



I Curso de Especialização em Engenharia da Soldagem

Turma 2011 - CTA DEMEC-TC/UFPR

RODRIGO MASAMI SANEFUJI WERNER

AVALIAÇÃO DA SOLDAGEM DO AÇO FUNDIDO ASTM A148 GR.

105-85

CURITIBA-PR

2013

RODRIGO MASAMI SANEFUJI WERNER

**AVALIAÇÃO DA SOLDAGEM DO AÇO FUNDIDO ASTM A148 GR.
105-85**

Monografia apresentada ao Curso de especialização em Engenharia de Soldagem pela Universidade Federal do Paraná, como requisito parcial para obtenção de aprovação, sob orientação do Prof. Ramón Sigifredo Cortés Paredes

CURITIBA

2013

TERMO DE APROVAÇÃO


RODRIGO MASAMI SANEFUJI WERNER

AVALIAÇÃO DA SOLDAGEM DO AÇO FUNDIDO ASTM A148 GR. 105-85

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. Paulo Cesar Okimoto
UFPR


Prof. Dr. Ramon Sigifredo Cortés Paredes
UFPR

Curitiba, 31 de outubro de 2013.

AGRADECIMENTOS

À Deus pela oportunidade, força e por iluminar meu caminho durante esta jornada.

Aos meus pais Marly e Luiz, pela dedicação, amor e palavras de apoio que tornaram esta etapa ainda mais prazerosa. Muito obrigado por sempre incentivar meus estudos e por cobrar minha dedicação máxima à eles.

À minha namorada Andréa, que me acompanhou durante toda extensão da especialização, incentivando a minha busca por mais conhecimento e sempre demonstrando seu carinho e amor. Sem o seu apoio este sonho não seria alcançado.

Agradeço ao meu orientador Ramon, pela paciência e pelos conhecimentos divididos comigo durante a produção desta monografia e pela receptividade quando o procurei para que me orientasse.

Aos colegas de especialização pela oportunidade de convívio. Vivemos esses anos de finais de semana juntos, com muita dedicação e estudos, mas também com muita alegria e risadas.

RESUMO

A soldagem de materiais dissimilares é largamente utilizada para que as uniões soldadas sejam capazes de cumprir requisitos de propriedades mecânicas em qualquer tipo de estrutura. Fatores como resistência ao escoamento, fadiga, desgaste ou corrosão determinam quais materiais base serão escolhidos e suas diferentes composições químicas afetam de forma única a zona fundida e também a zona termicamente afetada, podendo causar o aparecimento de alguns tipos de defeito durante e após a soldagem. O presente trabalho busca analisar a soldagem do aço ASTM A148 Gr. 105-85 com o aço ASTM A572 Gr.50 pelo processo GMAW, seguindo critérios da norma AWS D1.1. Foi possível notar que a escolha inicial de parâmetros de soldagem é capaz de produzir uma junta com penetração e perfil adequados.

Palavras-chave: Soldagem de materiais dissimilares, A148 Gr. 105-85, A572 Gr.50

ABSTRACT

Welding of dissimilar materials is widely used so that welded unions can be able to fulfill requisites of mechanical properties in any kind of structure. Factors such as yield resistance, fatigue or corrosion determinate which base metals will be chosen e their different chemical compositions affect the melted zone and also the heated affected zone in a unique way, which may cause the appearance of defects during or after the welding process. The present work strives to analyze the welding of ASTM A148 Gr. 105-85 steel and ASTM A572 Gr. 50 steel, trough the GMAW welding process, following criteria from standard AWS D1.1. It was possible to notice that the welding parameters chosen were able to produce a joint with acceptable profile and penetration.

Keywords: Welding of dissimilar materials, A148 Gr. 105-85, A572 Gr.50

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Régua de resfriamento de metais (whittam, 2013).....	11
Figura 2 - Custo por molde versus durabilidade do modelo (asm vol. 15, 1998)	12
Figura 3 - Temperatura entre a interface solido/liquido (ufpr, 2012).....	16
Figura 4 - Exemplificação de estruturas de solidificação: a) planar b) celular c) colunar dendrítica e d) dendrítica equiaxial (kou, 2003).	17
Figura 5 - Exemplo de estruturas de solidificação formadas durante a solda (asm vol. 6, 1998)	18
Figura 6 - Influência da velocidade de soldagem e do calor imposto sobre o formato da poça de fusão (kou, 2003).	19
Figura 7 - Diferentes estruturas formadas pela variação na velocidade de soldagem: a) 1000 mm/min e b) 250 mm/min (kou, 2003).	20
Figura 8 - Microestrutura de um aço astm a148 (asm vol. 9, 1998).	21
Figura 9 - Esquema geral de funcionamento da soldagem gmaw (ufpr, 2011)	27
Figura 10 - Correntes de transição para diferentes diâmetros de eletrodo e gases de proteção (asm vol 6, 1998).	30
Figura 11 - Adequação de perfis obtidos na soldagem de filetes (aws d1.1, 2012)	33
Figura 12 - Exemplo de chapa de teste (aws d1.1, 2012)	35
Figura 13 - Requerimentos para qualificação de junta de filete (aws d1.1, 2012).....	36
Figura 14 - Junta antes da soldagem.....	38
Figura 15 - Microestrutura de um aço astm a 148 gr 105-85.....	39
Figura 16 - Equipamento de soldagem utilizado.....	39
Figura 17 - Dados do metal de adição utilizado durante a soldagem.....	40
Figura 18 - Junta inspecionada por ensaio visual.....	41
Figura 19 - Aplicação do líquido penetrante nas juntas soldadas	41
Figura 20 - Aplicação do revelador após a retirada do excesso de líquido penetrante,	42
Figura 21 - Poro encontrado durante ensaio não destrutivo.....	44
Figura 22 - Amostra 01 após ataque com nital 3%	45
Figura 23 - Amostra 02 após ataque químico com nital 3%	45
Figura 24 - Amostra 03 após ataque químico com nital 3%	46
Figura 25 - Amostra 04 após ataque químico com nital 3%	46
Figura 26 - Micrografias da amostra 01	47
Figura 27- Micrografias da amostra 02	47
Figura 28 - Micrografias da amostra 03	48
Figura 29- Micrografias da amostra 04	48

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Material versus número de moldes produzidos (asm vol. 15, 1998)	12
tabela 2 - Propriedades do aço astm a 148 gr. 105-85 (astm a 148, 2012)	21
tabela 3 - Dimensões máximas para produção (astm a 572, 2012)	22
tabela 4 - Composição química do aço (astm a 572, 2012)	22
tabela 5 - Propriedades mecânicas (astm a 572, 2012)	22
tabela 6 - Variáveis essenciais para o processo gmaw (aws d1.1, 2012)	32
tabela 7 - Relação entre tamanho de solda máximo e dimensões da chapa de teste (aws d1.1, 2012)	35
tabela 8 - Espessuras para chapas de teste (aws d1.1, 2012)	36
tabela 9 - Número de ensaios necessários para soldas de penetração parcial (aws d1.1, 2012)	37
tabela 10 - Composições químicas dos materiais base.....	38
tabela 11 - Parâmetros de soldagem	40
tabela 12 - Resultado das medições de dureza.....	49

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	10
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	11
2.1 FUNDIÇÃO	11
2.2 SOLIDIFICAÇÃO	14
2.3 EFEITOS DOS PARÂMETROS DE SOLDAGEM NA SOLIDIFICAÇÃO	18
2.4 MATERIAIS	20
2.4.1 ASTM A148 GR. 105-85.....	20
2.4.2 ASTM A 572 Gr. 50.....	21
2.5 DESCONTINUIDADES	22
2.6 PROCESSO GMAW.....	26
2.6.1 Modos de transferência metálica	28
2.6.1.1 Transferência por curto-circuito.....	28
2.6.1.2 Transferência globular	29
2.6.1.3 Transferência goticular	29
2.7 AWS D1.1.....	30
2.7.1 Métodos de teste e critérios de aceitação.....	33
3. METODOLOGIA.....	38
3.1 SOLDAGEM E CONSUMÍVEIS	39
3.2 ENSAIO NÃO DESTRUTIVO	40
3.3 MACROGRAFIA.....	42
4. RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	44
4.1 ENSAIO NÃO DESTRUTIVO.....	44
4.2 MACROGRAFIA.....	44
4.3 MICROGRAFIA	46
4.4 DUREZA.....	49
5. CONCLUSÃO E SUGESTÕES.....	50
6. REFERÊNCIAS.....	51

1. INTRODUÇÃO

A Soldagem requer além da habilidade do soldador um conhecimento sobre os materiais e processos de soldagem que serão empregados, dentre inúmeros outros fatores que podem influenciar a qualidade final do produto. Uma junta soldada perfeita seria aquela impossível de se distinguir do restante do material, porém é praticamente impossível reproduzir essa condição. Nenhum dos processos de soldagem é universal, cada um apresenta vantagens e desvantagens e sua escolha deve ser realizada com critério, para que a qualidade da junta soldada seja garantida. Devido ao grande número de variáveis envolvidas, o conhecimento do Engenheiro de Soldagem e a habilidade manual do soldador necessitam ser qualificados através de uma série de testes/ensaios para cada processo.

A validação de todo o processo é feita através de normas ou códigos de construção, que padronizam como as variáveis devem ser tratadas e também servem para facilitar o acesso às informações geradas durante o processo. Estas informações são encontradas nos principais documentos gerados durante a qualificação, dentre eles estão a Especificação de Procedimento de Soldagem (EPS), o Registro de Qualificação de Procedimento de Soldagem (RQPS) e o Registro de Qualificação de Soldador (RQS).

A soldagem de materiais fundidos é frequentemente utilizada em reparos ou para a fabricação de componentes maiores e é importante que os materiais apresentem uma boa soldabilidade, ou seja, uma qualidade adequada do ponto de vista mecânico, metalúrgico, e/ou de resistência ao desgaste ou corrosão. Para que se tenha uma fundamentação técnica o presente trabalho utilizará a norma *AWS D1.1 – Structural Welding Code – Steel*, onde são encontradas diretrizes para a fabricação e projeto de juntas soldadas para estruturas de aço.

Para avaliar a integridade de uma junta soldada pelo processo MIG/MAG (GMAW) serão realizados ensaios destrutivos do material para avaliar as características obtidas durante o processo de soldagem e assim obter um parecer sobre a adequação do procedimento de soldagem (EPS) com base nos resultados obtidos.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

O processo de soldagem permite a união dos mais diversos tipos de materiais e frequentemente diferentes formas são utilizadas para atender os requisitos de projeto. É principalmente nestes casos que a soldagem de componentes torna-se importante, pois em algumas situações o uso de somente um processo de fabricação torna-se extremamente onerosa e proibitiva. Em casos onde a forma de determinado componente é especial podemos utilizar o processo de fundição.

2.1 FUNDIÇÃO

A fundição é um dos processos de fabricação mais antigos desenvolvido pelo homem e devido a sua versatilidade pode ser utilizado para produzir peças de diferentes formas e tamanhos e variando entre peças de uso comum e de grande responsabilidade. A fundição nada mais é que o vazamento de um metal no estado líquido para dentro de um molde com o formato desejado.

O primeiro passo é a fabricação de um modelo, com as dimensões da peça a ser fabricada. É importante verificar que devido à contração do metal líquido durante seu resfriamento o dimensionamento do molde deve levar em consideração os coeficientes de contração térmica do material. Para isso existem régua métricas corrigidas (figura 1) que servem de base para que se estime qual deve ser o sobre espessura do material para que as dimensões fiquem dentro ou próximas da tolerância.



Figura 1 - Régua de resfriamento de metais (WHITTAM, 2013)

É importante notar que o uso de réguas métricas corrigidas somente levam em conta a contração linear da peça, portanto deve-se fundir um protótipo para verificar se as medidas obtidas estão dentro do aceitável para o projeto.

O modelo deve ser confeccionado em material adequado ao tipo de molde utilizado e também deve-se levar em conta que há um número limitado de moldes que podem ser fabricados a partir de cada modelo.

Tabela 1 - Material versus número de moldes produzidos (ASM VOL. 15, 1998)

Material	Número de Moldes Produzidos
Madeira	200 à 300
Madeira reforçada com metais	Até 2000
Alumínio	Até 6000
Ferro Fundido	Até 10000

Modelos de madeira tendem a ser baratos, porém como pode ser observado na tabela 1 acima, o número de moldes que se pode produzir é reduzido. Assim a longo prazo pode ser possível que um modelo mais caro de modelo seja mais econômico que um mais barato, dependendo da quantidade de peças a ser produzida (figura 2).

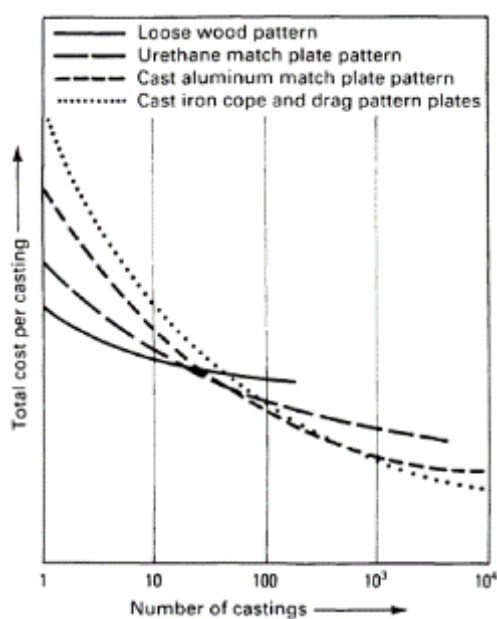


Figura 2 - Custo por molde versus durabilidade do modelo (ASM Vol. 15, 1998)

Após a confecção do modelo, deve escolher o tipo de molde que será utilizado para a fundição das peças a serem produzidas. Os processos podem ser divididos em:

- Modelo Permanente
- Modelos Descartáveis
- Molde Permanente

Na fundição por modelo permanente o fundido é fabricado geralmente utilizando um molde de areia verde. Nesse processo um único modelo é utilizado para fabricar uma série de moldes descartáveis, dependendo do tamanho do lote a ser produzido. No caso do uso da areia verde o modelo é posicionado dentro de caixas de contenção. São posicionados os canais de alimentação de metal líquido e em seguida uma quantidade de areia verde é depositada e prensada para adquirir a forma do modelo. Em seguida o metal fundido é derramado dentro do molde e ao final de toda a solidificação o molde é enfim aberto. Neste instante o molde de areia é destruído para a retirada da peça fundida.

Os modelos da fundição por modelos descartáveis são feitos com materiais, geralmente cera, que podem ser derretidos após a confecção do molde. Este processo também é conhecido pelo nome de processo por cera perdida. Tem como principais características uma alta precisão de dimensões e pequenas tolerâncias podem ser prescritas, além de uma superfície acabada que pode até dispensar uma usinagem posterior (ASM VOL. 15, 1998).

Neste processo o modelo de cera é confeccionado em um molde e posteriormente é revestido com um material cerâmico. Em seguida a cera é aquecida e vazada, deixando a cavidade da casca cerâmica oca e formando o novo molde. O molde então é curado e segue para a deposição de metal fundido. Quando solidificada a peça é retirada da casca de cerâmica e segue para posterior acabamento.

Na fundição por molde permanente os moldes são construídos de materiais geralmente metálicos que podem ser utilizados por várias vezes antes de serem substituídos. A maioria dos fundidos produzidos por este método são de metais não

ferrosos, devido ao seu menor ponto de fusão e também devido ao fato de o molde ter uma vida útil maior, em comparação com processos de molde permanente utilizados com aços e ferros fundidos. Tem como características os fundidos produzidos por este processo (ASM VOL. 15, 1998):

- Ótimo acabamento superficial;
- Excelentes propriedades mecânicas;
- Excelentes tolerâncias dimensionais;
- Boa produtividade.

2.2 SOLIDIFICAÇÃO

A solidificação tanto no processo de fundição quanto no de soldagem é determinada pelo processo de nucleação. É ele que irá determinar o tipo de estrutura inicial, o tamanho de grão, a homogeneidade e a morfologia da estrutura solidificada. Para que ocorra a solidificação passa por duas etapas, a formação e estabilização de um núcleo estável (cluster) e a partir desse momento o seu crescimento, até formar os grãos de metal sólido (ASM VOL. 6, 1998).

A nucleação começa com a formação de núcleos de solidificação, pequenas porções de sólido formadas no metal em solidificação e a variação do seu tamanho, para mais ou para menos, se dá através da troca de átomos com o líquido que o rodeia. Todo esse processo é governado pela energia livre de Gibbs (G), acima da temperatura de solidificação a energia livre é menor para o metal líquido, sendo neste caso a fase mais estável. Abaixo da temperatura de solidificação a fase sólida é a que apresenta uma estabilidade maior, enquanto que na temperatura de solidificação a energia livre do líquido é igual à do sólido (ASM VOL. 15, 1998).

Porém para que a solidificação de fato ocorra, visto que na temperatura de solidificação a energia livre é igual em ambas as fases, é necessário que haja uma redução na temperatura do material para que o processo de solidificação inicie. Essa diferença de temperaturas é conhecida por super-resfriamento. O desenvolvimento da solidificação pode se dar a partir de três formas (ASM VOL. 6, 1998):

- Nucleação homogênea;
- Nucleação heterogênea;
- Crescimento epitaxial.

Na nucleação homogênea a formação do sólido ocorre sem que haja a participação de impurezas ou quaisquer outras superfícies que podem auxiliar a criação de núcleos de solidificação no metal fundido. Na nucleação heterogênea a formação de núcleos de solidificação é facilitada devido a presença de inclusões, elementos de liga ou paredes de um molde, fazendo com que o super-resfriamento de poucos graus abaixo da temperatura de solidificação seja suficiente para que o fenômeno ocorra.

Já o crescimento epitaxial ocorre quando a estrutura que está se solidificando sobre outro cristal, de modo que a estrutura final seja similar à do cristal base. Este fenômeno ocorre principalmente em cordões de solda, onde o sólido da zona fundida. Geralmente um super-resfriamento maior é necessário para a solidificação de um fundido enquanto para a solda somente um pequeno decréscimo de temperatura é suficiente para que a solidificação epitaxial ocorra (ASM VOL. 6, 1998)

Existe um tamanho que define se o embrião, o pequeno aglomerado de partículas sólidas, tornar-se-á um núcleo estável de solidificação e formará um grão de material sólido ou se tornará instável e voltará ao estado líquido. Esta dimensão recebe o nome de raio crítico. Após a formação do núcleo há a sua expansão até que todo o líquido se transforme no metal solidificado. Diferentes estruturas podem ser formadas durante esta etapa, dependendo do comportamento da interface entre o metal sólido e o líquido (figura 3).

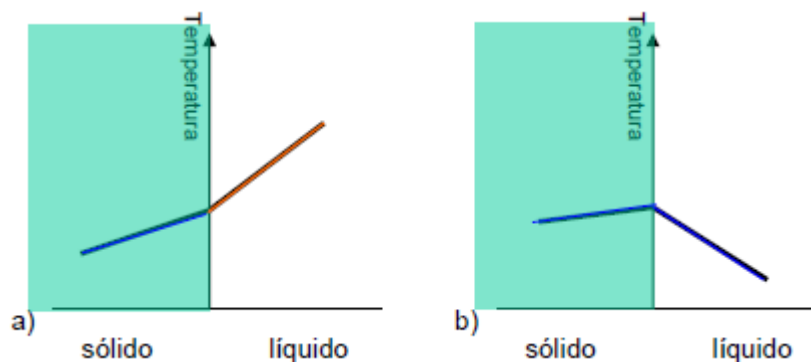


Figura 3 - Temperatura entre a interface sólido/líquido (UFPR, 2012).

A direção do fluxo de calor é o que irá determinar o tipo de estrutura de solidificação que será formada e o parâmetro de solidificação é dado pela seguinte equação:

$$\varepsilon = G \cdot R$$

A taxa de resfriamento (ε) é determinada pelo gradiente de temperatura (G) e pela taxa de avanço da interface sólido/líquido no material (R).

Podem ocorrer duas situações durante a solidificação. A primeira ocorre quando o gradiente térmico é positivo, ou seja, o calor flui do líquido para o sólido. Neste caso a microestrutura formada é do tipo colunar, pois a temperatura maior do líquido faz com que qualquer instabilidade na interface sólido/líquido seja rapidamente liquefeita e a estrutura apresente uma solidificação direcional (planar) e gere grãos de material colunares. Quando há também um resfriamento do metal líquido a frente de solidificação acaba se tornando instável e o material perde a capacidade de controlar o aparecimento de pequenos braços de material solidificado e uma estrutura dendrítica se forma, com os grãos apresentando uma forma equiaxial ou colunar.

Em fundidos as duas situações podem ocorrer, sendo a estrutura colunar encontrada nas proximidades da parede do molde e no centro do material encontram-se grãos equiaxiais.

A estrutura planar ocorre em ligas quando o gradiente de temperatura é bastante elevado ou quando a taxa de avanço da interface é lenta, havendo nesse caso tempo suficiente para que o soluto rejeitado pelo sólido se difunda através do líquido. Quando a taxa de solidificação é elevada não há tempo para que a composição química local se torne homogênea e há um super-resfriamento adicional devido ao excesso de microconstituintes na interface, alterando o gradiente de

temperatura no local. Neste caso a interface sólido/líquido não apresenta um crescimento estável e gera subestruturas como a celular, colunar dendrítica e equiaxial dendrítica. As estruturas típicas de solidificação podem ser visualizadas na figura 4.

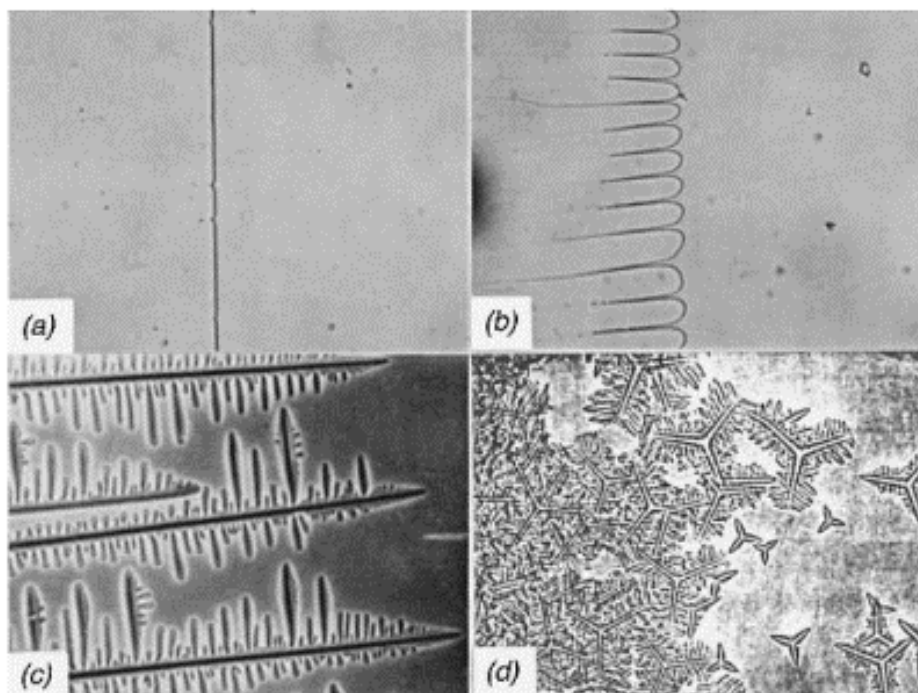


Figura 4 - Exemplificação de estruturas de solidificação: a) planar b) celular c) colunar dendrítica e d) dendrítica equiaxial (KOU, 2003).

Para a formação da estrutura colunar é necessário que uma pequena quantidade de soluto seja rejeitada para as margens, ou seja, o super-resfriamento constitucional é pequeno devido à um gradiente de temperatura inferior ao encontrado na solidificação planar. Caso haja um aumento na taxa de solidificação a estrutura formada torna-se colunar dendrítica.

A estrutura dendrítica é formada quando há um baixo gradiente térmico e um elevado super-resfriamento constitucional. Este tipo de estrutura é caracterizado pelo desenvolvimento de braços secundários nas frentes de solidificação. O espaçamento entre os braços secundários da dendrita é o parâmetro que melhor caracteriza a microestrutura e também define as propriedades mecânicas do material (UFPR, 2012). Isso ocorre devido à formação de uma segunda fase nos espaços interdendriticos pela segregação de soluto. Deve-se atentar que assim como ocorre

com o soluto pode haver uma segregação de impurezas nos espaços interdendriticos, podendo trazer prejuízos ao material.

A estrutura equiaxial ocorre quando há um pequeno gradiente térmico no interior do fundido e um líquido super-resfriado. Também é necessário que haja um número suficiente de núcleos de solidificação no líquido. Os núcleos de solidificação presentes no centro do molde provem da quebra dos braços da dendrita, que são carregados até ali por convecção (ASM VOL. 15, 1998).

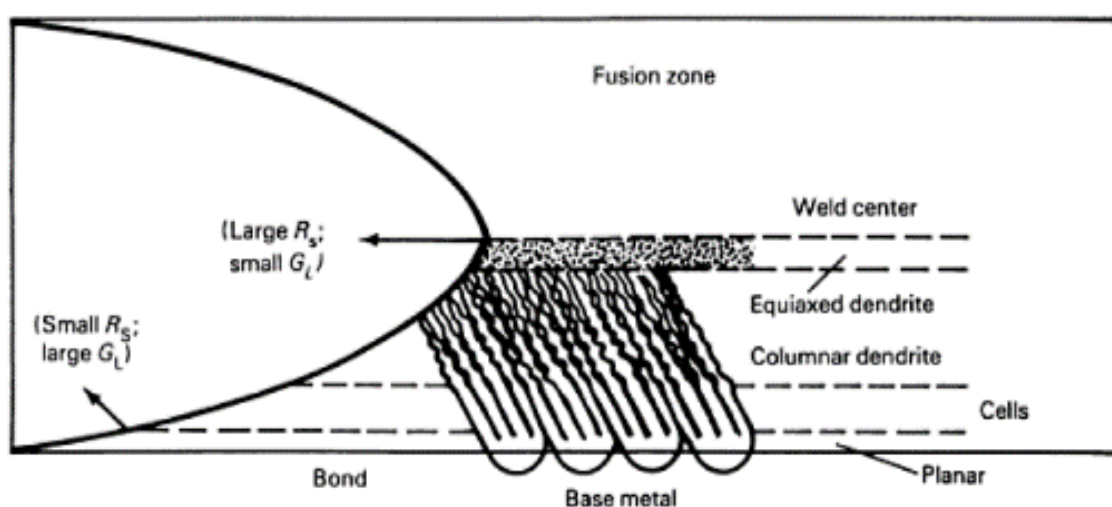


Figura 5 - Exemplo de estruturas de solidificação formadas durante a solda (ASM VOL. 6, 1998)

É importante observar que devido à menor temperatura de solidificação da fase rica em soluto presente entre os braços dendríticos pode haver a presença de um filme líquido nesta região e como muitas vezes estes filmes de líquido enriquecido por soluto não é capaz de suportar as tensões térmicas provenientes da contração do metal durante a solidificação podem ser formadas trincas a quente nessa região. A ocorrência desse tipo de defeito pode ser minimizada através do aumento da relação G/R .

2.3 EFEITOS DOS PARÂMETROS DE SOLDAGEM NA SOLIDIFICAÇÃO

A velocidade de soldagem é um parâmetro capaz de modificar não somente a taxa de solidificação do material como o formato da poça de metal líquido, o que pode influenciar o aparecimento de trincas a quente na junta soldada (KOU, 2003). Em soldas com menor velocidade o formato da poça de fusão tende a ser elíptico e

quando o deslocamento é mais rápido obtém-se um padrão de lágrima no metal fundido.

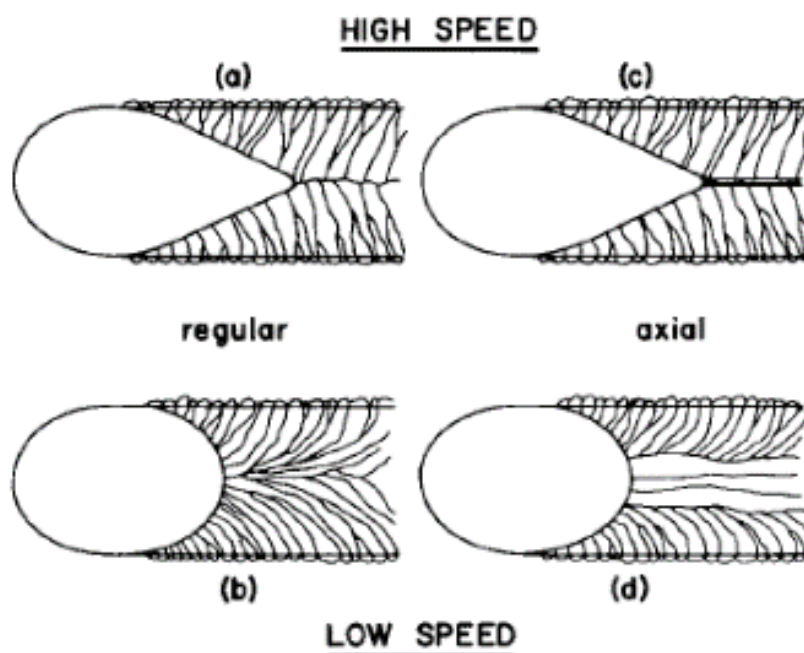


Figura 6 - Influência da velocidade de soldagem e do calor imposto sobre o formato da poça de fusão (KOU, 2003).

Em velocidades baixas de soldagem o metal em solidificação tende a se aproximar da poça de fusão, assumindo um padrão curvado para o sentido de soldagem, porém perpendicular à superfície elíptica da poça. Em velocidades elevadas as estruturas de solidificação também ficam orientadas perpendicularmente, porém devido ao formato da poça há a tendência de se formar uma linha de solidificação no centro do cordão de solda. Como é nesse local que a última porção de metal líquido se solidifica podem ocorrer trincas a quente devido à segregação de soluto durante a solidificação.

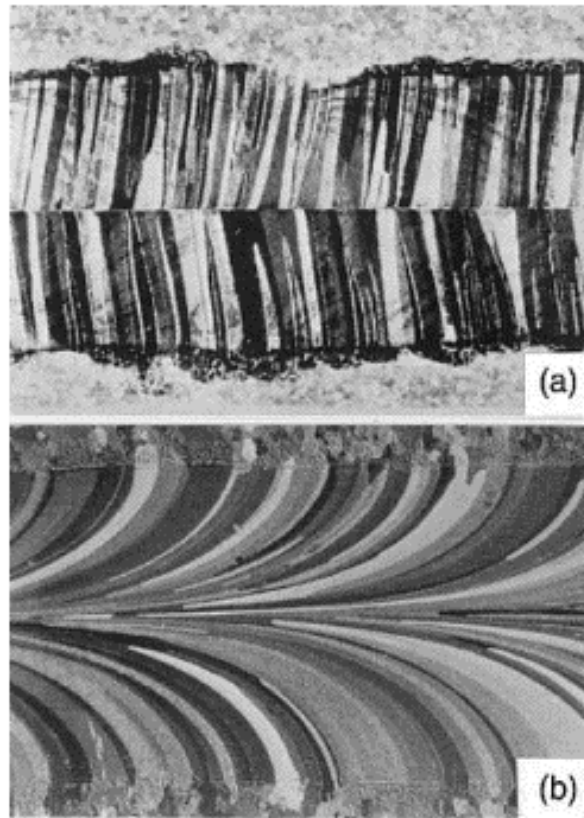


Figura 7 - Diferentes estruturas formadas pela variação na velocidade de soldagem: a) 1000 mm/min e b) 250 mm/min (KOU, 2003).

Para uma mesma velocidade de soldagem uma mudança no calor imposto pode causar uma mudança nas estruturas formadas. Para um alto calor imposto elevado, ou seja, um produto entre tensão e corrente elevado, a taxa de resfriamento é menor, por consequência o gradiente de temperatura (G) é reduzido e uma estrutura dendrítica é formada. Quando o calor imposto é menor há um aumento no gradiente de temperatura e uma estrutura celular torna-se preferencial (KOU, 2003).

2.4 MATERIAIS

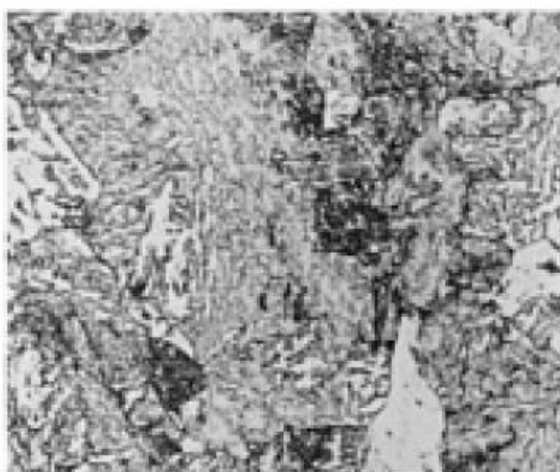
2.4.1 ASTM A148 GR. 105-85

O fundido ASTM A148 é um aço com propriedades mecânicas definidas através de seu grau de fabricação. Quanto à composição química somente as quantidades de enxofre e fósforo são definidas e outros elementos de liga podem ser determinados pelo cliente ou pelo fabricante para que o aço fabricado atinja as propriedades mecânicas do grau requisitado. O grau utilizado neste trabalho é o 105-85, definindo suas propriedades mecânicas e químicas conforme tabela abaixo:

Tabela 2 - Propriedades do aço ASTM A148 Gr. 105-85 (ASTM A 148, 2012)

Grau	Composição, %		Tensão de Ruptura, ksi [MPa]	Tensão de Escoamento, ksi [MPa]	Alongamento em 50 mm, mín, %	Redução em área, mín, %
	Enxofre, máx.	Fósforo, máx.				
105-85	0,06	0,05	105 [725]	85 [585]	17	35

Depois de fabricada a peça fundida deve passar por tratamento térmico após a sua temperatura se tornar inferior à de transformação. Os tratamentos térmicos que podem ser utilizados são recozimento pleno, normalização, normalização e revenido, além de têmpera e revenido.

**Figura 8 - Microestrutura de um aço ASTM A148 (ASM VOL. 9, 1998).**

Este aço apresenta uma microestrutura de base ferrítica com presença de perlita

2.4.2 ASTM A 572 GR. 50

Esta especificação detalha a padronização de cinco graus de aços alta resistência e baixa liga, utilizando os elementos nióbio, vanádio, titânio e nitrogênio como elementos ligantes. A norma trata dos requisitos de resistência mecânica e também da composição química do material, nos mais diferentes formatos, como perfis estruturais, chapas e barras.

As tabelas 3 e 4 contém algumas das especificações para a produção deste tipo de material.

Tabela 3 - Dimensões máximas para produção (ASTM A 572, 2012)

Grau	Tensão mín. de Escoamento ksi [MPa]	Espessura máx. em placas in. [mm]	Espessura máxima em perfis In. [mm]
50 [345]	50 [345]	4 [100]	todas

Tabela 4 - Composição química do aço (ASTM A 572, 2012)

Grau	C máx., %	Mg máx., %	P máx., &	S máx., %	Si ¹ máx., %	Si ² , %
50	0,23	1,35	0,04	0,05	0,40	0,15 à 0,40

¹ Placas até 40 mm de espessura e perfis até 75 mm de espessura

² Placas acima de 40 mm de espessura e perfis acima de 75 mm de espessura

Devido ao seu uso em construções civis é necessário que uma resistência mínima seja padronizada, o que pode ser visualizado na tabela 5.

Tabela 5 - Propriedades mecânicas (ASTM A 572, 2012)

Grau	Tensão de Escoamento mín. ksi [MPa]	Tensão de Ruptura mín. ksi [MPa]	Alongamento mín. % (em 2 in.)
50	50 [345]	65 [450]	21

2.5 DESCONTINUIDADES

Uma descontinuidade é a interrupção da estrutura típica do material, podendo ser exemplos a falta de homogeneidade nas propriedades físicas, metalúrgicas ou mecânicas do material ou junta soldada. Dependendo de sua severidade por ser considerada um defeito e o material deve ser rejeitado (AWS A3.0, 2002)

As descontinuidades podem ser classificadas em três grupos:

- Descontinuidade Planar;
- Descontinuidade Geométrica;
- Descontinuidade Volumétrica.

A descontinuidade do tipo planar pode ou não aflorar à superfície do material e tem como característica um efeito de entalhe no material, gerando uma concentração de tensão. Exemplos deste tipo de descontinuidade são trincas, falta de penetração e falta de fusão.

A descontinuidade geométrica são encontradas na superfície do material e também possuem efeito de entalhe, porém menos pronunciado que o grupo anterior. São exemplos mordeduras, irregularidades no cordão de solda e desalinhamento do material.

A descontinuidade volumétrica pode aparecer em qualquer porção do material e possuem um pequeno efeito de concentração de tensão. Apresentam-se na forma de porosidades e inclusões.

As trincas são conhecidas pelo alto concentrador de tensão em sua ponta e podem ser a causa de falhas catastróficas no material e podem se formar durante ou após o resfriamento da junta soldada. Pode ser classificada entre os seguintes grupos:

- Trincas a quente;
- Trincas a frio;

As trincas a quente são formadas pela rejeição do soluto devido a solidificação do material. Este tipo de defeito recebe este nome devido ao seu aparecimento ocorrer logo após ou até durante a soldagem. As impurezas e os elementos de liga que compõe o líquido tem sua solubilidade reduzida enquanto o material solidifica, enriquecendo o líquido de soluto e criando uma fase que não é capaz de suportar as tensões de contração.

O uso de uma velocidade de soldagem inadequada pode fazer surgir trincas no centro do cordão de solda ou outro lugar da zona fundida (ZF) e na zona termicamente afetada (ZTA), devido à segregação do soluto no local. De acordo com a sua localização podem ser subclassificadas em trincas de solidificação, quando ocorrem no centro do cordão de solda e trincas de liquação quando ocorrem na zona termicamente afetada (ZTA). Os locais onde as trincas podem aparecer são os contornos de grão, espaços interdendriticos ou entre células (DA SILVA e PARANHOS, 2003).

Quando o nível de restrição em uma junta soldada é aumentado, maior é a chance de formação de trincas a quente. O próprio aumento na espessura do material já é um fator agravante, além do modo de fixação da junta.

Algumas das causas de trincas a quente no metal de solda podem ser baixa corrente de soldagem, velocidade de soldagem elevada, falta de ou baixo preaquecimento, má preparação de junta e restrições mecânicas inadequadas. Já quando presentes no metal de base e na ZTA as causas podem ser a presença de enxofre, altas concentrações de carbono ou elementos de liga e tensões mecânicas residuais (ASM VOL. 6, 1998).

Para reduzir os problemas causados por esse tipo de defeito devem ser utilizados processos ou procedimentos que não tenham penetração muito alta, velocidade de soldagem adequada, neste caso evitando a poça de fusão em formato de lágrima, evitar cordões de solda côncavos e preencher a cratera no final da soldagem (ASM VOL. 6, 1998).

Trincas a frio, também conhecidas como trincas por hidrogênio, podem ocorrer logo após a fabricação da junta soldada como também após alguns dias. A faixa de temperatura em que esse tipo de defeito surge é entre -50 à 150 °C para os aços e sua propagação se dá pelo método intergranular ou clivagem transgranular e geralmente ocorre na zona termicamente afetada (ZTA), logo abaixo da linha de fusão, mas também pode vir à ocorrer na zona fundida (ASM VOL. 6, 1998). As trincas que decorrem da presença de hidrogênio surgem geralmente em pontos onde há uma intensa concentração de tensão como, por exemplo, na margem do cordão ou na raiz da junta soldada.

Para que este tipo de defeito ocorra é necessário que as seguintes condições sejam cumpridas:

- Presença de hidrogênio, que pode vir de contaminantes (graxas, óleos, etc.), eletrodos ricos em hidrocarbonetos e umidade;
- Tensões residuais ou solicitações externas;
- Presença de uma microestrutura susceptível (martensita).

A solubilidade do hidrogênio varia de acordo com a temperatura do aço e também é maior quando o metal está no estado líquido. A solubilidade do hidrogênio a uma temperatura de 1500 °C é de aproximadamente 30 partes por milhão, enquanto que à 400 °C a solubilidade cai para uma parte por milhão, o que já é suficiente para causar trincas em aços de elevada resistência (ASM VOL. 6, 1998).

O método mais comum de se evitar as trincas por hidrogênio é a realização de um pré-aquecimento na peça a ser soldada. Este procedimento reduz a formação de martensita na junta soldada e melhora a difusão do hidrogênio ao diminuir o gradiente térmico entre a poça de fusão e o metal base. Os métodos para determinar a necessidade e temperatura do pré-aquecimento são o carbono equivalente, a espessura da peça, a concentração de hidrogênio e o calor imposto (MODENESI, 2011).

O carbono equivalente serve como uma referência para transformar as quantidades dos diversos elementos de liga presentes nos aços em um teor equivalente a se somente carbono fosse usado como um elemento ligante, facilitando a interpretação do tipo de estrutura que pode ser formada durante a solidificação da liga. Diferentes elementos de liga causam diferenças na dureza do aço que está sendo soldado, assim é importante ter uma referência sobre a soldabilidade do material. Um teor elevado de carbono e outros elementos de liga como, por exemplo, manganês, cromo, silício e níquel, podem fazer com que uma microestrutura frágil (martensita) seja formada durante o resfriamento da junta, diminuindo a soldabilidade, pois a possibilidade de formação de trincas aumenta.

A fórmula recomendada pelo IIW (*International Institute of Welding*) para cálculo do carbono equivalente é dada por:

$$C_{eq(IIW)} = \%C + \frac{\%Mn}{6} + \frac{\%Cr + \%Mo + \%V}{5} + \frac{\%Ni + \%Cu}{15}$$

Um valor de carbono equivalente maior que 0,6 torna a junta susceptível à trincas a frio, fazendo com que ações sejam tomadas para evitar o aparecimento destes defeitos, como pré-aquecimento, por exemplo. Com um valor abaixo de 0,4 a junta está livre de fissuração por hidrogênio (MODENESI, 2011).

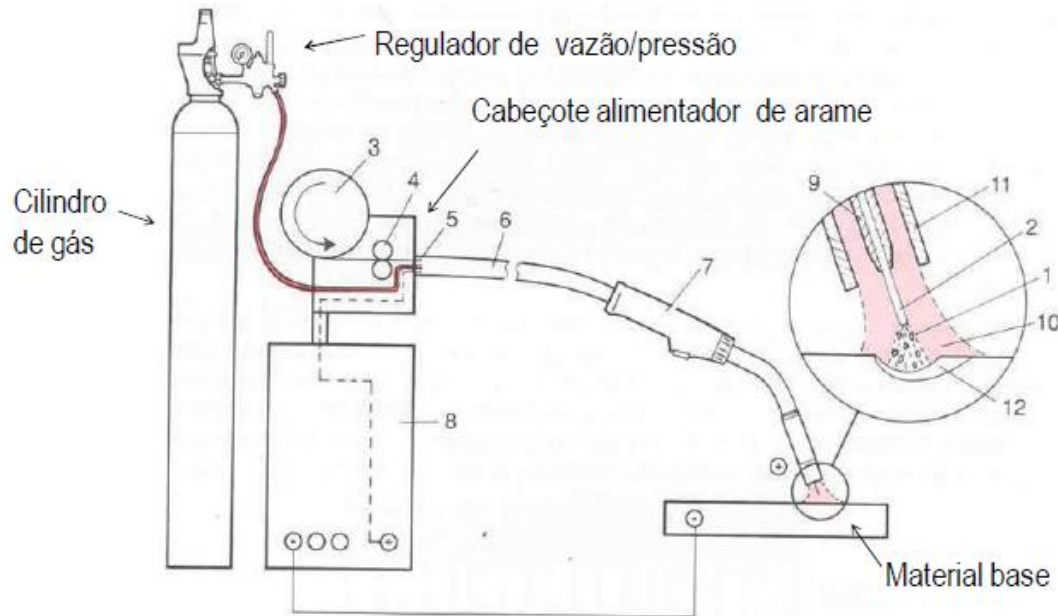
2.6 PROCESSO GMAW

No processo de soldagem GMAW (*Gas Metal Arc Welding*), popularmente conhecido como MIG/MAG (MIG – *Metal Inert Gas* e MAG – *Metal Active Gas*), o arco elétrico é estabelecido entre um eletrodo consumível em formato de arame e o metal de base. Como os parâmetros que definem o arco elétrico são controlados pela fonte de soldagem, cabe ao operador garantir que uma solda de qualidade seja realizada por meio do controle da velocidade de soldagem, posicionamento da tocha e ângulo de trabalho, no caso de soldas realizadas manualmente.

O arame que é continuamente alimentado através da tocha é fundido pelo arco elétrico e transferido à poça de fusão, gerando o cordão de solda e a proteção da poça líquida é feita através da adição de um gás protetor externo, que pode ser tanto ativo, quando reage com a poça de fusão, bem como inerte, quando não há modificações no metal fundido.

O processo de soldagem geralmente utiliza uma fonte de corrente contínua (CC), onde geralmente o polo positivo fica conectado à tocha, também chamada de polaridade reversa. As fontes utilizadas são de tensão constante, pois assim pode-se obter um processo auto corrigível, o que torna a operação de soldagem mais estável.

O esquema geral de funcionamento da soldagem GMAW pode ser encontrado na figura abaixo:



1 – Arco elétrico; 2 – Arame eletrodo consumível; 3 – Bobina ou carretel de arame; 4 – Roletes de tração; 5 – Conduíte flexível; 6 – Pacote de Mangueiras; 7 – Pistola ou tocha de soldagem; 8 – Fonte de energia, máquina de solda; 9- Bico de contato; 10 – Gás de proteção; 11 – Bocal; 12 – Poça de fusão

Figura 9 Esquema geral de funcionamento da soldagem GMAW (UFPR, 2011)

Dentre as vantagens do processo de soldagem GMAW temos:

- Permite a solda em qualquer posição;
- Pode ser automatizável;
- Processo versátil;
- Requer pouca limpeza após a soldagem;
- Alta taxa de deposição;
- Facilidade para soldagem manual.

Porém podemos citar como desvantagens:

- Equipamento mais caro que o de eletrodo revestido;
- Requer maior cuidado na limpeza e preparação da junta;
- Trabalho tende a ser cansativo ao soldador;

- Maior risco na formação de descontinuidades na junta soldada;
- Não apresenta tanta mobilidade quanto o eletrodo revestido.

2.6.1 Modos de transferência metálica

Dependendo da combinação de alguns parâmetros de soldagem, como o tipo e a magnitude da corrente de soldagem, diâmetro, composição química e stick-out do arame-eletrodo e tipo de gás de proteção, podem haver diferentes modos de transferência do metal de adição fundido na ponta do arame-eletrodo para o metal de base.

Existem dois tipos de transferência metálica na soldagem GMAW, o primeiro é quando há o contato da gota formada na ponta do arame-eletrodo com a poça de fusão antes que haja o seu destacamento, sendo este tipo classificado com transferência por curto-circuito.

No segundo tipo de transferência é quando há um destacamento da gota antes que haja um contato com a poça, sendo este tipo denominado transferência por voo livre. Neste caso há uma subclassificação composta por seis diferentes modos de transferência.

2.6.1.1 Transferência por curto-circuito

Neste modo de transferência metálica a gota formada na ponta do arame-eletrodo é transferida para a poça de fusão no momento em que se tocam. Neste instante ocorre um curto-circuito e simultaneamente o arco elétrico apaga. No momento em que ocorre o curto-circuito a tensão cai a zero e ocorre um aumento na corrente, retornando ao valor normal após o destacamento da gota. As tensões e correntes de soldagem neste tipo de transferência são baixas, o que possibilita a soldagem fora da posição e em chapas finas.

A frequência em que ocorrem esses curtos-circuitos varia entre 20 a 200 vezes por segundo e dependendo da violência em que ocorre a separação da gota do arame-eletrodo a quantidade de respingos pode se alterar. Para que se reduza ao máximo a ocorrência de respingos deve-se utilizar uma regulagem adequada de indutância. Uma indutância baixa não é suficiente para diminuir a violência da separação, visto

que a atenuação na subida de corrente durante o curto-circuito não é suficiente para suavizar a transferência. Porém uma indutância muito elevada causa um retardo na formação da gota na ponta do arame-eletrodo o que faria com que o próprio eletrodo mergulhasse na poça de fusão, o que ocasionaria o completo apagamento do arco.

Como a transferência metálica somente ocorre durante o contato entre a ponta do arame-eletrodo e a poça de fusão o gás de proteção praticamente não influencia em nada esse processo, porém a sua seleção pode afetar parâmetros como penetração e níveis de respingos, maiores no caso de se utilizar o gás carbônico. Geralmente são utilizadas misturas de gases para garantir penetração e níveis de respingos aceitáveis (ASM VOL. 6, 1998)

2.6.1.2 Transferência globular

Este tipo de transferência, posicionada depois do curto-circuito e antes da goticular, ocorre quando tensões médias e correntes baixas são utilizadas durante a soldagem. A gota que se forma na ponta do eletrodo tem um diâmetro superior ao do arame e é transferida à poça de fusão por meio de voo livre. Devido ao tempo necessário para que a gota de metal líquido se acumule na ponta do eletrodo há uma baixa taxa de transferência, o que ocasiona uma menor capacidade de produção. Uma característica deste tipo de transferência é que esta somente pode ser utilizada na posição plana, devido à transferência ser governada pela força da gravidade.

Várias discontinuidades podem ocorrer devido à este tipo de transferência, como falta de fusão, falta de penetração e reforço excessivo, devido à tensão mais alta requerida neste caso. O impacto destas gotas de grande massa causa a ocorrência de respingos durante a solda. Além do que devido à sua instabilidade a deposição não é constante, o que causa cordões com aspecto irregular (ASM VOL. 6, 1998).

2.6.1.3 Transferência goticular

A transferência goticular, também conhecida como transferência por spray, ocorre quando a corrente de soldagem ultrapassa um certo valor, denominado corrente de transição, cujo valor depende de fatores como a composição química,

diâmetro e comprimento energizado do eletrodo, além de variar de acordo com o gás de proteção utilizado.

É um tipo de transferência muito estável, com gotas de tamanho aproximadamente igual ao do arame-eletrodo e também conhecido por não apresentar respingos durante a soldagem. O uso de um gás de soldagem com maior potencial de ionização como, por exemplo, o argônio ou uma mistura rica com este elemento em sua composição deve ser utilizado (ASM VOL. 6, 1998).

WIRE ELECTRODE TYPE	SHIELDING GAS	WIRE DIAMETER		SPRAY ARC CURRENT, A
		mm	in.	
LOW-CARBON STEEL	98AR-2O ₂	0.58	0.023	135
		0.76	0.030	150
		0.89	0.035	165
		1.14	0.045	220
		1.57	0.062	275
	95AR-5O ₂	0.89	0.035	155
		1.14	0.045	200
		1.57	0.062	265
	92AR-8CO ₂	0.89	0.035	175
		1.14	0.045	225
		1.57	0.062	290
	85AR-15CO ₂	0.89	0.035	180
		1.14	0.045	240
		1.57	0.062	295
	80AR-20CO ₂	0.89	0.035	195
1.14		0.045	255	
1.57		0.062	345	

Figura 10 - Correntes de transição para diferentes diâmetros de eletrodo e gases de proteção (ASM VOL 6, 1998).

Uma das características deste processo é que há uma penetração maior, fazendo com que o formato do cordão tenha um formato de taça, porém devido ao valor da corrente ser relativamente alto deve-se ter cuidado na soldagem de chapas com menores espessuras. A corrente elevada também pode dificultar a solda nas posições sobre cabeça e vertical.

2.7 AWS D1.1

A norma AWS D1.1 é um código para soldagem de aços em estruturas metálicas, cobrindo a utilização de aços estruturais de carbono ou baixa liga com no

máximo 690 MPa de limite de escoamento e com uma espessura maior que três milímetros (3 mm).

Para que a soldagem seja realizada de acordo com esta norma é necessário que todo o processo de fabricação seja documentado. Deve ser registrada uma especificação de procedimento de soldagem (EPS), que deve também ser qualificada através de uma RQPS (Registro de qualificação de procedimento de soldagem). A EPS é o documento no qual todas as informações necessárias para a execução da soldagem na produção estão descritas.

Este documento serve para auxiliar o processo de fabricação e o controle de qualidade da soldagem. Para qualificação deste procedimento deve-se primeiro criar uma EPS preliminar e em seguida preparar uma chapa de teste para a soldagem, que deve ser realizada com os parâmetros seguindo o que foi descrito na especificação. Durante esta etapa é importante que todos os dados sejam registrados (corrente e tensão de soldagem, por exemplo), pois farão parte da versão final da EPS. Em seguida serão realizados ensaios destrutivos e não destrutivos nas amostras retiradas da chapa de teste, com os tipos e quantidades dependendo da aplicação do material fabricado. Em caso de aprovação os dados coletados durante a soldagem são registrados na RQPS e a EPS está qualificada. Existem também as EPS pré-qualificadas, que dispensam a validação através da RQPS, pois a faixa de parâmetros já vem definida no próprio código. Caso algum valor se encontre fora desta faixa pré-estabelecida a RQPS deve obrigatoriamente ser produzida.

A RQPS é o documento que prova que a solda realizada, com base em um procedimento de soldagem, apresenta propriedades mecânicas e também metalúrgicas adequadas. Neste documentos estão registrados os dados obtidos durante a solda, diferente da EPS que contém faixas adequadas para os parâmetros de soldagem.

Para a soldagem a ser realizada pelo processo GMAW temos as variáveis essenciais apresentadas na tabela 6 abaixo:

Tabela 6 - Variáveis essenciais para o processo GMAW (AWS D1.1, 2012)

Variável	Requalificação da RQPS
Acréscimo na resistência de classificação do metal de adição	Sim
Alteração para uma classificação de eletrodo não abordada em:	A5.18 ou A5.28
Modificação no diâmetro nominal do metal de adição	Qualquer acréscimo ou decréscimo
Modificação no número de eletrodos	Sim
Alteração na corrente para cada diâmetro usado por:	Acréscimo ou decréscimo maior que 10%
Modificação no tipo de corrente ou polaridade	Sim
Modificação no modo de transferência	Sim
Modificação de saída CV para CC	Sim
Modificação na tensão para cada diâmetro usado por:	Acréscimo ou decréscimo maior que 7%
Acréscimo ou decréscimo na velocidade de alimentação do arame para cada diâmetro de eletrodo (quando não controlada pela corrente)	Quando maior que 10%
Alteração na velocidade de deslocamento	Acréscimo ou decréscimo maior que 25%
Alteração no gás de proteção	Sim
Alteração no fluxo do gás	Acréscimo maior que 50% ou decréscimo maior que 20%
Modificação na posição (não qualificada pela tabela 4.1 da AWS D1.1)	Sim
Modificação em diâmetro espessura ou ambos não qualificada pela tabela 4.2 da AWS D1.1	Sim
Alteração no metal base ou combinação de metais base não listados na RQPS ou qualificados pela tabela 4.8 da AWS D1.1	Sim
Soldagem vertical: Para qualquer passe vertical ascendente para descendente ou vice versa	Sim

Porém para que a solda seja realizada de maneira satisfatória é mandatório que o soldador também seja qualificado. Pode-se aproveitar a chapa de teste de qualificação da EPS para também qualificar o soldador, neste caso os parâmetros de soldagem devem ser os mesmos da EPS.

Para facilitar o acesso às informações de soldagem pelo soldador pode-se confeccionar uma Instrução de Execução e Inspeção de Soldagem (IEIS). Neste documento estão descritas, de forma resumida, todas as informações necessárias para que a soldagem seja feita de forma satisfatória.

2.7.1 Métodos de teste e critérios de aceitação

Para a verificação da qualidade da junta soldada e qualificação da EPS é necessária a realização de alguns ensaios mecânicos nas placas de teste. Segundo a AWS D1.1 uma inspeção visual deve ser realizada e dentre os critérios que devem ser obedecidos estão:

- Trincas de qualquer tamanho são consideradas inaceitáveis;
- Nenhuma cratera deve ter sua seção transversal menor que a da própria solda;
- O reforço não deve ter menos que 3 mm de altura;
- A fusão deve ser completa e não devem aparecer mordeduras maiores que 1 mm

Para soldas de filete ainda há de verificar que as dimensões da perna atendem às condições especificadas. O perfil da solda deve estar de acordo com a figura abaixo:

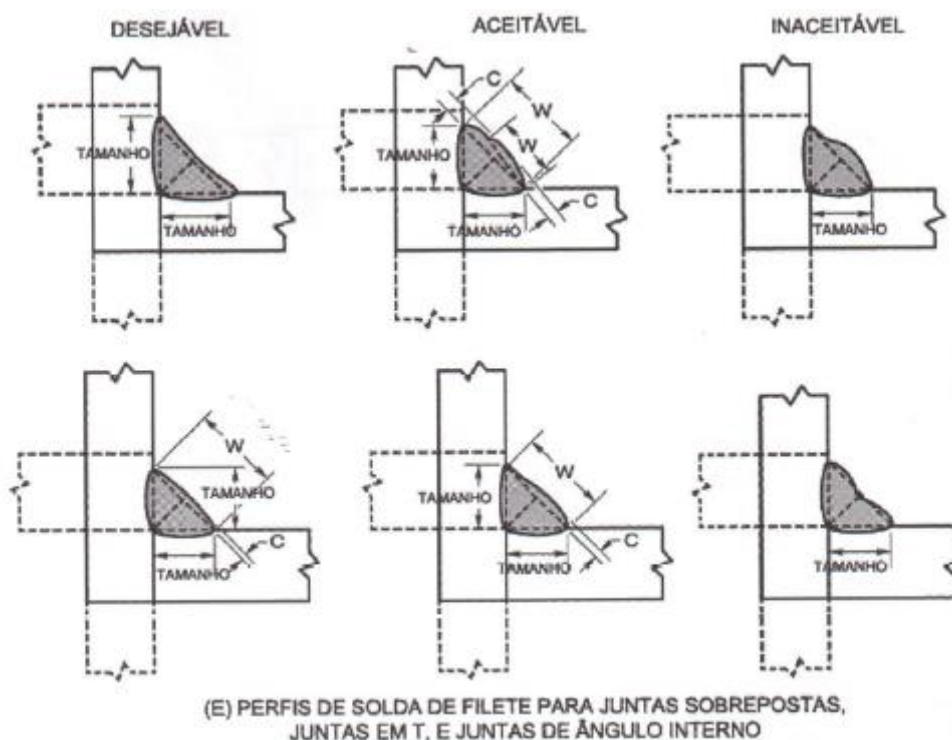


Figura 11 - Adequação de perfis obtidos na soldagem de filetes (AWS D1.1, 2012)

Antes de se verificar as propriedades mecânicas da junta soldada, deve-se verificar a sanidade da placa de teste através de um ensaio não destrutivo. No caso de solda de filete é necessário proceder com um ensaio visual antes de se realizar a macrografia da junta.

Os ensaios mecânicos de flexão e de tração devem ser realizados para determinar se a junta soldada apresenta defeitos e se suas propriedades mecânicas estão adequadas ao projeto. O ensaio de flexão deve ser realizado com um dispositivo próprio e o espécime deve ser posicionado com o cordão de solda no centro entre os apoios. A área a ser ensaiada deve ser posicionada do lado oposto ao que o êmbolo pressionará contra a matriz. Por exemplo, caso a parte a ser testada seja a raiz da solda, esta deve ser posicionada de forma a ficar direcionada à folga da matriz. Para que a solda seja aceitável nenhuma descontinuidade deve apresentar dimensões maiores que 3 mm

A tensão de ruptura do material, obtida através do ensaio de tração, que deve ser realizado através da obtenção da carga de ruptura do corpo de prova dividida por sua menor área de seção transversal. O valor da tensão obtida através do ensaio deve ser maior que a tensão especificada para o metal base utilizado.

Deve ser também realizado um ensaio macrográfico para verificar se as dimensões da solda são adequadas (tamanho mínimo de perna especificado para soldas de filete, por exemplo) e se houve fusão até a raiz em soldas de filete. A solda não pode apresentar trincas, falta de fusão e mordeduras maiores que 1 mm.

Para ensaio de soldas de filete deve ser construído um corpo de prova deve ser montado conforme a figura 12 abaixo. A perna máxima da solda deve ser conhecida para definir a espessura da chapa de teste. Em caso de soldas multipasses o tamanho mínimo da perna é que deve ser conhecido. A placa de testes deve ser soldada na posição plana e deve ter dimensões suficientes para que todos os corpos de prova sejam retirados. As variáveis de soldagem devem estar em níveis parecidos com o que será utilizado durante a fabricação de juntas qualificadas. Devem ser realizados dois ensaios de flexão lateral e um ensaio de tensão de metal depositado.

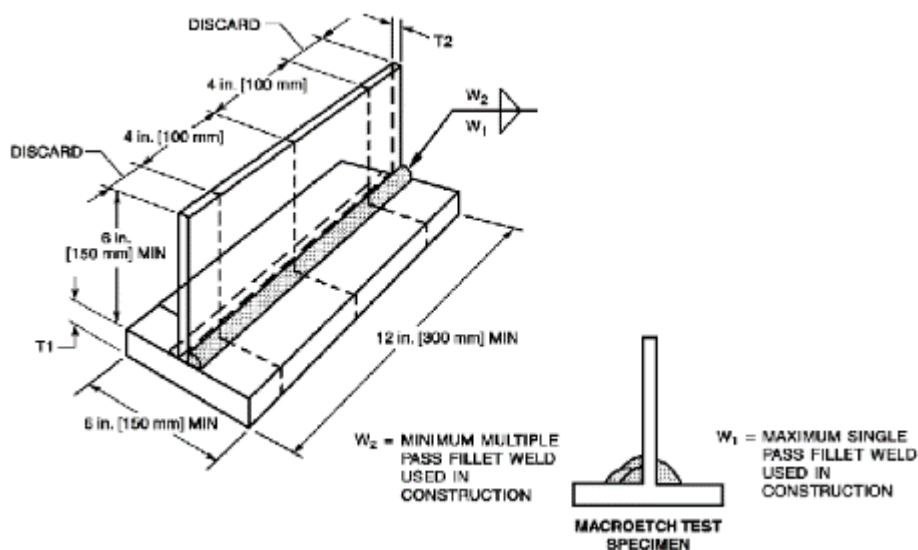


Figura 12 - Exemplo de chapa de teste (AWS D1.1, 2012)

A tabela abaixo dá as coordenadas para o tamanho máximo de solda com relação à espessura das chapas de teste:

Tabela 7 - Relação entre tamanho de solda máximo e dimensões da chapa de teste (AWS D1.1, 2012)

Milímetros		
Tamanho de solda	T1 (mín.)	T2 (mín.)
5	12	5
6	20	6
8	25	8
10	25	10
12	25	12
16	25	16
20	25	20
> 20	25	25

A figura13 abaixo demonstra os tipos de ensaio necessários para a qualificação da junta de filete.

Tabela 4.4
Número e Tipo de Espécimes de Teste e Faixa de Espessura Qualificada - Qualificação WPS; Soldas de Filete (ver 4.12.1)

Espécie de Teste	Tamanho de Filete	Número de Soldas por WPS	Espécime de Teste Requerido b			Tamanhos Qualificados	
			Análise Metalográfica 4.11.1 4.8.4	Tensão de Metal Consolidado (ver Figura 4.18)	Flexão Lateral (ver Figura 4.13)	Espessura de Placa/Cano	Tamanho do Filete
Teste T- de Placa (Figura 4.19)	Passo único, tamanho máximo a ser usado em construção	1 em cada posição a ser usada	3 faces	-	-	Ilimitado	Passo único máximo testado e menor
	Passo múltiplo, tamanho mínimo a ser usado em construção	1 em cada posição a ser usada	3 faces	-	-	Ilimitado	Passo múltiplo mínimo testado e maior
Teste T- de Cano ^c (Figura 4.20)	Passo único, tamanho máximo a ser usado em construção	1 em cada posição a ser usada (ver Tabela 4.1)	3 faces (exceto para 4F & 5F, 4 faces requeridas)	-	-	Ilimitado	Passo único máximo testado e menor
	Passo múltiplo, tamanho mínimo a ser usado em construção	1 em cada posição a ser usada (ver Tabela 4.1)	3 faces (exceto para 4F & 5F, 4 faces requeridas)	-	-	Ilimitado	Passo múltiplo mínimo testado e maior
Teste de chanfro ^d (Figura 4.23)	-	1 na posição 1G	-	1	2	Qualifica consumíveis de soldagem a serem usados no teste T- acima	

Figura 13 - Requerimentos para qualificação de junta de filete (AWS D1.1, 2012)

Para soldagem de chapas de teste em soldas de chanfro com penetração total temos a seguinte tabela que confronta as espessuras que poderão ser soldadas com a EPS e as dimensões da chapa de teste.

Tabela 8 - Espessuras para chapas de teste (AWS D1.1, 2012)

Espessura nominal da placa de teste	Número de espécimes				Espessura qualificada	
	Ensaio de tração	Dobramento de raiz	Dobramento de face	Dobramento lateral	Mín.	Máx.
$3 \leq T \leq 10$	2	2	2	Nota 9	3	2T
$10 \leq T \leq 25$	2	-	-	4	3	2T
≥ 25	2	-	-	4	3	Ilimitada

A nota 9 citada acima permite que para uma chapa de teste de espessura 10 mm um dos testes de dobramento lateral pode ser substituído por cada um dos dobramento de raiz ou de face.

Para soldas em chanfro com penetração parcial a seguinte tabela deve ser seguida.

Tabela 9 - Número de ensaios necessários para soldas de penetração parcial (AWS D1.1, 2012)

Espessura nominal da placa de teste	Número de espécimes					Profundidade do chanfro	Espessura qualificada	
	Macrografia	Ensaio de tração	Dobramento de raiz	Dobramento de face	Dobramento lateral		Mín.	Máx.
$3 \leq T \leq 10$	2	2	2	2	Nota 9	T	3	2T
$10 \leq T \leq 25$	2	2	-	-	4	T	3	2T

3. METODOLOGIA

Este trabalho tem como objetivo estudar o comportamento do material ASTM A148 durante a soldagem realizada pelo processo GMAW. Foram realizadas quatro soldas variando alguns dos parâmetros de soldagem. Dois dos corpos de prova foram soldados com pré-aquecimento de 150 °C e dois não passaram por tratamento térmico anterior à solda. O aço fundido ASTM A148 foi soldado à uma chapa de aço estrutural laminada ASTM A572 Gr. 50, com junta tipo T sem chanfro, formando um filete de solda, conforme a figura abaixo.



Figura 14 - Junta antes da soldagem

As composições químicas dos materiais utilizados podem ser encontradas na tabela 10 abaixo.

Tabela 10 - Composições químicas dos materiais base

Material	Composição química							
	C, %	Si, %	Mn, %	P, %	S, %	Ni, %	Cr, %	Mo, %
A148 Gr. 105-85	0,367	0,615	1,28	0,0333	0,0198	0,255	0,75	0,204
A572 Gr. 50	0,109	0,184	1,16	0,0262	0,045	0,0015	0,0162	0,0054

A microestrutura encontrada para o aço fundido ASTM A148 Gr. 105-85 pode ser visualizada na figura 15 abaixo.

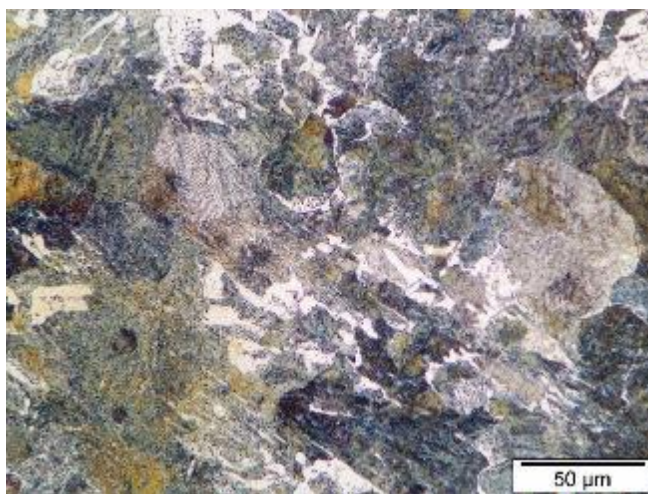


Figura 15- Microestrutura de um aço ASTM A 148 Gr 105-85

3.1 SOLDAGEM E CONSUMÍVEIS

As juntas foram soldadas utilizando uma fonte modelo Sumig Eagle 408 com corrente contínua e eletrodo no polo positivo. O gás de proteção utilizado foi o Corgon 8 (8% de CO₂ em Ar) da fornecedora Linde e o arame utilizado foi o Aristorod 12.50 1,2 mm da marca ESAB, correspondente ao E70S-6 da norma AWS A 5.18, conforme figura 15 e 16 abaixo.



Figura 16 - Equipamento de soldagem utilizado




METAL DEPOSITADO	PROPIED. MECÂNICAS	POSIÇÃO SOLDAGEM	DIÂM. (mm)	TENSÃO (V)	FAIXA DE CORRENTE (A)	DEPOS. (kg/h)	GÁS DE PROTEÇÃO TIPO DE CORRENTE
C 0,10	Ar+20% CO2		0,8	18 - 24	60 - 200	0,8 - 2,5	Ar + 8-25% CO2
Si 0,90	L.R. 560 MPa		1,0	18 - 32	80 - 300	1,0 - 5,5	ou
Mn 1,50	L.E. 470 MPa		1,2	18 - 35	120 - 380	1,3 - 8,0	100% CO2
	A 26%						CC+
	ChV (+20°C) 130J						
	ChV (-20°C) 90J						
	ChV (-30°C) 70J						
	ChV (-40°C) 60J						
	100% CO2						
	L.R. 540 MPa						
	L.E. 440 MPa						
	A 25%						
	ChV (20°C) 120J						
	ChV (-20°C) 70J						

Figura 17 - Dados do metal de adição utilizado durante a soldagem

Os parâmetros de soldagem podem ser encontrados na tabela 11 abaixo. Como a soldagem foi feita manualmente, a determinação da velocidade de soldagem foi realizada através da cronometragem do tempo que o soldador levava para a execução de cada cordão.

Tabela 11 - Parâmetros de soldagem

Junta	Nº de passes	Tensão, V	Corrente, A	Velocidade de soldagem, mm/min	Pré-aquecimento, °C
1	1	28,5	246	250	Sim, 150 °C
2	2	28,6	246	234	Sim, 150 °C
3	1	28,5	243	288	Não
4	2	28.7	245	268	Não

3.2 ENSAIO NÃO DESTRUTIVO

Antes de se realizar os ensaios de macrografia do material foram realizados ensaios não destrutivos nos corpos de prova para verificar a presença de descontinuidades nos corpos de prova.

Foram realizados ensaios visuais e de líquido penetrante, conforme as figuras abaixo.



Figura 18 - Junta inspecionada por ensaio visual

Após a inspeção visual a junta soldada foi limpa com solvente para retirada de qualquer contaminante e após a secagem foi realizada a aplicação do líquido penetrante Metal Chek tipo II Método A VP 30, conforme figura 19 abaixo.

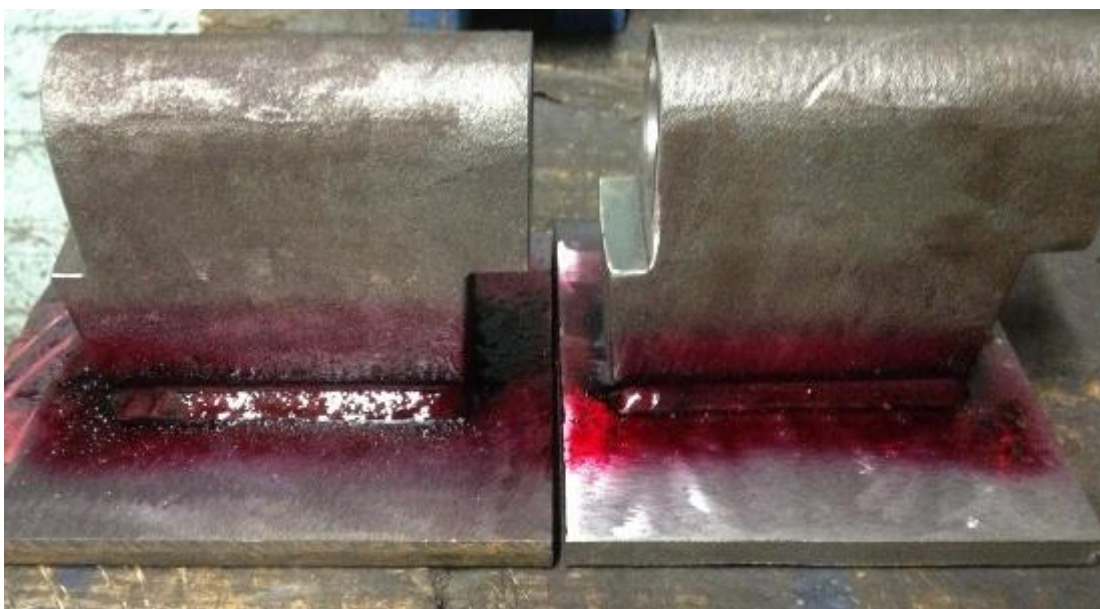


Figura 19 - Aplicação do líquido penetrante nas juntas soldadas

Foi utilizado um tempo de penetração de aproximadamente 15 minutos. O excesso de líquido penetrante foi removido com estopas de pano embebidas em água

e em seguida foi aplicado o revelador Metal Chek D 70 forma D e em uma das juntas foi encontrado um poro perto da cratera, o que pode ser observado na figura abaixo.



Figura 20 - Aplicação do revelador após a retirada do excesso de líquido penetrante

3.3 MACROGRAFIA

Foram retirados corpos de prova tomando-se o cuidado para que a região a ser ensaiada apresentasse resultados confiáveis. O corte foi realizado em uma serra com fluido refrigerante e as amostras foram em seguida lixadas até que se obtivesse a superfície adequada, com uso de lixas com granulometrias cada vez menores. Após essa etapa foi efetuado um ataque com o agente Nital 3%.

3.4 ENSAIO DE DUREZA

Os ensaios de dureza realizados nas quatro amostras foram de dois tipos. Primeiro foi realizado o ensaio Brinell e nos casos em se estimava uma dureza maior foi utilizado o ensaio Rockwell tipo C. Foram realizadas medições nos dois metais-base, nas duas zonas termicamente afetadas (ZTA) e também na zona fundida do cordão de solda.

O ensaio de dureza Brinell foi realizado com esfera de carbeto de tungstênio e carga de 187,5 kg, já o ensaio Rockwell tipo C foi realizado com um indentador de diamante, pré-carga de 10 kg e carga de teste de 150 kg.

3.5 MICROGRAFIA

Os ensaios de micrografia foram realizados nas mesmas amostras onde foram realizadas a avaliação macrográfica. As amostras foram lixadas da mesma forma e o polimento foi realizado com alumina de granulometria 1 μm . O ataque químico foi realizado com Nital 3%.

4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

4.1 ENSAIO NÃO DESTRUTIVO

Conforme a figura 21, podemos observar que foi encontrada uma descontinuidade em um dos cordões de solda, especificamente a junta número 3.



Figura 21 - Poro encontrado durante ensaio não destrutivo

De acordo com a norma AWS D1.1 a presença deste poro pode ser considerada como descontinuidade e é aceitável. Este poro só deveria ser removido caso a solda fosse de penetração total ou se em 300 mm a soma de todos os poros maiores que 1 mm fosse maior que 10 mm.

Durante a inspeção visual não foi encontrado nenhum tipo de descontinuidade que afetasse a resistência da junta.

4.2 MACROGRAFIA

Nas amostras de macrografia podemos notar que apareceram poros nas amostras 1, 3 e 4. Também é possível notar que há penetração suficiente em todas as juntas soldadas. O perfil do cordão de solda também está adequado ao que a norma AWS D1.1 requisita.

Também é possível verificar que a zona termicamente afetada é maior nas amostras 1 e 2, que sofreram tratamento térmico de pré-aquecimento a 150 °C. A penetração e largura do cordão das amostras pré-aquecidas também são maiores que o restante das amostras.



Figura 22 - Amostra 01 após ataque com Nital 3%

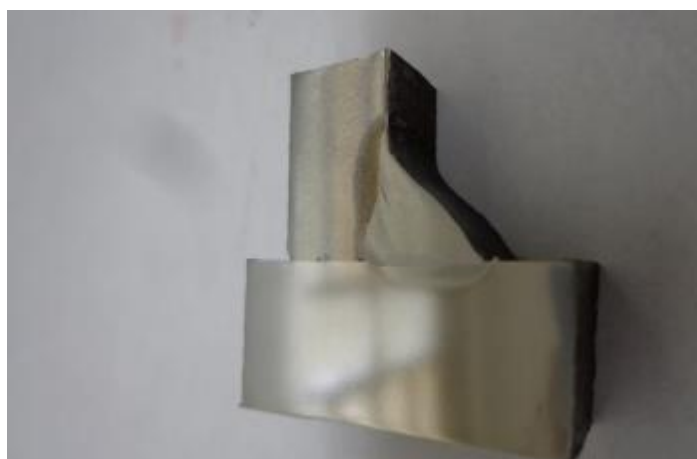


Figura 23 - Amostra 02 após ataque químico com Nital 3%



Figura 24 - Amostra 03 após ataque químico com Nital 3%



Figura 25 - Amostra 04 após ataque químico com Nital 3%

4.3 MICROGRAFIA

As figuras abaixo representam as estruturas encontradas nas amostras soldadas. As figuras (a) representam a zona fundida do cordão, a (b) representa a ZTA encontrada no metal base ASTM A148 Gr. 105-85 e a (c) representa a ZTA no metal de base ASTM A572 Gr. 50.

Não houveram diferenças significativas na microestrutura das juntas soldadas, além da zona de refino quando foi utilizada a técnica de dois passes.

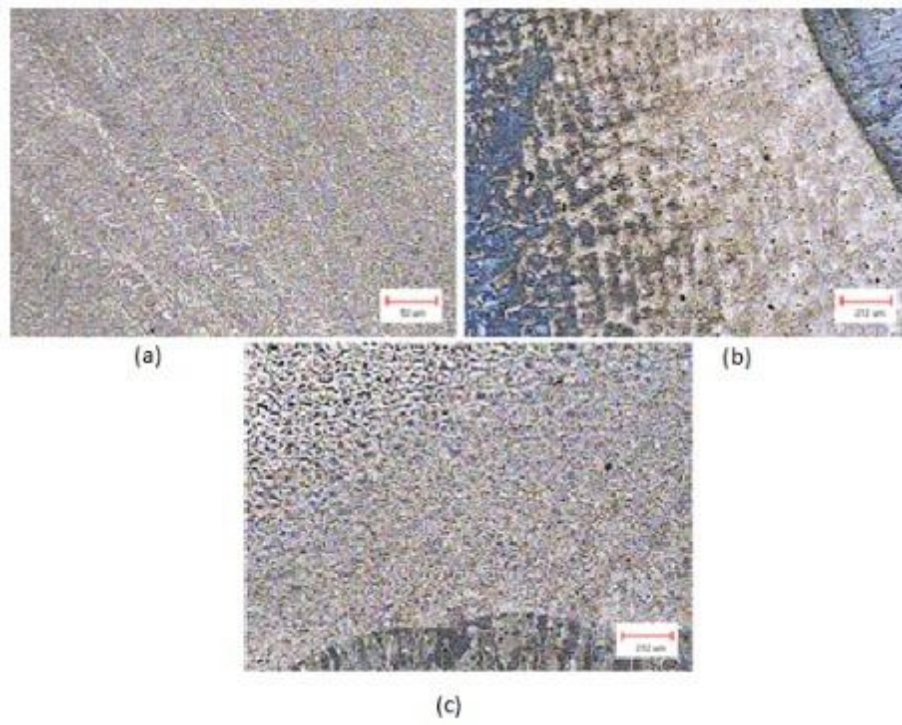


Figura 26 - Micrografias da amostra 01

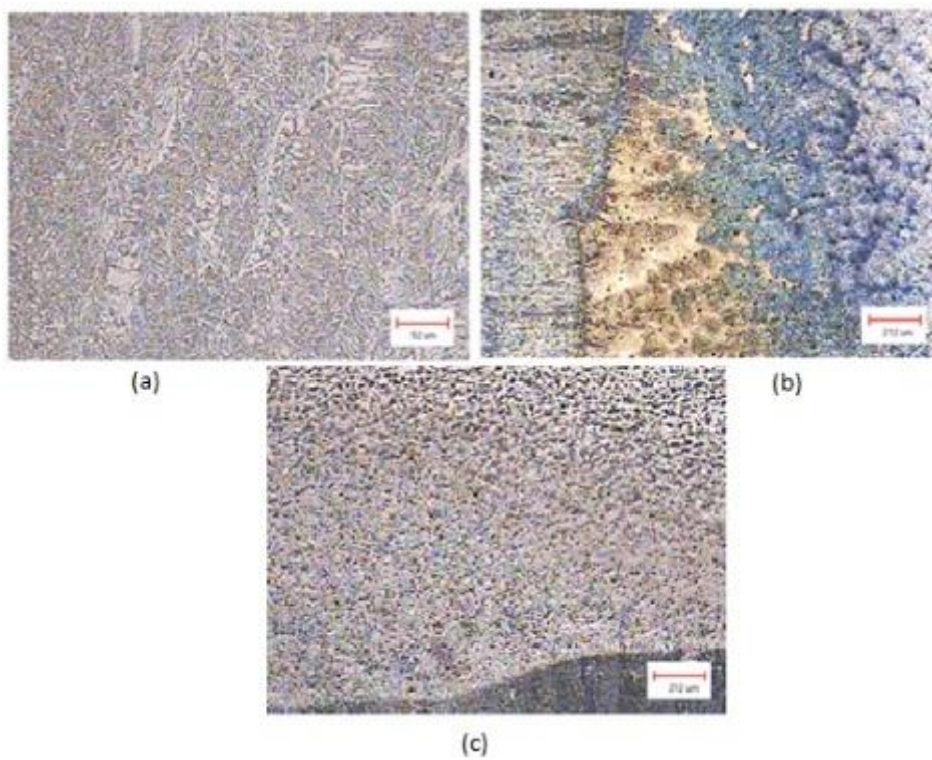


Figura 27- Micrografias da amostra 02

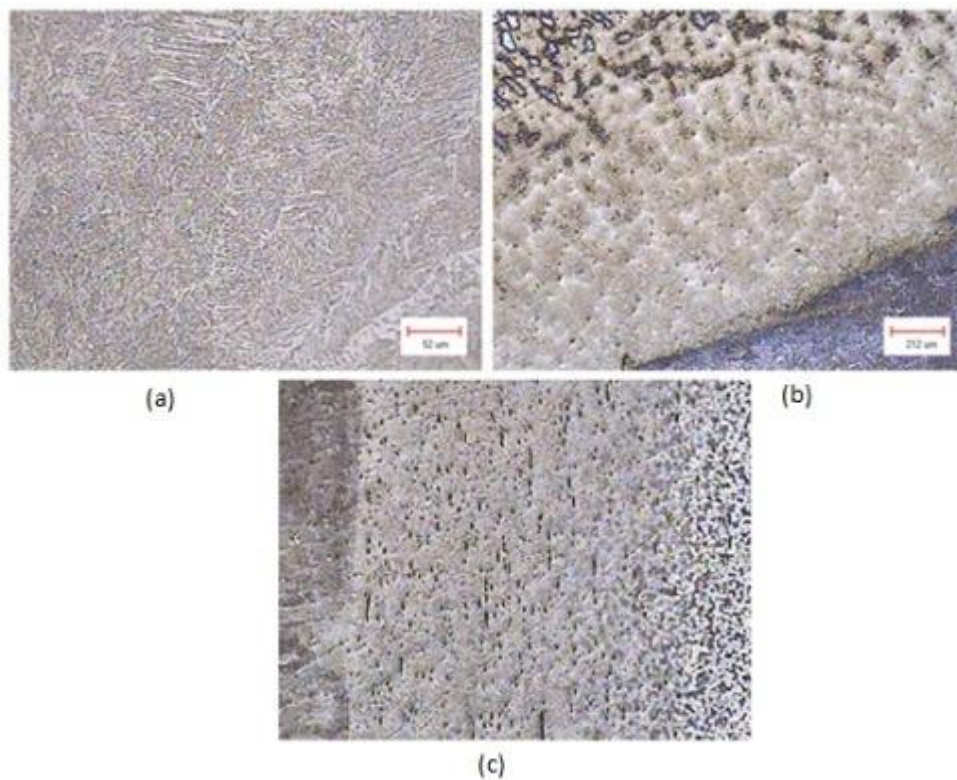


Figura 28 - Micrografias da amostra 03

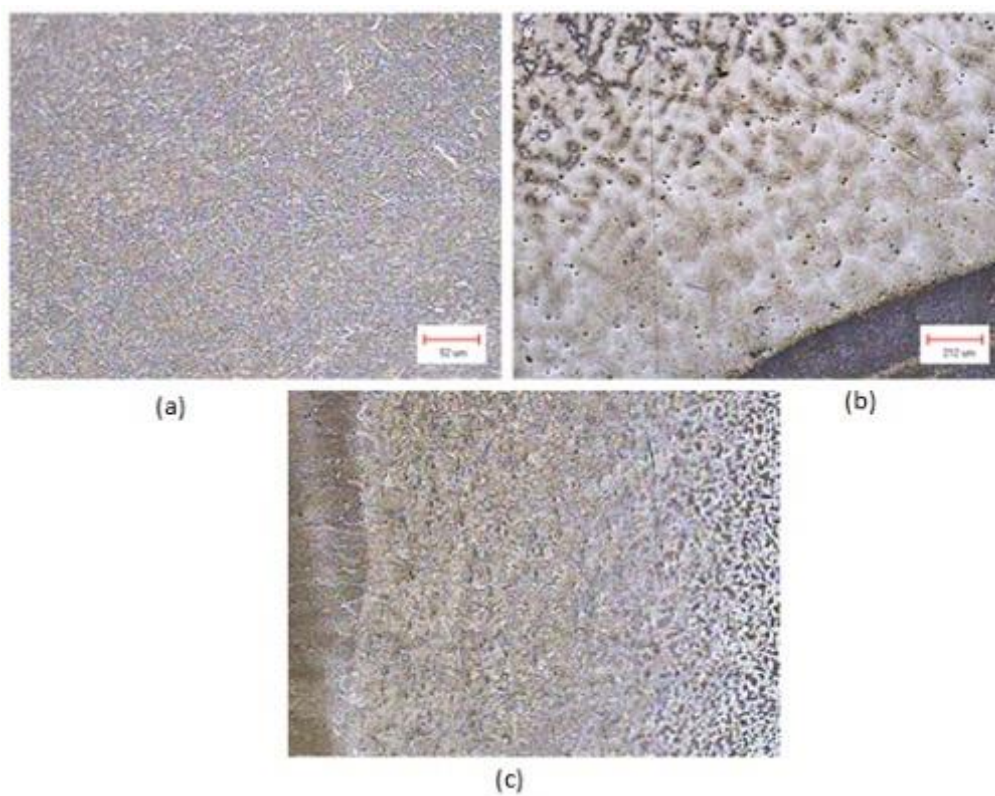


Figura 29- Micrografias da amostra 04

4.4 DUREZA

Os valores de dureza encontrados para as amostras encontram-se na tabela a seguir. O código Mb1 representa o aço ASTM A572 Gr. 50, enquanto o Mb2 representa o aço ASTM A148 Gr. 105-85.

Tabela 12 - Resultado das medições de dureza

Amostra	Dureza				
	Metal de Solda [HRC]	ZTA Mb1 [HRC]	ZTA Mb2 [HRC]	Mb1 [HB]	Mb2 [HB]
1	25	22	39	158	211
2	21	18	40	161	198
3	25	18	39	156	195
4	29	19	38	150	195

É possível notar que a dureza encontrada na ZTA do metal de base ASTM A148 Gr. 105-85 é muito superior que a do restante da amostra.

5. CONCLUSÃO E SUGESTÕES

O trabalho apresentado teve como objetivo verificar se a soldagem dos materiais ASTM A572 Gr.50 e ASTM A148 Gr.105-85.

Com base no estudo realizado é possível destacar:

- Foi verificado que os parâmetros de soldagem selecionados foram capazes de produzir um cordão de solda de aparência e penetração adequadas em todas as juntas;
- Nos ensaios não destrutivos realizados não foi encontrado nenhum tipo de defeito de soldagem que descartasse a amostra;
- Não houve diferença significativa entre as amostras soldadas com pré-aquecimentos e as que foram soldadas sem.

Sugere-se para o aprofundamento da verificação da soldabilidade das juntas:

- Realização de ensaios destrutivos nas amostras, como ensaio de tração e dobramento;
- Verificação da redução da dureza com a utilização de temperaturas de pré-aquecimento maiores que 150°C;
- Realização de ensaios de Ultrassom ou Radiografia para verificação da sanidade da junta soldada.

6. REFERÊNCIAS

AMERICAN SOCIETY FOR MATERIALS ASM Handbook Volume 6: Welding, Brazing and Soldering, 1998.

AMERICAN SOCIETY FOR MATERIALS ASM Handbook Volume 9: Metallography and Microstructures, 1998.

AMERICAN SOCIETY FOR MATERIALS ASM Handbook Volume 15: Casting, 1998.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS ASTM A 148 Standard Specification for Steel Castings, High Strength for Structural Purposes, 2008.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS ASTM A 572/572M Standard Specification for High-Strength Low-Alloy Columbium-Vanadium Structural Steel, 2012.

AMERICAN WELDING SOCIETY AWS A3.0 Standard Welding Terms and Definitions, 2002.

AMERICAN WELDING SOCIETY AWS D1.1/D1.1M Structural Welding Code - Steel, 2010.

CALLISTER, W. D., Materials Science and Engineering : An Introduction, 5th edition, John Wiley & Sons, Inc., 5th edition, 1999.

KOU, S., Welding Metallurgy. Book, John Wiley & Sons. 2003.

DA SILVA, C. L. J., PARANHOS, R., Fissuração a Quente (Trincas a Quente), Infosolda, 2003

WHITTAM PRECISION RULES. Shrink Rulers. Disponível em: <http://www.whittamprecision.co.uk/shrink_rulers.htm>. Acesso em: 15 maio 2013.