

LUCAS MANOEL LEANDRO COSTA

**Influência da concentração gasosa da mistura Hélio e Argônio
nos processos de soldagem de cobre**

Lucas Manoel Leandro Costa

**Influência da concentração gasosa da mistura Hélio e Argônio
nos processos de soldagem de cobre**

Trabalho de Graduação apresentado ao Conselho de Curso de Graduação em Engenharia Mecânica da Faculdade de Engenharia do Campus de Guaratinguetá, Universidade Estadual Paulista, como parte dos requisitos para obtenção do diploma de Graduação em Engenharia Mecânica.

Orientador: Prof. Dr. Peterson Luiz Ferrandini.

C837i	Costa, Lucas Manoel Leandro Influência da concentração gasosa da mistura Hélio e Argônio nos processos de soldagem de cobre / Lucas Manoel Leandro Costa – Guaratinguetá, 2021. 54 f : il. Bibliografia: f. 46-47 Trabalho de Graduação em Engenharia Mecânica – Universidade Estadual Paulista, Faculdade de Engenharia de Guaratinguetá, 2021. Orientador: Prof. Dr. Peterson Luiz Ferrandini 1. Gases. 2. Gases nobres. 3. Soldagem. I. Título. CDU 621.6.02
-------	---

Luciana Maximo

Bibliotecária CRB-8/3595

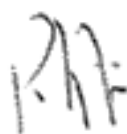
LUCAS MANOEL LEANDRO COSTA

ESTE TRABALHO DE GRADUAÇÃO FOI JULGADO ADEQUADO COMO
PARTE DO REQUISITO PARA A OBTENÇÃO DO DIPLOMA DE
"GRADUADO EM ENGENHARIA MECÂNICA"

APROVADO EM SUA FORMA FINAL PELO CONSELHO DE CURSO DE
GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA

Prof. Dr. Celso Eduardo Tuna
Coordenador

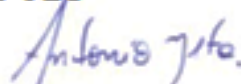
BANCA EXAMINADORA:



Prof. Dr. Peterson Luiz Ferrandini
Orientador/UNESP-FEG



Prof. Me. Everton Coelho de Medeiros
UNESP-FEG



Prof. Me. Antônio dos Reis de Faria Neto
UNESP-FEG

Dedico este trabalho principalmente aos meus pais, e também a todos que participaram dessa trajetória.

AGRADECIMENTOS

Primeiramente eu agradeço a meus pais pela oportunidade de cursar o ensino superior em uma escola pública. A minha avó que sempre me apoiou e a Deus, sempre presente.

Agradeço também ao meu amor, Gabriela, por me transformar e desenvolver o potencial que eu nunca enxerguei em mim.

A família que eu escolhi, meus grandes amigos da República Só na Manteiga que proporcionaram muitos momentos felizes e nunca se ausentaram nos momentos ruins.

Agradeço também à toda comunidade da FEG - UNESP, pois sem eles nada seria possível. Aos professores, pelo conhecimento valioso que aprendi com todos.

Por fim, a todos que fizeram parte dessa caminhada, muito obrigado. Eu sou da FEG!!

“Motor de crescimento econômico mais eficiente já inventado. Inovação em ciência e tecnologia”

Neil deGrasse Tyson

RESUMO

Este trabalho apresenta o estudo da influência da concentração na mistura de gases Hélio e Argônio nos processos TIG / MIG (Tungstênio em Gás Inerte / Metal em Gás Inerte) na soldagem de cobre (Cu). O objetivo principal é avaliar o comportamento das propriedades mecânicas da junta soldada com a utilização de 3 concentrações diferentes da mistura, sendo: ArHe75 (75% Hélio + 25% Argônio), ArHe50 (50% Hélio + 50% Argônio) e ArHe25 (25% Hélio + 75% Argônio). A análise segue em conformidade com a norma ASME IX – 2019, que estabelece critérios para a fabricação de corpos de prova, metodologia de ensaios e critérios de aceitação para avaliação dos gases. A mistura ArHe25 foi a concentração mais benéfica a solda, devido ao aumento na resistência a tração ocasionado pelo acréscimo da concentração de argônio, sendo também a composição mais viável economicamente.

PALAVRAS-CHAVE: Solda. Gases de solda. ASME-IX. TIG. MIG.

ABSTRACT

This work presents the study of the influence of concentration in the mixture of Helium and Argon gases in the TIG / MIG (Tungsten in Inert Gas / Metal in Inert Gas) processes in copper (Cu) welding. The main objective is to evaluate the mechanical properties of the welded joint using 3 different concentrations of the mixture: ArHe75 (75% Helium + 25% Argon), ArHe50 (50% Helium + 50% Argon) and ArHe25 (25 % Helium + 75% Argon). The analysis follows in accordance with the ASME IX - 2019 standard, which is the criterion for the manufacture of specimens, testing methodology and acceptance criteria for the evaluation of gases. The ArHe25 mixture was the most beneficial to weld, due to the increase in tensile strength caused by the increase in the concentration of argon, being also a more economically viable composition.

KEYWORDS: Weld. Gas Welding. ASME-IX. GTAW. GMAW.

LISTA DE FIGURAS

Figura 01 – Fluxograma dos tipos de proteção na soldagem.....	14
Figura 02 – Tocha de soldagem TIG.....	15
Figura 03 – Processo TIG.....	16
Figura 04 – Tocha de soldagem MIG.....	17
Figura 05 – Processo de soldagem MIG.....	18
Figura 06 – Característica da poça de fusão.....	23
Figura 07 – Esquema de ensaio para dobramento transversal lateral, de face e de raiz.....	27
Figura 08 – Croqui da chapa para fabricação do corpo de prova.....	30
Figura 09 – QW 462.1(d).....	32

LISTA DE FOTOGRAFIAS

Fotografia 01 – Chapas no dispositivo de soldagem.....	31
Fotografia 02 – Chapas soldadas.....	31
Fotografia 03 – Identificação dos corpos de prova para ensaio de tração.....	33
Fotografia 04 – Conjunto de CDP's preparados para ensaio de tração.....	33
Fotografia 05 – Corpo de prova para ensaio de dobramento lateral.....	34
Fotografia 06 – Detalhes da identificação dos corpos de prova.....	34
Fotografia 07 – Corpo de prova para ensaio de dobramento de face e de raiz.....	35
Fotografia 08 – Dispositivo de dobra na prensa.....	35
Fotografia 09 – Chapas pós-soldadas para ensaio visual.....	36
Fotografia 10 – Corpos de prova ensaiados.....	39
Fotografia 11 – Fratura na solda / Fratura no metal base.....	39
Fotografia 12 – Dobramento de Face e Raiz.....	39
Fotografia 13 – Dobramento Lateral.....	39
Fotografia 14 – Ensaio de Dobramento (75% He + 25% Ar)	39
Fotografia 15 – Ensaio de Dobramento (50% He + 50% Ar)	40
Fotografia 16 – Ensaio de Dobramento (25% He + 75% Ar)	40

LISTA DE TABELAS

Tabela 01 – Propriedades dos gases de solda.....	21
Tabela 02 – Comportamento químico e aplicação dos gases de solda.....	21
Tabela 03 – Aplicação dos gases em diferentes processos e materiais.....	22
Tabela 04 – Parâmetros de qualificação ASME IX QW 451.1.....	29
Tabela 05 – Identificação das chapas soldadas.....	32
Tabela 06 – Dimensões para CDP Tração - QW 462.1(d).....	32
Tabela 07 – Resultados do ensaio de tração para o metal base.....	36
Tabela 08 – Resultados do ensaio de tração dos corpos de prova soldados.....	37
Tabela 09 – Resultados dos ensaios de dobramento lateral.....	40
Tabela 10 – Resultados dos ensaios de dobramento de face e de raiz.....	42
Tabela 11 – Cotação das misturas de gases.....	44

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	13
1.1	PROCESSO TIG	13
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	14
2.1	PROCESSO TIG	15
2.1.1	Vantagens e desvantagens do processo	16
2.2	PROCESSO MIG	17
2.2.1	Vantagens e desvantagens do processo	19
2.3	GASES	20
2.3.1	Propriedades e Características dos Gases	20
2.3.2	Gases Nobres	22
2.4	COBRE	23
3	ASME IX	25
3.1	REQUISITOS GERAIS	25
3.2	ENSAIOS PROPOSTOS	25
3.2.1	Exame Visual	25
3.2.1.1	Critérios de aceitação	26
3.2.2	Ensaio de Tração	26
3.2.2.1	Critérios de aceitação	26
3.2.3	Ensaio de Dobramento	27
3.2.3.1	Dobramento transversal lateral	27
3.2.3.2	Dobramento transversal de face	28
3.2.3.3	Dobramento transversal de raiz	28
3.2.3.4	Critérios de aceitação	28
4	METODOLOGIA	29
4.1	ENSAIO DE TRAÇÃO	32
4.2	ENSAIO DE DOBRAMENTO	33
4.2.1	Dobramento Lateral	34
4.2.2	Dobramento de Face e Raiz	34
5	RESULTADOS	36
5.1	ENSAIO VISUAL	36
5.2	ENSAIO DE TRAÇÃO	36
5.3	ENSAIO DE DOBRAMENTO	39

5.4	DISCUSSÃO DOS RESULTADOS	42
6	CONCLUSÃO	45
	REFERÊNCIAS	46
	BIBLIOGRAFIA CONSULTADA	47
	ANEXO A – ASME IX QW 463.1(a) e QW 463.1(b).....	48
	ANEXO B – ASME IX QW 462.2	49
	ANEXO C – ASME IX QW 462.3(a).....	50
	ANEXO D – ASME IX QW 466.2	51

1 INTRODUÇÃO

Hélio e Argônio são gases nobres comumente utilizados nos processos de soldagem (TIG/MIG) (Tungstênio em Gás Inerte / Metal em Gás Inerte) sendo o meio de proteção para evitar a contaminação de impurezas na poça de fusão, além de fornecerem características específicas das propriedades do cordão de solda.

Os gases nobres possuem custo elevado, sendo necessária a escolha adequada do gás ao processo de soldagem. O gás ideal deve atender aos requisitos de qualidade da junta soldada ao menor custo de fabricação. Para isso, muitas vezes são utilizadas misturas de gases de modo a unir propriedades diferentes de cada um.

Os processos de soldagem de chapas em cobre (Cu), utilizam como gás de proteção uma mistura composta por Hélio (He) e Argônio (Ar). Como esses gases possuem preços diferentes, se faz necessário avaliar como a concentração de cada gás afeta as propriedades da solda, pois é interessante ao processo a utilização da mistura gasosa com o menor custo.

Para avaliar a influência da concentração desses gases nas propriedades da solda, serão analisadas 3 diferentes combinações, denominadas: ArHe75 (75% He + 25% Ar), ArHe50 (50% He + 50% Ar) e ArHe25 (25% He + 75% Ar). As misturas serão avaliadas através de ensaios mecânicos normatizados pela ASME IX.

1.1 OBJETIVO

Objetivo deste trabalho é avaliar como a variação da concentração de hélio, e por consequência a variação da concentração do argônio, afetam as propriedades mecânicas da junta soldada, de modo a identificar a combinação de menor custo adequada aos processos.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

A solda é consequência do processo de soldagem, no qual se une dois metais com ou sem aplicação de pressão, e com calor. A soldagem deve ser realizada com controle necessário para se obter as propriedades desejadas, evitando a contaminação pelo ar atmosférico (WAINER, 2004).

Não é possível realizar uma soldagem ideal, pois, as superfícies dos materiais que são soldados não são planas em escala microscópica, ou seja, apresentam picos e vales devido à descoordenação dos átomos na superfície. Portanto, ao tentar se unir superfícies irregulares, sempre haverá a presença de defeitos e diferenças de composição química na região da solda, ainda mais quando há a soldagem de materiais de composição diferentes (MESSLER, 1999).

O processo de soldagem se encontra em constante melhoria, pois nem sempre é possível se obter um metal com boa capacidade de ser soldado, e, portanto, deve ser necessário possuir um processo de alta qualidade para estes casos (WAINER, 2004).

De acordo com a AWS (2007) (*American Welding Society* – Sociedade Americana de Soldagem) os processos de soldagem ao arco elétrico são definidos em: Soldagem com Eletrodo Revestido, Soldagem TIG (Tungstênio em Gás Inerte), Soldagem MIG/MAG (Metal em Gás Inerte / Metal em Gás Ativo), Soldagem com Arame Tubular; Soldagem a Arco Submerso e Soldagem a Plasma, conforme Figura 01.

Figura 01 – Fluxograma dos tipos de proteção na soldagem.



Fonte: CEFET-MG (2016).

2.1 PROCESSO TIG

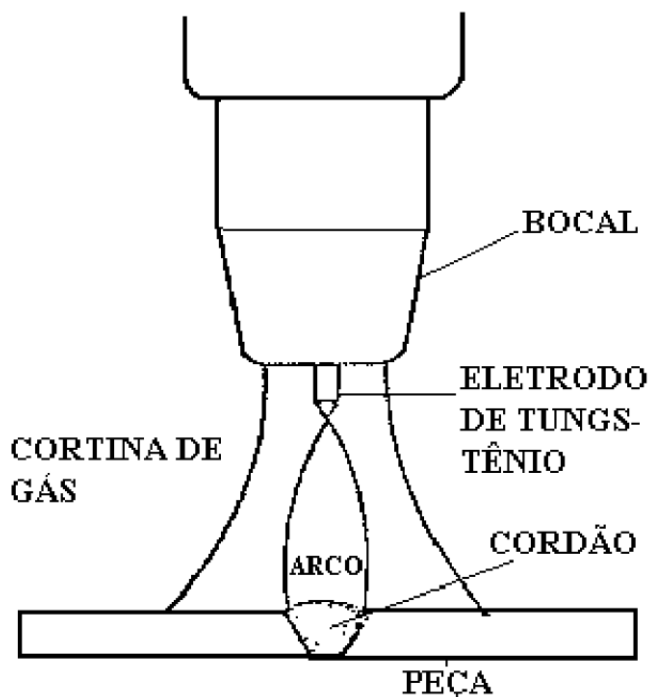
O processo TIG (Tungstênio em Gás Inerte), trata-se de um processo de soldagem a arco elétrico que utiliza um arco entre um eletrodo não consumível de tungstênio e a poça de soldagem, a proteção do arco quanto da poça e do eletrodo, se faz por meio do fluxo de gás inerte (MESSLER, 1999).

O processo TIG pode ser usado no processo produtivo que envolva soldagem de materiais distintos, como em aplicações específicas de manutenção e revestimento onde permite obter resultados únicos característicos do processo (MESSLER, 1999).

O material do utilizado no eletrodo é o Tungstênio, que produz o arco elétrico gerando o calor necessário para realização da solda. O seu elevado ponto de fusão, aproximadamente 3410 °C torna-o praticamente não consumível neste tipo de aplicação (MARQUES, 2011).

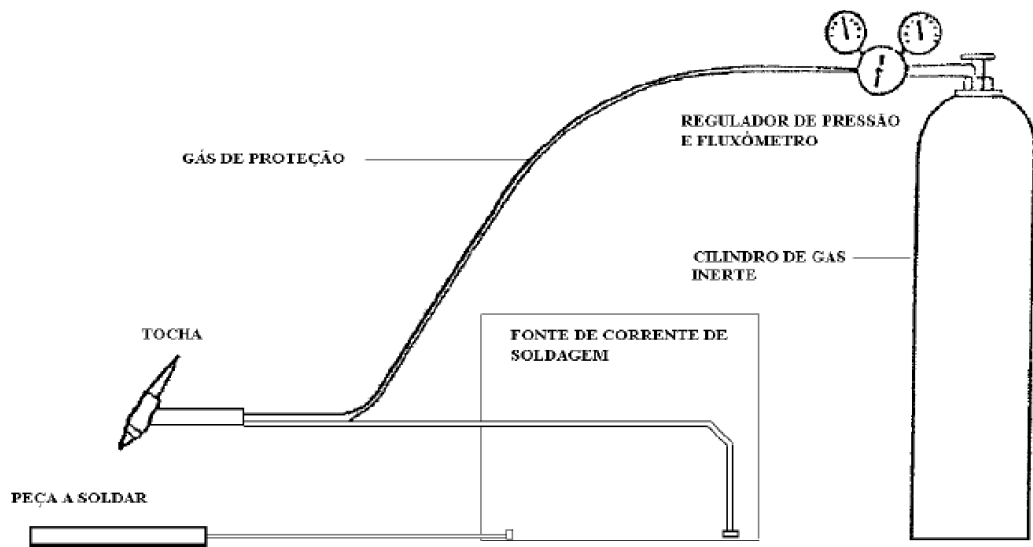
O eletrodo de tungstênio se encontra na tocha, o qual é circundado por um tubo de contato, que normalmente possui água circulante a fim de evitar o superaquecimento do eletrodo, vide Figura 02. Nela também há a passagem do gás de proteção que vem do cilindro, conforme Figura 03, e a formação do arco elétrico ocorre devido à um polo da fonte de energia que se conecta ao eletrodo de tungstênio e o outro polo à peça de trabalho (KOU, 2003).

Figura 02 – Tocha de soldagem TIG.



Fonte: Núcleo Tecnológico de Soldagem e Qualidade (2002).

Figura 03 – Processo TIG.



Fonte: Núcleo Tecnológico de Soldagem e Qualidade (2002).

O processo pode ser realizado com ou sem metal adição. Sem o uso do metal de adição, o calor do arco é destinado a fundir as bordas em contato das peças a soldar, que se uniram quando a poça de fusão se solidificar. Com o uso de metal de adição, as bordas da junta são fundidas e adiciona-se material conforme necessidade, podendo ser de forma manual ou automatizada (MARQUES, 2011).

2.1.1 Vantagens e desvantagens do processo

Para Kou (2003), as vantagens e desvantagens do processo são:

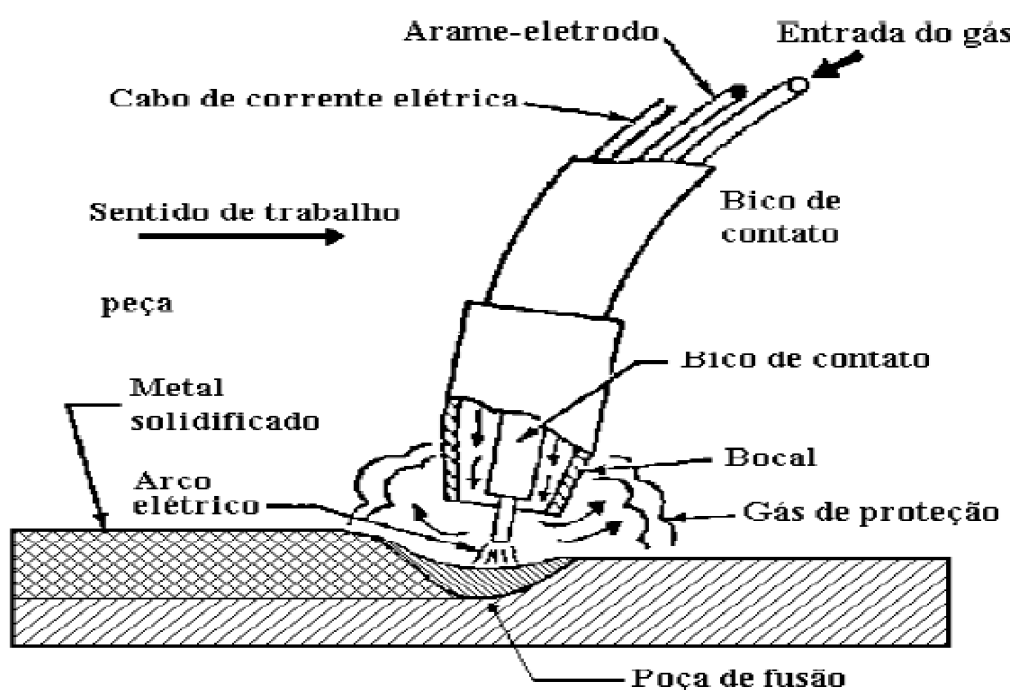
- TIG possui baixa introdução de calor e, portanto, é mais indicado para juntas finas.
- A taxa de alimentação do eletrodo consumível é relativamente independente da corrente utilizada.
- TIG pode soldar metais reativos por ser um processo mais limpo.
- A taxa de deposição é baixa.
- A energia transferida à peça pode ser muito bem controlada, pois a adição de metal na solda e a fonte de calor são controladas de maneira independente.
- Processo adequado para soldas de materiais com baixa soldabilidade.
- Pode ser realizada a solda sem utilização do eletrodo consumível.

Em suma, a soldagem TIG se utiliza frequentemente em situações onde a junção de metais é difícil por outros processos de soldagens. Além disso, ela é utilizada por ser possível controlar a quantidade de calor inserida no material e quando há a necessidade de que a qualidade da solda seja mais importante do que o custo de produção (MARQUES, 2011).

2.2 PROCESSO MIG

No processo de soldagem MIG / MAG (Metal em Gás Inerte / Metal em Gás Ativo), o arco elétrico é estabelecido entre a peça e um consumível na forma de arame. O arco funde continuamente o arame à medida que este é alimentado à poça de fusão, vide Figura 04. O metal de solda é protegido da atmosfera pelo fluxo de um gás (ou mistura de gases) inerte ou ativo (MESSLER, 1999).

Figura 04 – Tocha de soldagem MIG.

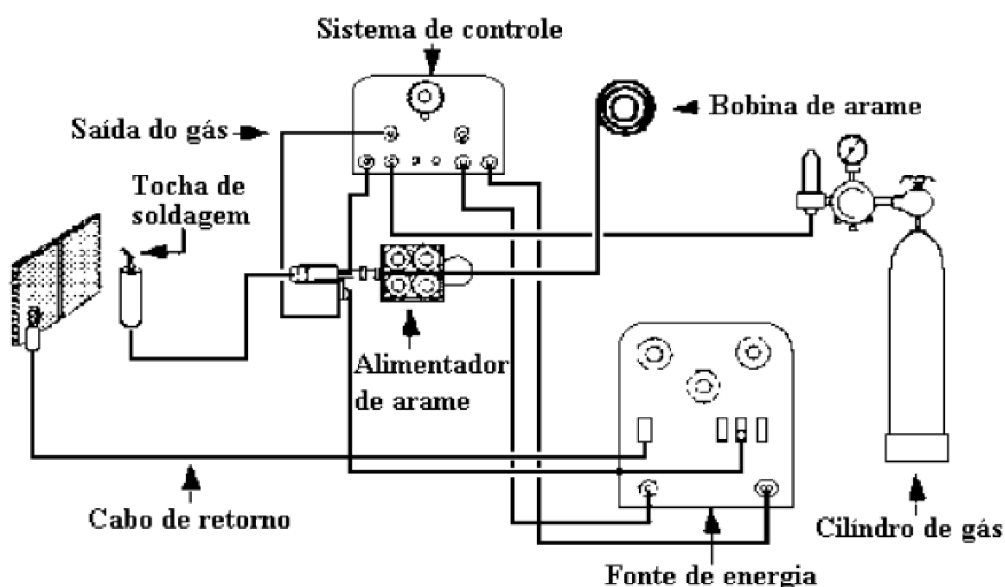


Fonte: Núcleo Tecnológico de Soldagem e Qualidade (2002).

O processo pode ser considerado semiautomático, em que a alimentação do arame-eletrodo é feita mecanicamente através de um alimentador mecanizado, restando ao operador

a função de iniciar e interromper o arco, além da condução da tocha durante a execução da soldagem, vide Figura 05.

Figura 05 – Processo de soldagem MIG.



Fonte: Núcleo Tecnológico de Soldagem e Qualidade (2002).

A alimentação do arco é garantida pela contínua alimentação do arame-eletrodo, enquanto o comprimento do arco é, em princípio, mantido aproximadamente constante pelo próprio sistema, dependendo do movimento do operador e dentro de certos limites (MESSLER, 1999).

O calor gerado pelo arco é usado para fundir as peças a serem unidas e o arame-eletrodo que é transferido para junta como metal de adição, podendo ser utilizado em materiais com uma ampla faixa de espessura (MARQUES, 2011).

A transferência contínua de metal pela coluna de arco faz com que a eficiência do calor adicionado seja superior, neste caso, do que a soldagem pelo processo TIG. A transferência é tão eficiente nesse processo que até elementos muito ativos como o Titânio, conseguem ser recuperados no metal de solda com relativa eficiência, desde que esteja presente no arame determinados elementos de liga (MARQUES, 2011).

A soldagem MIG / MAG é definida como:

- MIG: quando a proteção gasosa utilizada for constituída de um gás inerte, ou seja, um gás normalmente monoatômico como Argônio ou Hélio, e que não sofre reação com os materiais da poça de fusão.
- MAG: quando a proteção gasosa é feita com gás ativo, ou seja, um gás que interage com a poça de fusão, normalmente dióxido de Carbono.

Os dois processos se diferem unicamente pelo gás que utilizam, pois os demais componentes utilizados permanecem os mesmos. A mudança do gás será responsável por uma série de alterações no comportamento das soldagens (GIMENES, 2016).

Estes gases, segundo sua natureza e composição, tem uma influência preponderante nas características do arco, no tipo de transferência de metal do eletrodo à peça, na velocidade de soldagem e na forma externa da solda. Além disso, o gás também tem influência nas perdas de elementos químicos, na temperatura da poça de fusão, na sensibilidade à fissuração e porosidade, bem como na facilidade de execução da soldagem em diversas posições (GIMENES, 2016).

O processo MAG é utilizado somente na soldagem de materiais ferrosos, enquanto o processo MIG pode ser utilizado tanto na soldagem de materiais ferrosos quanto não-ferrosos como alumínio, cobre, magnésio, níquel e suas ligas (MESSLER, 1999).

2.2.1 Vantagens e desvantagens do processo

Para Kou (2003), as vantagens e desvantagens do processo são:

- Todos os metais comercialmente importantes, tais como aços carbono, aços de alta resistência e baixa liga, aço inoxidável, alumínio, cobre, titânio e ligas de níquel; podem ser soldados com o processo, em todas as posições de soldagem através da escolha apropriada do gás de proteção, do arame e das variáveis de soldagem.
- Uma característica típica do processo é que dependendo dos parâmetros de soldagem, em especial corrente, diâmetro do arame, tensão e tipo de gás de proteção, consegue-se distinguir facilmente os três modos de transferência metálica: curto-circuito, globular e spray.

- Alta taxa de deposição do metal de adição.
- Altas velocidades de soldagem; menos distorção das peças.
- Largas aberturas preenchidas ou amanteigadas facilmente, tornando certos tipos de soldagem de reparo mais eficientes.

2.3 GASES

O ar atmosférico é expulso da região de soldagem por um gás de proteção com o objetivo de evitar a contaminação da poça de fusão. A contaminação é causada principalmente pelo nitrogênio, oxigênio e vapor d'água presentes na atmosfera (AINER, 2004).

Para evitar problemas associados a contaminação da poça de fusão, três gases principais são utilizados como proteção: argônio (Ar), hélio (He) e dióxido de carbono (CO₂). Além desses, pequenas quantidades de oxigênio (O₂), nitrogênio (N₂) e hidrogênio (H₂) provaram ser benéficas em algumas aplicações. Desses gases, apenas o argônio e o hélio são gases inertes. A compensação para a tendência de oxidação dos outros gases é realizada pelas formulações especiais dos arames (GIMENES, 2016).

O argônio, o hélio e o dióxido de carbono podem ser empregados puros, em combinações ou misturados com outros gases para proporcionar soldas livres de defeitos numa variedade de aplicações e processos de soldagem.

O conhecimento da função de cada gás e como poderá influenciar sobre o processo de soldagem que está sendo aplicado poderá beneficiar muito o desempenho da produção. O gás de proteção tem um efeito significativo sobre vários parâmetros do cordão de solda, como exemplo podemos citar que: é determinante na velocidade de soldagem e no perfil de penetração e aspecto do cordão, além de influenciar no aporte térmico e quantidade de respingos. (GIMENES, L. Jr., 2016, v. 0, p. 1)

Ainda segundo GIMENES L. Jr. (2016), a redução nos custos de fabricação através do aumento de produção, reduzindo as taxas de rejeição e melhoria da qualidade, fornecem uma vantagem competitiva na seleção correta dos gases de proteção.

2.3.1 Propriedades e Características dos Gases

As propriedades básicas dos gases que afetam o desempenho do processo de soldagem, Tabela 01, incluem: propriedades térmicas a temperaturas elevadas, reação química do gás

com os vários elementos do metal base e do metal de adição, e o efeito de cada gás no modo de transferência de metal.

Tabela 01 – Propriedades dos gases de solda.

Gás	Argônio	Dióxido de Carbono	Hélio	Hidrogênio	Oxigênio	Nitrogênio
Símbolo	Ar	CO ₂	He	H ₂	O ₂	N ₂
Densidade Relativa [Ar (atm.) = 1,0]	1,38	1,53	0,14	0,07	1,1	0,96
Potencial de Ionização [Ev]	15,7	14,4	24,5	13,5	13,2	14,5
Condutividade Térmica [W/mK]	0,018	0,016	0,152	0,181	0,027	0,026
Densidade [Kg/m ³]	1,784	1,980	0,179	0,090	1,429	1,251

Fonte: Adaptado de CEFET - MG (2016).

O uso de gases com a densidade relativa maior que 1,0, ou seja, gases com densidade maior que a densidade do ar, são vantajosas pois facilitam a dispersão do ar atmosférico na região de soldagem e requerem uma vazão de operação menor (GIMENES, 2016).

O potencial de ionização elevado permite a operação de soldagem com uma tensão mais alta, aumentando o nível de energia transferida no processo. O potencial de ionização do gás à temperatura do arco, influencia a energia térmica transferida à solda e a tensão do arco. Quando o potencial de ionização aumenta, maior tensão de soldagem é necessária para sustentar o arco. (GIMENES, 2016).

A compatibilidade de cada gás com o arame do metal de adição e o metal de base determina a adequação das diversas combinações de gases, Tabela 02. Os gases de proteção também determinam o modo de transferência do metal e a profundidade de penetração.

Tabela 02 – Comportamento químico e aplicação dos gases de solda.

Gás ou Mistura	Comportamento Químico	Aplicações
Argônio (Ar)	Inerte	Quase todos os metais (- aço)
Hélio (He)	Inerte	Al, Mg, Cu e suas ligas
Ar + 20 a 50 % He	Inerte	Idem He (melhor que 100% He)
Nitrogênio (N ₂)	Inerte	Cobre e suas ligas
Ar + 20 a 30 % N ₂	Inerte	Idem N ₂ (melhor que 100% N ₂)
Ar + 1 a 2 % O ₂	Ligeiram. oxidante	Aços inox e algumas ligas de Cu
Ar + 3 a 5 % O ₂	Oxidante	Aços carbono e alguns baixa liga
CO ₂	Oxidante	Aços carbono e alguns baixa liga
Ar + 20 a 50 % CO ₂	Oxidante	Diversos aços (- curto-circuito)
Ar + CO ₂ + O ₂	Oxidante	Diversos aços

Fonte: O Autor (2020).

2.3.2 Gases Nobres

- Argônio (Ar): É um gás monoatômico comumente utilizado nos processos TIG e MIG em vários tipos de materiais base incluindo não ferrosos. Quimicamente inerte, é adequado para soldagem de metais reativos ou refratários (AINER, 2004).

Este gás tem uma condutividade térmica baixa e relativo potencial de ionização baixo, essas propriedades resultam em uma baixa transferência de calor para as zonas externas do arco, formando uma coluna estreita no arco elétrico proporcionando dessa forma um perfil de penetração profundo e relativamente estreito (GIMENES, 2016).

- Hélio (He): É um gás monoatômico e inerte, comum nos processos TIG e muito utilizado em materiais não ferrosos. Possui elevado potencial de ionização e condutividade térmica, fornecendo um perfil de cordão com maior largura, boa molhagem na margem de solda e um maior aporte de calor em relação ao Argônio (AINER, 2004).

O alto potencial de ionização pode criar dificuldades para se iniciar o arco elétrico, dessa forma indica-se o uso de alta frequência ou capacitiva para abertura de arco no processo TIG. Devido ao baixo peso atômico do Hélio e consequente mais leve que o ar, é recomendado vazões de gás ligeiramente mais elevadas, porque o gás tende a elevar-se acima do ar. O gás Hélio puro promove uma transferência globular e é raramente utilizado para o processo MIG, com a exceção da soldagem do cobre puro (GIMENES, 2016).

Há uma diversidade de misturas de gases usados na soldagem, e são especificadas conforme o processo e material empregado, vide Tabela 03.

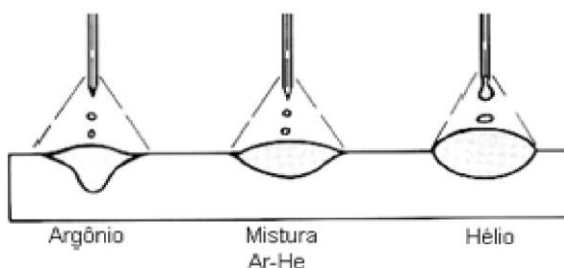
Tabela 03 – Aplicação dos gases em diferentes processos e materiais.

Gás / Material	MIG				TIG			
	Aço	Inox	Alumínio	Cobre	Aço	Inox	Alumínio	Cobre
Ar			X	X	X	X	X	X
He							X	X
Ar+ He			X	X		X		X

Fonte: O Autor (2020).

Em geral as misturas são realizadas de modo a unir as propriedades desejadas de cada gás, fornecendo características específicas a poça de fusão, conforme Figura 06.

Figura 06 – Característica da poça de fusão.



Fonte: CEFET - MG (2016)

Os fabricantes de gases industriais têm uma estratégia comercial de utilização de misturas bem próximas umas das outras, tem que se tomar uma precaução na hora de escolha de uma mistura gasosa, pois caso tenha que executar uma qualificação de procedimento de soldagem pelo Código ASME IX (Vasos de Pressão e Caldeira e Tubulações), ou para a soldagem de estruturas metálicas AWS, terá que especificar a utilização de misturas gasosas, já que a mistura do gás de proteção é uma variável essencial, e a mudança do tipo e porcentagem da mistura gasosa por menor que seja exige que se façam os testes para a certificação do procedimento de soldagem, isso impacta em aumento de custo, já que o gás tem uma influência significativa no processo de deposição e pode alterar a composição química do depósito e em última análise: se uma variável de soldagem pode alterar as propriedades mecânicas esta deve ser testada, esse é o princípio de toda norma de construção (MARQUES, 2011).

2.4 COBRE

O cobre e suas ligas possuem como características: excelente condutividade térmica e elétrica, boa resistência à corrosão, facilidade de fabricação, geralmente não são magnéticos, boa resistência à fadiga e boa soldabilidade (ASM HANDBOOK, 1990).

De acordo com Modenesi (2011), o cobre necessita para soldagem de um pré-aquecimento de alta temperatura devido à sua elevada condutividade térmica, e seu coeficiente de expansão é bem alto, podendo apresentar distorções no resfriamento.

As propriedades do cobre que requerem atenção especial para soldagem são:

1. Elevada condutividade térmica.
2. Elevado coeficiente de expansão térmica.
3. Tendência a se tornar frágil a altas temperaturas.
4. Ponto de fusão relativamente baixo.
5. Baixa viscosidade do metal fundido.
6. Elevada condutividade elétrica.
7. Resistência mecânica, para várias ligas, baseada principalmente no encruamento.

O coeficiente de expansão térmica do cobre é cerca de 50% maior que o do aço, podendo ser ainda maior para algumas ligas de cobre, existindo, assim, um grande potencial para problemas de distorção com o cobre (ASM HANDBOOK, 1990).

O cobre e muitas de suas ligas são basicamente monofásicas, com estrutura cristalina FCC. Diversas destas ligas podem perder a sua ductilidade a alta temperatura e, ainda, sofrer problemas de fissuração a quente. Elementos de liga como arsênico, bismuto, estanho, selênio e chumbo tendem a favorecer esta forma de fissuração. Na soldagem de cobre comercialmente puro não desoxidado, a absorção de hidrogênio pela poça de fusão pode levar à reação deste gás com inclusões de óxido de cobre, com a formação de água, a qual leva à formação de trincas na ZTA destes materiais. Ligas de cobre e zinco não devem ser soldadas a arco pois a elevada temperatura deste pode levar à vaporização de parte do zinco na poça de fusão (AMERICAN WELDING SOCIETY, 1997).

Os processos mais usados para a soldagem do cobre e suas ligas são TIG e MIG. Soldagem TIG é normalmente feita com corrente contínua e eletrodo negativo e proteção de argônio, hélio ou misturas destes dois gases. O processo MIG é usado para a soldagem de peças de maior espessura (AINER, 2004).

3 ASME IX

ASME é uma sigla em inglês que significa: “*The American Society of Mechanical Engineers*” (Sociedade Americana de Engenheiros Mecânicos).

A ASME representa um conjunto de normas e na sua seção 9, conhecida como ASME IX, há a determinação de parâmetros para qualificação de soldadores e procedimentos de soldagem, principalmente em virtude do grande número de variáveis envolvidas nos processos de soldagem.

Todas essas variáveis precisam ser validadas por uma série de testes/ensaios destinados a cada situação de soldagem, recebendo assim a qualificação.

3.1 REQUISITOS GERAIS

O objetivo de qualificar o procedimento de soldagem é demonstrar que o processo de união proposto para a construção é capaz de produzir juntas com as propriedades mecânicas necessárias para a aplicação pretendida. A qualificação do procedimento demonstra as propriedades mecânicas da junta feita, e não a habilidade da pessoa usando o processo de união.

A especificação do procedimento de soldagem é um documento escrito que fornece os parâmetros à pessoa que aplica o processo de união do material. As especificações de procedimentos abordam as condições do processo no qual a união do material deve ser executada. Estas condições são referidas no código como "variáveis", e deve abordar as variáveis aplicáveis ao processo de união do material a ser usado na produção.

Variáveis essenciais são condições nas quais sua alteração, modifica a resistência da junta, afetando as suas propriedades mecânicas. Quando uma variável essencial é modificada o procedimento deve ser submetido a uma nova qualificação.

3.2 ENSAIOS PROPOSTOS

Os ensaios propostos para qualificação dos procedimentos são discutidos a seguir;

3.2.1 Exame Visual

De acordo com a ASME IX - QW 194 (2019) o exame visual é usado para analisar se as

superfícies finais da solda atendem às especificações padrões de qualidade. Os corpos de prova aprovados devem apresentar penetração completa da junta com fusão completa da solda no material base e no metal de adição e não devem apresentar rachaduras na região soldada.

3.2.1.1 Critérios de aceitação

As seguintes discontinuidades são aceitáveis:

- Porosidade: Para todas as soldas em chanfro ou em ângulo, a soma dos poros visíveis com 1 até 2 mm de diâmetro não deve exceder 10 mm em qualquer comprimento de 25 mm de solda e não deve exceder 20 mm em qualquer 300 mm de comprimento de solda.
- Respingos: Não são permitidos quando interferem com inspeções subsequentes; e/ou, interferem em operações de acoplamento ou montagem; e/ou, a superfície é exposta e existem requisitos de acabamento. Nos outros casos são permitidos enquanto a sua aderência ao metal base seja resistente ao escovamento manual ou ao jateamento abrasivo e não existam mais que 10 respingos por cm².
- Sobreposição: Ângulo de reforço menor que 90°.

3.2.2 Ensaio de Tração

De acordo com a ASME IX - QW 152 (2019) a amostra do ensaio deve ser rompida sob carga de tração. A resistência à tração deve ser calculada dividindo-se a carga total final pela menor área transversal do corpo de prova, calculado a partir de medições reais, aferida antes da carga ser aplicada.

3.2.2.1 Critérios de aceitação

De acordo com a ASME IX - QW 153 (2019) para aprovação no ensaio de tração, a amostra deve ter uma resistência à tração não inferior a:

- a) A resistência à tração mínima do metal base; ou
- b) A resistência à tração mínima do metal base de menor resistência, se metais base diferentes são utilizados; ou

- (c) a resistência à tração mínima do metal de adição, quando o processo prevê o uso de metal de solda com menor resistência à temperatura ambiente do que o metal comum;
- (d) se a amostra quebrar no metal base fora da solda ou interface de solda, o teste deve ser aceito como aprovado, desde que a força não seja mais de 5% abaixo da tração mínima especificada do metal base.
- (e) a resistência à tração mínima especificada no item QW-422, deve ser utilizada como referência para amostras de espessura com menos de 1/2 pol. (13 mm).

3.2.3 Ensaio de Dobramento

De acordo com a ASME IX - QW 160 (2019) as amostras para o ensaio de dobramento devem ser preparadas cortando as chapas de testes em seção transversal retangular. As superfícies cortadas devem ser designadas como laterais da amostra. As outras duas superfícies devem ser chamadas de superfície da face e da raiz, sendo a superfície da face com a maior largura de solda.

As amostras para o ensaio podem ser de cinco tipos, dependendo se o eixo da solda é transversal ou paralelo ao eixo longitudinal da amostra, e qual superfície (lateral, face ou raiz) está no lado convexo (externo) da amostra dobrada, vide figura 07. Utilizaremos 3 tipos definidos da seguinte forma:

Figura 07 – Esquema de ensaio para dobramento transversal lateral, de face e de raiz.



Fonte: Núcleo Tecnológico de Soldagem e Qualidade (2002).

3.2.3.1 Dobramento transversal lateral

De acordo com a ASME IX - QW 161.1 a solda é transversal ao eixo longitudinal do corpo de prova, que é dobrado para que uma das superfícies laterais se torne convexa a superfície da amostra dobrada.

3.2.3.2 Dobramento transversal de face

De acordo com a ASME IX - QW 161.2 a solda é transversal ao eixo longitudinal do corpo de prova, que é dobrado para que a superfície da face se torne a superfície convexa da amostra dobrada.

3.2.3.3 Dobramento transversal de raiz

De acordo com a ASME IX - QW 161.2 a solda é transversal ao eixo longitudinal do corpo de prova, que é dobrado para que a superfície da raiz se torne a superfície convexa da amostra dobrada.

3.2.3.4 Critérios de aceitação

De acordo com a ASME IX - QW 163 (2019) a solda e a zona afetada pelo calor, devem estar completamente dentro da porção dobrada da amostra após o teste. A região de dobra não deve ter descontinuidade aberta na solda ou na zona afetada pelo calor superior a 1/8 pol. (3 mm), medido em qualquer direção na superfície convexa da amostra após a dobra.

Descontinuidades abertas nos cantos da amostra durante o teste não devem ser consideradas, a menos que haja evidência definitiva que resultam da falta de fusão, inclusões de escória ou outras descontinuidades internas. Para soldas de revestimento de sobreposição, nenhuma descontinuidade aberta superior a 1/16 pol. (1,5 mm), medido em qualquer direção, deve ser permitido no revestimento e nenhuma descontinuidade aberta superior a 1/8 pol. (3 mm) deve ser permitido ao longo da interface de solda.

4 METODOLOGIA

De acordo com a Tabela 04, foi determinada a espessura do material base e o número de ensaios.

Tabela 04 – Parâmetros de qualificação ASME IX QW 451.1

Espessuras e ensaios de qualificação						
Espessura (E) do CDP soldado (mm)	Intervalo		Tipo e quantidade de testes requeridos para qualificação			
	qualificado da espessura (E) do metal base (mm)					
	Mínimo	Máximo	Tração	Dobramento lateral	Dobramento Face	Dobramento Raiz
E < 1,5	E	2E	2	-	2	2
1,5 < E ≤ 10	1,5	2E	2	Nota	2	2
10 < E < 19	5	2E	2	Nota	2	2

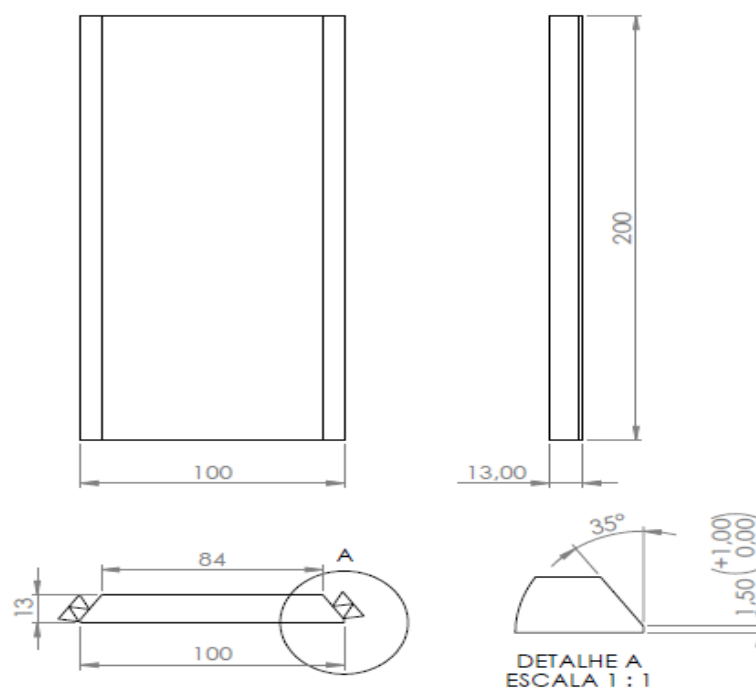
Nota: Os ensaios de Dobramento Face/Raiz podem ser substituídos por 4 ensaios de Dobramento lateral.

Fonte: Adaptado de ASME IX – QW 451.1 (2019).

Foi determinado a espessura de ½” [pol.] (12,5 mm) para as chapas a serem soldadas. Para a qualificação dessa espessura são designados dois ensaios de tração, dois dobramentos de face e dois dobramentos de raiz. Em nota, os ensaios de dobramento de face e de raiz podem ser substituídos por quatro ensaios de dobramento lateral. A qualificação dessa espessura de chapa permite o uso do procedimento para chapas de 3/16” [pol.] (5 mm) a 1” [pol.] (25,4 mm).

As chapas foram usinadas para a preparação do bisel (chanfro) com ângulo de 30°, abertura da raiz de 4 [mm], face da raiz de 1,5 [mm] e comprimento de 200 [mm], vide Figura 08.

Figura 08 – Croqui da chapa para fabricação do corpo de prova.



Fonte: O Autor (2019).

Após a preparação das chapas, foram executados os procedimentos descritos nas EPS 01/03 e 01/08 apresentadas a seguir:

➤ PROCESSO TIG: EPS 01/03

O procedimento utilizado como base para a fabricação dos CDP's no processo TIG, determina a utilização dos seguintes parâmetros:

- Metal Base: DIN EN 1982 – COBRE
- Metal de Adição: ER Cu – SFA 5.7
- Vazão do gás: 18 – 22 L/min.
- Faixa de espessura: 4,8 – 32,0 mm
- Temperatura de pré-aquecimento: $\geq 250^{\circ}\text{C}$
- Temperatura de interpasse: $\leq 550^{\circ}\text{C}$
- Corrente de aplicação: 320 – 420 [A]
- Tensão de aplicação: 17 – 22 [V]
- Tipo de junta: Topo - Plana (1G).

➤ PROCESSO MIG: EPS 01/08

O procedimento utilizado como base para a fabricação dos CDP's no processo MIG, determina a utilização dos seguintes parâmetros:

- Metal Base: DIN EN 1982 – COBRE
- Metal de Adição: ER Cu – SFA 5.7
- Vazão do gás: 18 – 22 L/min.
- Faixa de espessura: 9,5 – 40,0 mm
- Temperatura de pré-aquecimento: $\geq 270^{\circ}\text{C}$
- Temperatura de interpasse: $\leq 400^{\circ}\text{C}$
- Corrente de aplicação: 260 – 350 [A]
- Tensão de aplicação: 30 – 33 [V]
- Tipo de junta: Topo - Plana (1G).

Fotografia 01 – Chapas no dispositivo de soldagem



Fonte: O Autor (2020).

Fotografia 02 – Chapas soldadas



Fonte: O Autor (2020).

Para melhorar a variabilidade e a confiabilidade dos ensaios, foram fabricadas 3 chapas para cada processo (TIG / MIG), e para cada concentração da mistura gasosa (ArHe75, ArHe50, ArHe25). As chapas foram identificadas de P1 a P18, conforme processo TIG ou MIG e conforme concentração da mistura gasosa, vide Tabela 05:

Tabela 05 – Identificação das chapas soldadas.

GASES	TIG			MIG		
75% He + 25% Ar	P1	P2	P3	P4	P5	P6
50% He + 50% Ar	P7	P8	P9	P10	P11	P12
25% He + 75% Ar	P13	P14	P15	P16	P17	P18

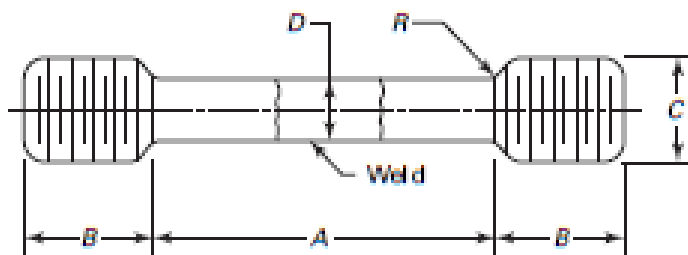
Fonte: O Autor (2020).

As chapas foram dispostas de modo a fornecer a maior quantidade de CDP's, conforme ANEXO A - QW 463.1(a) e QW 463.1(b):

4.1 ENSAIO DE TRAÇÃO

O CDP para tração foi preparado conforme Figura 9 - QW-462.1(d) e Tabela 06:

Figura 9 – QW 462.1(d)



Fonte: ASME IX (2019).

Tabela 06 – Dimensões para CDP Tração - QW 462.1(d)

	Dimensão padrão da espessura E (mm)			
	(a) 12,7	(b) 8,89	(c) 6,35	(d) 4,78
A – Comprimento da seção reduzida	O máximo que se possa utilizar	O máximo que se possa utilizar	O máximo que se possa utilizar	O máximo que se possa utilizar
D – Diâmetro da seção reduzida	12,7 +/- 0,25	8,89 +/- 0,18	6,35 +/- 0,13	4,78 +/- 0,08
R – Raio do filete	10 mín.	6 mín.	5 mín.	3 mín.
B – Comprimento da seção final	35 aprox.	29 aprox.	22 aprox.	13 aprox.
C – Diâmetro da seção final	19	13	10	6

Fonte: O Autor - Adaptado QW 462.1(d) - ASME IX (2019).

Fotografia 03 – Identificação dos corpos de prova para ensaio de tração.



Fonte: O Autor (2020).

Fotografia 04 – Conjunto de CDP's preparados para ensaio de tração



Fonte: O Autor (2020).

O CDP possui as dimensões do item (c), sendo o comprimento de 100 mm, diâmetro de 10 mm, e o diâmetro médio da seção de ruptura 6,3 mm

4.2 ENSAIO DE DOBRAMENTO

Os ensaios de dobramento são descritos a seguir:

4.2.1 Dobramento Lateral

O CDP para dobramento lateral foi preparado conforme ANEXO B – ASME IX QW-462.2, segue com comprimento de 200 mm, 10 mm de largura e ½” pol. de espessura.

Fotografia 05 – Corpo de prova para ensaio de dobramento lateral.



Fonte: O Autor (2020).

Fotografia 06 - Detalhes da identificação dos corpos de prova.



Fonte: O Autor (2020).

4.2.2 Dobramento de Face e Raiz

O CDP para dobramento de Face e de Raiz foi preparado conforme ANEXO C – ASME IX QW-462.3(a), segue com comprimento de 200 mm, 38 mm de largura e ½” pol. de espessura.

Fotografia 07 – Corpo de prova para ensaio de dobramento de face e de raiz.



Fonte: O Autor (2020)

Os CDP's foram ensaiados utilizando o dispositivo de dobra conforme ANEXO D – ASME IX QW 466.2, com o uso de uma prensa, vide Fotografia 08:

Fotografia 08 – Dispositivo de dobra na prensa.



Fonte: O Autor (2020).

5 RESULTADOS

Para avaliação do processo de qualificação, são apresentados os resultados dos ensaios:

5.1 ENSAIO VISUAL

As soldas realizadas com as três misturas não apresentaram porosidades, respingos ou reforço excessivo, vide Fotografia 09. O aspecto visual é a primeira característica analisada pois pode indicar defeitos que serão revelados nos ensaios posteriores. Portanto as 3 misturas gasosas apresentaram bons resultados.

Fotografia 09 – Chapas pós-soldadas para ensaio visual.



Fonte: O Autor (2020).

5.2 ENSAIO DE TRAÇÃO

Para avaliação dos critérios de aceitação, é necessário a resistência a tração do metal base. Dessa forma foram ensaiados 6 corpos de prova da mesma chapa base utilizada nos procedimentos de soldagem. Os resultados para o metal base são apresentados na Tabela 07:

Tabela 07 – Resultados do ensaio de tração para o metal base.

Corpo de Prova / Metal Base	Diâmetro médio [mm]	Área média [mm ²]	Força de Ruptura [N]	Resistência à Tração [Mpa]	Resistência média à Tração [Mpa]
C1	6,45	32,67	5980	183,04	184,24
C2	6,55	33,7	6070	180,1	
C3	6,50	33,18	6100	183,85	
C4	6,60	34,21	6170	180,35	
C5	6,65	34,73	6825	196,52	
C6	6,50	33,18	6025	181,58	

Fonte: O Autor (2020).

Com o resultado de 184 [Mpa] para o limite de resistência a tração do metal base, define-se que para aprovação de um corpo de prova com região de ruptura na solda, sua resistência a tração deve ser superior ou igual ao limite de resistência a tração do metal base. Já para aprovação de um corpo de prova com região de ruptura no metal base, define-se que a resistência a tração desse corpo de prova não seja inferior à 95% da resistência do metal base, ou seja, menor que 175 [Mpa].

Na Tabela 08 são apresentados os resultados dos corpos de prova soldados nos processos TIG e MIG com à utilização das misturas de gases em análise.

Tabela 08 – Resultados do ensaio de tração dos corpos de prova soldados.

(continua)

Ensaio de Tração			Diâmetro médio da Seção [mm]	Área média da Seção [mm ²]	Força de Ruptura [N]	Resistência à Tração [Mpa]	Resistência média à Tração [Mpa]	Região de Ruptura	Critério de Aprovação ASME IX	Resultado
75% He + 25% Ar	TIG	P1	6,4	32,17	5477	170,25	165,38	Metal Base	QW 153.1(d)	Reprovado
		P2 - A	6,35	31,67	5209	164,48		Solda	QW 153.1(a)	Reprovado
		P2 - B	6,45	32,67	6174	188,95		Metal Base	QW 153.1(d)	Aprovado
		P2 - C	6,35	31,67	4900	154,72		Solda	QW 153.1(a)	Reprovado
		P3	6,55	33,7	5004	148,51		Metal Base	QW 153.1(d)	Reprovado
	MIG	P4 - A	6,44	32,57	5326	163,51	174,65	Metal Base	QW 153.1(d)	Reprovado
		P4 - B	6,42	32,37	6076	187,7		Metal Base	QW 153.1(d)	Aprovado
		P5 - A	6,55	33,7	5625	166,94		Metal Base	QW 153.1(d)	Reprovado
		P5 - B	6,5	33,18	5782	174,25		Metal Base	QW 153.1(d)	Reprovado
		P6 - A	6,35	31,67	5690	179,67		Metal Base	QW 153.1(d)	Aprovado
		P6 - B	6,36	31,77	5586	175,83		Metal Base	QW 153.1(d)	Aprovado

Tabela 08 – Resultados do ensaio de tração dos corpos de prova soldados.

(conclusão)

Ensaio de Tração			Diâmetro médio da Seção [mm]	Área média da Seção [mm ²]	Força de Ruptura [N]	Resistência à Tração [Mpa]	Resistência média à Tração [Mpa]	Região de Ruptura	Critério de Aprovação ASME IX	Resultado
50% He + 50% Ar	TIG	P7	6,45	32,67	5595	171,23	174,28	Metal Base	QW 153.1(d)	Reprovado
		P8	6,38	31,97	5254	164,35		Metal Base	QW 153.1(d)	Reprovado
		P9 - A	6,7	35,26	5767	163,57		Metal Base	QW 153.1(d)	Reprovado
		P9 - B	6,45	32,67	6468	197,95		Metal Base	QW 153.1(d)	Aprovado
	MIG	P10 - A	5,85	26,88	5880	218,76	194,17	Metal Base	QW 153.1(d)	Aprovado
		P10 - B	6,4	32,17	6069	188,65		Metal Base	QW 153.1(d)	Aprovado
		P11 - A	6,45	32,67	6904	211,3		Metal Base	QW 153.1(d)	Aprovado
		P11 - B	6,47	32,88	5978	181,83		Metal Base	QW 153.1(d)	Aprovado
		P12 - A	6,36	31,77	5700	179,42		Metal Base	QW 153.1(d)	Aprovado
		P12 - B	6,36	31,77	5880	185,09		Metal Base	QW 153.1(d)	Aprovado
25% He + 75% Ar	TIG	P13 - A	6,44	32,57	6016	184,69	180,99	Metal Base	QW 153.1(d)	Aprovado
		P13 - B	6,5	33,18	5998	180,75		Metal Base	QW 153.1(d)	Aprovado
		P14	6,44	32,57	5710	175,32		Metal Base	QW 153.1(d)	Aprovado
		P15 - A	6,3	31,17	5858	187,92		Metal Base	QW 153.1(d)	Aprovado
		P15 - B	6,45	32,67	5760	176,30		Metal Base	QW 153.1(d)	Aprovado
	MIG	P16	6,6	34,21	6248	182,63	184,76	Metal Base	QW 153.1(d)	Aprovado
		P17 - A	6,4	32,17	6182	192,17		Metal Base	QW 153.1(d)	Aprovado
		P17 - B	6,6	34,21	6370	186,19		Metal Base	QW 153.1(d)	Aprovado
		P18 - A	6,35	31,67	5762	181,94		Metal Base	QW 153.1(d)	Aprovado
		P18 - B	6,38	37,97	5782	180,86		Metal Base	QW 153.1(d)	Aprovado

Fonte: O Autor (2020).

Fotografia 10 – Corpos de prova ensaiados.



Fonte: O Autor (2020).

Fotografia 11 – Fratura: na solda / no metal base



Fonte: O Autor (2020).

5.3 ENSAIO DE DOBRAMENTO

Para avaliação dos critérios de aceitação do ensaio de dobramento, foram analisadas as descontinuidades encontradas na região de dobra dos corpos de prova:

Fotografia 12 – Dobramento de Face e Raiz



Fonte: O Autor (2020).

Fotografia 13 – Dobramento Lateral.



Fonte: O Autor (2020).

Fotografia 14 – Ensaios de Dobramento (75% He + 25% Ar).



Fonte: O Autor (2020).

Fotografia 15 – Ensaios de Dobramento (50% He + 50% Ar).



Fonte: O Autor (2020).

Fotografia 16 – Ensaios de Dobramento (25% He + 75% Ar).



Fonte: O Autor (2020).

Na Tabela 09, seguem os resultados dos ensaios de Dobramento lateral.

Tabela 09 – Resultados dos ensaios de dobramento lateral.

(continua)

ENSAIO DE DOBRAMENTO		Lateral	Critérios de Aceitação - ASME IX	Resultado
75% He + 25% Ar	TIG	P1	Livre de Descontinuidades	Aprovado
		P2	Descontinuidades > 3 mm	Reprovado
		P3	Descontinuidades > 3 mm	Reprovado
	MIG	P4	Livre de Descontinuidades	Aprovado
		P5	Livre de Descontinuidades	Aprovado
		P6	Livre de Descontinuidades	Aprovado

Tabela 09 – Resultados dos ensaios de dobramento lateral.

(conclusão)

ENSAIO DE DOBRAMENTO		Lateral	Critérios de Aceitação - ASME IX	Resultado
50% He + 50% Ar	TIG	P7	Livre de Descontinuidades	Aprovado
		P8	Livre de Descontinuidades	Aprovado
		P9	Livre de Descontinuidades	Aprovado
	MIG	P10	Livre de Descontinuidades	Aprovado
		P11	Livre de Descontinuidades	Aprovado
		P12	Livre de Descontinuidades	Aprovado
25% He + 75% Ar	TIG	P13	Livre de Descontinuidades	Aprovado
		P14	Livre de Descontinuidades	Aprovado
		P15	Livre de Descontinuidades	Aprovado
	MIG	P16	Livre de Descontinuidades	Aprovado
		P17	Livre de Descontinuidades	Aprovado
		P18	Livre de Descontinuidades	Aprovado

Fonte: O Autor (2020).

Na Tabela 10, seguem os resultados dos ensaios de Dobramento lateral.

Tabela 10 – Resultados dos ensaios de dobramento de face e de raiz.

ENSAIO DE DOBRAMENTO		Face	Critérios de Aceitação ASME IX	Resultado	Raiz	Critérios de Aceitação ASME IX	Resultado
75% He + 25% Ar	TIG	P1	Livre de Descontinuidades	Aprovado	P1	Livre de Descontinuidades	Aprovado
		P2	-	-	P2	-	-
		P3	Livre de Descontinuidades	Aprovado	P3	Livre de Descontinuidades	Aprovado
	MIG	P4	Livre de Descontinuidades	Aprovado	P4	Livre de Descontinuidades	Aprovado
		P5	Livre de Descontinuidades	Aprovado	P5	Livre de Descontinuidades	Aprovado
		P6	Descontinuidades < 3 mm	Aprovado	P6	Livre de Descontinuidades	Aprovado
50% He + 50% Ar	TIG	P7	Livre de Descontinuidades	Aprovado	P7	Livre de Descontinuidades	Aprovado
		P8	Livre de Descontinuidades	Aprovado	P8	Livre de Descontinuidades	Aprovado
		P9	Livre de Descontinuidades	Aprovado	P9	Livre de Descontinuidades	Aprovado
	MIG	P10	Livre de Descontinuidades	Aprovado	P10	Livre de Descontinuidades	Aprovado
		P11	Livre de Descontinuidades	Aprovado	P11	Livre de Descontinuidades	Aprovado
		P12	Livre de Descontinuidades	Aprovado	P12	Livre de Descontinuidades	Aprovado
25% He + 75% Ar	TIG	P13	Livre de Descontinuidades	Aprovado	P13	Livre de Descontinuidades	Aprovado
		P14	Livre de Descontinuidades	Aprovado	P14	Livre de Descontinuidades	Aprovado
		P15	Livre de Descontinuidades	Aprovado	P15	Livre de Descontinuidades	Aprovado
	MIG	P16	Livre de Descontinuidades	Aprovado	P16	Descontinuidades > 3 mm	Reprovado
		P17	Livre de Descontinuidades	Aprovado	P17	Livre de Descontinuidades	Aprovado
		P18	Livre de Descontinuidades	Aprovado	P18	Livre de Descontinuidades	Aprovado

Fonte: O Autor (2020).

5.4 DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

Na avaliação do aspecto visual da solda, a ausência de porosidades indica que a vazão da mistura gasosa utilizada foi adequada para realizar a proteção da poça de fusão. A utilização de uma faixa de temperatura adequada promove a redução da quantidade de

respingos na solda, indicando uma boa seleção dos parâmetros de tensão e da temperatura de pré-aquecimento. O aspecto físico da solda também deve ser avaliado a fim de evitar interferência ou distorções geométricas, sendo assim as chapas avaliadas nesse ensaio apresentaram um bom desempenho do procedimento.

O próximo ensaio realizado foi o ensaio de tração, que fornece uma característica fundamental da solda, o limite de resistência a tração. Primeiro foi realizado o ensaio com o metal base para se obter o valor de referência para as juntas soldadas. O valor de 184 [Mpa] para a resistência a tração do cobre fundido se mostrou superior aos valores encontrados na literatura, como no ASM Handbook (1990) que fornece como referência para o cobre fundido o valor de 150 [Mpa] para o limite de resistência a tração, indicando uma boa qualidade do metal base.

Para a mistura ArHe75 (75% Hélio + 25% Argônio) a resistência média a tração dos CDP's ficou abaixo da referência do metal base tanto no processo TIG quanto no processo MIG e com duas amostras com a região de ruptura na solda, indicando que o aumento na proporção de hélio na solda produz uma junta menos resistente. Já para a mistura ArHe50 (50% Hélio + 50% Argônio), a resistência média a tração dos CDP's ficou abaixo do valor de referência para o processo TIG, porém desempenhou muito bem no processo MIG, tendo como característica desse processo, maior transferência de energia. Por fim, a mistura ArHe25 (25% Hélio + 75% Argônio) apresentou a resistência média a tração dos CDP acima da referência do metal base nos dois processos, TIG e MIG. É notável que o aumento na concentração do argônio foi benéfico a solda devido a propriedade característica que esse gás fornece que é promover maior penetração na junta, impactando diretamente na resistência da solda.

Como o argônio possui uma baixa condutividade térmica e relativo potencial de ionização baixo, acabam resultando em uma baixa transferência de calor para as zonas externas do arco, formando uma coluna estreita no arco elétrico proporcionando dessa forma um perfil de penetração profundo e relativamente estreito. Já o hélio possui elevado potencial de ionização e condutividade térmica, fornecendo um perfil de cordão com maior largura, boa molhagem na margem de solda e um maior aporte de calor em relação ao Argônio.

O último ensaio realizado foi o ensaio de dobramento. A avaliação consiste na análise de descontinuidades reveladas na região de dobra da solda, tanto lateral quanto de face e raiz. O dobramento lateral reprovou o processo TIG com a mistura ArHe75, o resultado reforça a análise feita no ensaio de tração que indica que o aumento na concentração do hélio não traz benefícios a solda. Já o processo MIG apresentou um CDP reprovado com a mistura ArHe25,

contudo devido ao bom desempenho da mistura nos ensaios anteriores, é possível que a descontinuidade gerada possa ter origem na execução do procedimento.

O custo é um fator preponderante na escolha dos gases de solda. De acordo com a cotação realizada em outubro/2020, vide Tabela 10, o preço da mistura gasosa aumenta conforme se adiciona hélio na composição, sendo assim, é preferível a utilização da mistura com a menor concentração desse gás.

Tabela 11 – Cotação das misturas de gases (outubro/2020)

COMPOSIÇÃO DA MISTURA	PREÇO [m ³ /kg]
ArHe75	R\$ 85,00
ArHe50	R\$ 60,00
ArHe25	R\$ 40,00

Fonte: O Autor – Adaptado White Martins (2020).

Portanto, a mistura ArHe25 produziu uma solda mais robusta em comparação com as outras misturas, sendo tecnicamente mais adequada ao processo e a composição mais viável economicamente, pois possui o menor preço dentre as misturas analisadas.

6 CONCLUSÃO

A característica principal fornecida pelo argônio a solda, é a capacidade de promover maior penetração do arco elétrico na poça de fusão. Já o hélio tem como característica principal, promover um perfil de cordão com maior largura e maior aporte de calor em relação ao Argônio.

Portanto ao elevar a concentração de argônio na mistura, a penetração da poça de fusão se torna mais profunda, promovendo aumento na resistência da junta soldada.

Diante do exposto, conclui-se que o aumento da concentração de argônio na mistura gasosa, traz melhores benefícios a solda de cobre, e por consequência, a diminuição na concentração de hélio reduz os custos do processo. Portanto a mistura ArHe25 é a que possui menor custo e fornece melhores propriedades a solda, sendo mais adequada aos processos.

REFERÊNCIAS

AINER, E. E. A. **Soldagem**: processos e metalurgia. São Paulo: Edgard Blücher LTDA, 2004.

AMERICAN SOCIETY OF MECHANICAL ENGINEERING. **ASME Boiler and pressure vessel code IX**: welding and brazing qualifications. [S.l.], 2019.

AMERICAN WELDING SOCIETY. **AWS Welding handbook**: metals and their weldability. Miami: AWS, 1997.

AMERICAN WELDING SOCIETY. **AWS Specification for copper and copper-alloy bare welding rods and electrodes**: AWS A5.7/A5.7M. Miami: AWS, 2007.

AMERICAN SOCIETY MATERIALS. **ASM Properties and selection**: nonferrous alloys and special-purpose materials. Ohio: ASM International, 1990.

FELIZARDO, I. *et al.* **Apostila de tecnologia da soldagem**. Minas Gerais: CEFET, 2006.

GIMENES, L. Jr. *et al.* **Gases de proteção para soldagem a arco elétrico**. São Paulo: FATEC, 2016.

KOU, S. *et al.* **Welding metallurgy**. 2nd ed. New Jersey: John Wiley & Sons Inc., 2003.

MARQUES, P. V. E. A. *et al.* **Soldagem**: fundamentos e tecnologia. 3rd ed. Belo Horizonte: UFMG, 2011.

MESSLER, W. R. **Principles of welding**: processes, physics, chemistry, and metallurgy. New York: John Wiley & Sons Inc., 1999.

MODENESI, P. J. **Soldabilidade dos aços transformáveis**. Belo Horizonte: UFMG, 2002.

RAMALHO, J. P. **Manual de tecnologia de fabricação e soldagem**. São Paulo: Núcleo Tecnológico de Soldagem & Qualidade, 2002.

BIBLIOGRAFIA CONSULTADA

MANZ, A. F. **Apostila de soldagem**. São Paulo: Alcan, 2004.

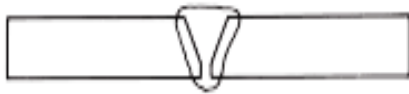
SOUZA, A. C. **Consumíveis de soldagem**. São Paulo: 2005.

SOUZA, S. A. **Ensaio mecânico de materiais metálicos**. 3. ed. São Paulo: Edgard Blücher LTDA, 1974.

ANEXO A – ASME IX QW 463.1(a) e QW 463.1(b)

QW-463.1(a) PLATES – LESS THAN $\frac{3}{4}$ in. (19 mm) THICKNESS PROCEDURE QUALIFICATION

Discard		this piece
Reduced section		tensile specimen
Root bend		specimen
Face bend		specimen
Root bend		specimen
Face bend		specimen
Reduced section		tensile specimen
Discard		this piece



QW-463.1(b) PLATES – $\frac{3}{4}$ in. (19 mm) AND OVER THICKNESS AND ALTERNATE FROM $\frac{3}{8}$ in. (10 mm) BUT LESS THAN $\frac{3}{4}$ in. (19 mm) THICKNESS PROCEDURE QUALIFICATION

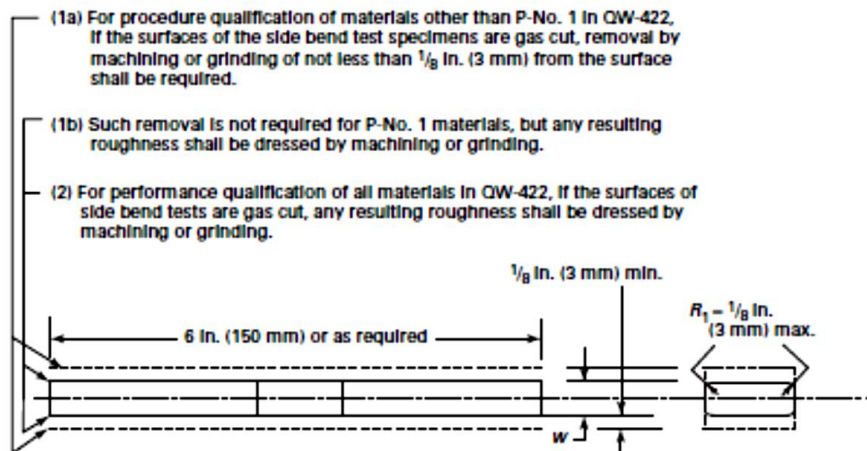
Discard		this piece
Side bend		specimen
Reduced section		tensile specimen
Side bend		specimen
Side bend		specimen
Reduced section		tensile specimen
Side bend		specimen
Discard		this piece



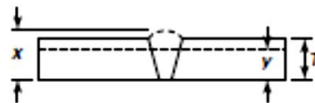
Fonte: ASME IX (2019).

ANEXO B – ASME IX QW 462.2

QW-462.2 SIDE BEND



T, in. (mm)	y, in. (mm)	w, in. (mm)	
		P-No. 23, F-No. 23, or P-No. 35	All other metals
$\frac{3}{8}$ to $1\frac{1}{2}$ (10 to < 38)	T [Note (1)]	$\frac{1}{8}$ (3)	$\frac{3}{8}$ (10)
$\geq 1\frac{1}{2}$ (≥ 38)	Notes (1) and (2)	$\frac{1}{8}$ (3)	$\frac{3}{8}$ (10)



GENERAL NOTE: Weld reinforcement and backing strip or backing ring, if any, may be removed flush with the surface of the specimen. Thermal cutting, machining, or grinding may be employed. Cold straightening is permitted prior to removal of the reinforcement.

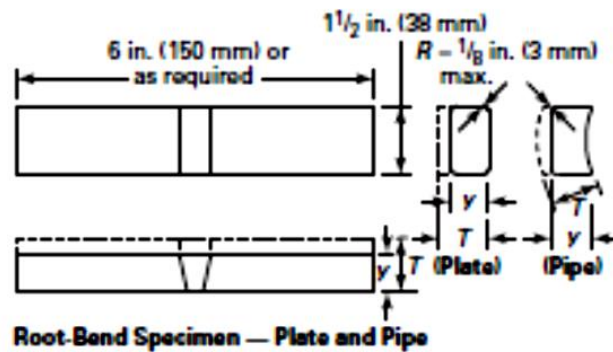
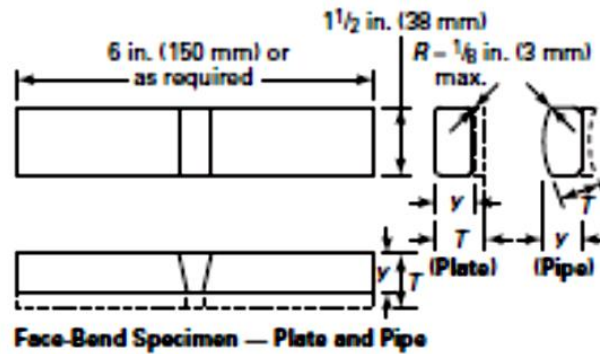
NOTES:

- (1) When weld deposit t is less than coupon thickness T , side-bend specimen thickness may be t .
- (2) When coupon thickness T equals or exceeds $1\frac{1}{2}$ in. (38 mm), use one of the following:
 - (a) Cut specimen into multiple test specimens of thickness y of approximately equal dimensions [$\frac{3}{4}$ in. (19 mm) to $1\frac{1}{2}$ in. (38 mm)]. y = tested specimen thickness when multiple specimens are taken from one coupon.
 - (b) The specimen may be bent at full width. See requirements on jig width in QW-466.1.

Fonte: ASME IX (2019).

ANEXO C – ASME IX QW 462.3(a)

QW-462.3(a) FACE AND ROOT BENDS — TRANSVERSE



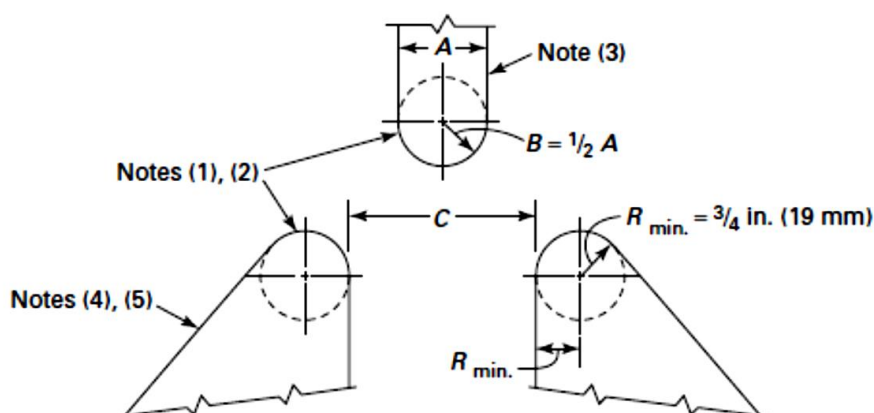
T , in. (mm)	Y , in. (mm)	
	P-No. 23, F-No. 23, or P-No. 35	All Other Metals
$\frac{1}{16} < \frac{1}{8}$ (1.5 < 3)	T	T
$\frac{1}{8} - \frac{3}{16}$ (3–10)	$\frac{3}{16}$ (3)	T
$> \frac{3}{16}$ (10)	$\frac{3}{16}$ (3)	$\frac{3}{16}$ (10)

GENERAL NOTES:

- Weld reinforcement and backing strip or backing ring, if any, shall be removed flush with the surface of the specimen. If a recessed ring is used, this surface of the specimen may be machined to a depth not exceeding the depth of the recess to remove the ring, except that in such cases the thickness of the finished specimen shall be that specified above. Do not flame-cut nonferrous material.
- If the pipe being tested has a diameter of NPS 4 (DN 100) or less, the width of the bend specimen may be $\frac{3}{4}$ in. (19 mm) for pipe diameters NPS 2 (DN 50) to and including NPS 4 (DN 100). The bend specimen width may be $\frac{3}{8}$ in. (10 mm) for pipe diameters less than NPS 2 (DN 50) down to and including NPS $\frac{3}{4}$ (DN 10) and as an alternative, if the pipe being tested is equal to or less than NPS 1 (DN 25) pipe size, the width of the bend specimens may be that obtained by cutting the pipe into quarter sections, less an allowance for saw cuts or machine cutting. These specimens cut into quarter sections are not required to have one surface machined flat as shown in QW-462.3(a). Bend specimens taken from tubing of comparable sizes may be handled in a similar manner.

ANEXO D – ASME IX QW 466.2

QW-466.2 GUIDED-BEND ROLLER JIG



GENERAL NOTE: See QW-466.1 for jig dimensions and general notes.

NOTES:

- (1) Either hardened and greased shoulders or hardened rollers free to rotate shall be used.
- (2) The shoulders or rollers shall have a minimum bearing surface of 2 in. (50 mm) for placement of the specimen. The rollers shall be high enough above the bottom of the jig so that the specimens will clear the rollers when the ram is in the low position.
- (3) The ram shall be fitted with an appropriate base and provision made for attachment to the testing machine, and shall be of a sufficiently rigid design to prevent deflection and misalignment while making the bend test. The body of the ram may be less than the dimensions shown in column A of QW-466.1.
- (4) If desired, either the rollers or the roller supports may be made adjustable in the horizontal direction so that specimens of t thickness may be tested on the same jig.
- (5) The roller supports shall be fitted with an appropriate base designed to safeguard against deflection and misalignment and equipped with means for maintaining the rollers centered midpoint and aligned with respect to the ram.

Fonte: ASME IX (2019).