



**I Curso de Especialização em Engenharia da Soldagem  
Turma 2011 - CTA DEMEC-TC/UFPR**

**FABRÍCIO CELINSKI**

**CARACTERIZAÇÃO DE JUNTAS SOLDADAS COM AÇO CARBONO  
ESTRUTURAL EM PROCESSO GMAW**

**CURITIBA-PR**

**2013**

FABRÍCIO CELINSKI

**CARACTERIZAÇÃO DE JUNTAS SOLDADAS COM AÇO CARBONO  
ESTRUTURAL EM PROCESSO GMAW**

Monografia apresentada como requisito parcial à obtenção do grau de Especialista em Engenharia da Soldagem do curso de Especialização em Engenharia da Soldagem da Universidade Federal do Paraná, na área de concentração fabricação.

Orientador: Prof. Dr. Ramón Sigifredo Cortés Paredes.

**CURITIBA**

**2013**


**TERMO DE APROVAÇÃO**

FABRÍCIO CELINSKI

**CARACTERIZAÇÃO DE JUNTAS SOLDADAS COM AÇO CARBONO  
ESTRUTURAL EM PROCESSO GMAW**

Monografia aprovada como requisito parcial à obtenção de grau de Especialista em Engenharia da Soldagem, área de concentração Fabricação, no Curso de Especialização em Engenharia da Soldagem, Setor de Tecnologia da Universidade Federal do Paraná.

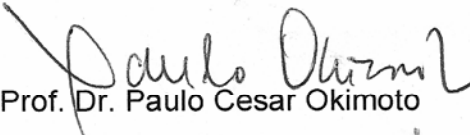
Banca Examinadora :



Prof. Dr. Hélio Padilha  
UFPR



Prof. Dr. Ramon Sigifredo Cortés Paredes  
UFPR



Prof. Dr. Paulo Cesar Okimoto  
UFPR

Curitiba, 31 de outubro de 2013.

## **AGRADECIMENTOS**

À minha família pela compreensão.

Aos professores Ramón e Okimoto pela orientação.

Às amizades realizadas no curso.

## RESUMO

O presente relatório se propõe a demonstrar algumas das diferenças e semelhanças entre juntas soldadas com aços carbono estrutural (A36) e aço estrutural de alta resistência (A572) que são largamente utilizados na construção civil. Existem várias bitolas de perfis e espessuras de chapas no mercado. Os aços de alta resistência têm sido mais utilizados nos últimos anos devido a sua redução de custo (apenas 15% mais caro), muito mais resistente e soldabilidade equivalente. Também foram avaliados os gases de proteção CO<sub>2</sub> e mistura Ar-CO<sub>2</sub>. Foi verificado que a penetração com CO<sub>2</sub> puro foi bem superior enquanto que na mistura Ar-CO<sub>2</sub> o nível de respingos foi menor e o acabamento foi superior o que torna mais indicado para carregamentos cíclicos.

PALAVRAS-CHAVE: Juntas Soldadas. GMAW. Aço Carbono Estrutural. Engenharia de Soldagem.

## **ABSTRACT**

This report demonstrate some of the differences and similarities between welds with structural carbon steels (A36) and high strength structural steel (A572) that are widely used in construction. There are several gauges of sheet thicknesses and profiles on the market. The high-strength steels have been used more in recent years due to its cost reduction (only 15% more expensive), much more sturdy and weldability equivalent.

Keywords: Welded Joints. GMAW. Carbon Steel Structural. Welding Engineering.

## LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 2.1– Barras laminadas a Quente. (g1.globo.com, 2013) .....	13
Figura 2.2 – Processo GMAW. (MODENESI, 2011) .....	14
Figura 2.3 – Esquema processo de soldagem GMAW. (SILVA, P.H.G., 2013).....	15
Figura 2.4 - Seção transversal de junta soldada indicando esquematicamente as reações químicas na soldagem a arco GMAW com gás CO <sub>2</sub> . (PAREDES, 2012) .....	16
Figura 2.5 – Geometria típica de cordões de solda GMAW com diferentes gases de proteção. (PAREDES, 2012).....	17
Figura 2.6 – Descontinuidades em soldagem GMAW: Porosidade e Respingos .....	21
Figura 2.7 – Descontinuidades em soldagem GMAW: Reforço excessivo e falta de fusão. ....	21
Figura 2.8 – Descontinuidades em soldagem GMAW: Falta de penetração e trincas. (HENRIQUES, 2006) .....	21
Figura 2.9 – Descontinuidades em soldagem GMAW: Sobreposição e mordeduras. (HENRIQUES, 2006) .....	22
Figura 2.10 - Ciclo térmico em um determinado ponto. (MODENESI, 2011) .....	23
Figura 2.11 - Seção transversal de junta soldada indicando esquematicamente as principais regiões da junta soldada e ciclo térmico. (MODENESI, 2011) .....	24
Figura 2.12 – Exemplo de placa de teste Fonte: (AWS D1.1.; 2010) .....	25
Figura 3.1 – Junta preparada para receber solda. ....	26
Figura 3.2 – Origo MIG 408T, equipamento utilizado. ....	27
Figura 3.3 – Processo de soldagem das chapas a 300A.....	28
Figura 4.1 – Juntas soldadas 1, 2, 3 e 4 (após corte) em A36 com Correntes de 150A, 200A, 250A e 300A respectivamente.....	30
Figura 4.2 – Macrografia das juntas em A36, gás de proteção CO <sub>2</sub> com correntes de 300A, 250A, 200A e 150A respectivamente. ....	31
Figura 4.3 – Macrografia das juntas em A572, gás de proteção CO <sub>2</sub> com correntes 300A, 250A, 200A e 150A respectivamente.....	31
Figura 4.4 – Macrografia das juntas em A572, gás de proteção mistura 15%CO <sub>2</sub> com correntes de 150A, 200A, 250A e 300A respectivamente. ....	32

## LISTA DE TABELAS

TABELA 3.1 – PARÂMETROS DE SOLDAGEM UTILIZADOS .....	28
TABELA 3.2 – PARÂMETROS DE SOLDAGEM UTILIZADOS. ADAPTADO DE MENDES, 2011.....	29
TABELA 4.1 – PARÂMETROS DE SOLDAGEM COMPARADOS COM A EPS. ADAPTADO DE MENDES, 2011. ....	33

## **LISTA DE ABREVIATURAS OU SIGLAS**

UFPR - Universidade Federal do Paraná

AWS – American Welding Society

GMAW – Gas Metal Arc Welding

GTAW – Gas Tungsten Arc Welding

ASTM - American Society for Testing and Materials

MIG – Metal Inert Gas

MAG – Metal Active Gas

TIG – Tungsten Inert Gas

EPS – Especificação de Procedimento de Soldagem

## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO</b> .....	11
<b>2</b>	<b>REVISÃO BIBLIOGRÁFICA</b> .....	13
2.1	AÇOS BAIXO CARBONO .....	13
2.2	PROCESSO GMAW (MIG/MAG) .....	13
2.2.1	<i>Gás de Proteção</i> .....	15
2.2.1.1	<i>Atmosfera protetora CO<sub>2</sub></i> .....	16
2.2.1.2	<i>Atmosfera protetora Mistura Ar-CO<sub>2</sub></i> .....	18
2.2.2	<i>Modos de Transferência Metálica</i> .....	18
2.2.3	<i>Arame Consumível</i> .....	19
2.2.4	<i>Descontinuidades em soldagem GMAW</i> .....	20
2.3	METALURGIA DA SOLDAGEM .....	22
<b>3</b>	<b>MATERIAIS E MÉTODOS</b> .....	26
3.1	PREPARAÇÃO DAS JUNTAS .....	26
3.2	EQUIPAMENTO UTILIZADO .....	27
3.3	CONSUMÍVEIS .....	27
3.4	CONDUÇÃO DO PROCESSO DE SOLDAGEM .....	27
3.5	ENSAIO MACROSCÓPICO .....	29
<b>4</b>	<b>RESULTADOS E DISCUSSÃO</b> .....	30
4.1	ENSAIO VISUAL E DIMENSIONAL DE SOLDA .....	30
4.2	ENSAIO MACROGRÁFICO .....	31
4.3	COMPARAÇÃO COM A EPS .....	32
<b>5</b>	<b>CONCLUSÕES</b> .....	35
	REFERÊNCIAS .....	36

## 1 INTRODUÇÃO

A construção de edifícios com estruturas metálicas já é conhecida a muitos anos. No Brasil esta tecnologia é utilizada em plantas industriais, mineradoras, petroquímicas, refinarias, galpões em geral, etc., porém quando se trata de edifícios residenciais e comerciais ainda é muito pouco empregada.

Para a escolha do material a ser empregado é necessário verificar: localização do empreendimento (meio ambiente), comportamento estrutural (geometria e esforços solicitantes), atmosfera seja por proximidade do mar ou meio industrial agressiva e disponibilidade de manutenção futura.

Ou seja, condições ambientais agressivas exigem a utilização de aços de adequada resistência mecânica e alta resistência a corrosão. Peças que são comprimidas ou fletidas onde o perfil é muito esbelto faz com que seja determinante o emprego de aços de média resistência mecânica. Em casos onde a deformação não é importante e sem o desgaste é mais econômica a utilização de aços de alta resistência. Logicamente que existem casos específicos que devem ser analisados separadamente.

Os materiais mais empregados atualmente são: ASTM A-36 (média resistência para uso geral), ASTM A-242 (baixa liga de alta resistência resistente a corrosão atmosférica), ASTM-588 (baixa liga de alta resistência resistente a corrosão atmosférica) e ASTM-572 (baixa liga de alta resistência). Sendo que nos projetos estruturais, uma boa parte da construção estrutural é realizada utilizando a Soldagem como processo de união de acordo aos projetos especificados.

No Brasil as metalúrgicas de construção e montagem utilizam, em sua maioria, e para construção civil, os processos de soldagem com eletrodo revestido (SMAW) e o com proteção gasosa MIG/MAG (GMAW).

No processo GMAW é utilizado como gás de proteção misturas de argônio com CO<sub>2</sub> ou somente CO<sub>2</sub>. As pequenas e médias metalúrgicas tem preferido a utilização de CO<sub>2</sub> puro por causa do menor custo e retrabalho e também porque pode ser uma boa escolha em espessuras menores. Como metal de adição tem-se utilizado em maior escala o arame ER70S-6. Esta escolha também é dada pelo menor custo e pela maior ação desoxidante.

Foi procurado neste trabalho, por conta dos motivos acima comentados, utilizar os materiais citados nas condições encontradas nas indústrias de menor porte e verificar se (nestas condições) pode-se encontrar juntas com qualidade

próxima a esperada de acordo com a literatura, quando utilizadas diferentes condições de soldagem.

Neste projeto tem como objetivo realizar uniões soldadas para simular uma situação corriqueira nas praticas de soldagem em pequenas e médias industrias metalúrgicas, com juntas de chanfro reto, sem limpeza (oxidada) com carepa destacando (grau de intemperismo B), processo GMAW (MIG/MAG), arame ER70S-6 (mais utilizado nas metalúrgicas de construção civil), gás de proteção CO<sub>2</sub> (mais utilizados nas metalúrgicas de pequeno e médio porte) e materiais de base A36 e A572.

Confeccionadas as juntas, procurou-se avaliar as juntas com ensaio de macrografia, verificando a presença de descontinuidades ou outras particularidades, para duas condições de soldagem.

## 2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

### 2.1 AÇOS BAIXO CARBONO

O tipo de aço mais produzido é o baixo carbono: com teor de carbono inferior a 0,25% de carbono. Estes aços possuem baixa dureza, baixa resistência e alta ductibilidade e tenacidade. Não se consegue aumento de resistência significativo com tratamento térmico e sim com trabalho a frio. Possuem melhor usinabilidade, soldabilidade e menor custo de produção que os demais aços. Normalmente possuem limite de escoamento de 275MPa, limite de resistência a tração entre 415 e 550MPa e ductibilidade de 25% (CALLISTER, 2008).

Aços de alta resistência possuem outros elementos de liga como cromo, vanádio, níquel, molibdênio e possuem resistência superior aos aços baixo carbono comuns. Ambos são dúcteis, conformáveis e usináveis. Em casos onde a resistência estrutural é um fator crítico, os aços de alta resistência substituem os aços carbono comuns. E em atmosferas normais possuem maior resistência à corrosão (CALLISTER, 2008).



Figura 2.1– Barras laminadas a Quente. (g1.globo.com, 2013)

### 2.2 PROCESSO GMAW (MIG/MAG)

É o processo de soldagem que utiliza um arco elétrico para aquecer e fundir o arame de solda (que é consumível e eletrodo) e o metal de base (junta a ser

soldada). A proteção da poça de fusão e do arco elétrico é exercida por um gás de proteção (ou mistura de gases) conforme FIGURA 2.2 abaixo. Se o gás for ativo o processo se chama MAG e se o gás for inerte chama-se MIG (MODENESI, 2011).

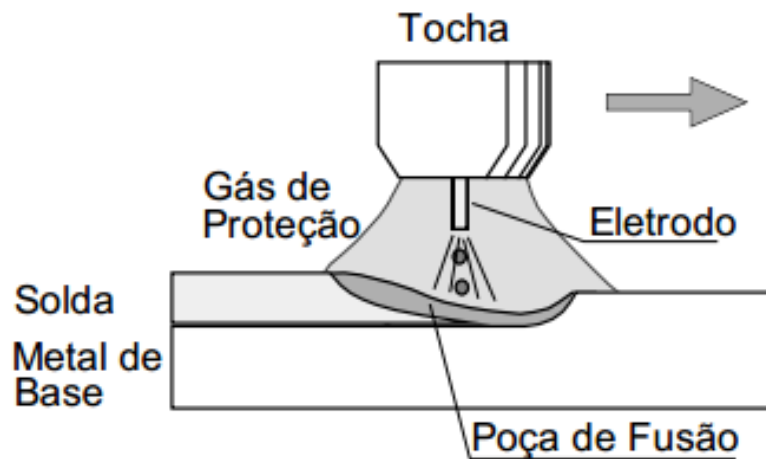


Figura 2.2 – Processo GMAW. (MODENESI, 2011)

Apresenta alta produtividade e é considerado semiautomático, devido a que a alimentação de arame é automática. Vários são os parâmetros operacionais: corrente, polaridade, diâmetro do arame, composição do arame, composição do gás de proteção e distância tocha a poça. As alterações destes parâmetros definem o modo de transferência do metal fundido para a junta. Os três modos básicos de transferência metálica são: spray, globular e curto circuito (ver item 2.2.2 para mais detalhes).

O equipamento consiste de: tocha para soldagem, fonte de energia de corrente constante, fonte de gás e alimentador de arame (MODENESI, 2011). Segue esquema abaixo na Figura 2.3 indicando as principais partes do equipamento.

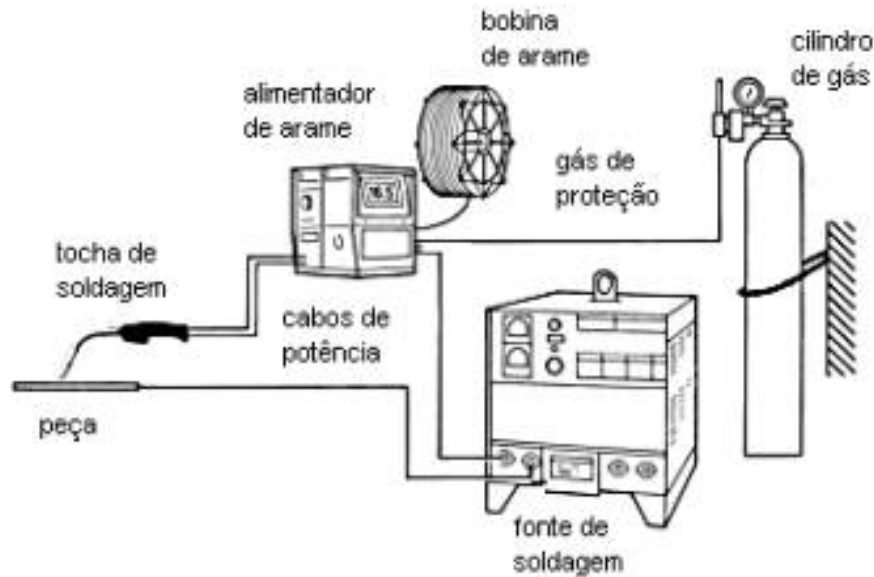


Figura 2.3 – Esquema processo de soldagem GMAW. (SILVA, P.H.G., 2013)

### 2.2.1 Gás de Proteção

A utilização do Argônio puro para soldas de aço carbono pode produzir grande quantidade de respingos e provocar mordeduras. Adição de  $O_2$  ou  $CO_2$  pode reduzir estes problemas. Frequentemente solda-se aços baixo carbono e baixa liga com  $CO_2$  como gás de proteção, as vantagens encontradas são: maior velocidade de soldagem, maior penetração e baixo custo.

Por outro lado  $CO_2$  puro produz alto nível de respingos e uma baixa tensão é usada para manter o arco menor e minimizar o salpico, deixando a ponta do eletrodo abaixo da superfície da peça (KOU, 2003).

No processo de soldagem a arco MAG é utilizada proteção gasosa que alimentada até a pistola de soldagem por meio de mangueiras ligadas a uma central de gás ou cilindros. O gás de proteção estabiliza o arco, protege a poça de fusão e, portanto protege o metal de solda. O gás também interfere na geometria do cordão de solda e nas propriedades mecânicas (PAREDES, 2012).

Os gases de proteção podem ser classificados como ativos ou inertes:

a) Gases inertes são aqueles que não reagem quimicamente para formar outras substâncias. Normalmente são utilizados por processos GTAW (TIG) ou GMAW (MIG) com metais não ferrosos. Exemplos de gases inertes são Argônio e Hélio com pequenas quantidades de  $CO_2$  ou  $O_2$ .

b) Os gases ativos reagem quimicamente com o metal de solda e dividem-se entre oxidantes ou redutores. Os oxidantes contêm oxigênio e os redutores reagem com o oxigênio. Exemplo de gás ativo é o  $\text{CO}_2$ . Também é comum encontrar mistura de gases como  $\text{CO}_2 + 5\%$  de  $\text{O}_2$ , Argônio + 15% a 30% de  $\text{CO}_2$ , Argônio + 5 a 15% de  $\text{O}_2$  ou Argônio + 25 a 30% de  $\text{N}_2$ .

O gás escolhido é uma variável essencial o que significa que se a mistura de gases for alterada em 1% nova qualificação é requerida (AWS D1.1:2010). Isso indica que a composição do gás é um parâmetro que pode influenciar fortemente nas características da junta soldada.

### 2.2.1.1 Atmosfera protetora $\text{CO}_2$

As reações químicas presentes nesta região são: o dióxido de carbono dissocia-se em monóxido de carbono e oxigênio ( $\text{CO}_2 \rightarrow \text{CO} + \frac{1}{2} \text{O}_2$ ), o oxigênio formado nesta primeira reação combina-se com o ferro para formação de monóxido de ferro ( $\text{Fe} + \frac{1}{2} \text{O}_2 \rightarrow \text{FeO}$ ). Por outro lado o monóxido de ferro ( $\text{FeO}$ ) reage na poça de fusão ( $\text{FeO} + \text{C} \rightarrow \text{Fe} + \text{CO}$ ). Segue esquema destas reações químicas na Figura 2.4.

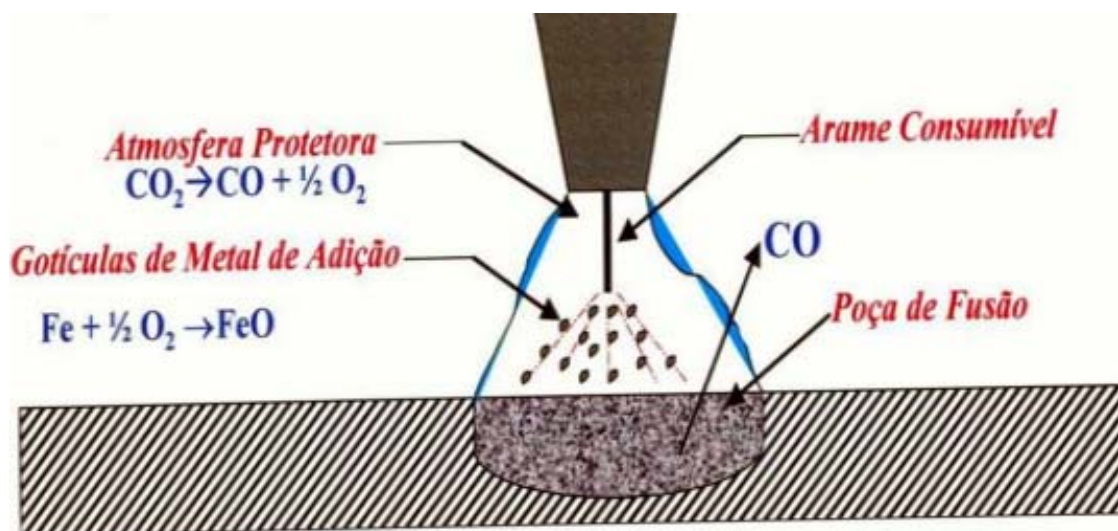


Figura 2.4 - Seção transversal de junta soldada indicando esquematicamente as reações químicas na soldagem a arco GMAW com gás  $\text{CO}_2$ . (PAREDES, 2012)

O monóxido de carbono pode não ter tempo suficiente para sair da poça de fusão gerando porosidade no cordão de solda. A presença de elementos

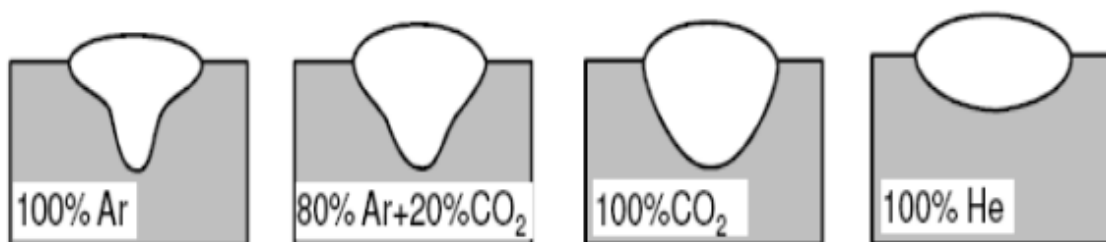
desoxidantes como silício e manganês pode resolver este problema reagindo com o oxigênio ( $\text{FeO} + \text{Mn} \rightarrow \text{Fe} + \text{MnO}$ ) ou ( $2\text{FeO} + \text{Si} \rightarrow 2\text{Fe} + \text{SiO}_2$ ), solidificando e vitrificando na superfície do cordão de solda. Porém o excesso destes elementos desoxidantes pode endurecer demais o material e facilitar a ocorrência trincas (PAREDES, 2012).

O dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ) apresenta baixo custo, pois na fabricação é realizada a partir da reação de combustão. É muito utilizado na solda GMAW tanto puro como em misturas. É utilizado puro nas soldas de aço baixo carbono. É oxidante e não pode ser utilizado com materiais reativos.

Não é aconselhado utilizar na solda de aços inoxidáveis devido a presença de carbono. É considerado um gás “quente” por causa da sua maior capacidade de transferir calor para o metal de base. Necessita de uma tensão maior para manter a estabilidade do arco, evitando respingos e falta de penetração. O potencial de oxidação favorece a uma penetração maior, mas ao contrario traz uma tensão superficial indesejada na superfície. Esta tensão superficial ajuda na transferência por curto circuito, mas dificulta na goticular.

A característica de um cordão soldado com  $\text{CO}_2$  é de um acabamento irregular com muitos respingos e fumos.

A geometria esperada de um cordão soldado com  $\text{CO}_2$  é a de um formato de prato fundo conforme mostrado na Figura 2.5. Não é esperado um formato raso ou formato de cálice como encontrado soldas com outros gases.



**Figura 2.5 – Geometria típica de cordões de solda GMAW com diferentes gases de proteção. (PAREDES, 2012)**

### 2.2.1.2 Atmosfera protetora Mistura Ar-CO<sub>2</sub>

Quase sempre com a proporção de CO<sub>2</sub> inferior a 25% e para soldagens de aços baixo carbono a mistura diminui a quantidade de respingos que com CO<sub>2</sub> puro. Podem ser classificadas em três faixas de composição. Entre 18% e 25% de CO<sub>2</sub>: normalmente em modo curto circuito e em chapas superiores a 6mm. Entre 8% e 15% de CO<sub>2</sub>: recomendada para chapas mais finas, menores que 3mm, e em curto circuito (goticular também é possível). A Outra faixa é 3% a 5% de CO<sub>2</sub>: para chapas muito finas, menores que 1mm, e também para aços inoxidáveis.

Como a corrente de transição é mais alta para gases de proteção mistura Ar-CO<sub>2</sub> é possível trabalhar com corrente um pouco maior sem que haja instabilidade do arco.

Com 11-21% de CO<sub>2</sub> é normalmente empregado com chanfro estreito, soldagem fora de posição, chapas finas e alta velocidade. Com esta faixa é possível maximizar a produtividade aumentando a velocidade de soldagem e a taxa de deposição sem furar a peça (PAREDES, 2012).

### 2.2.2 Modos de Transferência Metálica

O metal fundido que se desprende do arame pode ser transferido para a poça de solda por três modos básicos: globular, spray e curto circuito:

- A. Transferência Globular: o metal desce com diâmetro próximo ou maior que o diâmetro do eletrodo sendo que é mais influenciada pela abertura do arco e menos pela gravidade. Transferência globular normalmente não é suave e produz respingo. Com corrente relativamente baixa a transferência globular ocorre independentemente do gás.
- B. Transferência Spray: a um nível crítico de corrente, pequenas porções de metal descem através do arco com a influência da força eletromagnética a uma frequência mais alta que do modo globular. Transferência de metal é muito mais estável e não há respingo. A corrente crítica depende do material, do tamanho e composição do eletrodo e do gás de proteção.

- C. Transferência por Curto Circuito: O metal fundido é transferido do eletrodo para a poça de fusão quando o metal toca a superfície da poça. Ou seja um curto circuito ocorre. Transferência por curto circuito abrange a menor gama de correntes e diâmetros de eletrodo. Isso produz um pequena e rápido esfriamento da poça de fusão o que é desejável em pequenas espessuras, solda fora de posição (exemplo: sobrecabeça) e grande abertura de raiz (KOU, 2003).

### 2.2.3 Arame Consumível

O arame de solda GMAW mais utilizado no Brasil é o ER70S-6. Normatizado de acordo com a norma AWS A5.18 apresenta composição química: C: 0,06 a 0,15; Si: 0,8 a 1,15; Mn: 1,4 a 1,85; P: 0,025 máx.; S: 0,035 máx e Cu: 0,5 máx.

Indicado para a soldagem dos aços ao carbono em geral: ASTM A36, A285-C, A515-60, A516-55/60, SAE1010, 1020, etc.

Pode ser utilizado em todas as posições de soldagem podendo soldar em passes simples ou múltiplos, em chapas finas (indústria automotiva e linha branca) e chapas grossas (calderaria, industria naval e estruturas metálicas). Pode ser utilizado em praticamente todas as aplicações de soldagem GMAW de aços ao carbono.

Os elevados teores de manganês e silício destes arames melhoram a desoxidação do metal de solda quando soldados sobre materiais com moderada oxidação superficial mesmo com elevadas correntes de soldagem e com qualquer gás de proteção.

Tem como característica a composição química dos arames para soldagem proporciona excelente desoxidação resultando em soldas com bom acabamento superficial, ótimas propriedades mecânicas baixo nível de respingos e excelente sanidade radiográfica. Os arames possuem revestimento de cobre, delgado e aderente, garantindo ótima alimentação de arame e baixo desgaste do bico de contato, além de boa proteção contra oxidação do arame na bobina. (BELGO BEKAERT, 2010).

#### 2.2.4 Descontinuidades em soldagem GMAW

Segue abaixo as principais descontinuidades de soldagem encontradas em soldagem GMAW (FBTS, 2013):

- a) **Porosidade:** Utilizando CO<sub>2</sub> como gás de proteção e quando a velocidade de solidificação aumenta e, portanto, maiores velocidades de soldagem, torna-se maior a chance de aparecimento de porosidades.  
O gás de proteção pode causar porosidade se estiver contaminado ou se utilizado com vazão insuficiente ou muito alta. Se a vazão estiver alta o gás pode provocar turbulências e trazer o ar atmosférico para junto da poça de fusão que contém oxigênio e nitrogênio. Isto pode acarretar em porosidade no metal de solda. Falta de limpeza também pode gerar poros na solda.
- b) **Falta de fusão:** Pode ocorrer por causa da utilização de parâmetros de solda indevidos como: baixa corrente, alta tensão ou velocidade de soldagem alta.
- c) **Falta de penetração:** pode ocorrer com a transferência curto circuito.
- d) **Inclusão de escória:** Ocorre quando há problemas na proteção da poça de fusão. Durante a desoxidação, por alguma maneira, deveriam ir para a superfície da poça de fusão acabam ficando aprisionados dentro do metal de solda. Ocorre com mais frequência com atmosfera ativa e com eletrodos com altos teores de manganês e silício especialmente quando não há limpeza correta interpasses.
- e) **Mordeduras:** Normalmente associadas erro do soldador ou alta corrente.
- f) **Sobreposição:** Ocorre com mais frequência com a transferência curto circuito.
- g) **Trincas:** Erro do soldador e/ou altos teores de silício e manganês do arame de solda.

- h) **Lascas, dobras, duplas laminações e trinca interlamelar:**  
Podem ocorrer em peças com alto grau de restrição.

Seguem abaixo esquematizadas as principais discontinuidades encontradas em soldagem GMAW.



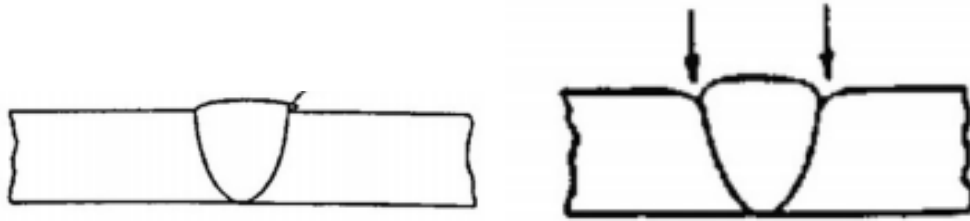
Figura 2.6 – Descontinuidades em soldagem GMAW: Porosidade e Respingos  
(HENRIQUES, 2006)



Figura 2.7 – Descontinuidades em soldagem GMAW: Reforço excessivo e falta de fusão.  
(HENRIQUES, 2006)



Figura 2.8 – Descontinuidades em soldagem GMAW: Falta de penetração e trincas.  
(HENRIQUES, 2006)



**Figura 2.9 – Descontinuidades em soldagem GMAW: Sobreposição e mordeduras. (HENRIQUES, 2006)**

## 2.3 METALURGIA DA SOLDAGEM

### 2.3.1 Ciclo térmico

A variação de temperatura ao longo do tempo em um determinado ponto em uma junta soldada é chamada de Ciclo Térmico de Soldagem (Figura 2.10). Em cada ponto existe um ciclo térmico distinto. Os pontos principais de um ciclo térmico são (MODENESI, 2011):

a. Temperatura de Pico ( $T_p$ ): É a maior temperatura atingida em um determinado ponto do cordão de solda. Depende da característica do material de base, parâmetros de soldagem, geometria, temperatura inicial e posição do ponto em relação ao cordão.

b. Tempo de permanência ( $T_c$ ): É o tempo que um determinado ponto permanece acima da temperatura crítica, onde pode haver crescimento de grão e/ou dissolução de precipitados.

c. Velocidade de resfriamento ( $\theta$ ): É dada pela inclinação da curva do ciclo térmico e é importante para determinar os constituintes finais de da microestrutura.

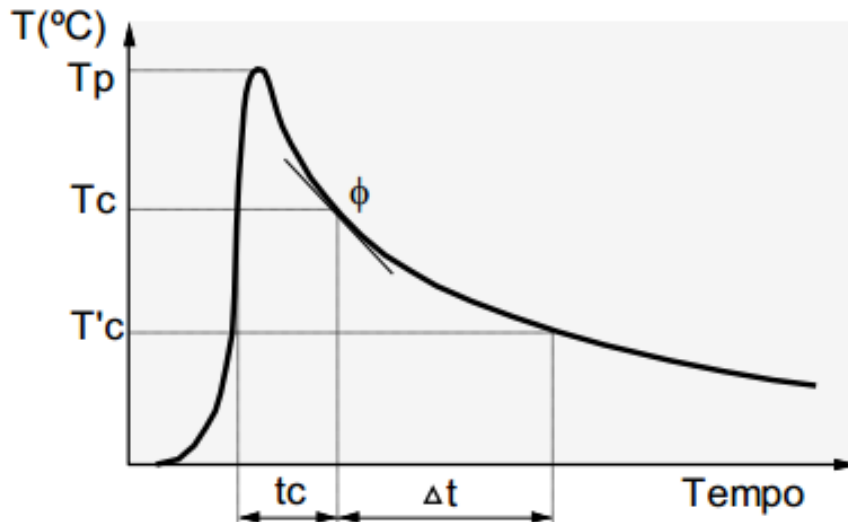


Figura 2.10 - Ciclo térmico em um determinado ponto. (MODENESI, 2011)

### 2.3.2 Macroestrutura

Quando uma solda é realizada, as regiões da solda e das vizinhanças são submetidas a diferentes ciclos térmicos. A temperatura de pico ocorre na região central do cordão e decresce quanto se afasta. O material é alterado metalurgicamente ao longo da seção transversal. Em uma solda por fusão são encontradas três regiões distintas (MODENESI, 2011):

- a. Zona fundida: Região onde houve fusão do material de base juntamente com o metal de adição. Temperatura de pico superior a temperatura de fusão.
- b. Zona Termicamente Afetada (ZTA): Região do metal de base que atingiu a temperatura crítica, mas não chegou a fundir o material.
- c. Metal Base (MB): Região do metal de base que estando mais afeta não foi alterada metalurgicamente.

Seguem regiões conforme Figura 2.11:

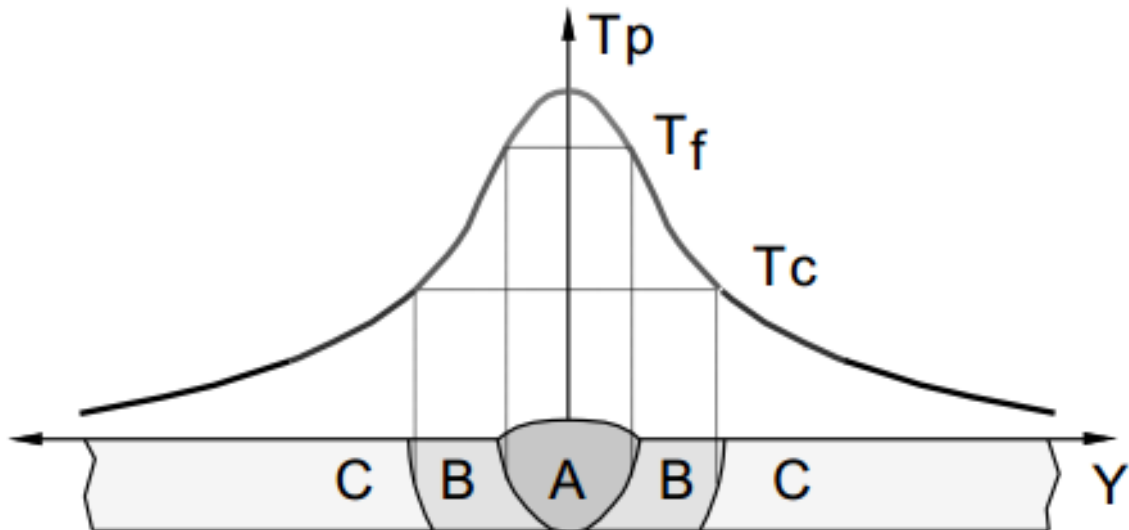


Figura 2.11 - Seção transversal de junta soldada indicando esquematicamente as principais regiões da junta soldada e ciclo térmico. (MODENESI, 2011)

## 2.4 QUALIFICAÇÃO DE PROCEDIMENTO

Na qualificação de procedimentos são conhecidas as propriedades mecânicas dos materiais que serão utilizados na obra. Será verificado também se a junta soldada é tão ou mais resistente que o metal de base. A partir de uma junta soldada (com procedimento de soldagem estabelecido em norma) chamada de peça de teste retiram-se corpos de prova (Figura 2.12) que passam por ensaios e através da avaliação dos resultados obtidos podem-se confeccionar os documentos RQPS e EPS. Os resultados obtidos nestes ensaios serão anotados na RQPS. Estes resultados qualificam uma faixa de parâmetros (prevista na norma adotada) que poderão ser utilizado em fábrica. O documento onde é anotada esta faixa de parâmetros é a EPS. Para a soldagem da chapa de teste é necessário que o soldador tenha habilidade, que a soldagem seja acompanhada, que sejam feitos os ensaios mecânicos e ensaios não destrutivos previstos em norma. Normalmente são utilizados ensaios de dobramento lateral, ensaio de resistência a tração, macrografia, ensaio visual e ensaios radiográfico.

Para que a solda não tenha defeitos é preciso verificar se os soldadores são qualificados, se a junta tem a geometria requerida, se a junta está limpa, se as condições ambientais (vento, chuva, temperatura...) são as adequadas, se os

parâmetros de pós aquecimento e pré aquecimento estão corretos, se o manuseio dos consumíveis (armazenamento e transporte) estão adequados entre outros.

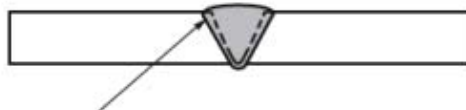
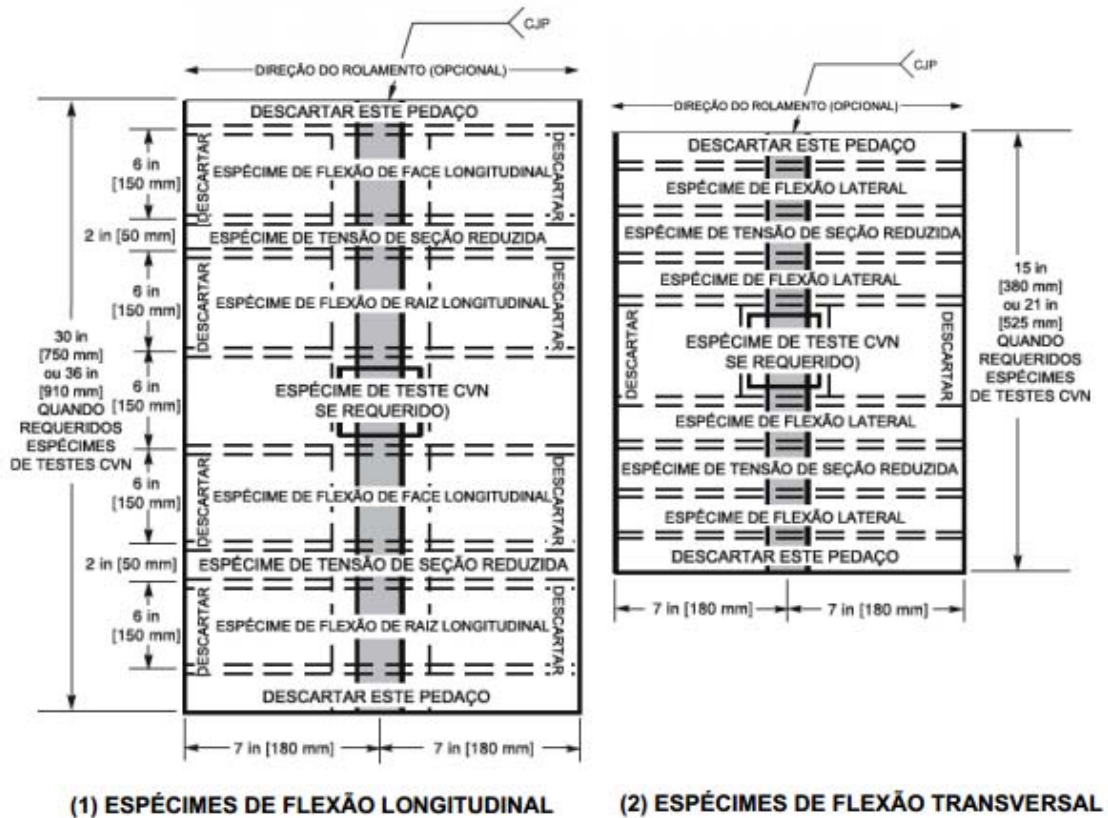


Figura 2.12 – Exemplo de placa de teste Fonte: (AWS D1.1., 2010)

Se não houver exigência contratual é uma boa prática seguir os procedimentos pré qualificados conforme item 3 da AWS D1.1. Os tipos de materiais, juntas e consumíveis mais conhecidos no mercado e utilizados a muitos anos contam com estes procedimentos pré qualificados. Deste modo não é necessária a execução dos testes de qualificação.

### 3 MATERIAIS E MÉTODOS

Este capítulo mostra como foram executados os testes.

#### 3.1 PREPARAÇÃO DAS JUNTAS

Foram cortadas, com serra, oito chapas  $\frac{1}{2}$ " aço carbono convencional (A36) e mais 16, da mesma espessura, de aço carbono alta resistência (A572). As chapas não tiveram preparação de chanfro, ou seja foi utilizado chanfro reto. As dimensões da chapa tinham de 100 a 120mm de comprimento e 60 a 80mm de largura.

As chapas não passaram por limpeza preliminar para retirada da carepa e oxidações. Todas as chapas tinham um nível inicial de corrosão, ou seja, grau de intemperismo grau B: superfície de aço com principio de corrosão e da qual a carepa de laminação tenha começado a desagregar, classificação conforme NBR 15239:2005.

A norma AWS D1.1: 2010 indica que o nível de limpeza é necessário é com escovamento não necessitando chegar ao "metal branco". Porém foi escolhido manter a oxidação e carepa por se tratar do cotidiano da grande maioria das metalúrgicas da construção civil.

Foram feitos pequenos ponteamientos para travamento nas extremidades das juntas. Foi deixada uma abertura de raiz 1,2mm. Mesma dimensão do diâmetro do arame utilizado Figura 3.1.



Figura 3.1 – Junta preparada para receber solda.

### 3.2 EQUIPAMENTO UTILIZADO

Foi utilizado para a soldagem GMAW uma fonte de soldagem Origo MIG 408T da Esab conforme Figura 3.2, máquina bastante presente em metalúrgicas de porte médio.



Figura 3.2 – Origo MIG 408T, equipamento utilizado.

### 3.3 CONSUMÍVEIS

Foi utilizado arame maciço diâmetro 1,2 mm ER70S-6 da ESAB.

O gás de proteção utilizado foi o CO<sub>2</sub> puro.

Ambos são amplamente utilizados no mercado por serem de mais baixo custo. Adicionalmente foi utilizado gás de proteção mistura 15% CO<sub>2</sub> e restante Argônio.

### 3.4 CONDUÇÃO DO PROCESSO DE SOLDAGEM

Foi escolhido fazer testes com 150A, 200A, 250A e 300A. Foi optado por realizar apenas um único passe em cada peça. Antes de realizar cada soldagem,

foram realizadas soldas de teste para verificar a estabilidade do arco. Em caso de falha na estabilidade do arco, novos parâmetros foram ajustados e devidamente anotados (Tabela 3.1).

**Tabela 3.1 – Parâmetros de soldagem utilizados**

Junta	Metal de Base	Gás de Proteção	Corrente (A)	Tensão (v)	Velocidade do Arame (m/min)
1	A36	CO <sub>2</sub>	150	20,8	5
2	A36	CO <sub>2</sub>	200	21,2	6,5
3	A36	CO <sub>2</sub>	250	27,2	9
4	A36	CO <sub>2</sub>	300	32,0	16
5	A572	CO <sub>2</sub>	150	20,8	5
6	A572	CO <sub>2</sub>	200	21,2	6,5
7	A572	CO <sub>2</sub>	250	27,2	9
8	A572	CO <sub>2</sub>	300	32,0	16
9	A572	15%CO <sub>2</sub>	150	18,8	6
10	A572	15%CO <sub>2</sub>	200	19,8	9
11	A572	15%CO <sub>2</sub>	250	27,6	13
12	A572	15%CO <sub>2</sub>	300	32,2	16

O soldador que executou as soldas era qualificado na norma AWS D1.1 para solda GMAW, com espessura igual ou superior a 3mm, aços do grupo 1, solda nas posições plana, horizontal e vertical ascendente. Abaixo foto da soldagem Figura 3.3 com corrente de 300A e gás de proteção CO<sub>2</sub> puro.



**Figura 3.3 – Processo de soldagem das chapas a 300A.**

Após as soldas foi realizado corte em serra para análise posterior. Os cortes foram feitos a pelo menos 20mm do final da junta.

Foram anotados os valores presentes na EPS para efeito de comparação conforme Tabela 3.2.

**Tabela 3.2 – Parâmetros de soldagem utilizados. Adaptado de MENDES, 2011.**

Junta	Metal de Base	Gás de Proteção	Corrente (A)	Tensão (v)	Velocidade do Arame (m/min)
EPS	Nota 1	CO <sub>2</sub>	147 a 237	17,4 a 20,5	6,3 a 7,7
EPS	Nota 1	15%CO <sub>2</sub>	216 a 313	22,0 a 26,0	N/A

*Todos os aços do grupo 1 e 2 conforme classificação da AWS D1.1, incluem A36 e A572*

### 3.5 ENSAIO MACROSCÓPICO

Foram realizados ensaios macroscópicos com ataque químico com Nital 2,5% na seção transversal das juntas. Foi realizado registro com câmera fotográfica convencional diretamente sobre a lente de um microscópio ótico nas amostras 1 a 8. Nas amostras 9 a 12 foi utilizado software específico para captura de imagem.

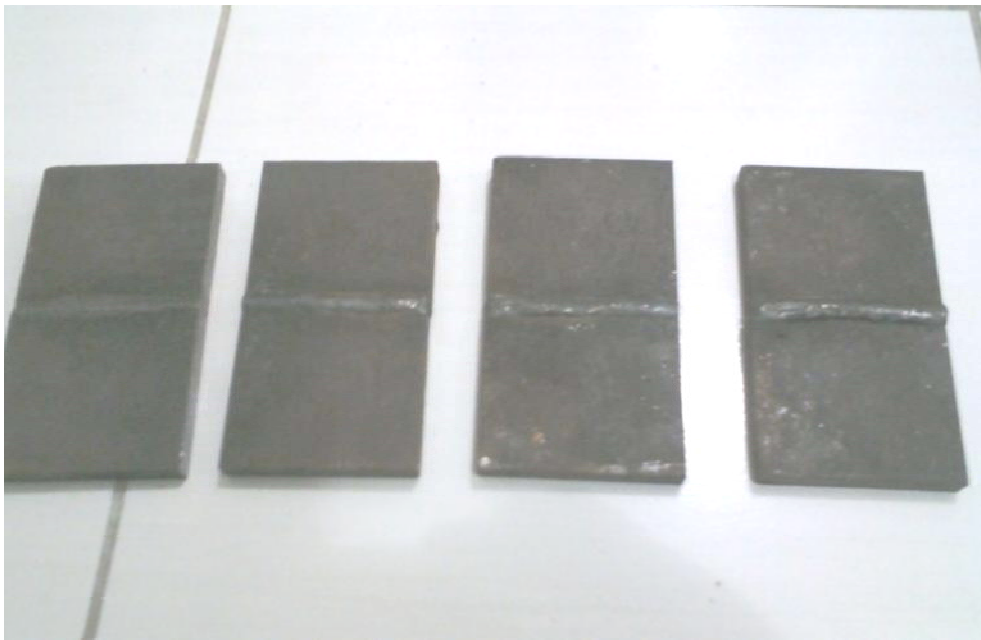
## 4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

### 4.1 ENSAIO VISUAL E DIMENSIONAL DE SOLDA

Nenhuma das juntas apresentou sobreposição, trinca ou porosidade (visível).

Foi notado excesso de reforço nas juntas 4 e 8, chegando a um máximo de 5mm. Isso ocorreu pela dificuldade em controlar a velocidade de avanço com a alta corrente e tensão empregados em relação ao diâmetro de eletrodo adotado (1,2mm). O restante das juntas apresentaram reforço iguais ou inferiores a 3mm.

A largura dos cordões foram de 8mm para a junta 9, 9mm para a junta 10, 10mm nas juntas 1, 2, 3, 5, 6 e 7 e 12mm das juntas 4, 8, 11 e 12.



**Figura 4.1 – Juntas soldadas 1, 2, 3 e 4 (após corte) em A36 com Correntes de 150A, 200A, 250A e 300A respectivamente.**

Em todas as amostras foram encontrados respingos, porém nas juntas 9 a 12 foram encontrados respingos em menor quantidade, menor tamanho e em formato que facilita a remoção.

Na amostra 12 foi detectada mordedura de até 1mm (esta descontinuidade não é considerada defeito segundo AWS D1.1:2010 para juntas com carregamento estático). Na amostra 8 e 12 houve escorrimento de metal líquido no final do cordão de solda.

## 4.2 ENSAIO MACROGRÁFICO

Segue na Figura 4.2 registro fotográfico das macrografias apresentadas nas amostras 1, 2, 3 e 4. São as amostras referentes às juntas de A36.

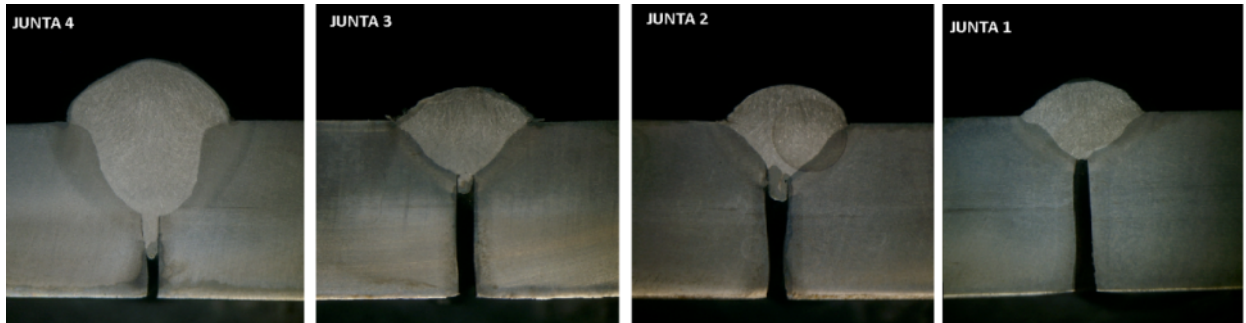


Figura 4.2 – Macrografia das juntas em A36, gás de proteção CO<sub>2</sub> com correntes de 300A, 250A, 200A e 150A respectivamente.

Pode-se notar que para a corrente de 300A a penetração foi bem maior que em todas as outras amostras. Outro detalhe que pode ser percebido nas amostras 2, 3 e 4 houve escorrimento de metal fundido para o interior da junta. Tais parâmetros, dependendo da configuração da junta, acarretarão em falta de fusão.

Apesar desta descontinuidade não ser grave para a construção civil, já que se tratam de estruturas estaticamente carregadas é interessante ressaltar que isso pode provocar o início de uma falha por sobrecarregamento e/ou corrosão.

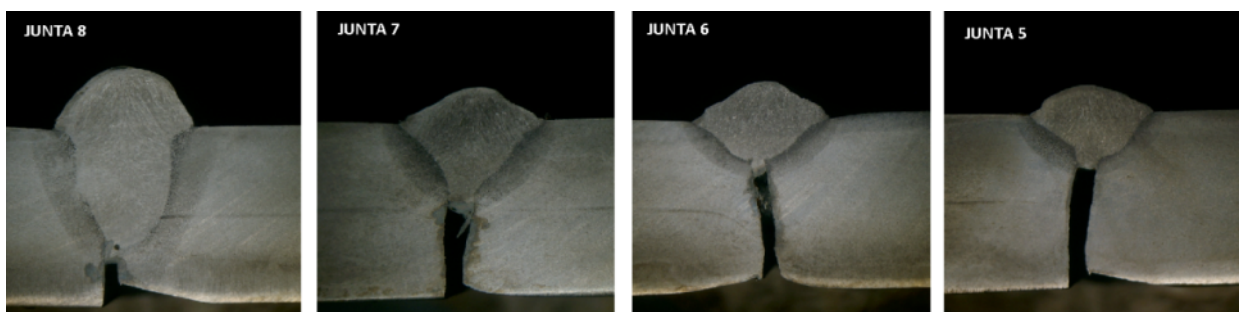


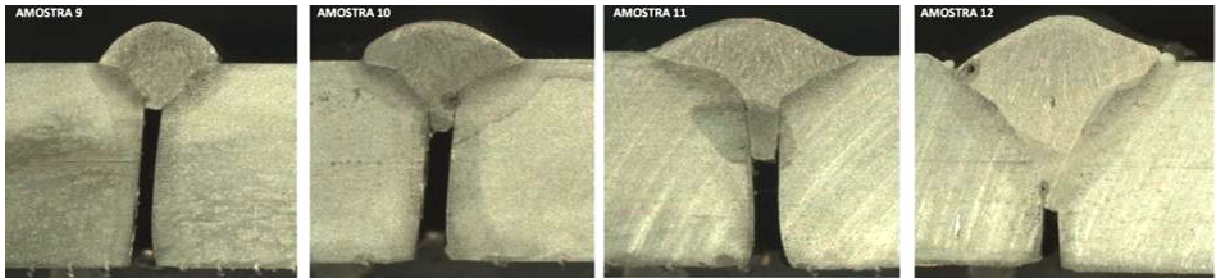
Figura 4.3 – Macrografia das juntas em A572, gás de proteção CO<sub>2</sub> com correntes 300A, 250A, 200A e 150A respectivamente.

A mesma análise feita no parágrafo anterior pode ser realizada para este outro metal de base: o A572.

As diferenças dimensionais entre as juntas de mesmo parâmetro (Figura 4.3), porém com metal de base diferente podem ser explicadas por variações de ângulo e

velocidade da de avanço da tocha, que por serem manuais certamente são ligeiramente diferentes.

Na Figura 4.4 estão as macrografias as juntas realizadas com gás de proteção mistura 15%CO<sub>2</sub> restante argônio, metal de base A572.



**Figura 4.4 – Macrografia das juntas em A572, gás de proteção mistura 15%CO<sub>2</sub> com correntes de 150A, 200A, 250A e 300A respectivamente.**

Todas as amostras com gás de proteção mistura 15%CO<sub>2</sub> apresentaram falta de fusão na raiz.

A amostra 12 apresentou mordedura no lado esquerdo do cordão. Com relação às amostras com 100% CO<sub>2</sub> houve penetração bem menor. O cordão ficou mais largo, mas também foi influenciado por outros parâmetros adotados como a tensão e velocidade do arame. O acabamento foi muito melhor com mistura do que com CO<sub>2</sub> puro: neste caso a mistura deve ser preferida para estruturas ciclicamente carregadas.

### 4.3 COMPARAÇÃO COM A EPS

Outra análise que pode ser feita é a comparação dos parâmetros usados para este trabalho com os parâmetros encontrados na EPS (Tabela 4.1).

**Tabela 4.1 – Parâmetros de soldagem comparados com a EPS. Adaptado de MENDES, 2011.**

Junta	Metal de Base	Gás de Proteção	Corrente (A)	Tensão (v)	Velocidade do Arame (m/min)
EPS	Nota 1	CO <sub>2</sub>	147 a 237	17,4 a 20,5	6,3 a 7,7
EPS	Nota 1	15%CO <sub>2</sub>	216 a 313	22,0 a 26,0	N/A
1	A36	CO <sub>2</sub>	150	20,8	5
2	A36	CO <sub>2</sub>	200	21,2	6,5
3	A36	CO <sub>2</sub>	250	27,2	9
4	A36	CO <sub>2</sub>	300	32,0	16
5	A572	CO <sub>2</sub>	150	20,8	5
6	A572	CO <sub>2</sub>	200	21,2	6,5
7	A572	CO <sub>2</sub>	250	27,2	9
8	A572	CO <sub>2</sub>	300	32,0	16
9	A572	15%CO <sub>2</sub>	150	18,8	6
10	A572	15%CO <sub>2</sub>	200	19,8	9
11	A572	15%CO <sub>2</sub>	250	27,6	13
12	A572	15%CO <sub>2</sub>	300	32,2	16

*Todos os aços do grupo 1 e 2 conforme classificação da AWS D1.1, incluem A36 e A572*

Apenas as juntas 1 e 5 apresentaram-se dentro dos parâmetros previstos na EPS. As demais amostras tinham valores de tensão bem acima da faixa permitida. Foi notado alto nível de respingos.

Em contratos onde não é requerida a EPS é possível utilizar um grande leque de variáveis de soldagem. Pode ser preferida a utilização de CO<sub>2</sub> puro onde se deseja uma maior penetração como mesmo sem a utilização de chanfros (em chapas mais finas). Lembrando que a preparação de chanfros elevam os custos.

Não é recomendável a utilização de corrente a 300A para a soldagem com este diâmetro de arame. O soldador encontrou dificuldade para encontrar a velocidade ideal de avanço associado a velocidade do arame, pois facilmente pode-se incorrer em defeitos de excesso de deposição e mordedura. Excetuando as amostras com 300A todas as amostras não apresentaram defeitos exceto falta de fusão que pode ser corrigida com goivagem ou preparação de chanfros adequados. Então em contratos onde não seja requerida a EPS é possível a utilização destes parâmetros de acordo com espessura do metal de base ou utilização da peça.

Apesar da presença de carepa e oxidação leve em todas as juntas, não foi notado nenhum tipo de defeito relacionado a estas causas. Foi notada insegurança dos soldadores em adotar os parâmetros das juntas 1, 5 e 9 com a alegação do receio da “solda fria”, ou seja, risco de falta de penetração. Porém, ao que pode ser

visto na macrografia, houve penetração satisfatória. Claro que este parâmetro não é adequado para esta espessura de chapa.

Utilizando os parâmetros das juntas 1, 5 e 9 é possível executar emendas não previstas (penetração total) em espessuras de até 6mm sem a preparação das juntas. Acima desta espessura é indispensável a preparação das juntas com chanfros em X ou em V. É sugerido que o nariz seja de 3 mm no máximo e que a abertura da raiz fique entre 0 e 2mm.

É altamente recomendável a utilização dos parâmetros das juntas 1, 5 e 9 devido a boa qualidade da solda apresentada, por utilizar menor corrente (economia de energia elétrica) e por apresentar menos respingos (menos trabalhos de limpeza posterior e menor perda de consumível). Portanto é recomendável seguir os parâmetros de EPS inclusive em contratos onde não é requerido! Esta deve ser uma prática normal, entretanto em casos especiais onde se deseja maior deposição ou maior penetração os outros parâmetros podem ser adotados. Em caso de juntas com ângulos muito fechados ou difícil acesso da tocha é interessante a utilização de valores de tensão maiores para aumentar a distancia da tocha a poça de fusão.

Ao utilizar parâmetros de soldagem baixos e não executando a limpeza correta da junta é sugerido que se façam ensaios de liquido penetrante periodicamente por amostragem para detectar possíveis defeitos que possam ocorrer.

Outra justificativa dos soldadores utilizarem alta corrente é a pressão por resultados por parte da empresa empregadora. A solda pode ser realizada com velocidade de avanço maior. Entretanto não é levado em consideração o custo da energia elétrica desperdiçada pelo aquecimento desnecessário da junta, desperdício de consumíveis e retrabalho para retirar estes respingos.

É uma boa prática a confecção de relatórios de ensaios visual e dimensional de solda periódicos para assegurar boa qualidade das juntas soldadas e servir de evidência sobre o acompanhamento para eventual consulta futura. É interessante lembrar que a norma AWS D1.1 não exige a confecção destes relatórios porém trata-se de uma requisito da ISO9000 e seguramente requisito em grandes contratos.

## 5 CONCLUSÕES

Com base neste estudo foi possível concluir:

- Os materiais A36 e A572 apresentaram comportamentos muito próximos na soldagem GMAW tanto em termos de estabilidade do arco, facilidade de soldagem e visual. Para os dois materiais houve penetração similar.
- Apesar da falta de limpeza das juntas não houve dificuldade em executar as soldas mesmo com parâmetros distintos (dentro da faixa da EPS e fora). A utilização do eletrodo ER70S-6 com altos teores de silício e manganês pode ter evitado porosidades.
- Ao elevar a corrente não houve descontinuidades graves de soldagem que pudessem comprometer a qualidade da junta. A falta de fusão encontrada pode ser eliminada com um passe do lado oposto da junta ou mesmo com goivagem. No entanto não é recomendada a utilização de CO<sub>2</sub> como gás de proteção com espessuras superiores a 1/2". Pode não ser possível eliminar possível falta de fusão internamente.
- É possível elevar os parâmetros como corrente a fim de acelerar o avanço e conseqüentemente aumentar a produtividade com a utilização de mistura 15%CO<sub>2</sub>. Por outro lado a mistura apresentou menores penetrações e isso deve ser levado em conta para a preparação de chanfro (ou não) em espessuras mais grossas.
- Finalmente, recomenda-se de que não se deve tentar consertar um erro como a falta de limpeza com uma solução paliativa (alterando parâmetros de solda fora da faixa especificada na EPS). Esta solução acarreta em alto nível de respingos o que significa desperdício de arame de solda e energia elétrica.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

CALLISTER, W. D. Ciência e Engenharia dos Materiais; Uma introdução. Rio de Janeiro: LTC, 2008.

ASTM, Standard Specification for Carbon Structural Steel, ASTM A36, 2004.

ASTM, High-Strength Low-Alloy Columbium-Vanadium Structural Steel, ASTM A572, 2004.

AWS, Structural Welding Code – Steel, AWS D1.1, 2010.

MODENESI, P. J.; MARQUES, P. V.; SANTOS, D. B. Introdução à Metalurgia da Soldagem, Belo Horizonte: UFMG, 2011.

KOU, S.; Welding Metallurgy, Wiley & Sons, Inc., 2003.

ABNT, Projeto de Estrutura de Aço e de Estrutura Mista de Aço e Concreto de Edifícios, ABNT 8800, 2008.

PAREDES, R. C. Introdução a Soldagem com Proteção Gasosa, Apresentação Curso Especialização Engenharia de Soldagem, UFPR, 2012.

FBTS, Curso de Inspetor de Soldagem, Processos de Soldagem MIGMAG, Fundação Brasileira de Tecnologia da Soldagem, 2013.

HENRIQUES, José Francisco Rodrigues; PINTO, Lívia Maria Fátima Amalfi e WIGHTMAN, Carlos. Inspetor De Fabricação de Caldeiraria e Tubulação: Módulo Específico / PROMINP, SENAI - RJ. Rio de Janeiro, 2006.

BELGO BEKAERT, Catálogo, 2010.

MENDES, Mario Alberto. Especificação de Procedimento de Soldagem (Qualificada através de testes conforme AWS D1.1), Curitiba, 2011.