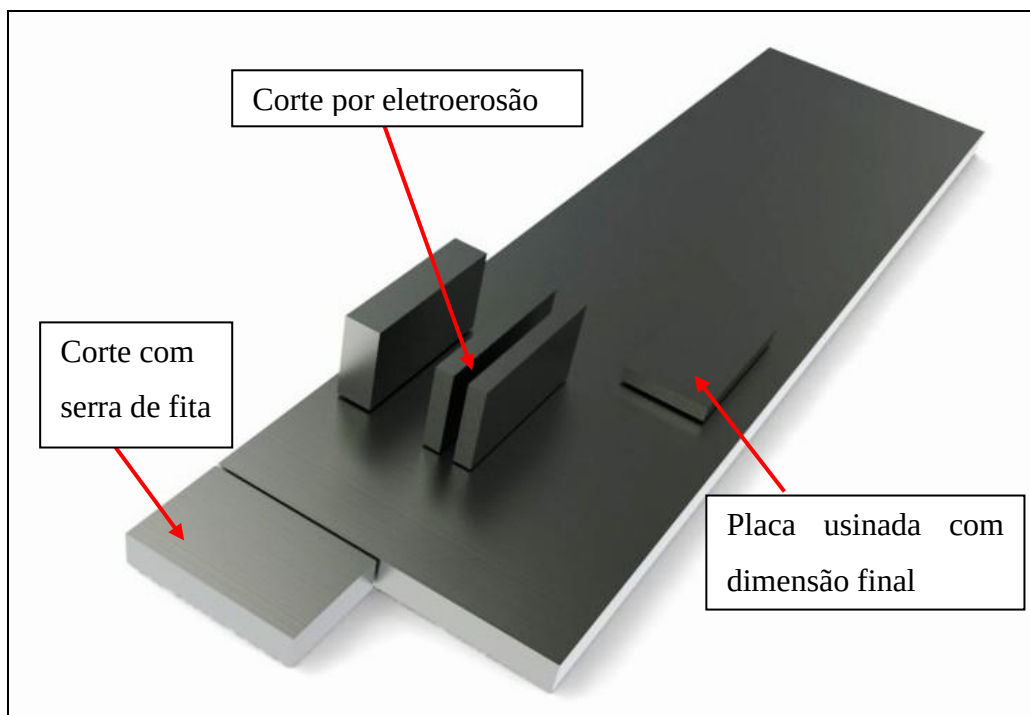


Figura 3.4. Esquema ilustrativo para retirada das chapas para abertura do chanfro.

A etapa seguinte consistiu da execução do chanfro. Para o desenvolvimento deste trabalho, foi adotado um chanfro na forma de “U” no centro da chapa e no sentido de laminação com profundidade de 8 mm. Na confecção do chanfro utilizou-se uma Fresadora Universal, modelo KFC 1150 com uma fresa de perfil constante semicircular convexa com raio de 5 mm. As Figuras 3.5 e 3.6 ilustram a montagem para o processo de usinagem na abertura do chanfro e a placa no seu estágio final pronta para a execução da solda.

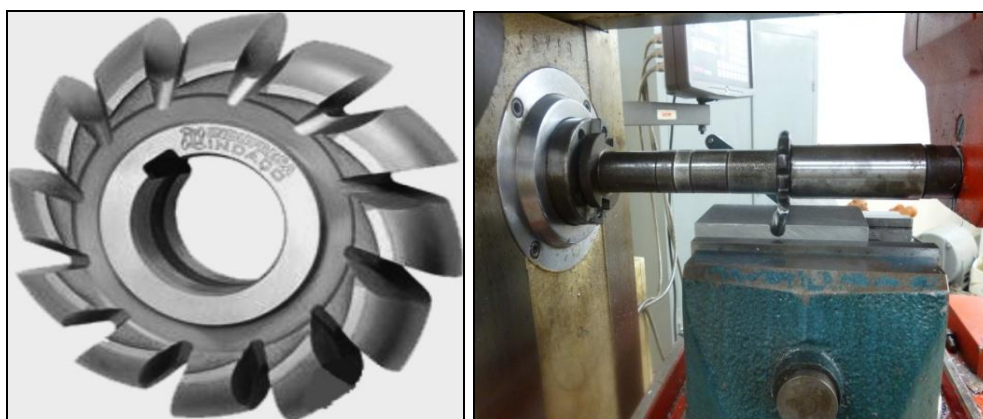


Figura 3. 5. Processo de usinagem para abertura do chanfro em forma de “U”

Para o início e o fechamento do arco foram confeccionadas abas com perfis semelhantes às placas chanfradas, só que com dimensões menores, dessa forma eliminando quaisquer

irregularidades de abertura e fechamento do cordão de solda que pudessem comprometer a retirada dos corpos de prova.

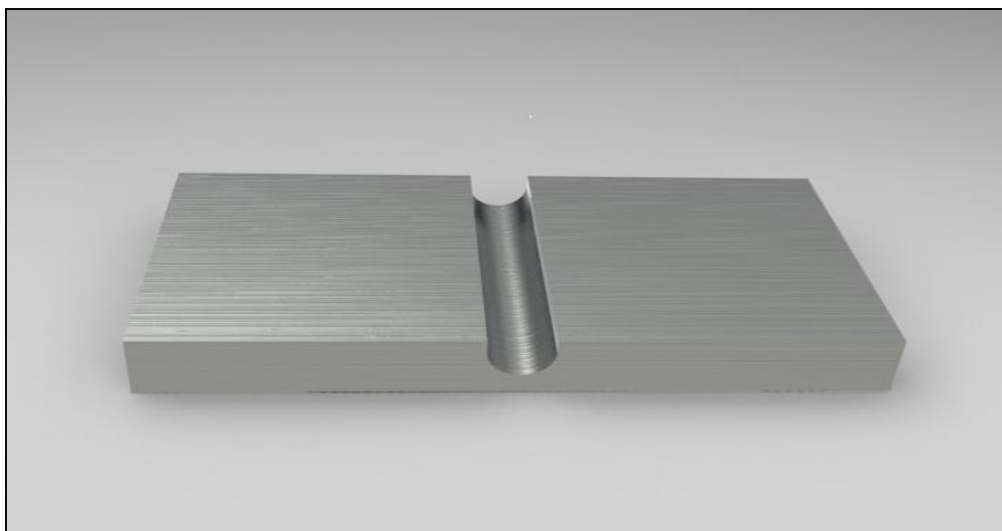


Figura 3.6 - Representação da placa pós-usinagem com chanfro em forma de “U”

Antes da execução da soldagem, os corpos de provas foram lavados com água e sabão, e em seguida mergulhados em álcool a 97%, eliminando resíduos provenientes do processo de usinagem como óleo e graxa.

3.8. Procedimento de soldagem

A execução da solda foi realizada de forma automática, para ambos os processos MIG/MAG e Arame tubular. O controle da velocidade se deu através de uma tartaruga oxí-corte para o translado da tocha. A fonte de soldagem utilizada foi ajustada em modo de tensão constante, ou seja, foram fixados os valores da tensão do arco e da velocidade de alimentação do arame.

As placas foram fixadas na posição plana por parafusos sobre um suporte de aço, e niveladas, a DBCP foi ajustado em 20 mm, com a tocha mantida perpendicular ao plano da peça. Os chanfros foram soldados em passe único, com polaridade inversa (CC+). Na abertura e fechamento do arco utilizaram-se abas com perfil semelhante ao das placas, sendo a mesma fixada de forma coincidente com a placa. A Figura 3.7 mostra a representação esquemática do procedimento quanto à fixação das chapas na execução do cordão de solda.

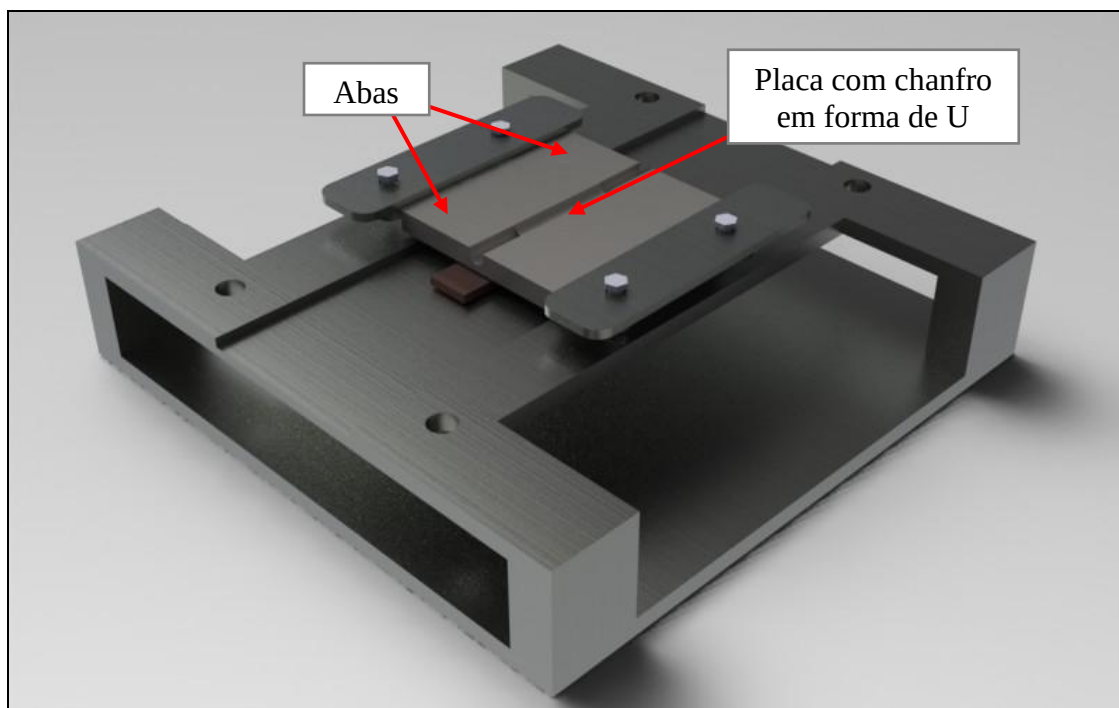


Figura 3.7 - Suporte ilustrativo para fixação das placas a serem soldada

3.9. Obtenção dos corpos de prova e realização dos ensaios mecânicos

Os corpos de provas para os ensaios mecânicos foram retirados das juntas soldadas do aço ASTM A-36 com dimensões já estabelecidas na secção 3.3, em cada condição e com suas respectivas réplicas. Para a retirada dos corpos de prova para os ensaios Charpy, Tração e Dureza, utilizou-se uma máquina de eletroerosão a fio modelo CNC EDM AR 1300.

Na retirada dos corpos de prova foram estabelecidos alguns critérios, como no caso do corpo de prova para ensaio de tração que ocorreu a 2 mm de profundidade do cordão de solda, já para o ensaio charpy a 0,2 mm de profundidade. A localização da retirada dos corpos de prova na junta soldada está esquematizada na Figura 3.8.

Em seguida, os corpos de prova foram usinados para manter as dimensões estabelecidas pelas normas. Para isso, foi usada uma Fresadora Ferramenteira modelo FVF 2500. Posteriormente para se obter uma maior uniformidade e paralelismo das suas faces se fez necessário a retificação desses corpos de prova. Exceto os de ensaio de tração, já que todo procedimento para retirada dos corpos de prova foi realizado pela máquina de eletroerosão com muita precisão em suas dimensões.

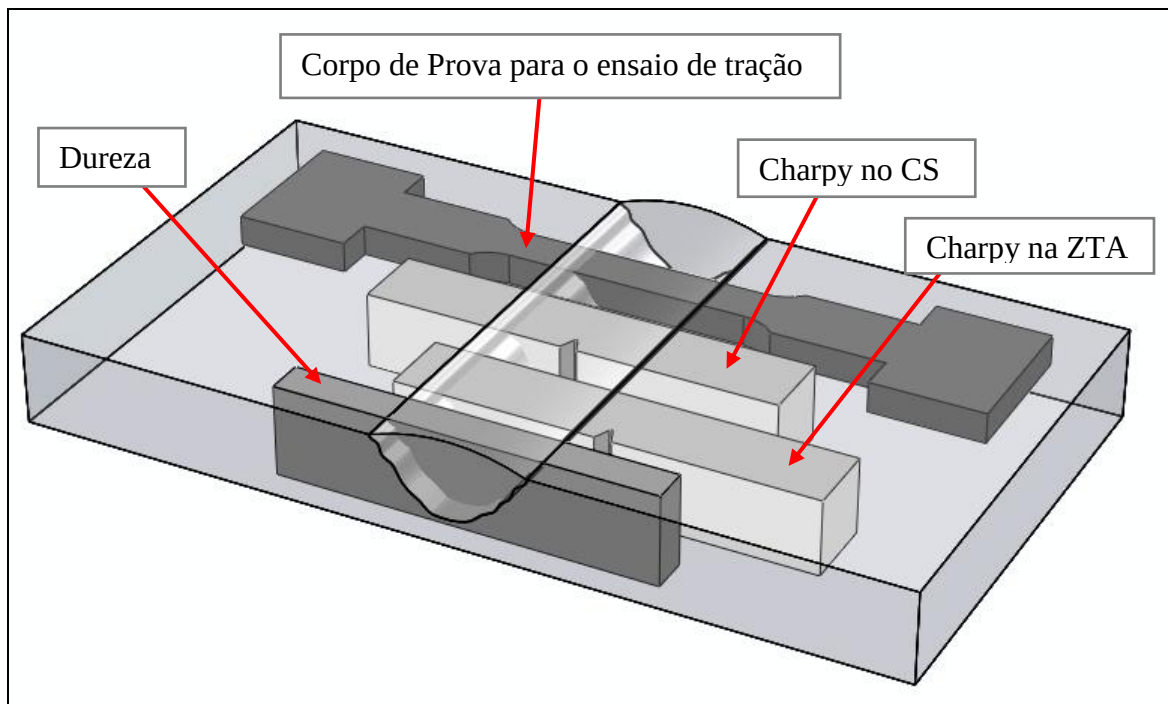


Figura 3.8 localização dos corpos de prova na peça soldada para sua retirada dos corpos de prova.

3.10. Ensaio de Charpy

Para determinar as dimensões dos corpos de prova para ensaio de charpy foi utilizada a norma ASTM E23 (1999) conforme a Figura 3.9.

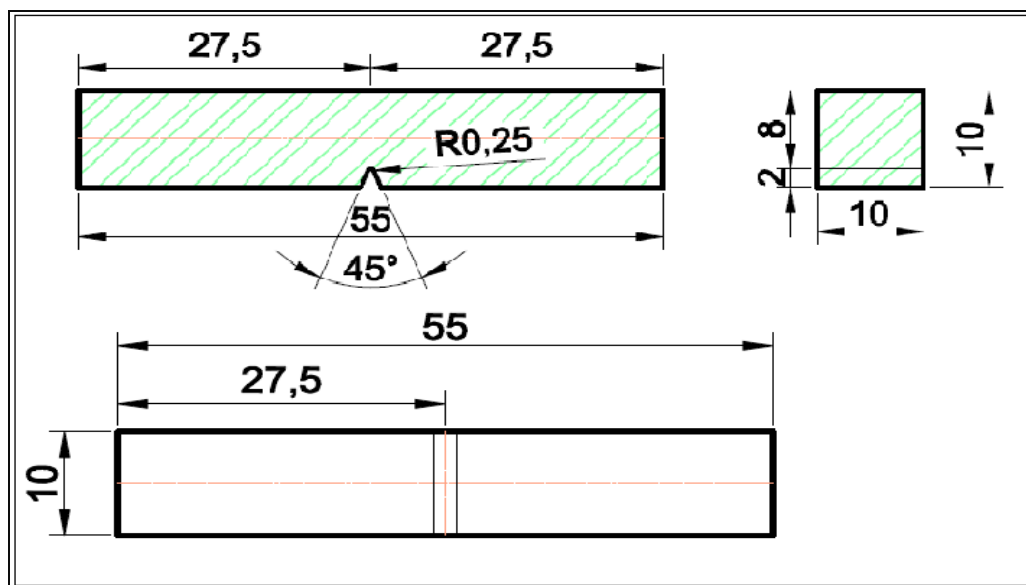


Figura 3.9. Dimensões dos corpos de prova para ensaios de charpy segundo a norma ASTM E23 no metal de base.

Segundo essa norma a linha central do entalhe deverá situar-se no centro da solda, já na ZTA a linha central deve interceptar o máximo possível da ZTA. No entanto, para a obtenção de uma confiabilidade maior na localização do entalhe para os ensaios na ZTA e no CS, utilizou-se na junta soldada um ataque com Nital a 2%%. O entalhe foi estabelecido a 1 mm de distância da margem da solda, conforme mostrado na Figura 3.10.

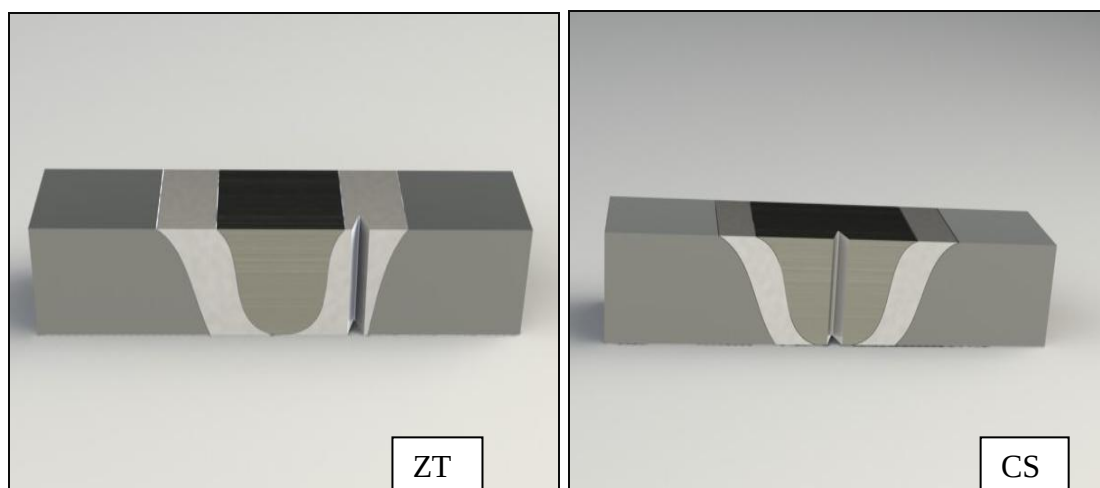


Figura 3.10. Corpo de prova para ensaio de charpy com entalhe localizado na ZTA e no CS.

Este ensaio possibilitou a verificação da fragilidade na junta soldada, tanto na ZTA quanto no Metal de solda. No caso, em que a amostra ensaiada apresentar pequenas deformações, absorvendo pouca energia, ela é considerada frágil.

Quando a amostra ensaiada apresentar grande deformação, absorvendo muita energia antes da ruptura, ela é considerada dúctil. Em outras palavras, no ensaio de charpy, quanto menor a energia absorvida, mais frágil será o comportamento da junta soldada, e vice versa. Os ensaios de charpy foram realizados à temperatura ambiente, em uma máquina modelo Jb-W300 semi-automática.

As análises dos modos de fraturas dos corpos de provas submetidos ao ensaio Charpy foram realizados no equipamento LEO-1430 para Microscopia eletrônica de Varredura (MEV). O objetivo é verificar modos de fraturas na junta soldada, tanto no metal de solda quanto na ZTA, nas quatro condições estabelecidas. Dessa forma pode-se avaliar se o hidrogênio presente no gás de proteção causou mudanças nas propriedades mecânicas como redução da ductilidade e fragilização da junta.

3.11- Ensaios de tração das juntas soldada

No ensaio de tração buscou-se obter todas as informações e propriedades mecânicas que o mesmo pode oferecer da junta soldada. Dados quantitativos das características mecânicas da junta soldada como, limite resistência (L_R), limite de escoamento (L_E), alongamento total (ϵ) e coeficiente de estricção (ϕ) foram analisados.

As dimensões para obtenção dos corpos de prova, métodos de execução e critérios de aceitação, foram determinadas pela norma E8/8M-09. A Figura 3.11, mostra as dimensões do corpo de prova utilizadas para o ensaio de tração e com ilustração da localização da junta soldada.

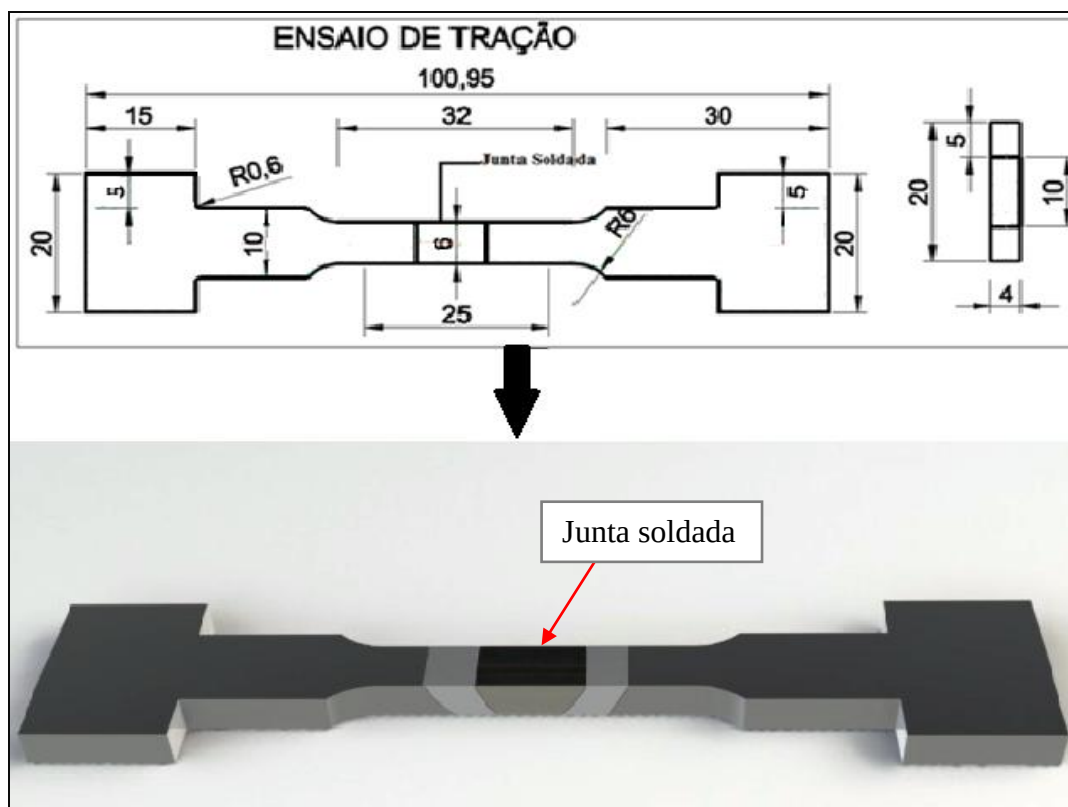


Figura 3.11- Corpo de prova para ensaio de tração

As amostras foram retiradas de chapas soldadas no mesmo plano, mas perpendicular ao cordão de solda como mostrado na Figura 3.8. Os corpos de prova foram cortados em uma máquina de eletroerosão como já citada no item 3.9.

Os ensaios de tração foram realizados no Laboratório de Ensaios Mecânico (LEM) no Centro de Tecnologia (CT) da UFPB em uma máquina modelo SERVO PULSER, marca SHIMADZU com capacidade de 200kN, com *Software* GLUON em temperatura ambiente.

A velocidade de tensionamento de 0,6mm/min e limite de escoamento $n=0,2\%$. A Figura 3.12 mostra o equipamento utilizado para ensaio de tração.



Figura 3.12- Equipamento utilizado no ensaio de tração

3.12. Dureza e microdureza

Foi levantado um perfil de microdureza vickers (HV) para cada junta soldada. Os ensaios foram realizados ao longo da seção transversal, iniciando do centro do cordão de solda passando pela ZTA e chegando ao metal de base. Para o ensaio de microdureza foi utilizado um microdurômetro SHIMADSU HARDNESS, TESTERS HMV-2SERIES com carga de 100 gf, aplicada durante 15 s. Foram realizadas 87 endentações, distribuídas em três linhas equidistantes em 0,5 mm. As médias foram extraídas conforme estão ilustradas na Figura 3.13, ou seja, cada ponto de média aritmética é a soma de 5 (cinco) pontos.

As amostras para ensaio de dureza passou por uma preparação metalográfica antes de serem feitas as endentações, para identificar com precisão a ZTA e centro do cordão de solda (CS). Para isso foram lixadas usando-se lixas de 220, 320, 400, 600, 800, 1000 e 1200 mesh, em seguida polidas com pasta de diamante com granulometrias de 3 μ , 1 μ e 1/4 μ e finalmente atacadas com Nital a 2%.

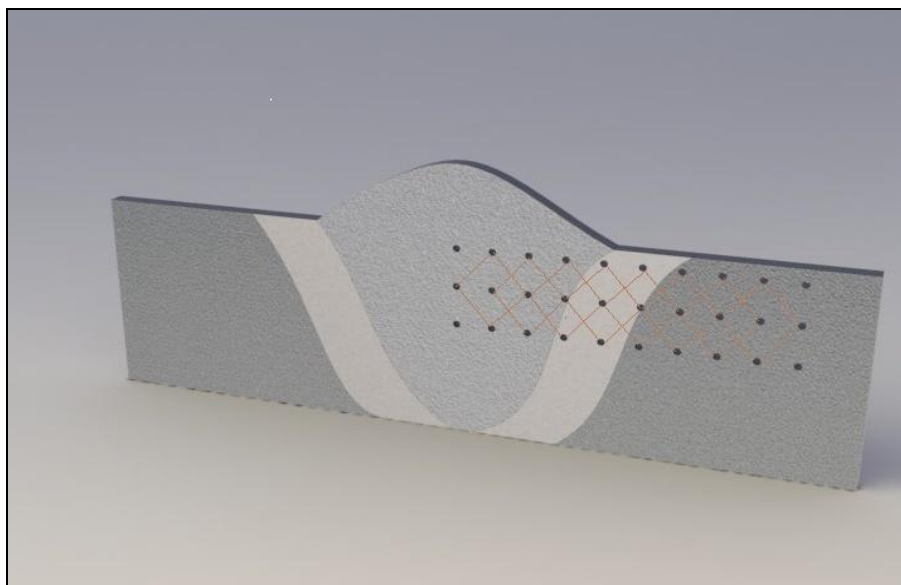


Figura 3.13: critério estabelecido para a retirada das médias de microdureza.

Os ensaios de dureza foram realizados na secção transversal das juntas soldadas de acordo com a norma NACE MR0175, que estabelece um total de 18 impressões com carga aplicada de 100Kgf , utilizando a escala Rockell B. Ainda segundo essa norma, as impressões na ZTA devem ficar a uma distância de 2mm da linha de fusão. A Figura 3.14 demonstra o posicionamento para todas as impressões, ao longo da junta, nas quatro condições distintas, sendo esta distribuída com 6 para o MB, ZTA e MS. Para a realização desse ensaio, utilizou-se um durômetro, modelo RASN-RBD, marca Panambra, com uma esfera de 1/16 mm.

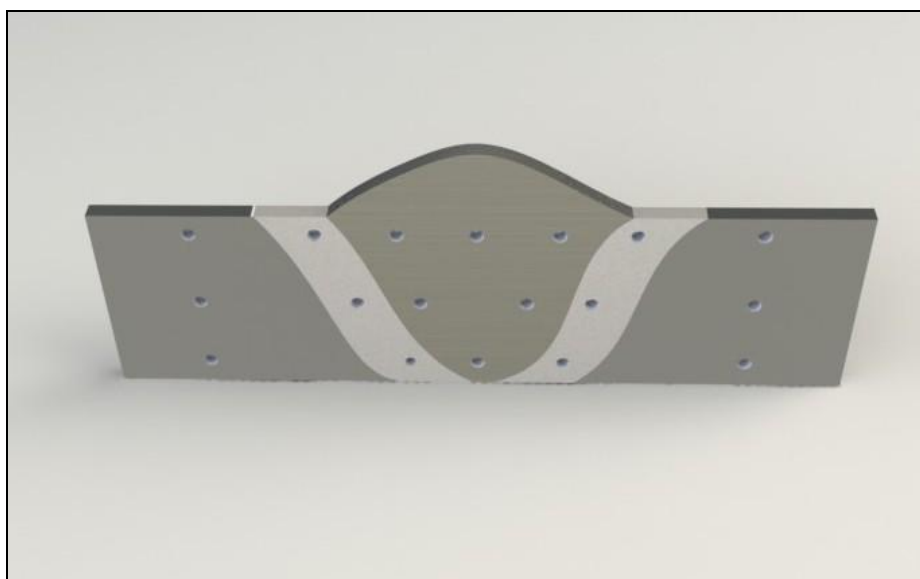


Figura 3.14: Perfil do procedimento do cálculo da dureza na junta Soldada (NACE MR0175, 2001).

CAPÍTULO IV

RESULTADOS E DISCUSSÕES

Neste capítulo são apresentados e discutidos os resultados obtidos nos ensaios realizados de acordo com a descrição apresentada no Capítulo III. Inicialmente são apresentados e discutidos os resultados dos pré-testes realizados para definir os parâmetros e as energias de soldagem para o estudo. Posteriormente uma análise do efeito da composição do gás de proteção e do tipo de arame, como variáveis de influência, sobre as variáveis de resposta (dureza, resistência a tração e tenacidade da junta soldada) são avaliados em função dos ensaios mecânicos.

4.1. Definição dos parâmetros de soldagem

Uma das principais dificuldades encontrada neste estudo consistiu em estabelecer os parâmetros de soldagem, para um mesmo nível de energia de soldagem, que permitissem preencher o chanfro com 8 mm de profundidade e obter um cordão de solda com uma penetração superior a 10 mm, para os 2 tipos de arames e gases de proteção. Uma série de ensaios foi realizada variando-se os parâmetros: velocidade de alimentação do arame (v_a), tensão do arco (U), velocidade de soldagem (V_s) e a distância bico de contato peça (DBCP), até ser definida a energia de soldagem apropriada e os respectivos parâmetros de soldagem.

Os testes iniciais de soldagem foram executados em placas de aço ASTM A-36, na posição plana e em seguida em placas com chanfro com parâmetros iniciais segundo as especificações do fabricante. Posteriormente foi realizada uma análise da morfologia do cordão, quanto à penetração para os dois arames e gases utilizados.

A energia nominal de soldagem (E_s) foi calculada com a utilização da equação abaixo:

$$E_s = \frac{60 \cdot I \cdot U}{1000 \cdot V_s} \quad (4.1)$$

Sendo: E_s – energia nominal de soldagem (kJ/mm);

I – corrente de soldagem (A);

U - tensão de soldagem (V);

V_s – velocidade de soldagem (mm/min).

As condições de soldagem selecionadas e utilizadas nos ensaios experimentais, para os arames ER70S-6 e E70C-6M, são apresentadas na Tabela 4.1.

Tabela 4.1 - Parâmetros de soldagem para os diferentes arames e gases de proteção

Gás de proteção - 75%Ar + 25%CO ₂						
Arame	I (A)	U (V)	Va (m/min)	Vs (mm/min)	DBCP (mm)	Es (kJ/mm)
ER70S-6	341,0	34,2	9,5	270	20	~2,6
E70C-6M	341,2	34,4	11	270	20	~2,6
Gás de proteção - 70%Ar + 25%CO ₂ + 5%+H ₂						
Arame	I (A)	U (V)	Va (m/min)	Vs (mm/min)	DBCP (mm)	Es (kJ/mm)
ER70S-6	333,2	35	9,5	270	20	~2,6
E70C-6M	333,4	34,8	11	270	20	~2,6

A análise das condições de soldagem apresentadas na Tabela 4.1, para cada arame e gás de proteção usado, permite observa-se que a corrente de soldagem resultante das condições de soldagem apresentou uma diferença de aproximadamente 8 A quando se utiliza o hidrogênio no gás de proteção. Pode ser verificado que há uma diminuição da intensidade média da corrente, em ambos os arames utilizados. Esse resultado está de acordo com o obtido por Tusek & Sudan (2000). Os autores verificaram que o aumento do teor de hidrogênio no argônio no gás de proteção para o processo TIG resultou em uma diminuição da corrente de soldagem, isso porque o hidrogênio aumenta a resistência elétrica do arco o que, conseqüentemente, provoca a diminuição da corrente. Os mesmos autores fizeram um estudo semelhante com as mesmas composições de hidrogênio em argônio (0,5; 1,0; 5,0; 10; e 20% H₂) na soldagem MIG e verificaram que o hidrogênio também causa influência no arco elétrico aumentando sua resistência e diminuindo a intensidade da corrente elétrica.

A diminuição da intensidade da corrente também pode ser justificada pela condutividade elevada do hidrogênio. Segundo Starling *et al.* (2011), gases de alta condutividade térmica devem aumentar a resistividade do arco, ou seja quanto maior for a resistividade do arco maior a resistência elétrica. Tal afirmação foi observada verificando-se que para mesma polaridade do eletrodo e velocidade de alimentação do arame, um aumento do teor de CO₂ no gás de proteção (soldagem com 100%CO₂ em relação à soldagem com 75%

Ar+25%CO₂), resulta em uma pequena redução da corrente elétrica de 270 a 261. O gráfico a baixo demonstra a condutividade térmica dos gases mais utilizados em processo de soldagem. Como se pode verificar, o hidrogênio é o gás de maior condutividade térmica.

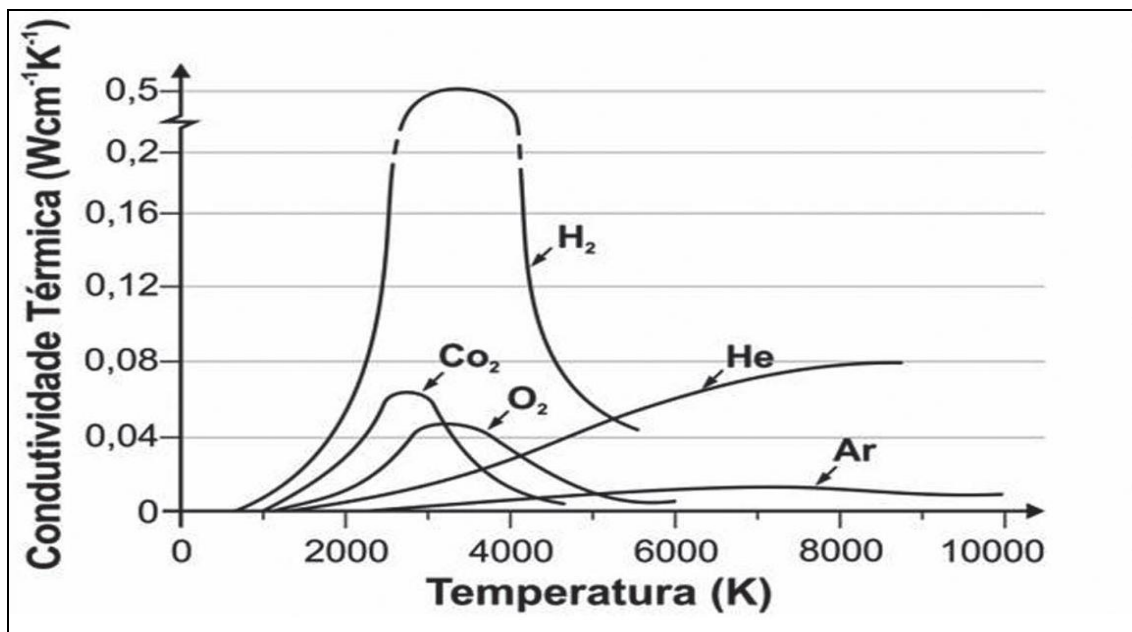


Figura 4.1 - Condutividade térmica de gases (Tusek & Sudan, 2000).

Estudos sobre condutividade térmica de gases de proteção para soldagem (Starling *et al.*, 2011; Tusek & Sudan, 2000) mostraram que, quando se retirar 5% de Ar de uma mistura de 75%Ar + 25%CO₂, e adicionam-se 5% H₂, aumenta-se a condutividade térmica da mistura, pela resistência mais elevada do hidrogênio injetado no arco. Tal fato leva a perda de intensidade de corrente ao usar a mistura com hidrogênio.

A Tabela 4.1, ainda permite observa que a soldagem com o arame ER70C-M6 “*metal cored*” produziu um aumento significativo quanto à taxa de consumo (Kg/h) para que fosse mantida a mesma energia de soldagem, independentemente do gás de proteção utilizado. Esse fato deve-se a constituição dos arames; enquanto o arame ER70S-6 é um arame maciço, o arame E70C-M6 é um arame tubular constituído por um fluxo interno de adições metálicas, resultando numa taxa maior de consumo de arame para uma mesma potência de arco.

Durante a soldagem dos corpos de provas foi possível verificar o comportamento da corrente de soldagem e da tensão do arco. As análises dos oscilogramas mostrados nas Figuras 4.2, 4.3, 4.4 e 4.5, permitem verificar que o hidrogênio contido no gás de proteção influencia sob o modo de transferência.

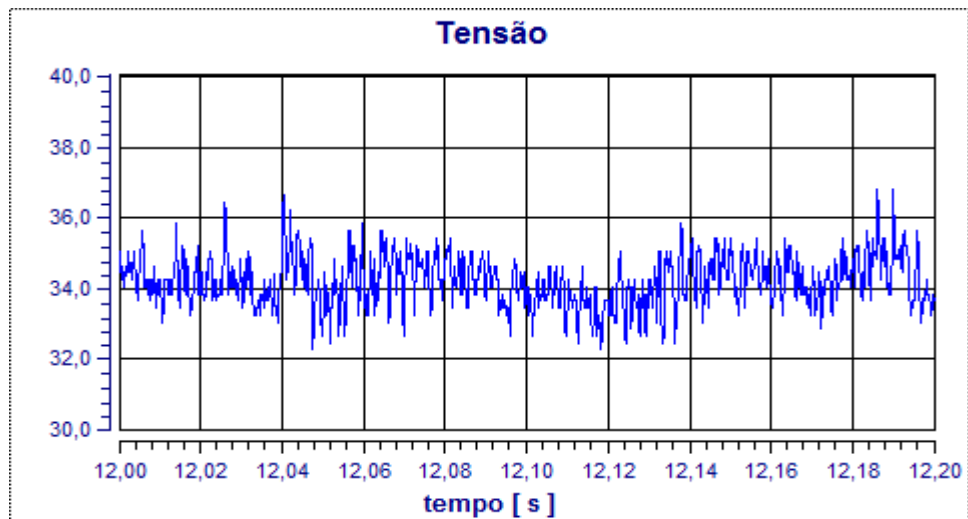


Figura 4.2 Oscillograma da tensão para o arame tubular "metal cored" usando o Ar + CO₂

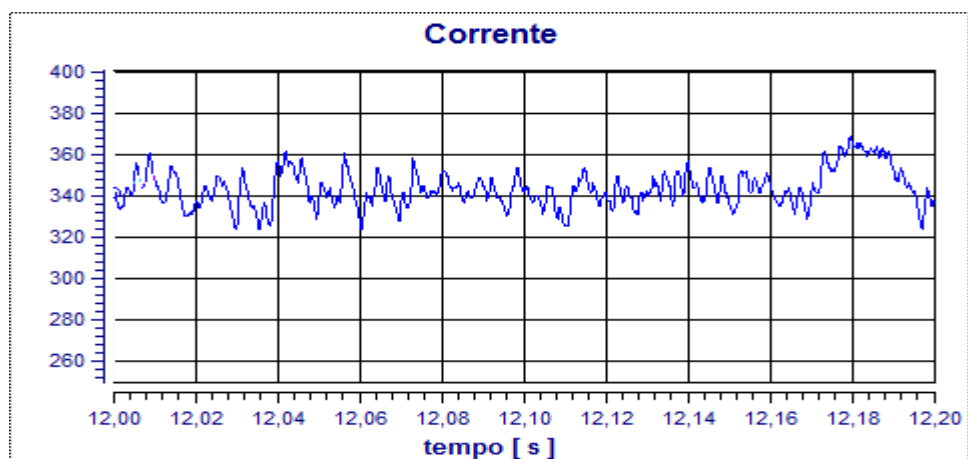


Figura 4.3 - Oscillograma da corrente para o arame tubular "metal cored" usando o Ar + CO₂

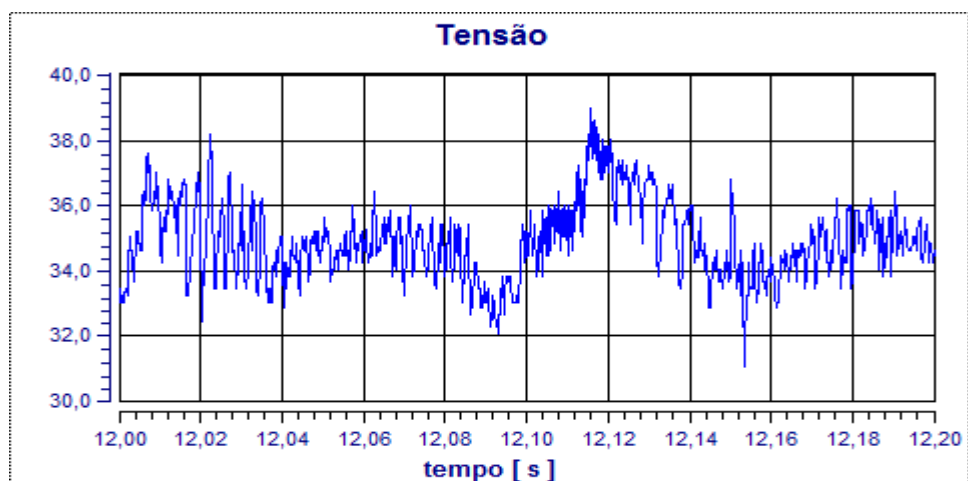


Figura 4.4 - Oscillograma da tensão para o arame tipo "metal cored" usando o 70%Ar+25%CO₂ +5%H₂

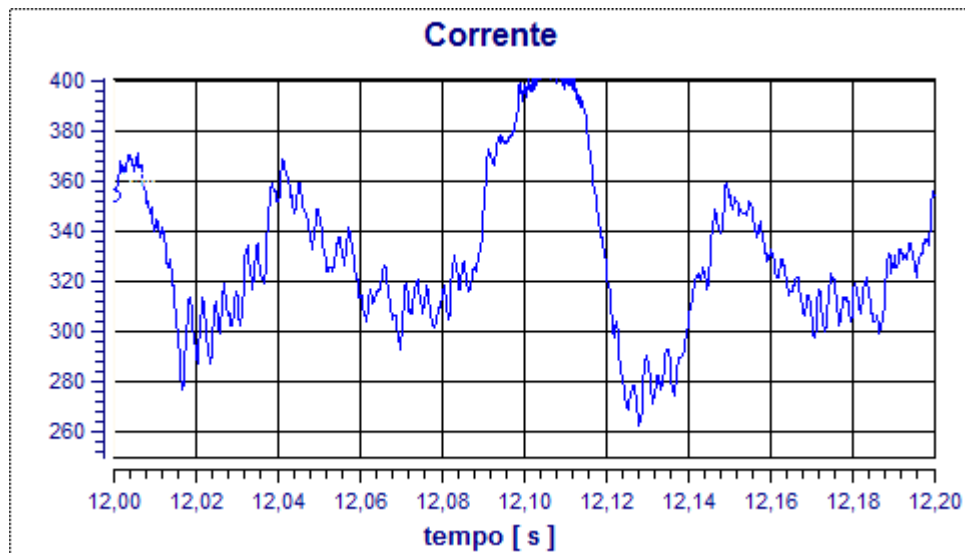


Figura 4.5 - Oscilograma da corrente para o arame tipo “*metal cored*” usando o $70\%Ar+25\%CO_2 + 5\%H_2$

4.2 - Resultados dos ensaios de tração

A realização dos ensaios de tração foi feita objetivando a obtenção de dados que possibilitassem avaliar a influência do hidrogênio adicionado ao gás de proteção sobre o comportamento da junta soldada quando submetida ao ensaio. O procedimento utilizado na realização do ensaio de tração foi descrito no item 3.11. As propriedades verificadas de interesse para análise deste trabalho definidas pela norma E8/8M-09 foram:

- Limite de resistência (L_R);
- Limite de escoamento (L_E);
- Alongamento total (ϵ).

A Figura 4.6 mostra uma macrografia de um corpo de prova após ser submetidos ao ensaio de tração. Nela podem ser observadas as diferentes regiões da junta soldada (MB, MS e ZTA). Todos os corpos de prova ensaiados tiveram o mesmo comportamento, ou seja, a fratura ocorreu sempre no metal de base. Dessa forma, todos os valores obtidos no ensaio de tração não demonstraram qualquer influência do hidrogênio presente no gás de proteção sobre a resistência a tração, limite de escoamento e alongamento da junta.

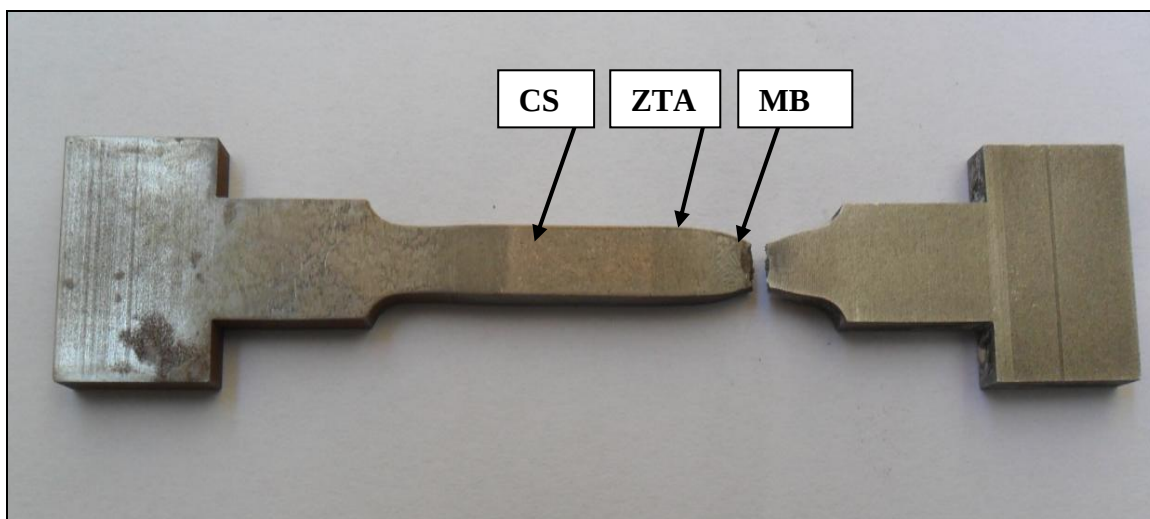


Figura 4.6 - Macrografia um corpo de prova submetido ao ensaio de tração (arame - E70C-6M; gás 70%Ar + 25%CO₂ + 5%H₂)

Todos os corpos de prova romperam no metal de base (MB), para as oito réplicas em todas as condições estabelecidas no item 3.5, demonstrando que para essa região tem-se menor resistência mecânica. Dessa forma todos os valores obtidos no ensaio de tração são atribuídos ao metal de base, que foi a região onde apresentou o fenômeno da estricção ou diminuição da seção transversal do corpo de prova. Observa-se ainda que as regiões de fraturas formaram um pescoço na região do MB, caracterizando a estricção. Esse tipo de fratura é conhecido por taça e cone e é típico de metais dúcteis. O comportamento dúctil do metal de base (MB) foi comprovado com os ensaios de charpy, demonstrando alta energia absorvida como pode se verificado na Tabela 4.6.

Como todos os corpos de provas romperam no metal de base, decidiu-se fazer mais um teste com o metal de base como fornecido pelo fabricante, utilizando o mesmo equipamento de ensaio, mesmo procedimento, como já especificado no item 3.11. Os resultados do ensaio estão mostrados na Tabela 4.2. Esse ensaio foi realizado para comparar os resultados obtidos na Tabela 4.2 e 4.3, correspondente aos ensaios realizados na junta soldada.

Tabela 4.2 - Propriedades mecânicas do aço ASTM A-36

Limite de escoamento (L _E)	Limite de resistência á tração (L _R)
312 MPa	432,5 MPa

Esse comportamento também foi verificado por Rodrigues (2011), ao realizar ensaio de tração em junta soldada de aço ASTM A-36, segundo seus resultados todos os corpos de prova romperam no metal de base (MB).

4.2.1 - Limite de resistência (LR)

A norma ASTM especifica que para o aço A-36 o valor do limite de resistência deve estar entre 400 MPa no mínimo e 550 MPa no máximo. A Tabela 4.3 mostra os resultados obtidos para os corpos de prova soldados com os arames ER70S-6 e E70C-M6, e as misturas de gases de proteção usadas.

Tabela 4.3 - Limite de resistência à tração

Gás de proteção	Limite de Resistência a Tração (L_R)			
	Arame ER70S-6		Arame E70C-6M	
75%Ar + 25% CO ₂	R1	493 MPa	R1	527 MPa
	R2	474 MPa	R2	464 MPa
	Média	484 MPa	Média	496 MPa
75%Ar + 25% CO ₂ + 5%H ₂	R1	439 MPa	R1	517 MPa
	R2	466 MPa	R2	503 MPa
	Média	452 MPa	Média	510 MPa

A análise da Tabela 4.3, verifica-se que os valores obtidos estão dentro dos estabelecidos pela norma ASTM para o aço A-36. O ensaio de tração comprovou a integridade da junta soldada, pois todos os corpos de prova romperam no metal de base, com tensão máxima de tração acima do valor mínimo permitido pela norma.

Comparando os valores quando se utiliza o hidrogênio no gás de proteção, não se observa mudança significativa na resistência mecânica da junta soldada, já que todos os corpos de prova romperam no metal de base.

As juntas soldadas mostraram-se mais resistente do que o metal de base. Esse aumento na resistência do metal de solda está de acordo com a literatura. Ordóñez (2004) apud EASTERLING (1983), explica que o aumento na resistência da solda é ocasionado pela abundância de elementos de liga do metal de solda, os quais, somados às taxas de

resfriamento rápidas que acontecem durante a soldagem, tendem a promover baixas temperaturas de transformação, gerando microestruturas mais resistentes.

4.2.2 - Limite de escoamento (L_E)

A norma ASTM especifica que para o aço A-36 o valor do limite de escoamento mínimo é de 250 MPa. A Tabela 4.4 mostra os resultados obtidos em juntas soldados em ambos os arames para cada mistura de gás estabelecida.

Tabela 4.4 - Limite de escoamento

Gás de proteção	Limite de Escoamento (L_E)			
	Arame ER70S-6		Arame E70C-6M	
75%Ar + 25% CO ₂	R1	334 MPa	R1	374 MPa
	R2	360 MPa	R2	306 MPa
	Média	347 MPa	Média	340 MPa
70%Ar + 25% CO ₂ + 5%H ₂	R1	334 MPa	R1	359 MPa
	R2	334 MPa	R2	352 MPa
	Média	334 MPa	Média	356 MPa

Ao analisar a Tabela 4.4 verifica-se que todos os valores do limite de escoamento estão acima do valor mínimo estabelecido pela norma ASTM para o aço A-36. Como a fratura ocorreu no metal de base pode ser considerado que o limite de escoamento medido corresponde ao do metal de base (MB) e não à região da junta soldada (CS e ZTA). Assim, a junta soldada não afetou limite de escoamento. Os resultados indicaram que a propriedade mecânica de limite de escoamento aumentou e a região da junta soldada mostrou ser mais resistente do que o metal de base.

4.2.3 - Alongamento total dos corpos de prova e coeficiente de estricção

O alongamento total consistir na medida da distância entre dois pontos antes e depois do ensaio no corpo de prova, ou seja, a diferença entre o comprimento final e inicial do corpo de prova. Já a estricção é a diferença entre seções iniciais e final após a ruptura do corpo de prova expressa em porcentagem da seção inicial (GARCIA, 2000).

A tabela 4.5 mostra os resultados obtidos para todas as condições do alongamento e estrição.

Tabela 4.5 - Alongamento e Estrição

Gás de proteção	Arame ER70S-6				E70C-6M			
	Alongamento (ϵ - mm)		Estrição (%)		Alongamento (ϵ - mm)		Estrição (%)	
70%Ar + 25%CO ₂	R1	6,05	R1	55,5	R1	6,10	R1	61
	R2	5,55	R2	58,0	R2	6,35	R2	63,5
	Média	5,80	Média	56,8	Média	6,22	Média	62,2
70%Ar + 25% CO ₂ + 5%H ₂	R1	6,25	R1	61,0	R1	6,1	R1	59,3
	R2	6,50	R2	62,6	R2	6,1	R2	56,5
	Média	6,15	Média	61,8	Média	6,1	Média	57,9

Ao analisar a Tabela 4.5, percebe-se que não houve uma variação significativa no valor da estrição dos corpos de provas ensaiados quando comparados a estrição do metal de base (61,5%). Já quando se analisa os resultados do alongamento não se observa variações significativas nos resultados dos corpos de prova soldados com os diferentes arames e gases de proteção. Mas quando se comparam os resultados do alongamento para os corpos de provas soldados com o resultado do alongamento para o metal de base ($\epsilon = 11$ mm) observa-se uma grande variação dos mesmos. Esse fenômeno ocorre porque a junta soldada tem influência no comportamento do alongamento do corpo de prova, o que não ocorreu nos ensaios de limite de resistência e limite de escoamento, onde o metal de base foi quem determinou as características dos ensaios.

Os valores obtidos para o alongamento estão de acordo com os resultados de Barbedo (2011), que ao realizar ensaio de tração em junta soldada de aço ASTM A-36, utilizando os arame ER70S-6 e E70C-6M com diâmetro de 1,2 mm, foram obtidos 5,2 mm de alongamento para a junta soldada com o arame ER70S-6 e 5,9 mm para a junta soldada com o arame E70C-M6.

Quanto à influência do gás de proteção no alongamento e na estrição não foram verificadas mudanças significativas quando se usou o hidrogênio no gás de proteção.

4.3. Comportamento da junta soldada quanto à tenacidade

O comportamento da tenacidade na junta, isto é, no cordão de solda (CS), na zona termicamente afetada (ZTA) e no metal de base (MB), foi analisado através do ensaio de impacto Charpy, como especificado no item 3.9. Através desse ensaio foi possível obter informações a respeito da tenacidade da junta e correlacionar a influencia do hidrogênio adicionado ao gás de proteção com a energia absorvida, além de se caracterizar os modos de fraturas da junta soldada. A Tabela 4.6 apresenta os valores da energia absorvida, obtidos para cada condição estabelecida no item 3.5.

Tabela 4.6 - Energia absorvida (Joule - J) no cordão de solda, na ZTA e no metal de base.

Gás de proteção			Arame ER70S-6				E70C-6M			
			CS		ZTA		CS		ZTA	
75%Ar + 25%CO ₂			R1	98	R1	96	R1	104	R1	100
			R2	88	R2	100	R2	100	R2	100
			Média	93	Média	98	Média	102	Média	100
70%Ar + 25% CO ₂ + 5%H ₂			R1	92	R1	90	R1	72	R1	108
			R2	84	R2	96	R2	88	R2	98
			Média	88	Média	93	Média	80	Média	103
MB	R1	156	R2	172	R3	182	R4	174	Média	171

Ao analisar a Tabela 4.6, pode ser observado que o metal de base sempre apresentou energia absorvida maior do que o cordão de solda e a zona termicamente afetada pelo calor, independentemente do tipo de arame e gás de proteção.

As medições de tenacidade apresentaram um baixo grau de dispersão, como pode ser observada Tabela 4.6. Esse comportamento da tenacidade contradiz alguns estudos (QIU *et al.*, 2000; Ordoñez (2003), obtiveram resultados com altos níveis de dispersão em ensaios de impacto Charpy de soldas. Esse comportamento da tenacidade da junta soldada deve-se provavelmente ao tipo de metal de base, tipo de metal de adição, das condições de soldagem usadas na obtenção da junta soldada e das condições de realização do ensaio Charpy.

Os menores valores de tenacidade observados na ZTA das juntas soldadas estão de acordo com os resultados de QIU *et al.* (2000) e FAIRCHILD *et al.* (1991). Esses autores afirmam que a perda na tenacidade da junta acontece mais comumente na ZTA, como

resultado do ciclo térmico induzido pela soldagem, que ocasiona crescimento de grão, afetando adversamente as propriedades mecânicas desta zona.

4.3.1. Análises estatísticas dos resultados

Com o objetivo de verificar o efeito do tipo de arame e a influência do hidrogênio contido no gás de proteção nas propriedades mecânicas da junta soldada, os resultados obtidos dos ensaios Charpy foram analisados estatisticamente por meio de uma análise de variância. A análise de variância é um teste estatístico amplamente difundido entre os analistas, e visa fundamentalmente verificar se existe uma diferença significativa entre as médias e se os fatores exercem influência em alguma variável dependente. Os fatores propostos podem ser de origem qualitativa ou quantitativa, mas a variável dependente deverá ser contínua.

Essa análise estatística tem grande importância, pois através desta é possível comprovar a validade dos resultados quanto à energia absorvida em ambas as condições estabelecidas, ou seja, a influência do gás de proteção e do tipo de arame na mesma. Os resultados obtidos consideram-se um nível de significância (α) igual a 10%. Portanto, a confiabilidade dos resultados é de 90%.

A análise de variância consistiu em calcular, a partir dos resultados das médias das energias absorvidas da ZTA e do MS, um fator F_0 para cada uma das variáveis de influência, bem como para as suas interações, e compará-lo ao valor correspondente da distribuição F que é obtido em função da confiabilidade adotada de 90%, do nível de significância do erro de 10%, do grau de liberdade, da variância do fator analisado e do grau de variância total dos resultados.

Se o fator F_0 calculado for maior do que o fator F tabelado rejeita-se a hipótese nula H_0 , ou seja, existem evidências de diferença significativa entre pelo menos um par de médias de tratamentos, ao nível de significância escolhido. Caso contrário, não se rejeita a hipótese nula H_0 , ou seja, não há evidência de diferenças significativas entre os tratamentos, ao nível de significância escolhido.

Os resultados da análise de variância são apresentados na Tabela 4.7. A análise da tabela mostra que, a hipótese nula (H_0) foi rejeitada sempre que o valor do fator F_0 calculado para cada uma das variáveis de influência e suas interações foi maior que o valor de F adotado.

Tabela 4.7 – Análise de variância para os ensaios de charpy

Metal de Solda – MS					
ANÁLISE DOS EFEITOS PRINCIPAIS DAS VARIÁVEIS DE INFLUÊNCIA					
Variável	Soma dos Quadrados (SQ)	Graus de Liberdades (GL)	Fator F Calculado	Fator F Adotado	Conclusão
Tipo de Arame (A)	263540	1	0,00917	4,54	Aceito H0
Tipo de Gás (B)	264996	1	6,6681	4,54	Rejeita H0
ANÁLISE DOS EFEITOS DAS INTERAÇÕES DAS VARIÁVEIS DE INFLUÊNCIA					
Interação	Soma dos Quadrados (SQ)	Graus de liberdades (GL)	Fator F Calculado	Fator F Adotado	Conclusão
AB	209,44	1	2,65	4,54	Aceita H0
VARIABILIDADE TOTAL DOS RESULTADOS		VARIABILIDADE DEVIDO AO ERRO			
SS _T	GL	SS _E		GL	
727,5	7	218		4	
Zona Termicamente Afetada pelo Calor – ZTA					
ANÁLISE DOS EFEITOS PRINCIPAIS DAS VARIÁVEIS DE INFLUÊNCIA					
Variável	Soma dos Quadrados (SQ)	Graus de Liberdades (GL)	Fator F Calculado	Fator F Adotado	Conclusão
Tipo de Arame (A)	310760	1	3,79	4,54	Aceito H0
Tipo de Gás (B)	310480	1	0,11	4,54	Aceito H0
ANÁLISE DOS EFEITOS DAS INTERAÇÕES DAS VARIÁVEIS DE INFLUÊNCIA					
Interação	Soma dos Quadrados (SQ)	Graus de liberdades (GL)	Fator F Calculado	Fator F Adotado	Conclusão
AB	209,44	1	1,68	4,54	Aceita H0
VARIABILIDADE TOTAL DOS RESULTADOS		VARIABILIDADE DEVIDO AO ERRO			
SS _T	GL	SS _E		GL	
182	7	76		4	

De acordo com a Tabela 4.7 pode-se afirmar que o a composição do gás, teve influência significativa na propriedade mecânica (tenacidade) do metal de solda (MS). Ainda verifica-se que o tipo de gás foi o que mais afetou na diminuição da energia absorvida, quando utiliza o hidrogênio em sua composição, com um valor F_0 calculado de 6,6681 contra um valor F adotado de 4,54.

Observa-se, na mesma tabela, que as interações com o tipo de arame e o tipo de gás utilizado não tiveram efeito significativo sobre a propriedade mecânica analisada.

Ainda segundo os resultados da análise estatística, mostrados na Tabela 4.7, pode-se observa que o tipo de arame analisado individualmente não teve influência em ambas às situações analisada, Metal de Solda (MS) e na Zona Termicamente Afetada pelo calor (ZTA). Além disso, de acordo com a análise estatística, o tipo de gás teve influencia significativa apenas no MS.

Pode ser observado na Tabela 4.6, que a junta soldada (metal de solda e ZTA) com o arame maciço (ER70S-6) apresentou um valor quantitativo menor de energia absorvida quando foi utilizado o hidrogênio no gás de proteção. O mesmo comportamento é observado quando se usou o arame “*metal cored*” (E70C-6M). No entanto, a análise estatística mostrou que apenas a MS da junta soldada com o arame E70C-6M foi fragilizada pela presença do hidrogênio no gás de proteção.

Ainda da análise dos valores apresentados na Tabela 4.6, para ZTA, pode ser observado que, apesar de temos uma diferença entre os valores, não si verifica uma mudança significativa ao compara os resultados obtidos.

Os resultados dos ensaios de charpy com a mistura de 70%Ar + 25%CO₂ + 5%H₂ forneceram subsídios para uma possível redução da ductilidade do metal de solda, uma vez que o gás de proteção interage diretamente na poça de fusão, possibilitando dessa forma maior absorção de hidrogênio pelo metal de solda e difusão do hidrogênio para a ZTA.

Para entender melhor os resultados da fragilização na junta soldada, provavelmente provocada pelo hidrogênio contido no gás de proteção, foi realizado um estudo sobre os tipos de mecanismo de fraturas obtidos nos corpos de prova submetidos ao ensaio de charpy. Para isso utilizou-se os corpos de prova com menores energias absorvidas, ou seja, réplica (R1), “*metal cored*” com Ar+CO₂+H₂, comparando com réplica (R1) “*metal cored*” Ar+CO₂ e para arame maciço réplica (R2) Ar+CO₂, comparando com replica (R2) Ar+CO₂+H₂.

As Figuras 4.7, 4.8, 4.9 e 4.10, mostram os diferentes mecanismos de fraturas observados nas juntas soldadas.

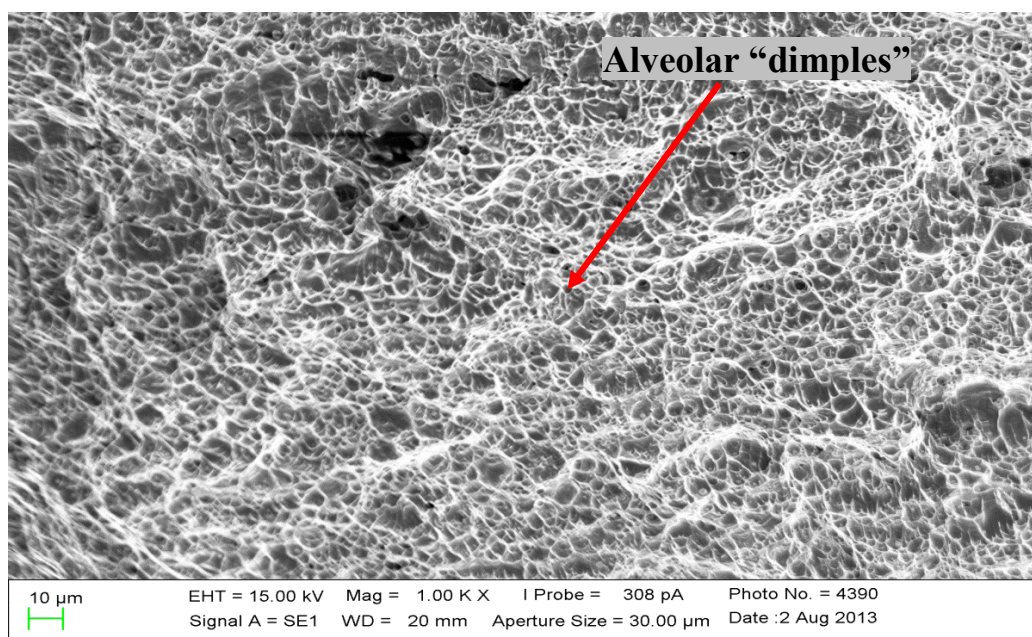


Figura 4.7 – Modo de fraturas para o arame maciço com gás de proteção 75%Ar + 25%CO₂ no CS.

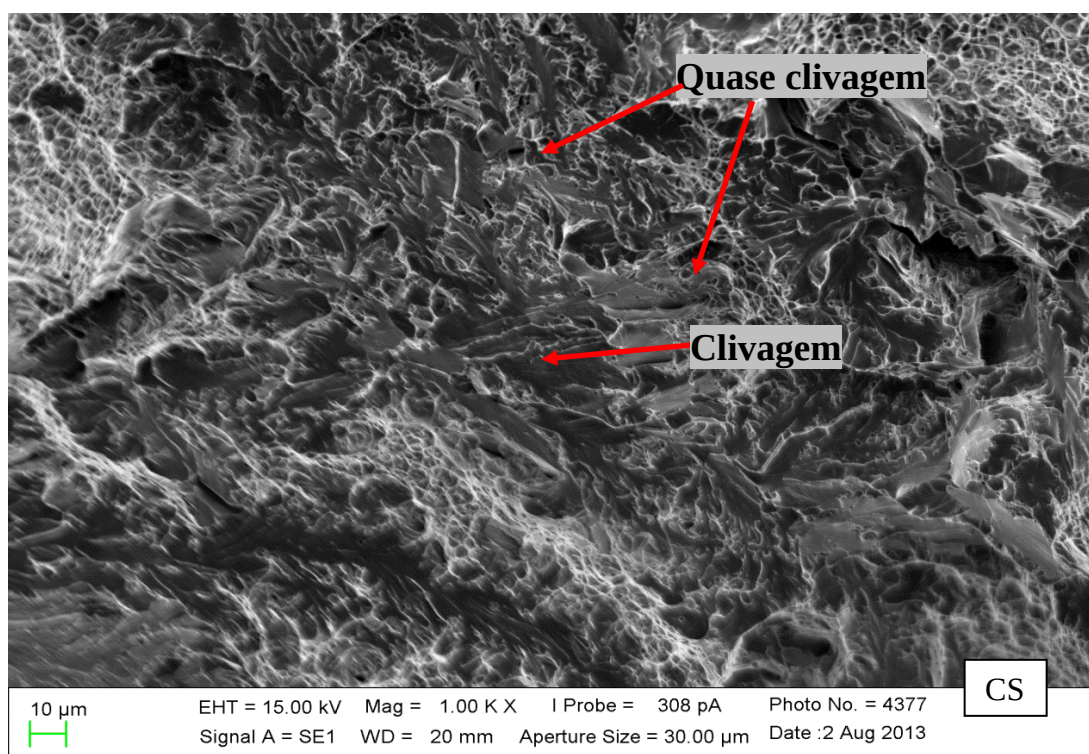


Figura 4.8 - Modos de fraturas para o arame maciço com mistura de 70%Ar+25%CO₂ +5%H₂

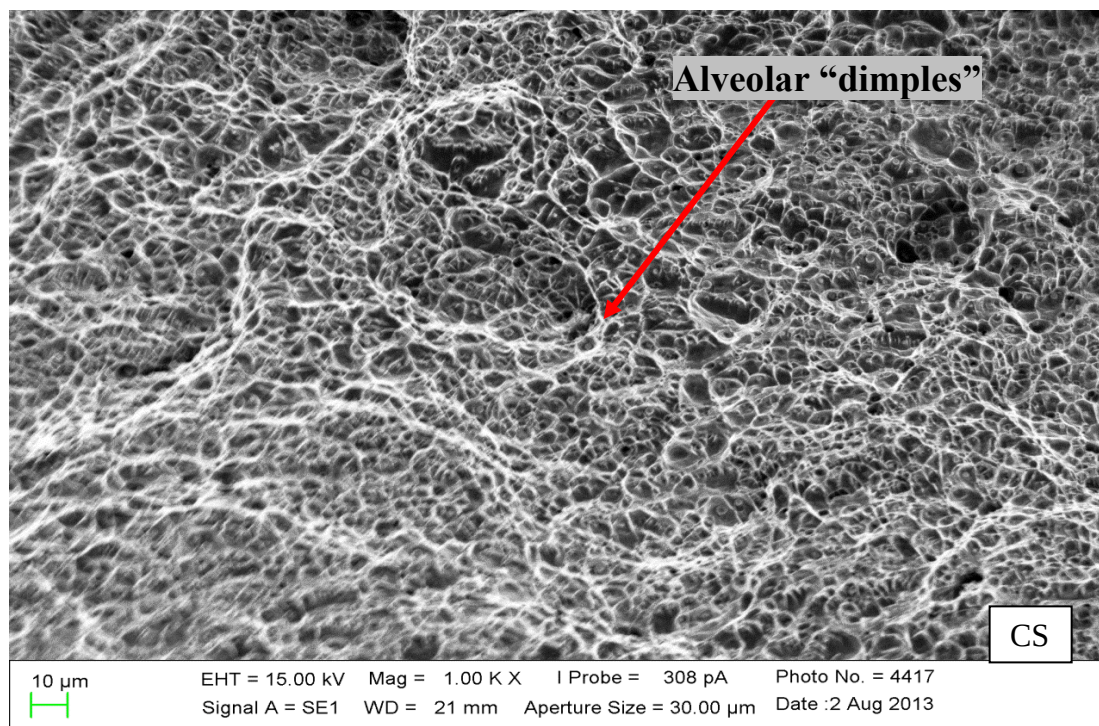


Figura 4.9: Modos de fraturas para o arame tubulares tipo “*Metal cored*” com gás de proteção 75%Ar + 25CO₂.

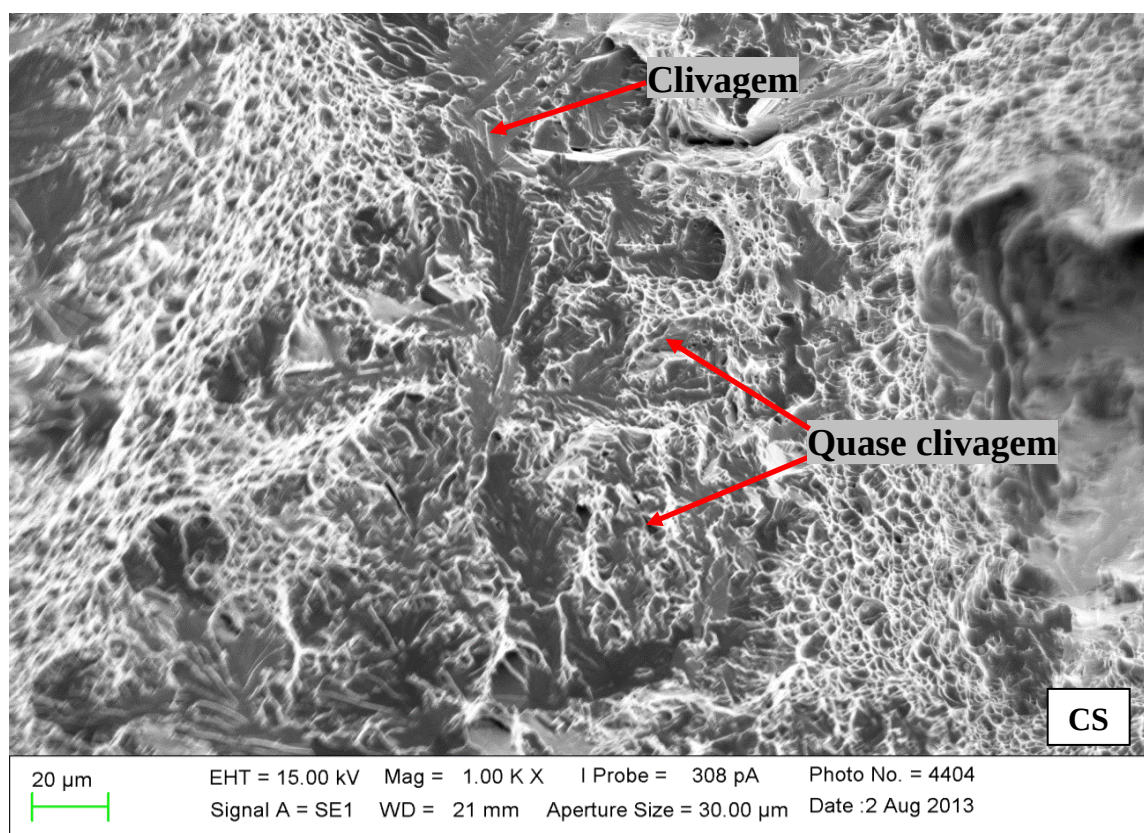


Figura 4.10: Modos de fraturas para o arame tubulares tipo “*Metal cored*” mistura de 70%Ar+25%CO₂ +5%H₂.

As fraturas obtidas por Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV) mostram a presença dos modos de fraturas por clivagem e quase-clivagem, em amostra ensaiadas com a mistura 70%Ar + 25%CO₂ + 5%H₂, para os dois arames utilizados. Este aspecto da fratura pode ser observado nas Figuras 4.8 e 4.10. O micromecanismo de fratura por clivagem representa o comportamento frágil da fratura, ou seja, ele caracteriza a baixa energia de impacto que foi absorvida pelo corpo de prova durante o ensaio, como no caso dos ensaios na região do CS, observado na tabela 4.6. Esse resultado está de acordo com a literatura. Miranda (1994) afirmou que a presença de hidrogênio no aço pode mudar o tipo de fratura de morfologia tipicamente dúctil para essencialmente frágil.

Quanto às fraturas com mistura de 75%Ar+25%CO₂ no CS, verifica-se que, para ambos os arames utilizados, o micromecanismo de fratura foi o alveolar (dimples), representando um comportamento dúctil da fratura, no entanto com maiores valores de energia absorvida. Estes aspectos das fraturas podem ser observados nas Figuras 4.7 e 4.9.

Estes resultados comprovam que o hidrogênio contido no gás de proteção fragilizou a junta soldada no metal de solda, esse mesmo efeito foi encontrado por Trevisan e Carvajal Fals (1999) ao utilizar uma mistura de CO₂+5%H₂ para induzir altos valores de hidrogênio na junta soldada. Os autores verificaram ao analisar as superfícies de fraturas na junta que foi soldada com a mistura que continha hidrogênio, a existência dos modos de fratura por MVC, QC e IG, características das trincas assistidas pelo hidrogênio.

Isso está de acordo com o que foi observado com os modos de fraturas, quando se verifica através fraturas obtidas por Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV) para o MS, micromecanismo de fraturas por clivagem(C) e quase-clivagem (QC) caracterizando um comportamento frágil da fratura, ou seja, caracteriza baixa energia de impacto quando utiliza o hidrogênio no gás de proteção.

4.4. Ensaio de dureza das juntas soldadas

A resistência mecânica de juntas soldadas pode ser determinada pelo comportamento das propriedades dos materiais que as formam. A dureza tem sido a propriedade de mais fácil obtenção e, como consequência, as medições de dureza são amplamente usadas para avaliar o comportamento mecânico de juntas soldadas para diversas aplicações na indústria.

A dureza de um metal pode ser determinada por meio de dois tipos de ensaio: microdureza e macrodureza. Inicialmente foram realizados ensaios de microdureza *Vickers*. Os resultados obtidos apresentaram um alto grau de dispersão, razão pela qual optou-se por

realizar medições de macrodureza, ou dureza *Brinell*. Os ensaios de dureza foram realizados para avaliação o comportamento das juntas soldadas. O aumento da dureza em junta soldada está relacionada à formação de fases mais duras e mais frágeis.

4.4.1 - Ensaio de microdureza

Os resultados do ensaio de microdureza estão mostrados nas Figuras 4.11 e 4.12. Nesses gráficos foram plotadas as médias de valores de cinco endentações para microdureza, começando do centro do cordão de solda (CS) até o metal de base (MB), estabelecido no item 3.12.

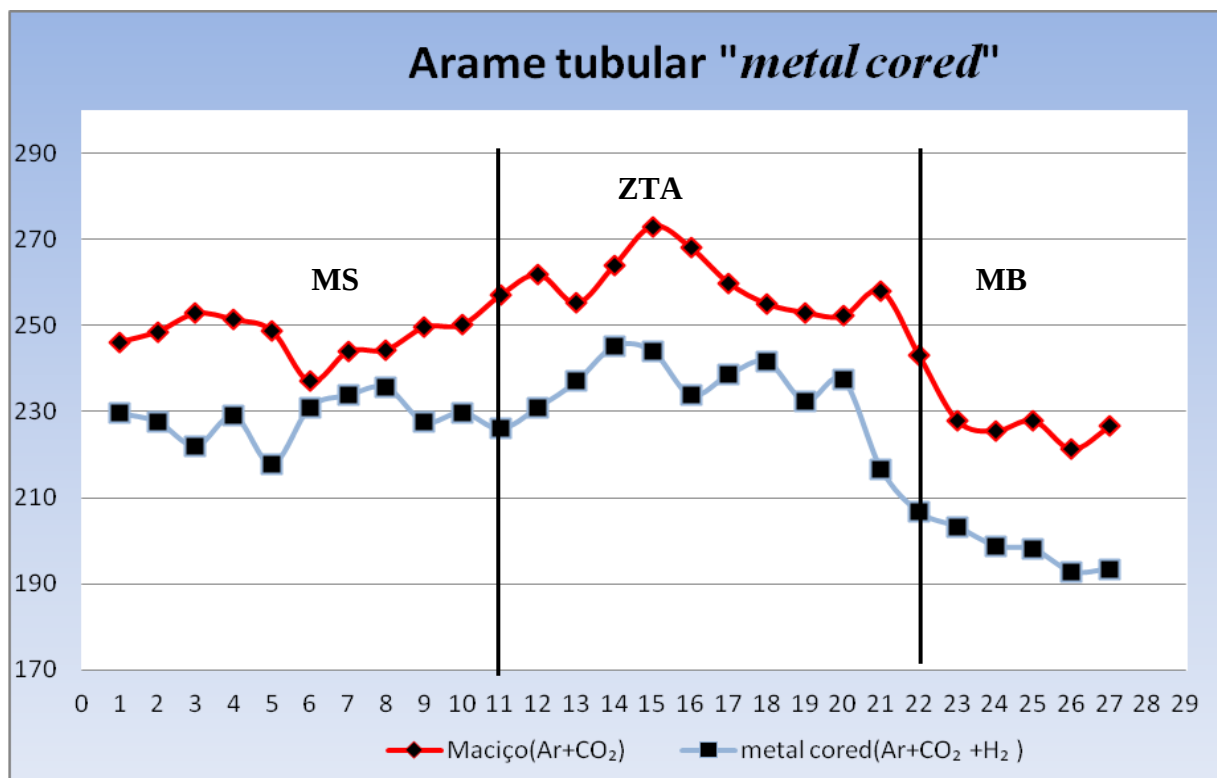


Figura 4.11- Comportamento da microdureza por regiões para o arame tubular E70C-6M

A análise da Figura 4.11 mostra que os resultados dos ensaios de microdureza apresentam certo grau de dispersão. No entanto, é possível observar uma tendência de valores médios menores de microdureza, quando foi utilizada a mistura 70%Ar+25%CO₂ +5% H₂. Ainda pode ser observado que há uma tendência dos valores da microdureza maior na zona termicamente afetada pelo calor (ZTA) do que no cordão de solda (CS) e este por sua vez

menor que o metal de base (MB). Esse comportamento da dureza como pode ser observado, é verificado para ambos os gases em cada arame utilizado.

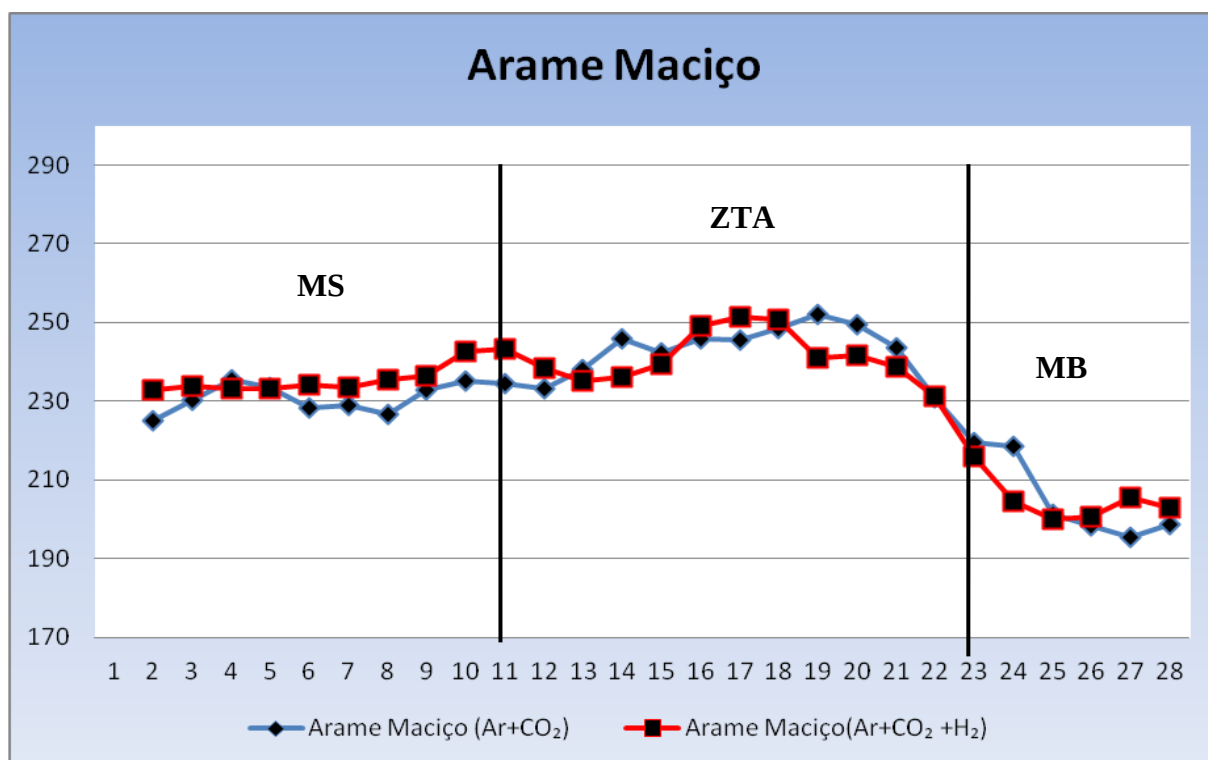


Figura 4.12 - Comportamento da microdureza por regiões para o arame Maciço ER70S-6.

A análise da Figura 4.12 mostra que os resultados dos ensaios de microdureza apresentam um baixo grau de dispersão. É possível observar que não houve uma tendência de valores médios menores de microdureza, quando foi utilizada a mistura 70%Ar+25%CO₂ +5% H₂. Ainda podem ser observado que há uma tendência dos valores para microdurezas maiores na zona termicamente afetada pelo calor (ZTA) e no cordão de solda (CS) do que no metal de base (MB).

A tendência de uma menor microdureza no metal de base (MB) é um comportamento verificado para ambos os gases em cada arame utilizado.

4.4.2. Ensaio de macrodureza

A tendência do comportamento da dureza nas diferentes regiões da junta mostrou valores diferenciados quando comparados os dois processos com ambos os gases. Com relação ao arame maciço os resultados da dureza na junta soldada tiveram um maior aumento de seu

valor médio na ZTA é bem mais significativo na ZF, quando se utilizou a mistura com hidrogênio, como pode ser observado no gráfico da figura 4.13.

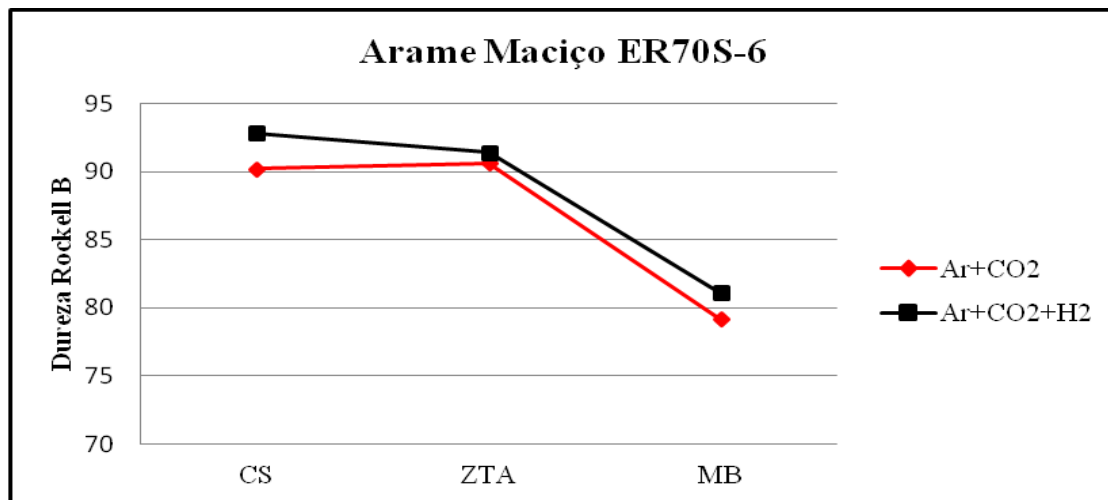


Figura 4.13. Comportamento da dureza na junta soldada com arame maciço em ambos os gases.

Esse resultado está de acordo com os obtidos por Trevisan *et al.* (1998), ao utilizar dois gases de proteção o CO₂ puro e uma mistura de CO₂ +5%H₂, os autores verificaram em seus resultados uma maior dureza nos corpos de prova soldados com o hidrogênio no gás de proteção. Os resultados mostrados no gráfico da figura 4.14, para o arame tubular tipo “*metal cored*”, apresentam valores médios de dureza na junta soldada com o hidrogênio no gás de proteção muito próximo as juntas soldadas sem hidrogênio no gás de proteção.

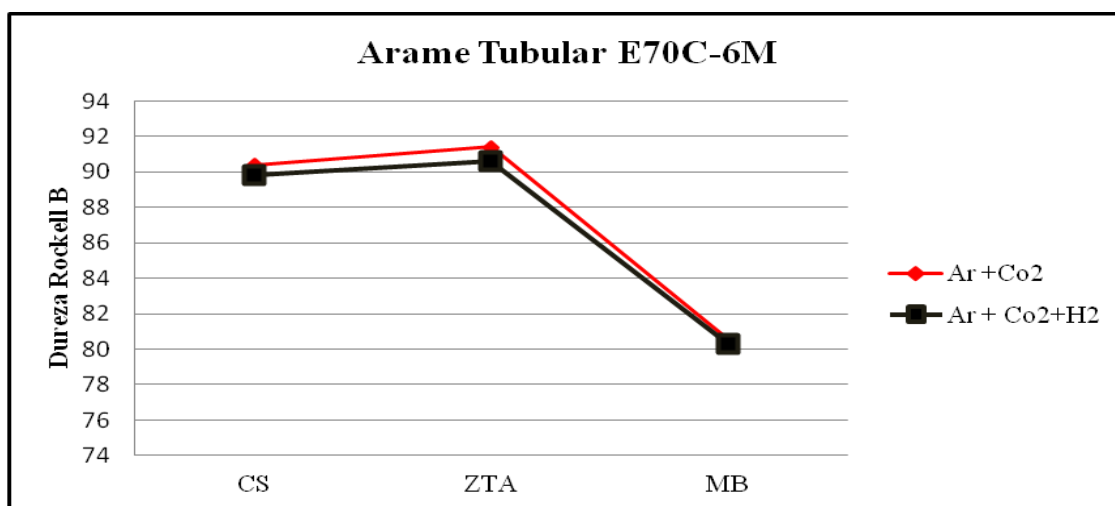


Figura 4.14. Comportamento da dureza na junta soldada com arame Tubular em ambos os gases.

Analisando o gráfico da figura 4.14, correspondente aos valores da dureza na região da junta solda, pode ser visto que não existe uma tendência clara do efeito do efeito do hidrogênio na dureza, quando utiliza o processo arame tubular (E70C-6M), uma vez que os valores evidenciados estão muito próximos.

4.4-Formação de poros na junta soldada

Todas as soldadas com a mistura 70%Ar+25%CO₂ +5%H₂ no gás de proteção, apresentaram formação bolhas no metal de solda. Foram observadas bolhas em todas as replicas para cada arame utilizado. A Figura 4.13 mostra as bolhas observadas no cordão de solda, quando foi utilizado o hidrogênio no gás de proteção para o arame maciço ER70S-6 e o arame tubular E70C-6M.

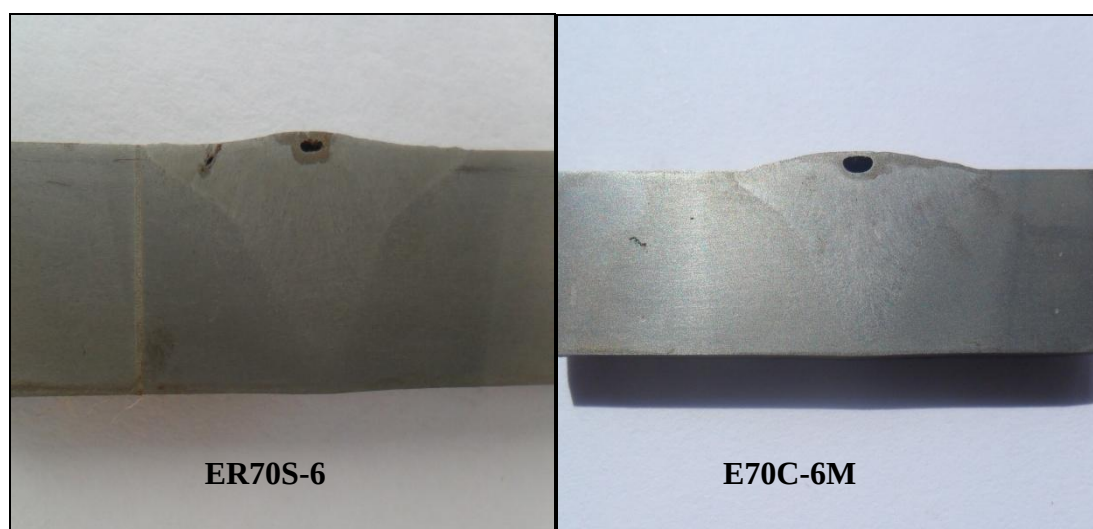


Figura 4.15 - Bolhas provocadas pela presença do hidrogênio no gás de proteção.

Segundo Hooijmans (1994), a formação de poros e bolhas em juntas soldada ocorre quando a concentração de gases dissolvidos no metal fundido excede a solubilidade do material. Esse é um fenômeno que facilmente pode ocorrer durante a soldagem. Ele pode se manifestar em duas situações diferentes: no primeiro caso, a quantidade de gás absorvido durante a soldagem excede a solubilidade no metal líquido aquecido, resultando na nucleação e crescimento de bolhas. No segundo caso, as bolhas são produzidas na frente de solidificação, devido ao fato que a solubilidade do gás no metal sólido, é muito menor do que

no metal fundido. Essa diferença de solubilidade na temperatura de solidificação resulta em um excesso de gás na região próxima da frente de solidificação. A concentração de gás nessa região adjacente à frente de solidificação aumenta e eventualmente excede a solubilidade do gás nessa temperatura, resultando em nucleação e crescimento de bolhas. Essas bolhas irão tender a subir para a superfície devido às forças gravitacionais. Entretanto, parte das bolhas pode ser retida pelo processo da frente de solidificação, o que irá resultar em poros solidificados no metal de solda.

Ainda segundo Hooijmans (1994), a tendência à formação de porosidade é dependente do material, da quantidade de hidrogênio presente no momento da solda, e também das condições experimentais, em particular a taxa de solidificação.

No entanto as verificações feitas nas juntas soldadas com gás de proteção 70%Ar + 25%CO₂ + 5%H₂, mostraram a ocorrência de bolhas no cordão de solda não dependeram do tipo de material e das condições de soldagem, uma vez que foram mantidas as mesmas condições nos dois processos de soldagem com dois arames distintos. Dessa forma, a formação de bolhas verificada é atribuída exclusivamente pela adição de hidrogênio no gás de proteção. Esse comportamento deveu-se ao fato de que o hidrogênio retido na poça de fusão não tenha conseguido sair antes da solidificação.

Vale ressaltar que quando foi utilizada a mistura 75%Ar + 25%CO₂, não foram observadas bolhas em nenhuma das amostras soldada.

CAPÍTULO V

CONCLUSÕES

Com base nos objetivos propostos, na metodologia experimental usada e nos resultados obtidos e discutidos nesta pesquisa, algumas conclusões podem ser pressupostas.

- Todos os corpos de prova no ensaio de tração tiveram o mesmo comportamento, ou seja, a fratura ocorreu sempre no metal de base independentemente do tipo de arame e gás de proteção utilizado.
- O uso do hidrogênio no gás de proteção diminuiu a tenacidade no metal solda (MS) para ambos os arames utilizados. No entanto foi mais significativo no arame tubular tipo “*metal cored*” E70C-6M.
- Na ZTA, os valores encontrados para a tenacidade não teve mudanças significativa ao compara os resultados obtidos com hidrogênio e sem hidrogênio.
- As juntas soldadas com o hidrogênio no gás de proteção apresentaram formação de bolhas no metal de solda para os dois arames.
- A análise estatística para um nível de significância de 10% comprovou que o hidrogênio contido no gás de proteção diminuiu a tenacidade do metal de solda (MS) para ambos os arames utilizado.
- O uso do hidrogênio no gás de proteção aumentou a resistência elétrica do arco diminuindo a intensidade da corrente para ambos os arames utilizados.
- A taxa de consumo (Kg/h) quando se utilizou o arame E70C-6M foi maior quando comparada com o arame ER70S-6, para a mesma energia de soldagem, independentemente do gás de proteção utilizado.

REFERÊNCIAS

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS, ASTM – E 389, 1998.

AWS, **Welding Handbook**, Miami, v. 4, 621p, 1998

ASM Handbook. **Volume 6 – Welding, Brazing and Soldering**, (1993).

ARAUJO, W. R. **Comparação entre soldagem robotizada com eletrodo sólido e metal cored – A ocorrência do finger**. 2004. 91 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Escola de Engenharia, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte.

BARBEDO, N. D. **Avaliação comparativa dos processos de soldagem GMAW e FCAW utilizando aço ASTM A-36 para verificar a soldabilidade, propriedades metalúrgicas e geométricas, e resistência mecânica**. 2011, 56 p. Dissertação (Mestrado em Projeto e Fabricação) - Instituto de Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Itajubá.

BISKUP, L. *et al.* **Process for the MIG welding of nickel and nickel alloys with a shielding gas based on argon and CO₂**. Int. Cl. B23K 9/173. US 6,596,971 B1. 6 set. 2001, 22 jul. 2003.

CAMPOS, Wagner Reis da Costa *et al.* **Caracterização microestrutural de solda dissimilar – aço inoxidável austenítico AISI 304 com adição de liga de níquel INCONEL 625**. Tecnol. Metal. Miner., São Paulo, v. 6, n. I, p. 19 - 23, jul / set. 2009.

COLPAERT, Humberto. **Metalografia dos Produtos Siderúrgicos**. 5ª Edição. Editora LTC, Rio de Janeiro, 2012.

CHIAVERINI, Vicente. **Aços e ferros fundidos: características gerais, tratamentos térmicos, principais tipos**. ABM: São Paulo, 2002.

CALLISTER, William D. **Ciência e Engenharia de Materiais: Uma introdução**. 7ª Edição. Editora LTC, Rio de Janeiro, 2012.

GARCIA, R. P., & SCOTTI, A. **Análise Comparativa da Geração de Fumos entre Arames Maciços (GMAW) e Tubulares (FCAW)**. 2010.

GARCIA, A., SPIM, J. A., & DOS SANTOS, C. A. **Ensaaios dos materiais**. Livros Técnicos e científicos. 229p. (2000).

FAIRCHILD, D.P. et al. **A study concerning intercritical HAZ microstructure and toughness in HSLA steels**. Welding Journal, v. 70, n. 12, p. 321s-329s, Dec. 1991.

HOOIJMANS, J. **Hydrogen Absorption in Iron and Steel During Gas Tungsten Arc Welding**. thesis. ed. the Netherlands: Delft Univ. Technol., 1994.

KARŠENBOJM, Savelij G. (Ed.). **The Hydrogen Atom.: Precision Physics of Simple Atomic Systems**. Springer, 2001.

MOREIRA, A. F. **Influência da atmosfera protetora no cordão de solda obtido através dos processos de soldagem GMAW e FCAW**. 2008. 147 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira, Universidade Estadual Paulista, Ilha Solteira.

MODONESI, P. J. **Soldabilidade dos aços transformáveis**. 2004. 75 p. Apostila. - Departamento de Engenharia Metalúrgica e de Materiais, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte.

MACHADO, Ivan Guerra. **Soldagem & Técnicas Conexas: Processos**. Porto Alegre. Editado pelo autor, 1996.

MARQUES, Paulo Villani; MODENESI, Paulo J. BRACARENSE, Alexandre Queiroz. **Soldagem – Fundamentos e Tecnologia**. 2ª Edição. Editora UFMG, Belo Horizonte, 2009.

MIRANDA, PEV. **"Efeitos do Hidrogênio em aços inoxidáveis austeníticos."** *Gases em Metais e Ligas. Fundamentos e Aplicações na Engenharia* (1994): 291-353.

MARCHI, C. San; SOMERDAY, B. P.; ROBINSON, S. L. **Permeability, solubility and diffusivity of hydrogen isotopes in stainless steels at high gas pressures.** *International Journal of Hydrogen Energy*, v. 32, n. 1, p. 100-116, 2007.

MONTGOMERY, D. C., & RUNGER, G. C. **applied statistics and probability for engineers**, (With CD). John Wiley & Sons. (1996).

NORRISH, J. **Advanced welding process.** Bristol: IOP, 2006. 375 p.

NIBUR, K. A.; BAHR, D. F.; SOMERDAY, B. P. **Hydrogen effects on dislocation activity in austenitic stainless steel.** *Acta materialia*, v. 54, n. 10, p. 2677-2684, 2006.

ORDÓÑEZ, Robert Eduardo Cooper. Dissertação de Mestrado, **Soldagem e caracterização das propriedades mecânicas de dutos de aços API 5L-X80 com diferentes arames tubulares.** Faculdade de Engenharia Mecânica, Universidade Estadual de Campinas, 2004.

PIRES, J. NORBERTO; ALTINO LOUREIRO; GUNNAR BÖLMSJO. **Welding Robots.** Springer, 2006.

PADILHA, A.F., **Materiais de Engenharia: Microestrutura e Propriedades**, São Paulo, Hemus Editora Ltda, 1997.

QUITES, A. M. **Metalurgia na soldagem dos aços.** Soldasoft, Florianópolis, 2008.

ROBERT W. MESSLER JR. **Principles of Welding**, 689p. 2004.

QIU, H. et al. Fracture Mechanics and Toughness of the welding heat affected zone in structural steel under static and dynamic loading. **Metallurgical and materials transactions A**, v. 31A, p. 2785-2791, nov. 2000.

RODRIGUES, Emanuel Rezende, **Influência de parâmetros do processo FCAW–G nas características da solda do Aço ASTM A-36**, 2009, Dissertação (Mestrado em Engenharia) - Programa de Pós-graduação em Engenharia Mecânica e de Materiais, Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Curitiba, 96p.

RIGDEN, JOHN S. **Hydrogen: the essential element**. Harvard University Press, 2003.

SCHWEDERSKY, M. B., & DUTRA, J. C. (2011). **Soldagem TIG de Elevada Produtividade: Influência dos Gases de Proteção na Velocidade Limite para Formação de Defeitos**. *Soldagem e Inspeção*, 16(34), 333-340.

SILVA, José Hilton Ferreira da, **Proposta de um Novo Ensaio para Avaliar a Susceptibilidade de Metais de Solda ao Fenômeno de Trincas Induzidas pelo Hidrogênio em Diferentes Ambientes**, Campinas: Faculdade de Engenharia Mecânica, Universidade Estadual de Campinas, 2005. 158p. Tese (Doutorado).

STARLING, C. M. D., MODENESI, P. J., & BORBA, T. M. D. (2011). **Caracterização do Cordão na Soldagem FCAW com um Arame Tubular" Metal Cored**. *Soldagem & Inspeção*, São Paulo, 16, 285-3

SCOTTI, A.; PONOMAREV, V. **Soldagem MIG/MAG: melhor entendimento, melhor desempenho**. 284 p., 2008. São Paulo: Artliber Editora.

SUBAN, M.; TUSEK, J. Dependence of Melting Rate in MIG/MAG Welding on the Type of Shielding Gas Used. *Materials Processing Technology*, n. 119, p. 185-192, 2001.

SCHWEDERSKY, M.B. *et al.* **Soldagem TIG de Elevada Produtividade: Influência dos Gases de Proteção na Velocidade Limite para Formação de Defeitos**. *Soldagem e Inspeção*, v. 16, n. 34, p. 333-340, 2011.

STROE, M. E. **hydrogen embrittlement of ferrous materials**. Romania: Universite Libre De Bruxelles. (2006).

SIQUARA, P. C. **Influência da Microestrutura nas Propriedades Físicas e Mecânicas de Aços 2, 25Cr-1Mo usados em Ambientes ricos em Hidrogênio.** Rio de Janeiro, RJ-Brasil: Universidade Federal do Rio de Janeiro, 2006.

TUSEK, J.; SUBAN, M. **Experimental research of the effect of hydrogen in argon as a shielding gas in arc welding of high-alloy stainless steel.** International Journal of Hydrogen Energy, n. 25, p. 369-376, 2000.

TESKE, Mário. Dissertação de Mestrado, **Influência da Composição do Gás de Proteção na Soldagem do Aço ASTM A-516 Pelo Processo GMAW.** Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Curitiba (PR). 2006.

TREVISAN, R. D. E., & FALS, H. C. (1999). **Fracture modes and acoustic emission characteristics of hydrogen-assisted cracking in high-strength low-alloy steel weldment.** *Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences*, 21(4), 675-682.

TREVISAN, Roseana da Exaltação; **Modos de Fratura no Trincamento Assistido pelo Hidrogenio em Juntas Soldadas de um Aço Microligado (HSLA-80).** Científico Nacional, 13 CBECIMAT, Vol. 1, pp.834-841, Curitiba, PR, BRASIL, 1998.

TATAGIBA, L. C. S., GONÇALVES, R. B., & PARANHOS, R. (2012). **Trends in the development of protective gases used in GMAW welding.** *Soldagem & Inspeção*, 17(3), 218-228.

TIWARI, G. P., BOSE, A., CHAKRAVARTTY, J. K., Wadekar, S. L., TOTLANI, M. K., ARYA, R. N., & FOTEDAR, R. K. (2000). **A study of internal hydrogen embrittlement of steels.** *Materials Science and Engineering: A*, 286(2), 269-281

VIANNAA, C. S., CHICOTB, D., LESAGEB, J., & DE MIRANDAA, P. E. V. (2004). **Difusão do Hidrogênio em Martensita.** *Matéria*, 9(1), 1-12.