

UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS
Departamento de Engenharia Mecânica
Curso de Pós-Graduação em Engenharia de Soldagem

**ESTUDO PARA SOLDAGEM DE TUBOS SEM
COSTURA API 5L X65Q PSL 2**

Rodrigo Martins Incalado

Belo Horizonte
2022

Rodrigo Martins Incalado

**ESTUDO PARA SOLDAGEM DE TUBOS SEM
COSTURA API 5L X65Q PSL 2**

Trabalho de conclusão de curso apresentado ao Curso de Especialização em Engenharia de Soldagem da Universidade Federal de Minas Gerais como requisito para obtenção do título de Especialista em Engenharia da Soldagem.

Área de Concentração: Engenharia de Soldagem

Orientador: Professor Dr. Paulo José Modenesi

Belo Horizonte

2022

I36e	<p>Incalado, Rodrigo Martins. Estudo para soldagem de tubos sem costura API 5L X65Q PSL2 [recurso eletrônico] / Rodrigo Martins Incalado. – 2022. 1 recurso online (62 f. : il., color.) : pdf.</p> <p>Orientador: Paulo José Modenesi.</p> <p>Monografia apresentada ao Curso de Especialização em Engenharia de Soldagem da Universidade Federal de Minas Gerais, como requisito para a obtenção do título de Especialista em Soldagem.</p> <p>Apêndice: f. 61-62. Bibliografia: f. 59-60. Exigências do sistema: Adobe Acrobat Reader.</p> <p>1. Soldagem. 2. Aço de Alta Resistência. I. Modenesi, Paulo José. II. Universidade Federal de Minas Gerais. Escola de Engenharia. III. Título.</p>
	CDU: 621.791

Ficha catalográfica elaborada pela Bibliotecária Letícia Alves Vieira - CRB-6/2337
Biblioteca Prof. Mário Werneck - Escola de Engenharia da UFMG



UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS

CURSO DE TECNOLOGIA E QUALIFICAÇÃO EM SOLDAGEM



ATA DA DEFESA DA MONOGRAFIA DO ALUNO **RODRIGO MARTINS INCALADO**

Realizou-se, no dia 20 de dezembro de 2022, às 14:00 horas, UFMG, Escola de Engenharia, DEMET, Sala do Laboratório de Soldagem, da Universidade Federal de Minas Gerais, a defesa de monografia, intitulada *ESTUDO PARA SOLDAGEM DE TUBOS SEM COSTURA API 5L X65Q PSL 2*, apresentada por RODRIGO MARTINS INCALADO, número de registro 2016675041, graduado no curso de ENGENHARIA METALÚRGICA, como requisito parcial para a obtenção do certificado de Especialista em TECNOLOGIA E QUALIFICAÇÃO EM SOLDAGEM, à seguinte Comissão Examinadora: Prof(a). Paulo Jose Modenesi - Orientador (UFMG).

A Comissão considerou a monografia:

(x) Aprovada

() Reprovada

Finalizados os trabalhos, lavrei a presente ata que, lida e aprovada, vai assinada por mim e pelos membros da Comissão.

Belo Horizonte, 20 de dezembro de 2022.

Prof(a). Paulo Jose Modenesi (Doutor)

AGRADECIMENTOS

Ao meu orientador, Professor Dr. Paulo José Modenesi, por possibilitar a realização deste trabalho e ao colega de profissão, Engenheiro Ricardo Luiz Cardoso dos Santos, que contribuiu disponibilizando uma EPS qualificada para exemplificação e estudo, e a todos que, direta e indiretamente, colaboraram para a realização deste.

RESUMO

Os aços de Alta Resistência e Baixa Liga (ARBL) são cada vez mais requeridos em atividades relacionadas à exploração e transporte de petróleo, gás natural e derivados em virtude de suas características, tais como, alta resistência e boa tenacidade.

O presente trabalho tem como objetivo desenvolver um estudo técnico dos parâmetros e processos relacionados à soldagem de tubulações sem costura, de aços do tipo API 5L X65Q PSL 2, bem como avaliar e apresentar os requisitos da norma API 1104 (1999) para soldagem deste material. A partir do estudo das características dos processos e requisitos da referida norma e demais Referências Bibliográficas, determinar os possíveis parâmetros para a soldagem do aço API 5L X65Q PSL 2.

Além disso, para enriquecimento do estudo, tendo sido obtida uma EPS Qualificada para a soldagem do metal base citado, conforme a norma DNV-OS-F101 (2013), realizar um breve estudo desta. Esta EPS, anexa deste trabalho, também será uma referência bibliográfica para obtenção de possíveis valores dos parâmetros.

Portanto, não será abordada a comparação entre as normas API 1104 (1999) e DNV-OS-F101 (2013), mas, sim, um estudo para determinação das variáveis essenciais e seus possíveis valores a serem utilizados em uma qualificação de EPS, referenciando a norma API 1104 (1999) e outras Referências Bibliográficas, tal como uma EPS qualificada conforme norma DNV-OS-F101 (2013).

Palavras chaves: Aços ARBL, Aços API 5L X65Q PSL 2, Soldagem, EPS.

ABSTRACT

High Strength and Low Alloy (ARBL) steels have been increasingly required in activities related to the exploration and transportation of oil, natural gas and their derivatives. This occurs due to its characteristics, such as high strength and toughness.

This study aims to develop a study of the parameters and processes related to welding of seamless pipes manufactured with steels of type API 5L X65Q PSL 2, according to the requirements of API 1104 (1999). In addition, based on a Qualified EPS for welding the base metal cited, according to the DNV-OS-F101 standard (2013), to compare the parameters used with those obtained in Bibliographic References. Finally, having carried out a study on API 1104 (1999) in addition to evaluating the appropriate parameters for welding API 5L X65Q PSL 2 steel according to this standard and Bibliographic References.

In addition, for enrichment of the study, having obtained a Qualified EPS for welding the base metal cited, according to the standard DNV-OS-F101 (2013), to conduct a brief study of this. This EPS, attached to this work, will also be a bibliographic reference to obtain possible values of the parameters.

Therefore, the objective is not to compare the API 1104 (1999) and DNV-OS-F101 (2013) standards, but rather a study to determine the essential variables and their possible values to be used in an EPS qualification, referencing API 1104 (1999) and other Bibliographic References, such as a qualified EPS according to DNV-OS-F101 (2013).

Key-Word: Steel HSLA, Steel API 5L X65Q PSL 2, Welding, WPS.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1: Processos de soldagem e afins	27
Figura 2: Soldagem GTAW.	30
Figura 3: Soldagem FCAW com e sem proteção externa	33
Figura 4- Perfil do cordão de solda (FCAW) - conforme os diferentes tipos de gases de proteção.	33
Figura 5: Corpo de prova de teste de resistência a tração	38
Figura 6: Corpo de prova de teste de resistência a fratura – Nick-Break	40
Figura 7: Ilustração típica de um corpo de prova após ensaio Nick-break	40
Figura 8: Raio do êmbolo (A) = 45mm; Raio de dobramento (B) = 60mm; Largura de dobramento (C) = 50mm.	41
Figura 9: Corpo de prova de teste de dobramento – Side Bend (dobramento lateral)	42
Figura 10: Posições de Soldagem.....	46
Figura 11: Características da Vareta modelo ER80S-D2	47
Figura 12: Metais de adição - Grupos	47
Figura 13: Características do Arame Tubular modelo E81T1-Ni1M J	48
Figura 14- Influência das taxas de resfriamento na dureza de um aço API X65, a partir da temperatura de austenitização. Fonte: Ogata P.H. (2008)	49
Figura 15: Projeto da Junta soldada.....	52

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Composição Química de tubos API 5L PSL 2.....	20
Tabela 2 - Requisitos para os testes de tração de tubos API 5L PSL 2 - Propriedades mecânicas	21
Tabela 3 - Valores e tipos de corrente de soldagem para aços, no processo GTAW.	31
Tabela 4- Valores típicos de corrente e tensão aplicáveis à soldagem FCAW.	34
Tabela 5- Tipos e Números de CP's para Qualificação de Procedimento.....	37
Tabela 6- Tipos e Números de CP's para Qualificação de Soldadores.....	37
Tabela 7- Faixa de diâmetro externo e espessura qualificada da EPS de referência.	45
Tabela 8- Limites de qualificação por diâmetro externo e espessura, conforme API 1104.	45
Tabela 9- Relação taxa de resfriamento x percentual ferrita metal base	50
Tabela 10 - Relação de C. Equivalente x Temperatura de Pré-aquecimento	50
Tabela 11 – Especificações e faixas qualificadas	52
Tabela 12 – Posição e direção de soldagem.....	53
Tabela 13 – Tipo de metal de adição e diâmetros.....	53
Tabela 14 – Relação Corrente / Tensão	54
Tabela 15 – Corrente e polaridade.....	54
Tabela 16 – Tempo entre passes.....	55
Tabela 17 – Velocidade de soldagem por processo.....	56
Tabela 18 – Pré e pós aquecimento.....	56
Tabela 19 – Gás de proteção	57

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ASME - American Society of Mechanical Engineers

AWS - American Welding Society

EPS - Especificação de Procedimento de Soldagem

RQPS - Registro da Qualificação do Procedimento de Soldagem

IEIS - Instruções de Execução e Inspeção da Soldagem

WPS - Welding Procedure Specification

ARBL - Alta Resistência e Baixa Liga

HSLA - High-Strength Low-Alloy

API - American Petroleum Institute (Instituto Americano do Petróleo)

DNV - Det Norske Veritas (Veritas Norueguês)

CE - Carbono Equivalente

END - Ensaios Não Destrutivos

ED - Ensaios Destrutivos

CP – Corpo de Prova

L.R - Limite de Resistência

L.E - Limite de Escoamento

ZTA - Zona Termicamente Afetada

ZF - Zona Fundida

FCAW-G - Flux Cored Arc Welding - Gas Shielded – Processo de soldagem com Arame Tubular com proteção gasosa

FCAW-S - Flux Cored Arc Welding - Self Shielded – Processo de soldagem com Arame Tubular auto-protegido

GTAW - Gas Tungsten Arc Welding – Processo de soldagem com eletrodo de tungstênio e proteção gasosa (TIG)

TIG - Tungsten Inert Gas

HFW – High frequency electric welding – Processo de soldagem elétrica de alta frequência

SAW – Submerged arc welding – Processo de soldagem por arco submerso

COW – Combination welding process – Processo de soldagem combinada

LISTA DE SÍMBOLOS

A_f - Alongamento após a fratura, expresso em porcentagem e arredondado para a porcentagem mais próxima

A_{xc} - Área transversal da peça do teste de tração aplicável, expressa em milímetros quadrados (polegadas quadradas)

C - Constante, que depende do sistema de unidades usadas

CE_{IIW} - Carbono equivalente de carbono baseado na equação do International Institute of Welding

CE_{Pcm} - Carbono equivalente com base na porção química da equação equivalente de carbono de Ito-Bessyo

D - Diâmetro externo especificado do tubo, expresso em milímetros (polegadas)

R_m - Resistência à tração expressa em megapascais (libras por polegada quadrada)

$R_{p0,2}$ - Limite de elasticidade aparente (0,2% de extensão não proporcional), expresso em megapascais (libras por polegada quadrada)

$R_{t0,5}$ - Limite de elasticidade (0,5% de extensão total), expresso em megapascais (libras por polegada quadrada)

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	13
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	15
2.1	Norma API 1104(1999).....	15
2.2	Norma DNV-OS-F101(2013)	15
2.3	Tubos API 5L.....	16
2.4	Aços de Alta Resistência e Baixa Liga (ARBL).....	17
2.5	Características dos Aços ARBL.....	18
2.5.1	<i>Composição química e propriedades mecânicas</i>	<i>19</i>
2.5.2	<i>Efeito dos principais elementos de liga e microliga</i>	<i>21</i>
2.5.2.1	Carbono Equivalente (CE).....	23
2.6	Soldagem-conceitos	26
2.6.1	<i>Soldabilidade</i>	<i>27</i>
2.6.1.1	Tratamentos Térmicos.....	28
2.6.1.1.1	Pré e Pós aquecimento de soldagem.....	28
2.6.1.1.2	Alívio de Tensões	29
2.6.2	<i>Processo de Soldagem GTAW.....</i>	<i>30</i>
2.6.3	<i>Processo de Soldagem FCAW.....</i>	<i>32</i>
3	DESENVOLVIMENTO	35
3.1	Aspectos gerais.....	35
3.2	Ensaio dos corpos de prova.....	36
3.3	Estruturação da EPS	42
3.3.1	<i>Processo(s) de soldagem.....</i>	<i>43</i>
3.3.2	<i>Especificação, classe e dimensões do material de base.....</i>	<i>43</i>
3.3.3	<i>Projeto da junta e Faixa de diâmetro e espessura qualificada</i>	<i>44</i>
3.3.4	<i>Posição e Direção de Soldagem</i>	<i>45</i>
3.3.5	<i>Metal de adição</i>	<i>46</i>
3.3.6	<i>Características elétricas, Gás de proteção e Velocidade de soldagem... 48</i>	
3.3.7	<i>Tempo entre passes.....</i>	<i>48</i>
3.3.8	<i>Métodos de Pré e Pós aquecimento.....</i>	<i>50</i>
4	VARIÁVEIS ESSENCIAIS- EPS REFERÊNCIA.....	51
5	CONCLUSÃO	58

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	59
APÊNDICE A – ESPECIFICAÇÃO DE PROCEDIMENTO DE SOLDAGEM	61

1 INTRODUÇÃO

Frente ao aumento da demanda energética e aos desafios para a exploração e transporte de petróleo, gás natural e derivados nas reservas petrolíferas, observou-se uma demanda para o desenvolvimento de materiais de tubulações com alta resistência à corrosão, boa tenacidade a baixas temperaturas, adicionalmente a boa soldabilidade para montagem e instalação principalmente em campo.

A fabricação destas, bem como suas propriedades mecânicas, é regida por normas, que por sua vez são desenvolvidas por diferentes organismos, entre os quais pode ser citado o API (American Petroleum Institute - Instituto Americano do Petróleo).

No presente trabalho, será objeto de estudo a soldagem de tubos sem costura cujos materiais são normatizados conforme a API 5L "Specification for Line Pipe". Neste ponto em específico, ressalta-se a importância em atender aos requisitos de normas na fabricação destas tubulações em função das implicações ambientais, de saúde e segurança que uma falha nestes materiais poderia acarretar.

Ressalta-se que os tubos API 5L X65Q PSL 2 do presente estudo, podem inclusive ter aplicações offshore, neste caso aumentando ainda mais o grau de responsabilidade sobre a soldagem e fabricação dos mesmos devido às condições extremas de temperatura e pressão a que podem ser submetidos. Devido à necessidade de atendimento às aplicações a que se destinam, sendo estas offshore ou não, tornou-se crescente a aplicação de tubos sem costura. Uma das vantagens destes tubos é justamente não terem a solda longitudinal que os tubos com costura possuem uma vez que a solda, por si só, é uma descontinuidade presente no material que pode apresentar problemas em maior ou menor grau quando aplicada.

O presente trabalho tem como objetivo desenvolver um estudo técnico dos parâmetros e processos relacionados à soldagem de tubulações sem costura, de aço do tipo API 5L X65Q PSL 2, bem como avaliar e apresentar os requisitos da norma API 1104 (1999) para soldagem deste material. A partir do estudo das características dos processos e requisitos da referida norma e demais Referências Bibliográficas, determinar os possíveis valores dos parâmetros para a soldagem do aço API 5L X65Q PSL 2, que poderão ser utilizados para qualificação de uma EPS conforme esta norma.

Além disso, para enriquecimento do estudo, tendo sido obtida uma EPS Qualificada para a soldagem do metal base citado, conforme a norma DNV-OS-F101

(2013), realizar um breve estudo desta norma e utilizar de seus parâmetros como referência bibliográfica para o processo de qualificação, desta vez conforme a norma API 1104(1999).

As variáveis essenciais previstas na norma API 1104, e que foram definidas a partir do estudo da norma, serão apresentadas utilizando-se dos valores adotados na EPS de referência, haja visto que esta foi qualificada para a mesma finalidade, a soldagem do aço API 5L X65. Porém, os valores serão justificados com base nas referências bibliográficas, que inclui a própria EPS Apêndice, bem como o estudo dos processos e suas vantagens e desvantagens, dos ensaios e testes, da influência dos valores dos parâmetros, das boas práticas de execução e da indicação de fornecedores de consumíveis.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 Norma API 1104(1999)

Conforme a própria a norma API 1104(1999) define e esclarece, a mesma foi elaborada por um comitê de representantes do American Petroleum Institute(API), da American Gas Association, da Pipe Line Contractors Association, da American Welding Society e da American Society for Nondestructive Testing, bem como por representantes e fabricantes de tubos e indústrias similares. O objetivo desta norma é apresentar métodos para a produção de soldas de alta qualidade através do uso de soldadores qualificados, bem como utilizando procedimentos, materiais e equipamentos de soldagem devidamente qualificados e aprovados e, também, apresentar métodos de inspeção para garantir a qualidade das soldas. Aplica-se tanto à implantação de tubulações quanto para reparos e soldagem de tubulações em serviço. O uso desta norma é totalmente voluntário, e destina-se à soldagem de tubulações utilizadas na compressão, bombeamento e transmissão de petróleo bruto, produtos petrolíferos, gases combustíveis, dióxido de carbono e para sistemas de distribuição.

A norma representa os esforços combinados de muitos engenheiros que são responsáveis pelo projeto, a construção e a operação de oleodutos e gasodutos.

2.2 Norma DNV-OS-F101(2013)

Conforme a própria norma DNV-OS-F101(2013) define, ela estabelece os requisitos que asseguram os devidos conceitos de desenvolvimento, projeto, construção, operação e inutilização de gasodutos, e que sejam conduzidos com garantia da segurança pública e a proteção ao meio ambiente. Ela fornece um padrão de segurança internacionalmente aceitável para os sistemas de dutos submarinos, definindo requisitos mínimos para o desenvolvimento de conceitos, construção, exploração e inutilização dos dutos, servindo como referência técnica nos contratos entre comprador e contratante.

A norma possui orientações e critérios em vários âmbitos, listados abaixo, sendo o foco principal a integridade estrutural das tubulações.

- requisitos para coleta de dados ambientais, amostragem do solo, etc...
- critérios para concepção de layouts
- seleção de materiais e controle da corrosão
- tubulações
- componentes
- revestimentos
- construção offshore e pré-comissionamento
- ensaios de materiais
- soldagem
- ensaios não destrutivos

As normas API 1104(1999) e DNV-OS-F101(2013), não restringem a aplicação de tubos com costura. Inclusive estabelecem alguns requisitos conforme a característica de fabricação dos tubos. A API 1104(1999) indica a API 5L para classificação dos materiais de base, e a norma DNV-OS-F101(2013) indica a norma ISO 3183, que também é uma norma que estabelece requisitos para classificação das tubulações com e sem costura, em dois níveis de especificação de produto(PSL 1 e PSL 2).

2.3 Tubos API 5L

Os tubos API 5L são fabricados em aço carbono, com ou sem costura, e em sua grande parte, desenvolvidos para condução de água, gás ou derivados de petróleo em indústrias de petróleo e gás natural.

Ressalta-se, segundo MALCOLN (2007), que antes do desenvolvimento dos aços de Alta Resistência e Baixa Liga (ARBL) utilizados na fabricação de tubos API 5L a partir do grau X42, que os tubos eram produzidos com aços endurecidos pela adição de carbono e manganês possuindo, desta forma, baixa soldabilidade e tenacidade.

De acordo com a API 5L (2013), estes tubos são classificados pelo limite de escoamento precedido das letras A, B ou X, sendo que, quando precedido pela letra X, em maiúsculo, o aço utilizado é de alta resistência. Os algarismos à frente do X

correspondem ao limite de escoamento mínimo especificado em 1.000 psi, arredondado para o número inteiro mais próximo. Já as letras R, N, M, Q colocadas após os números, descrevem a condição de entrega destes materiais conforme abaixo:

- Letra R: Laminado
- Letra N: Normalizado
- Letra M: Tratado termicamente na junta soldada e/ou no tubo completo
- Letra Q: Tratado termicamente com Têmpera e Revenimento

Destaca-se que estes tubos podem ser fornecidos em dois níveis de especificação de produto: PSL 1 e 2. A diferença destes níveis de especificação consiste no maior rigor em relação aos requisitos técnicos, tais como o carbono equivalente (CE), tenacidade, limite de escoamento e resistência máxima no nível de especificação PSL 2.

Pelo exposto acima, uma descrição mais completa dos tubos objeto do presente estudo seria: tubos sem costura fabricados com aço de Alta Resistência e Baixa Liga (ARBL) com limite de escoamento mínimo especificado de 65.000 psi (440 Mpa) fornecidos na condição temperado e revenido (Q).

Ressalta-se, segundo a API 5L (2013), que os tubos produzidos devem ser aprovados nos Ensaio Não Destrutivos (END) exigidos pela própria especificação. Os END utilizados para garantir a integridade dos tubos são: visual, teste hidrostático, ultrassom e radiografia. Os Ensaio Destrutivos (ED) de tração e Charpy V, além da verificação da composição química, devem ser executados em cada lote de produção.

2.4 Aços de Alta Resistência e Baixa Liga (ARBL)

Os aços de Alta Resistência e Baixa Liga (ARBL) ou, em inglês, “High-Strength Low-Alloy (HSLA)” são fabricados para atender em sua grande maioria à indústria petrolífera na exploração e transporte de petróleo e derivados em geral. Contudo, este tipo de aço ganhou espaço em outros setores da indústria em função de ter uma boa relação resistência mecânica/tenacidade, além de resultarem em estruturas com uma massa menor e apresentarem soldabilidade relativamente melhor quando

comparados com aços carbono convencionais, resultando em benefícios econômicos e em maior produtividade durante a construção.

Ressalta-se, segundo RATNAPULI (2007), que quanto menor a espessura de parede, maior a economia em relação ao material necessário à fabricação do tubo bem como em relação aos custos de manuseio, soldagem e instalação.

Segundo SANTOS (2003), a tecnologia de fabricação destes aços teve sua evolução ao decorrer dos tempos na medida em que eram necessários aços mais resistentes. A laminação era realizada à quente e seguida de normalização. Posteriormente o processo de conformação termomecânica foi aperfeiçoado com a introdução do resfriamento controlado. Mais recentemente, adição de elementos de liga como o molibdênio, cobre e níquel, somaram os efeitos positivos já obtidos com os processos de resfriamento controlado.

Destaca-se que o tratamento térmico de normalização descrito acima tem como finalidade a redução de tensões residuais da conformação, assim como diminuir a dureza, melhorar a ductilidade e ajustar o tamanho de grão, enfim, produzir uma estrutura mais uniforme e definida após realização de processos térmicos e/ou mecânicos (CHIAVERINI, 1977).

2.5 Características dos Aços ARBL

Os aços ARBL são aços baixo carbono ou aços carbono manganês com pequenas adições de alumínio, vanádio, titânio ou nióbio, sendo suas características mecânicas provenientes de sua granulação extremamente fina e a fenômenos de precipitação resultantes do processo de fabricação e de sua composição química.

Conforme SEROPE e STEVEN (2009), os aços ARBL têm baixo teor de carbono, geralmente menor que 0,30%. Em termos de microestrutura, eles podem ser compostos de ferrita de grão fino como a matriz e segunda fase dura de martensita e austenita. Além disso, dependendo dos parâmetros de seu processamento, como ciclo de cargas e temperaturas e, principalmente ao resfriar a partir de temperaturas maiores ou iguais à de austenitização, poderão ser compostos de outros constituintes, como perlita, bainita, martensita ou uma mistura desses e também austenita retida, em casos nos quais as taxas de resfriamento são relativamente baixas. São aços com teor de liga menor que 5% e que apresentam adições intencionais de elementos de

liga e/ou microliga diferentes do carbono, conforme descrito acima, visando a obtenção de características de acordo com sua aplicação.

Para RATNAPULI (2007), o principal elemento dos aços API 5L é o carbono. Contudo, teores acima de 0,10% são evitados, pois diminuem a ductilidade e tenacidade e aumentam a probabilidade da formação de defeitos superficiais, a ocorrência de micro-segregação durante a solidificação, a quantidade de perlita, o limite de resistência e o valor do carbono equivalente.

Conforme o HANDBOOK ALLOYS METALS (1997), os aços ARBL são aqueles que, através de pequenas adições de elementos de liga, se obtém limite de escoamento acima de 40 ksi (276 MPa) na condição laminado, tendo como característica uma boa relação resistência mecânica/tenacidade.

2.5.1 Composição química e propriedades mecânicas

A composição química bem como as propriedades mecânicas dos tubos API 5L X65Q PSL2 objeto deste trabalho, podem ser vistas destacadas em vermelho nas Tabelas 1 e 2. Estas características servirão de base para o estudo em questão.

Tabela 1 - Composição Química de tubos API 5L PSL 2
Fonte: Adaptado - API 5L (2018)

Grau de Aço	Percentual em massa									Carbono equivalente ^a		
	% máxima										CE _W	CE _{Pcm}
	C ^b	Si	Mn ^b	P	S	V	Nb	Ti	Outros			
Tubos sem costura e soldados												
L245R or BR	0,24	0,4	1,2	0,025	0,015	c	c	0,04	e,l	0,43	0,25	
L290R or X42R	0,24	0,4	1,2	0,025	0,015	0,06	0,05	0,04	e,l	0,43	0,25	
L245N or BN	0,24	0,4	1,2	0,025	0,015	c	c	0,04	e,l	0,43	0,25	
L290N or X42N	0,24	0,4	1,2	0,025	0,015	0,06	0,05	0,04	e,l	0,43	0,25	
L320N or X46N	0,24	0,4	1,4	0,025	0,015	0,07	0,05	0,04	d,e,l	0,43	0,25	
L360N or X52N	0,24	0,45	1,4	0,025	0,015	0,1	0,05	0,04	d,e,l	0,43	0,25	
L390N or X56N	0,24	0,45	1,4	0,025	0,015	0,10 ^f	0,05	0,04	d,e,l	0,43	0,25	
L415N or X60N	0,24 ^f	0,45 ^f	1,40 ^f	0,025	0,015	0,10 ^f	0,05 ^f	0,04 ^f	g,h,l	conforme acordado		
L245Q or BQ	0,18	0,45	1,4	0,025	0,015	0,05	0,05	0,04	e,l	0,43	0,25	
L290Q or X42Q	0,18	0,45	1,4	0,025	0,015	0,05	0,05	0,04	e,l	0,43	0,25	
L320Q or X46Q	0,18	0,45	1,4	0,025	0,015	0,05	0,05	0,04	e,l	0,43	0,25	
L360Q or X52Q	0,18	0,45	1,5	0,025	0,015	0,05	0,05	0,04	e,l	0,43	0,25	
L390Q or X56Q	0,18	0,45	1,5	0,025	0,015	0,07	0,05	0,04	d,e,l	0,43	0,25	
L415Q or X60Q	0,18 ^f	0,45 ^f	1,70 ^f	0,025	0,015	g	g	g	h,l	0,43	0,25	
L450Q or X65Q	0,18 ^f	0,45 ^f	1,70 ^f	0,025	0,015	g	g	g	h,l	0,43	0,25	
L485Q or X70Q	0,18 ^f	0,45 ^f	1,80 ^f	0,025	0,015	g	g	g	h,l	0,43	0,25	
L555Q or X80Q	0,18 ^f	0,45 ^f	1,90 ^f	0,025	0,015	g	g	g	i,j	conforme acordado		
L625Q or X90Q	0,16 ^f	0,45 ^f	1,9	0,02	0,01	g	g	g	jk	conforme acordado		
L690Q or X100Q	0,16 ^f	0,45 ^f	1,9	0,02	0,01	g	g	g	jk	conforme acordado		

NOTAS

^a Baseado na análise do produto. Para tubos sem costura com t > 20,0 mm (0,787 pol.), os limites do CE devem ser os acordados. Os limites CE_W aplicam-se se C > 0,12% e os limites CE_{Pcm} se aplicam se C ≤ 0,12%.

^b Para cada redução de 0,01% abaixo do máximo especificado para C, um aumento de 0,05% acima do máximo especificado para Mn é permissível: até um máximo de 1,65% para os graus ≥ L245 ou B, mas ≤ L360 ou X52; até um máximo de 1,75% para os graus > L360 ou X52, mas < L485 ou X70; até um máximo de 2,00% para os graus ≥ L485 ou X70, mas ≤ L555 ou X80; e até um máximo de 2,20% para os graus > L555 ou X80.

^c Salvo acordo em contrário, Nb + V ≤ 0,06%.

^d Nb + V + Ti ≤ 0,15 %.

^e Salvo acordo em contrário, Cu ≤ 0,50%; Ni ≤ 0,30%; Cr ≤ 0,30% e Mo ≤ 0,15%.

^f Salvo acordo em contrário.

^g Salvo acordo em contrário, Nb + V + Ti ≤ 0,15%.

^h Salvo acordo em contrário, Cu ≤ 0,50%; Ni ≤ 0,50%; Cr ≤ 0,50% e Mo ≤ 0,50%.

ⁱ Salvo acordo em contrário, Cu ≤ 0,50%; Ni ≤ 1,00%; Cr ≤ 0,50% and Mo ≤ 0,50%.

^j B ≤ 0,004%.

^k Salvo acordo em contrário, Cu ≤ 0,50%; Ni ≤ 1,00%; Cr ≤ 0,55% e Mo ≤ 0,80%.

^l Para todos os graus de tubos PSL 2, exceto os graus aos quais a nota de rodapé ⁱ já se aplica, aplica-se o seguinte. Salvo acordo em contrário, não é permitida nenhuma adição intencional de B e o B residual ≤ 0,001%.

Tabela 2 - Requisitos para os testes de tração de tubos API 5L PSL 2 - Propriedades mecânicas
Fonte: Adaptado - API 5L (2018)

Classe de Tubo	Corpo de tubo sem costura e tubos soldados					Solda de tubos HFW, SAW e COW	
	Limite de escoamento ^a		Resistência a tração ^a		Ratio ^{a, c}	Alongamento	Resistência a tração ^d
	$R_{10,5}$		R_m		$R_{10,5}/R_m$	A_f	R_m
	MPa (psi)		MPa (psi)			%	MPa (psi)
	mínimo	máximo	mínimo	máximo	máximo	mínimo	mínimo
L245R or BR L245N or BN L245Q or BQ L245M or BM	245 (35 500)	450 ^e (65 300) ^e	415 (60 200)	655 (95 000)	0,93	f	415 (60 200)
L290R or X42R L290N or X42N L290Q or X42Q L290M or X42M	290 (42 100)	495 (71 800)	415 (60 200)	655 (95 000)	0,93	f	415 (60 200)
L320R or X46R L320Q or X46Q L320M or X46M	320 (46 400)	525 (76 100)	435 (63 100)	655 (95 000)	0,93	f	435 (63 100)
L360R or X52R L360Q or X52Q L360M or X52M	360 (52 200)	530 (76 900)	460 (66 700)	760 (110 200)	0,93	f	460 (66 700)
L390R or X56R L390Q or X56Q L390M or X56M	390 (56 600)	545 (79 000)	490 (71 100)	760 (110 200)	0,93	f	490 (71 100)
L415R or X60R L415Q or X60Q L415M or X60M	415 (60 200)	565 (81 900)	520 (75 400)	760 (110 200)	0,93	f	520 (75 400)
L450Q or X65Q L450M or X65M	450 (65 300)	600 (87 000)	535 (77 600)	760 (110 200)	0,93	f	535 (77 600)

NOTAS

a_ Para graus intermediários, a diferença entre o valor máximo e o mínimo especificados do limite de escoamento especificado para o metal base deve ser o valor encontrado na tabela para o próximo grau superior e a diferença entre o valor mínimo especificado do limite de resistência e o valor mínimo do limite de escoamento especificado será o valor encontrado na tabela para o grau superior. Para graus intermediários até o Grau L320 ou X46, a resistência à tração deve ser ≤ 655 MPa (95 000 psi). Para graus intermediários maiores que o Grau L320 ou X46 e menores que o Grau L555 ou X80, a resistência à tração deve ser ≤ 760 MPa (110 200 psi). Para os graus intermediários superiores a Grau L555 ou X80, a resistência à tração máxima admissível deve ser obtida por interpolação. Para unidades do SI, o valor calculado deve ser arredondado para 5 MPa mais próximos. Para unidades USC, o valor calculado deve ser arredondado para os 100 psi mais próximos.

b_ Para graus maiores que L625 ou X90, Rp0,2 é aplicável.

c_ Este limite é aplicável para tubos com diâmetros maiores que 323,9mm.

d_ Para graus intermediários, o valor mínimo do limite de resistência da junta soldada deve ser o mesmo considerado pelo valor determinado na nota "a".

e_ Para tubos que exigem testes longitudinais, o limite de escoamento deve ser ≤ 495 MPa (71 800 psi).

f_ O alongamento mínimo especificado, Af, deve ser determinado usando a seguinte equação:

$$A_f = C \frac{A_{xc}^{0,2}}{U^{0,9}}$$

Onde

C - é uma constante com valor de 1.940 para cálculos em unidade SI e com valor de 625.000 para cálculos usando unidades USC.

A_{xc} - é a área de seção transversal da peça de ensaio, sujeita à tração, expressa em milímetros quadrados (polegadas quadradas), como se segue:

- _ para corpos de prova de seção circular, 130 mm² (0,20 pol²) para corpos de prova com diâmetro de 12,7 mm (0,500 pol.) e 8,9 mm (0,350 pol.) e área de 65 mm² (0,10 pol²) para corpos de prova com diâmetro de 6,4 mm (0,250 pol.);
- _ para corpos de prova que contenham a seção completa considerar o menor entre: a) 485 mm²(0,75 pol²) e b) área da seção transversal do corpo de prova, utilizando o diâmetro externo especificado e a espessura de parede especificada do tubo, arredondado para o 10 mm² mais próximo (0,01 pol²);
- _ para corpos-de-prova que não contenham a seção completa considerar o menor entre: a) 485 mm²(0,75 pol²) e b) que 485 mm² (0,75 pol²) e área da seção transversal do corpo de prova, arredondando a largura do corpo de prova e a espessura de parede especificada do tubo arredondada para os 10 mm² mais próximos (0,01 pol²);

U - é o limite de resistência à tração mínima especificada, expressa em megapascais (libras por polegada quadrada);

2.5.2 Efeito dos principais elementos de liga e microliga

Conforme MALCOLN (2007), o alumínio é adicionado com a finalidade de atuar como agente desoxidante e de refino de grão. Quando presente em solução sólida

(teores acima de 0,015%) garante que, durante as operações de soldagem ou tratamento térmico, o tamanho de grão austenítico será reduzido.

O elemento alumínio, ao ser adicionado ao aço líquido, produz o efeito de desoxidação e desulfuração e, quando remanescente e não estando em forma de óxido, poderá gerar nitreto de alumínio, que possui efeito de refino de grão. Contudo, o alumínio forma soluções sólidas substitucionais nos aços, podendo diminuir a tenacidade dos mesmos.

Conforme JÚNIOR (2013), o alumínio quando presente em solução sólida (teores maiores do que 0,015%) garante que, quando o aço for aquecido durante as operações de soldagem ou tratamento térmico, o tamanho do grão austenítico será reduzido.

O máximo teor de alumínio adotado é de 0,1%. Valores maiores do que 0,1% podem comprometer a tenacidade do aço.

Já o nióbio, quando adicionado ao aço em teor adequado, promove o aumento da resistência mecânica e tenacidade. Este efeito é proporcionado pelo refino do grão austenítico e ferrítico e pela precipitação de NbC (carboneto de nióbio) após a laminação. Quando presente em aços com baixo teor de carbono em conjunto com laminação controlada, tende a transformar a austenita em ferrita poligonal, ferrita acicular ou bainita com excelente tenacidade.

Ressalta-se, conforme MALCOLN (2007), que o vanádio também proporciona aumento de resistência mecânica pela precipitação de carbonetos e nitretos. A eficácia do vanádio como agente de refino de grão em processos que utilizam laminação controlada, é diminuída devido ao seu menor potencial de precipitação durante a laminação e por não retardar efetivamente a recuperação e recristalização do grão austenítico.

Ainda conforme MALCOLN (2007), o titânio é um forte formador de nitretos. O teor de titânio recomendado para se obter boa tenacidade na ZTA e diminuir a tendência de trincas transversais durante o lingotamento contínuo é de 0,008 a 0,015% em aços contendo 0,004 a 0,008% de nitrogênio. Com o aumento no teor de nitrogênio ou titânio, existe a tendência de formação de precipitados cúbicos grandes de nitreto de titânio prejudicando a tenacidade da ZTA. Um teor maior que 0,03 a 0,08% tende a formar carboneto de titânio, o qual proporciona um grande aumento na resistência mecânica, mas reduz a tenacidade. Os nitretos formados com tamanho

entre 5 a 20 nm auxiliam no refino de grão durante a laminação e soldagem, enquanto que os de maior tamanho tendem a nuclear trincas e reduzir a tenacidade.

2.5.2.1 Carbono Equivalente (CE)

Pode-se dizer que o carbono equivalente é calculado por uma equação empírica que estima um teor aproximado de carbono que produz um determinado efeito similar ao obtido para a composição química do aço considerado. O efeito considerado pode ser, por exemplo, a dureza ou a tendência ao trincamento da ZTA após soldagem.

Em outubro de 1940, DEARDEN e O'NEILL criaram o conceito de carbono equivalente e publicaram uma equação para representá-lo. No conceito deles, carbono equivalente traduz a influência de alguns elementos na resistência mecânica do aço, proporcionalmente ao aumento desta resistência pelo carbono. A equação publicada foi:

$$CE = C + \frac{Si}{6} + \frac{P}{0,8} + \frac{Mn}{5} \quad (I)$$

DEARDEN e O'NEILL desenvolveram uma equação, a partir do estudo de 50 aços diferentes e tendo seus valores de carbono equivalente calculados conforme a equação I, para determinar o valor do limite de resistência conforme abaixo:

$$UTS \left(\frac{ton}{in^2} \right) = (16 + 40xCE) \pm 2 \left(\frac{ton}{in^2} \right) \quad (II)$$

DEARDEN e O'NEILL utilizaram as equações I e II, retroalimentando-as com os valores de limite de resistência e composição química conhecidos de aços, para que novos fatores relacionados aos elementos químicos, fossem calculados. Foram sendo inseridos novos fatores na equação I, obtendo ao final a equação abaixo:

$$CE = C + \frac{Si}{6} + \frac{Mn}{8} + \frac{Cr}{7} + \frac{Ni}{16} + \frac{Mo}{4} + \frac{Co}{16} + P/0,8 \quad (III)$$

Outra importante equação utilizada no estudo, relaciona o carbono equivalente à dureza vickers:

$$Hv = 120CE - 200 \quad (IV)$$

Na equação acima, Hv é a dureza Vickers e CE é o valor de carbono equivalente.

Para utilização da equação IV, considera-se o cálculo do carbono equivalente através de outra importante equação, abaixo:

$$CE = C + \frac{(Mn + Cr)}{5,5} + \frac{Ni}{15} + \frac{V}{5} + \frac{Mo}{4} + \frac{Co}{150} + P/2 \quad (V)$$

As equações I a III foram desenvolvidas para o cálculo de carbono equivalente no metal base. As equações IV e V são aplicadas a juntas soldadas.

Conforme DEARDEN e O'NEILL, o valor da dureza Vickers é um dos parâmetros para prever ou evitar, dentre outros parâmetros e fatores, a ocorrência de fissuração a frio. Este valor havia sido definido como 350HV (REEVE, 1939). Os resultados obtidos nos testes por DEARDEN e O'NEILL, confirmaram o valor de dureza máxima da solda para evitar a fissuração a frio, de 350 HV.

O valor máximo de dureza, refere-se à dureza na ZTA (zona termicamente afetada), adjacente à linha de fusão.

As equações IV e V sugerem que o limite de resistência ou a dureza do aço podem ser projetados, em detrimento da composição química, considerando um baixo percentual de carbono e adição dos outros elementos, para evitar a fissuração a frio na ZTA, após soldagem. Esta estratégia lançou as bases para o desenvolvimento de aços modernos com boa soldabilidade.

A partir da publicação de Dearden e O'Neill, outros países passaram a desenvolver mais estudos sobre o cálculo do carbono equivalente e as influências de cada elemento de liga no valor desta grandeza.

Segundo MALCOLN (2007), a equação VI e VII, representadas abaixo, ambas transcritas da norma API 5L (2013), são utilizadas em conjunto com a composição química do material para o cálculo do carbono equivalente. Estas equações indicam

a influência dos elementos de liga na temperabilidade do aço em relação ao carbono, visto que este elemento é o mais eficaz, mais empregado e de menor custo para aumentar a resistência mecânica dos aços.

$$CE_{IIW} = C + \frac{Mn}{6} + \frac{(Cu + Mo + V)}{5} + \frac{(Ni + Cu)}{15} \quad (VI)$$

$$CE_{PCM} = C + \frac{Si}{30} + \frac{Mn}{20} + \frac{Cu}{20} + \frac{Ni}{60} + \frac{Cr}{20} + \frac{Mo}{15} + \frac{V}{10} + 5B \quad (VII)$$

De acordo com MALCOLN (2007), a equação VI é conhecida como fórmula do carbono equivalente do IIW (International Institute of Welding). Esta fórmula foi desenvolvida para aços normalizados com teor de carbono superior a cerca de 0,12% e continua sendo especificada pela API 5L.

Destaca-se que valores de CE_{IIW} abaixo de 0,45 indicam boa soldabilidade metalúrgica dos aços, enquanto valores acima deste requerem cuidados quando da soldagem. Pode-se dizer ainda segundo MALCOLN (2007), que os aços API 5L X65Q possuem valores entre 0,40 e 0,45.

A equação VII é conhecida como parâmetro do carbono equivalente ou fórmula de Ito-Bessyo. Esta fórmula foi desenvolvida na década de 60 no Japão, especificamente para os novos aços com teor de carbono mais baixo. Segundo MALCOLN (2007), valores de CE entre 0,18 e 0,20 obtidos pela equação VII, são compatíveis com valores em torno de 0,40 obtidos pela equação VI.

Conforme a norma API 5L (2013), o cálculo do carbono equivalente para teores de carbono menores ou iguais a 0,12%, deve ser realizado utilizando a equação IV e, para teores acima de 0,12%, a equação III. A norma ainda ressalta, conforme mostra a Tabela 1, os valores máximos de carbono equivalente dados por essas equações para o caso do aço que será estudado:

$$CE_{IIW} = 0,43\% \text{ ou } CE_{PCM} = 0,25\%.$$

2.6 Soldagem-conceitos

Segundo a AWS (2001), “denomina-se soldagem a operação que visa obter a coalescência localizada pelo aquecimento localizado até uma temperatura adequada, com ou sem a aplicação de pressão e de metal de adição”.

Já para WAINER, BRANDI e MELO (1995) “denomina-se soldagem o processo de união entre duas partes metálicas, usando uma fonte de calor, com ou sem aplicação de pressão. A solda é o resultado deste processo”.

Ressalta-se que, no decorrer dos tempos, processos de soldagem vêm sendo aplicados também para depositar materiais sobre superfícies buscando uma proteção adicional ou recuperação contra o desgaste através de um tipo de revestimento adicional ao metal base das peças. Logo, considerando os processos envolvidos na união, proteção e no aspecto conceitual, o termo “soldagem” pode ser melhor definido como “o processo de união baseado no estabelecimento de forças de ligação química de natureza similar às atuantes no interior dos próprios materiais, na região de ligação entre os materiais que estão sendo unidos” (MARQUES; MODENESI; BRACARENSE, 2013).

A Figura 1 apresenta de forma compacta os processos de soldagem e afins. Mais adiante é apresentado com pouco mais de ênfase os processos GTAW e FCAW utilizados no procedimento de soldagem anexo a este.

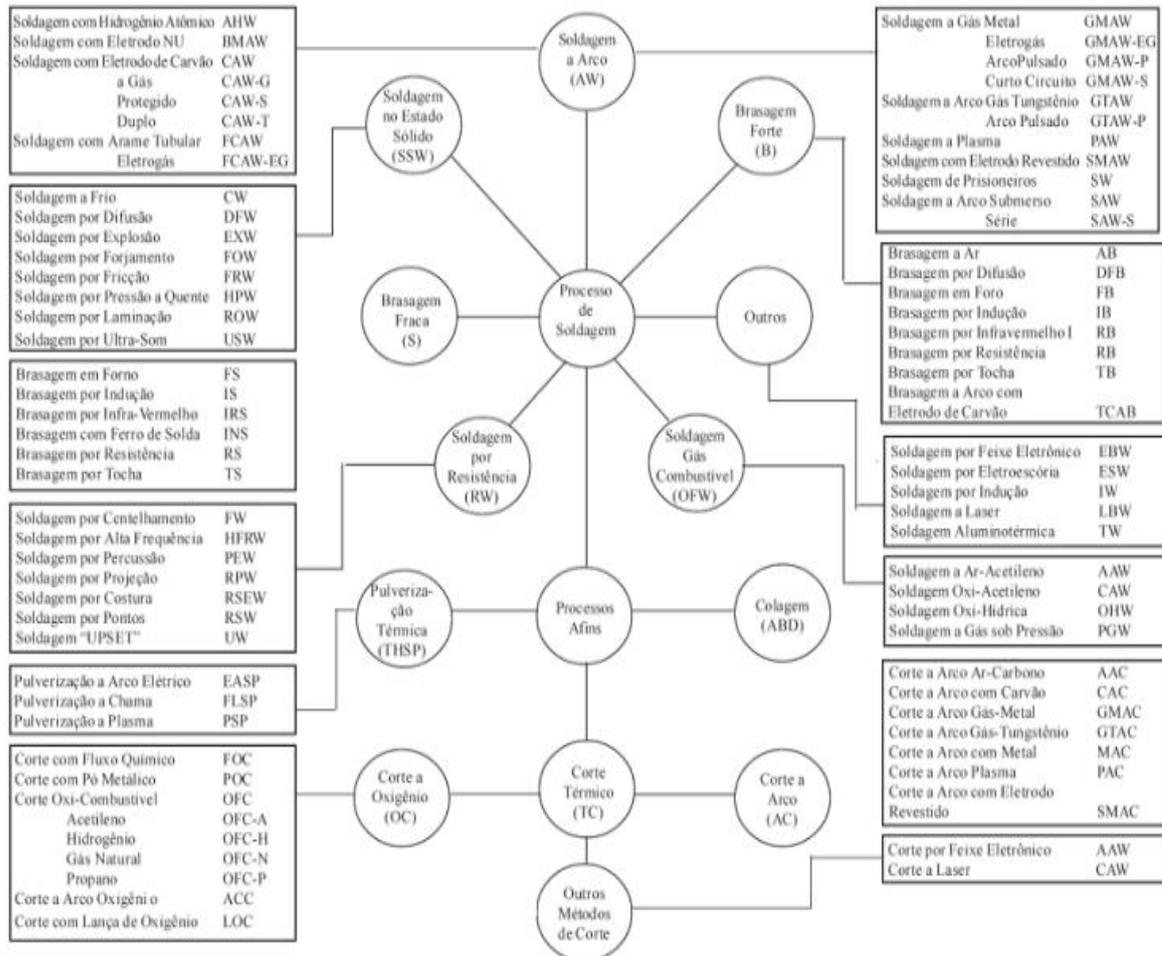


Figura 1: Processos de soldagem e afins
Fonte: AWS (2001)

2.6.1 Soldabilidade

Conforme a AWS (2001), soldabilidade pode ser definida como a capacidade de um material ser soldado, sob as condições impostas de fabricação em uma estrutura específica e convenientemente projetada, de modo a executar de maneira satisfatória o serviço pretendido.

Para BRANDI (1997), este conceito pode ser subdividido em: soldabilidade operacional, metalúrgica e em serviço. A soldabilidade operacional está relacionada as condições de operação da soldagem tais como a combinação do processo e natureza do metal de base; posição de soldagem; habilidade do soldador; técnicas de montagem das juntas, etc. Já a soldabilidade metalúrgica está associada a condições térmicas e químicas que podem proporcionar defeitos, ou propriedades mecânicas

indesejadas na junta soldada. Por último, a soldabilidade em serviço está mais relacionada a vida útil do componente soldado.

A soldabilidade pode ainda ser entendida como sendo a facilidade em se obter uma solda com baixa susceptibilidade à ocorrência de trincas. A solda é uma ação de aproximação e aquecimento, plasticidade ou fusão parcial, que leva a um fenômeno de difusão na zona soldada dando como resultado a junta que se caracteriza por sua resistência e coesão após o resfriamento (CHIAVERINI, 1986).

A solda deve ser produzida de forma a garantir o atendimento aos requisitos mecânicos e outros de sua aplicação.

Destaca-se ainda, segundo BOTT; KOJIMA; SAMPAIO (2003), que a soldabilidade dos aços, de um modo geral, é extremamente dependente da composição química e das condições térmicas, que determinam a microestrutura da junta soldada.

Em relação à soldabilidade do aço API 5L X65Q PSL 2, esta pode ser comparada a soldabilidade de outros aços utilizados para os mesmos fins. A soldabilidade de determinado aço pode ser estimada a partir do cálculo de carbono equivalente, a partir de sua composição química. Além de mensurar o grau de soldabilidade de determinado aço, o carbono equivalente também permite inferir a sua temperabilidade. Ressalta-se que quanto, mais temperável for o aço, maior a tendência de formação de martensita na sua ZTA (Zona Termicamente Afetada) durante a soldagem, que pode ocasionar a formação de trincas.

Segundo CRAIG (1993), para melhorar a soldabilidade dos aços, ou seja, para minimizar a temperabilidade destes, os limites superiores típicos para CE_{IIW} e CE_{PCM} são 0,40% e 0,18% respectivamente.

Ressalta-se que outros parâmetros, como o uso de pré e de pós aquecimento, podem minorar os efeitos negativos de em elevado carbono equivalente na soldagem de aços.

2.6.1.1 Tratamentos Térmicos

2.6.1.1.1 Pré e Pós aquecimento de soldagem

De acordo com a ESAB (2005), o pré e pós aquecimento de soldagem são empregados para aumentar a temperatura do metal vizinho à região da solda de tal

modo que o gradiente de temperatura entre a solda e o metal de base vizinho fique reduzido. O resultado é que a região aquecida sofre um resfriamento mais lento, reduzindo o risco de trincas por hidrogênio, as tensões de contração e a dureza da zona termicamente afetada.

Segundo SANTOS (2003), “para a correta aplicação do preaquecimento, vários fatores devem ser analisados: composição química e propriedades físicas do metal base, aporte térmico, tipo de eletrodo, grau de restrição da soldagem e espessura da chapa soldada. Para o cálculo da temperatura de preaquecimento é necessário que se obtenha o valor do Carbono Equivalente (CE)”.

Pode-se dizer que condições de resfriamento com gradientes térmicos relativamente elevados favorecem a formação de martensita na ZTA. Esta fase é indesejável, pois, aliada à retenção de hidrogênio na poça de fusão, pode gerar trincas localizadas principalmente na ZTA, particularmente na margem e na raiz da solda, e, em alguns casos, no metal de solda.

Ressalta-se que, pelo uso do pré-aquecimento, consegue-se eliminar grande parte ou, até mesmo, toda a umidade da superfície a ser trabalhada. Esta umidade, quando presente, pode ser uma das responsáveis pelo hidrogênio retido na solda juntamente com a umidade presente nos gases de proteção, sujeira e óxidos presentes no metal base e da umidade do revestimento dos eletrodos.

Conforme ROCHA (2010) independentemente do processo de soldagem utilizado e, especialmente na soldagem de tubos acima do grau X70, a fim de prevenir a ocorrência de defeitos de soldagem, sempre é feito o pré-aquecimento para soldagem.

Conforme MAINARD (2013), a norma para construção de oleodutos ASME B31.4, que é aplicável para a soldagem de tubos API5L, exige pré-aquecimento a temperaturas a partir de 93°C para espessuras entre 32 e 38mm. E, nestes casos, a execução do pré-aquecimento é suficiente, não sendo necessários tratamentos térmicos posteriores à finalização da solda.

2.6.1.1.2 Alívio de Tensões

Após finalização de todos os passes, visando reduzir as tensões residuais na junta soldada, pode ser necessária a realização de tratamento térmico de alívio de tensões. Esse consiste em aquecer e resfriar de forma controlada a peça/junta

soldada, e manter esta a uma determinada temperatura, por um determinado tempo. A temperatura e o tempo de tratamento, bem como as taxas de aquecimento e resfriamento da peça, podem ser calculados basicamente a partir da espessura da junta soldada e tipo de material com base em normas, como exemplo a norma AWS D10.10 e a norma ASME seção VIII divisão 1.

Os objetivos principais deste tratamento térmico é aliviar as tensões residuais resultantes do processo de soldagem, aumentar a ductilidade, diminuir a dureza na região de zona fundida (ZF) e na zona termicamente afetada (ZTA) e aumentar resistência à fadiga e à corrosão sob tensão.

2.6.2 Processo de Soldagem GTAW

A soldagem a arco elétrico com eletrodo de tungstênio e proteção gasosa (GTAW - Gas-Shielded Tungsten Arc Welding), conforme MARQUES; MODENESI; BRACARENSE (2013), é um processo de união de peças produzido pelo aquecimento e fusão destas pelo arco elétrico utilizando um eletrodo de tungstênio não consumível. Neste processo, que também é conhecido como TIG (Tungsten Inert Gas), o eletrodo, o arco e a área em volta da poça de fusão da solda são protegidos por uma atmosfera protetora de gás inerte ou gases inertes, normalmente o argônio e/ou o hélio. O tipo de gás é escolhido principalmente em função do tipo e espessura do metal que será soldado e da posição de soldagem. Segue abaixo, na Figura 2, um desenho esquemático do processo de soldagem TIG, mostrando o eletrodo, o metal base, o arco elétrico, o metal de adição e o gás de proteção.

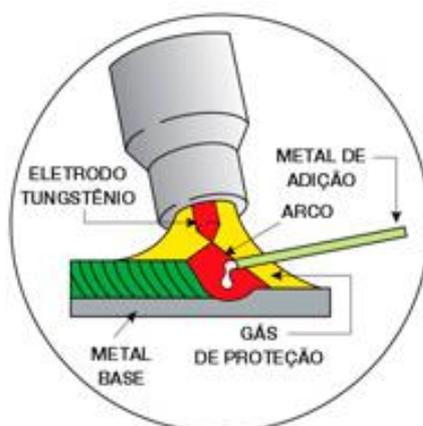


Figura 2: Soldagem GTAW.

Fonte: Site ESAB: http://www.esab.com.br/br/pt/education/blog/processo_soldagem_tig_gtaw.cfm (em 19/05/2018)

Neste tipo de processo, a soldagem pode ou não ser feita com metal de adição, sendo uma característica importante deste conforme MARQUES; MODENESI; BRACARENSE (2013). Adicionalmente, o processo permite um excelente controle da energia transferida para a solda, por apresentar elevada estabilidade (gerando reduzida quantidade de respingos) e permitir o controle independente da fonte de calor e da adição de metal de enchimento.

A soldagem TIG é normalmente executada de forma manual e pode ser realizada em qualquer posição. Com boa estabilidade do arco elétrico, em geral, este processo produz uma solda limpa e de alta qualidade, adicionalmente a outras vantagens tais como ser adequado para a soldagem de juntas de pequena espessura, excelente acabamento, a obtenção de boas propriedades mecânicas, maior controle da formação da solda, dentre outras.

Por outro lado, possui também suas limitações tais como baixa produtividade, baixa tolerância a contaminantes, necessidade de soldadores mais experientes, etc.

Neste trabalho, este processo será utilizado na soldagem do passe de raiz, para garantir uma solda com alto controle de seu formato e com boas propriedades mecânicas, dada a aplicabilidade destas tubulações.

Pode-se verificar na Tabela 3 uma referência com relação ao tipo de gás a ser utilizado conforme as principais ligas e os valores de corrente comumente aplicáveis.

Tabela 3 - Valores e tipos de corrente de soldagem para aços, no processo GTAW.
Fonte: Soldagem I- Introdução aos Processos de Soldagem. MODENESI(2008).

Diâmetro do Eletrodo (mm)	Diâmetro do Bocal (mm)	Corrente de Soldagem (A)			
		CC- (a/b)	CC+ (a/b)	CA (a)	CA (b)
0,5	6,4	5 - 20	--	5-20	5-15
1,0	6,4	15 - 80	--	15-80	10-60
1,6	9,5	70 - 150	10 - 20	70-150	50-100
2,4	9,5	150 - 250	15 - 30	140-235	100-160
3,2	12,5	250 - 400	25 - 40	225-325	150-210
4,0	12,5	400 - 500	40 - 55	300-400	200-275
4,8	16,0	500 - 750	55 - 80	400-500	250-350
6,4	19,0	750 - 1000	80 - 125	500-630	325-450
Eletrodos: (a) EWTh-2 (W-2%ThO ₂) (b) EWP (Tungstênio puro)					

Conforme MODENESI (2008), para soldagem de aços carbono no processo GTAW, recomenda-se a utilização de argônio (Ar) puro como gás inerte de proteção, desempenhando boa função de proteção do cordão de solda.

Neste processo de soldagem ainda podem ser utilizados gás Hélio (He) ou misturas de gases como Ar-He, Ar-H₂ e Ar-CO₂. Porém, o CO₂ não é usado normalmente em GTAW. Existem pesquisas com tochas de bocal duplo que usam gás ativo (CO₂, por exemplo), apenas no bocal externo. Misturas Ar-N₂ são usadas, por exemplo, na soldagem de aços inoxidáveis duplex.

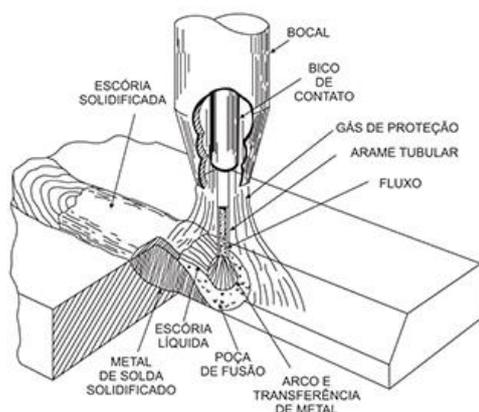
2.6.3 Processo de Soldagem FCAW

A soldagem a arco elétrico com arames tubulares (FCAW - Flux-Cored Arc Welding), segundo MARQUES; MODENESI; BRACARENSE (2013), é um processo que promove a união de metais pelo aquecimento destes através de um arco elétrico estabelecido entre o eletrodo, na forma de um arame tubular, e a peça de trabalho. A proteção do arco e do cordão de solda é obtida a partir da escória gerada por fluxo de soldagem contido dentro do eletrodo (arame auto protegido) e pode ser suplementada por um gás fornecido por fonte externa, sendo este normalmente uma mistura de argônio (75%) e CO₂ (25%). O metal de solda depositado com esta mistura de gases sendo aplicada no processo, permite obter maior limite de escoamento e resistência a tração do que quando é aplicada outra opção deste processo, que é aplicar somente o gás CO₂.

O CO₂, quando submetido às altas temperaturas do arco elétrico, se dissocia em CO e O₂, tornando-se um gás ativo e que pode promover maior instabilidade do arco elétrico e transferência metálica. No entanto, a adição de CO₂ para soldagem em grande escala e/ou grandes espessuras levam a redução de custo de soldagem, visto que possui o custo mais baixo em relação a outros gases. Segue na Figura 3 um desenho esquemático do processo FCAW, mostrando as diferenças entre o processo com arame tubular com proteção externa (FCAW-G) e auto protegido (FCAW-S).

É um processo utilizado frequentemente no modo semiautomático, sendo aplicado aos aços carbono, de baixa liga e inoxidáveis. Tem como vantagens alto fator de trabalho, alta taxa de deposição e alto rendimento, adicionalmente a boa versatilidade e possibilidade de ajustes de composição química do metal de solda.

Soldagem com arames tubulares com proteção externa



Soldagem com arames tubulares autoprotetidos

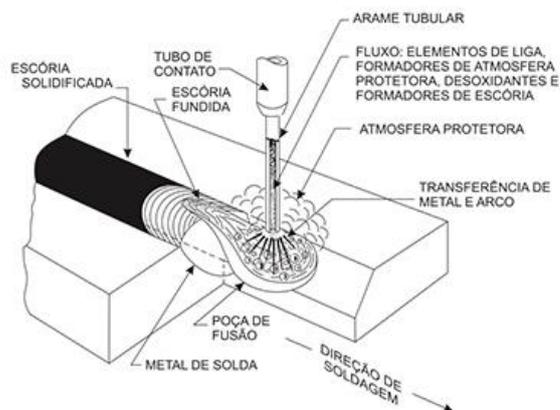


Figura 3: Soldagem FCAW com e sem proteção externa

Fonte: Site ESAB:

http://www.esab.com.br/br/pt/education/blog/processo_soldagem_arames_tubulares.cfm (em 19/05/2018)

Segundo FORTES (2004), é essencial que os arames tubulares sejam aplicados com misturas ricas em argônio (Ar) ou com argônio puro, visto que o dióxido de carbono (CO_2) pode causar deteriorações do cordão de solda, embora este gás possibilite maior produtividade e penetração deste cordão. Ainda conforme FORTES (2004), as vazões usuais para soldagem com arames tubulares devem variar entre 15 e 20 L/min.

Na Figura 4 pode ser observado o perfil do cordão de solda originado na soldagem FCAW, devido à influência da mistura do gás de proteção.

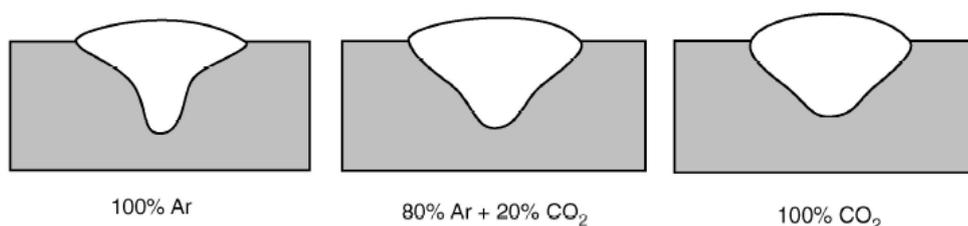


Figura 4- Perfil do cordão de solda (FCAW) - conforme os diferentes tipos de gases de proteção.

Fonte: Livro Soldagem Fundamentos e Tecnologia, MARQUES et al. (2011)

A Tabela 4 apresenta os valores típicos de parâmetros elétricos de soldagem com o processo FCAW, dependendo do diâmetro do arame e da posição de soldagem.

Tabela 4- Valores típicos de corrente e tensão aplicáveis à soldagem FCAW.
Fonte: Arames Tubulares Ok (FORTES, 2004).

Diâmetro (mm)	Posição	Corrente (A)	Tensão (V)
1,2	Plana / Horizontal	150 – 290	23 – 30
	Vertical Ascendente	150 – 250	22 – 26
	Sobre-cabeça	150 – 250	23 – 26
1,6	Plana / Horizontal	180 – 400	25 – 34
2,4	Plana / Horizontal	350 – 550	26 – 33

3 DESENVOLVIMENTO

3.1 Aspectos gerais

Para o estudo das variáveis essenciais, tomou-se como referência a norma API 1104 (1999). E foram assumidos os valores de carbono equivalente destacados na Tabela 1 para o aço API 5LX65Q, ou seja, $CE_{IIW} = 0,43\%$ e/ou $CE_{PCM} = 0,25\%$.

A norma citada contém os requisitos mínimos necessários para a qualificação de um procedimento de soldagem, de modo que se possa garantir que a solda executada entre os tubos atenda aos requisitos de projeto e de que esteja isenta de defeitos que possam comprometer a segurança durante a operação do duto. Ela determina os parâmetros que devem ser considerados e citados no referido procedimento. Além disso, determina como devem ser preparados os corpos de prova para execução dos devidos ensaios.

Haja vista a importância do entendimento dos processos de soldagem destes tubos e suas variáveis, torna-se necessário a qualificação de especificação de procedimento de soldagem (EPS), dos soldadores ou operadores de soldagem, para permitir o controle e rastreabilidade do processo.

Segundo a norma API 1104 (1999), uma EPS deve conter no mínimo os parâmetros essenciais abaixo:

- Processo ou processos de soldagem a serem utilizados;
- Especificação, classe e dimensões do material de base;
- Projeto da junta contendo o desenho mostrando o tipo, o ângulo, abertura da raiz e do nariz da junta;
- Posição de soldagem;
- Direção de soldagem;
- Faixa de diâmetro e espessura qualificada;
- Tipos e número do metal de adição, se aplicável, conforme classificação AWS;
- Características elétricas;
- Tempo entre passes;
- Velocidade de soldagem;

- O método de pré-aquecimento, a largura de aquecimento, a temperatura mínima e máxima para início de soldagem, e o mínimo da temperatura ambiente para a qual o pré-aquecimento é requerido;
- O método de pós-aquecimento, a largura da região aquecida, a temperatura mínima e máxima, tempo na temperatura de pós-aquecimento e método de controle de temperatura;
- A composição do gás de proteção e vazão, quando aplicáveis;

Outros fatores podem ser necessários para adequada operação dos processos, ou podem afetar a qualidade da junta soldada e, portanto, devem ser especificados sempre que possível.

O Apêndice A deste trabalho contém a compilação de dados de uma EPS qualificada para soldagem do aço API 5L X65(conforme norma DNV-OS-F101), que foi cedida pelo responsável pela elaboração da mesma, para referência bibliográfica.

3.2 Ensaios dos corpos de prova

Em relação aos testes que devem ser realizados nos corpos de prova quando da Qualificação, devem ser realizados os ensaios de tração, de fratura - “Nick Break”, dobramento lateral - “Side Bend”e dobramento na face – “Face Bend”. Os tipos de testes e quantidades de corpos de prova, para que seja atendida a norma API 1104, na qualificação de Procedimento e de Soldadores, estão mencionados nas Tabelas 5 e 6 respectivamente. Esta é a norma definida pela API 5L como a regulamentadora dos requisitos para qualificação da EPS e mão-de-obra. O destaque em vermelho nas Tabelas 05 e 06 serão discutidos no item 3.3.3 mais adiante.

Tabela 5- Tipos e Números de CP's para Qualificação de Procedimento.
Fonte: API 1104 (1999). Adaptado

Diâmetro externo		Número de corpos de prova					
in	mm	Ensaio de tração	Ensaio de fratura	Dobramento na raiz	Dobramento na face	Dobramento Lateral	Total
Espessura de parede <= 0,500 in. (12,7 mm)							
< 2,375	< 60,3	0(a)	2(b)	2	0	0	4(c)
2,375 to 4,500	60,3 to 114,3	0(a)	2(b)	2	0	0	4
> 4,500 to 12,750	>114,3 to 323,9	2	2(b)	2	2	0	8
>12,750	> 323,9	4	4(b)	4	4	0	16
Espessura de parede > 0,500 in. (12,7 mm)							Total
≤ 4,500	≤ 114,3	0(b)	2(b)	0	0	2	4
> 4,500 to 12,750	> 114,3 to 323,9	2	2(b)	0	0	4	8
> 12,750	> 323,9	4	4(b)	0	0	8	16
a) Um corpo de prova de ensaio Nick-break(fratura) e um corpo de prova de ensaio de dobramento de raiz devem ser retirados de cada duas soldas de teste ou, para tubos de diâmetros menores que 33,4 mm, um corpo de prova da seção completa deve ser retirado, para ensaio de tração							
b) Para materiais com limite de escoamento maior que 290MPa, deve ser feito no mínimo um (01) teste de tração.							
c) Um corpo de prova de ensaio de fratura e um corpo de prova de dobramento lateral são retirados de cada uma das duas soldas de teste, ou para tubos menores ou iguais a 33,4 mm (1,315 pol.), um corpo de prova da seção completa deve ser retirado, para ensaio de tração							

Tabela 6- Tipos e Números de CP's para Qualificação de Soldadores.
Fonte: API 1104 (1999). Adaptado

Diâmetro externo		Número de corpos de prova					
in	mm	Ensaio de tração	Ensaio de fratura	Dobramento na raiz	Dobramento na face	Dobramento Lateral	Total
Espessura de parede <= 0,500 in. (12,7 mm)							
< 2,375	< 60,3	0	2	2	0	0	4(a)
2,375 to 4,500	60,3 to 114,3	0	2	2	0	0	4
> 4,500 to 12,750	>114,3 to 323,9	0	2	2	0	0	4
>12,750	> 323,9	0	4	2	2	0	8
Espessura de parede > 0,500 in. (12,7 mm)							Total
≤ 4,500	≤ 114,3	0	2	0	0	2	4
> 4,500 to 12,750	> 114,3 to 323,9	0	2	0	0	2	4
> 12,750	> 323,9	0	4	0	0	4	8
a) para tubos de diâmetros externos menores ou igual a 33,4 mm, um corpo de prova de ensaio Nick-break(fratura) e um corpo de prova de ensaio de dobramento de raiz devem ser retirados de duas soldas, ou um corpo de prova da seção completa para ensaio de tração deve ser retirado.							

Conforme a norma API 1104 (1999), para que o Procedimento de Soldagem seja aprovado, deverão ser realizados testes nos CP's e a avaliação dos resultados obtidos, conforme critérios pré-definidos. Não necessariamente devem ser feitos todos os testes previstos na norma. Os principais e mais utilizados estão detalhados abaixo:

- Ensaio de tração (conforme item 5.6.2.3) - A resistência à tração da solda, incluindo a zona de fusão de cada CP, deve ser maior ou igual ao mínimo especificado para o material do tubo teste, contudo, não precisa ser maior ou igual à resistência à tração real do material. Se o CP quebrar fora da solda e da ZTA (ou seja, no material do tubo) e atender ao limite mínimo de resistência a tração especificada, a solda deve ser aceita como atendendo aos requisitos. Se o CP quebrar na solda ou na ZTA e a resistência observada for maior ou igual ao mínimo especificado do material do tubo, a solda deve ser aceita como atendendo aos requisitos. Se o CP quebrar abaixo do mínimo especificado de resistência à tração do material do tubo, a solda deve ser reprovada e uma nova junta deve ser feita e testada.

Segue na Figura 5 a ilustração de um corpo de prova típico para o teste de tração. Conforme pode ser visto, o corpo de prova deverá ter aproximadamente 230 mm de comprimento, medida transversalmente à solda a ser feita. A largura do corpo de prova, medida na direção longitudinal em relação ao corpo de prova, deve medir aproximadamente 25 mm. Os reforços não devem ser removidos.

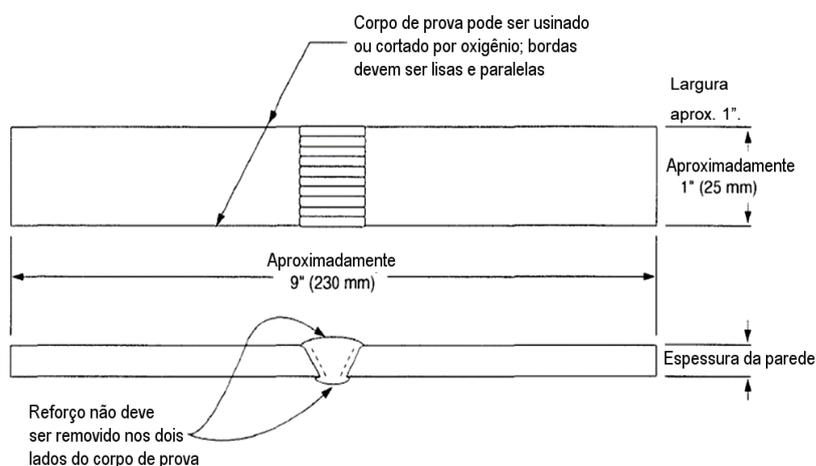


Figura 5: Corpo de prova de teste de resistência a tração
Fonte: API 1104 (1999) – Adaptado

- Ensaio de fratura (Nick-Break) (conforme item 5.6.3.3) – Trata-se de um ensaio de fratura em solda. Esta fratura ocorre quando é exercida uma força em um corpo de prova previamente entalhado. Como pode ser visto na Figura 6, o corpo de prova pode ser cortado via oxicorte e/ou usinagem. A profundidade do entalhe, na direção longitudinal a partir da face da solda, deve ser de aproximadamente 3 mm. A largura do mesmo, transversalmente à solda, deve ser de no máximo 1,6 mm. A largura da seção remanescente do corpo de prova na seção entalhada, deve ser de aproximadamente 19 mm. Este ensaio é feito fixando o corpo de prova nas garras da máquina de teste. No caso de fixar apenas uma, o teste é feito exercendo a carga na outra extremidade com um martelo. Caso contrário é aplicada força às duas extremidades de forma homogênea. As superfícies expostas de cada CP Nick-break devem mostrar penetração e fusão completas. A dimensão maior de qualquer poro não deve exceder a 1/16 pol (1,6 mm) e a área total de todos os poros não deve exceder a 2% da superfície da área exposta. Inclusão de escória não deve ser maior que 1/32 pol (0,8 mm) de profundidade e não deve ter diâmetro maior que 1/8 pol (3 mm) ou a metade da espessura da parede de comprimento, o que for menor. Deverá existir pelo menos ½ pol (12,7 mm) de separação entre inclusões de escórias adjacentes.

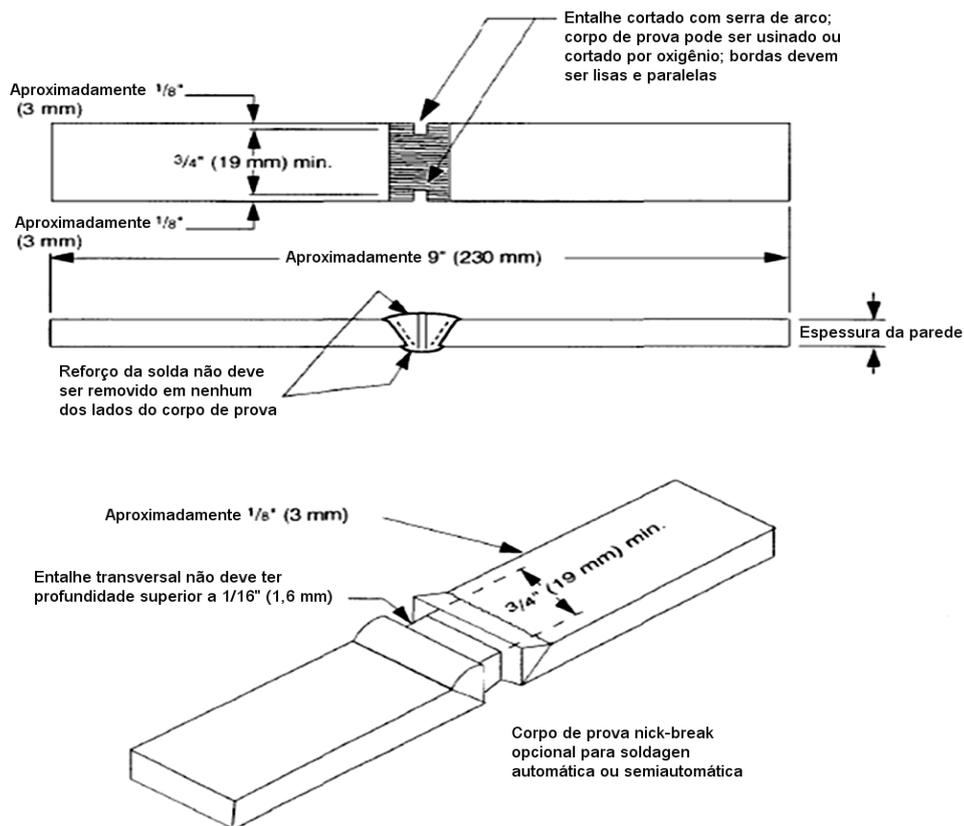


Figura 6: Corpo de prova de teste de resistência a fratura – Nick-Break
Fonte: API 1104 (1999) - Adaptado

A Figura 7, abaixo, exemplifica o aspecto de um corpo de prova após quebra pelo ensaio Nick-break.

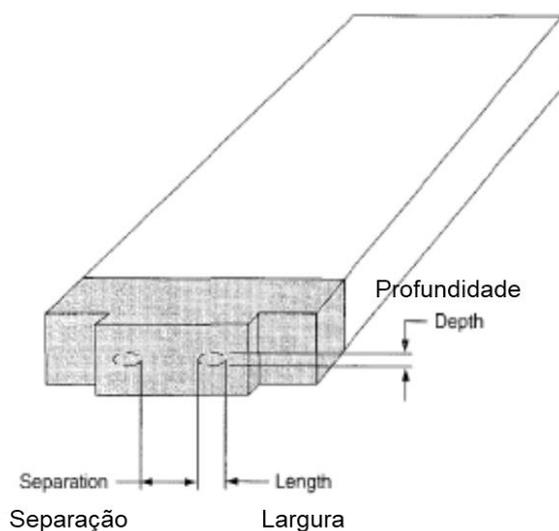


Figura 7: Ilustração típica de um corpo de prova após ensaio Nick-break
Fonte: API 1104 (1999) - Adaptado

- Ensaio de dobramento lateral (Side Bend) (conforme item 5.6.5.3) – O ensaio de dobramento lateral é feito posicionando o corpo de prova em um guia e aplicando uma força sobre ele a partir de um cutelo, dobrando-o sobre a matriz, conforme exemplificado na Figura 8. Cada CP de flexão lateral deve atender ao requisito de teste de flexão da raiz e da face especificado no item 5.6.4.3, que prevê que o ensaio pode ser considerado aceitável se nenhuma trinca ou outra imperfeição não exceder 1/8 pol (3 mm) ou metade da espessura nominal da parede, o que for menor, em qualquer direção na solda ou na zona de fusão, após dobramento. Trincas que originam do raio externo do dobramento ao longo das bordas do corpo de prova, durante o teste, e que são menores que ¼ pol (6 mm), medido em qualquer direção, não devem ser consideradas reprovadas, a menos que sejam observadas imperfeições óbvias.

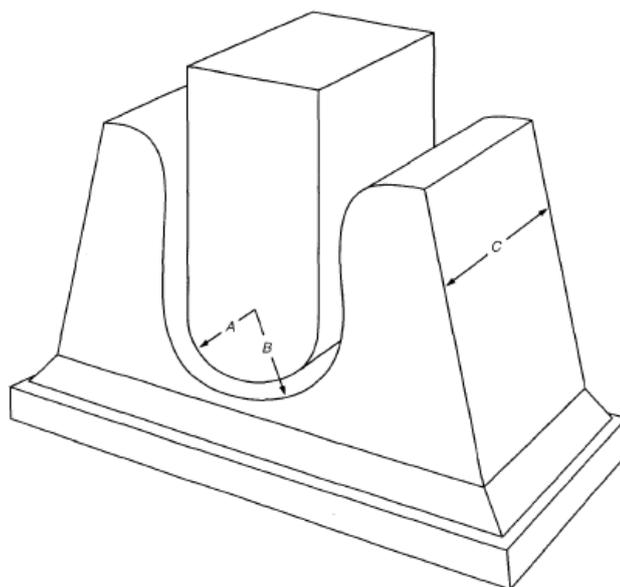


Figura 8: Raio do êmbolo (A) = 45mm; Raio de dobramento (B) = 60mm; Largura de dobramento (C) = 50mm.

Fonte: API 1104 (1999)

A Figura 9 mostra as dimensões típicas de um corpo de prova para ensaio de dobramento lateral. O corpo de prova deve ter em torno de 230mm de largura e 13mm de espessura.

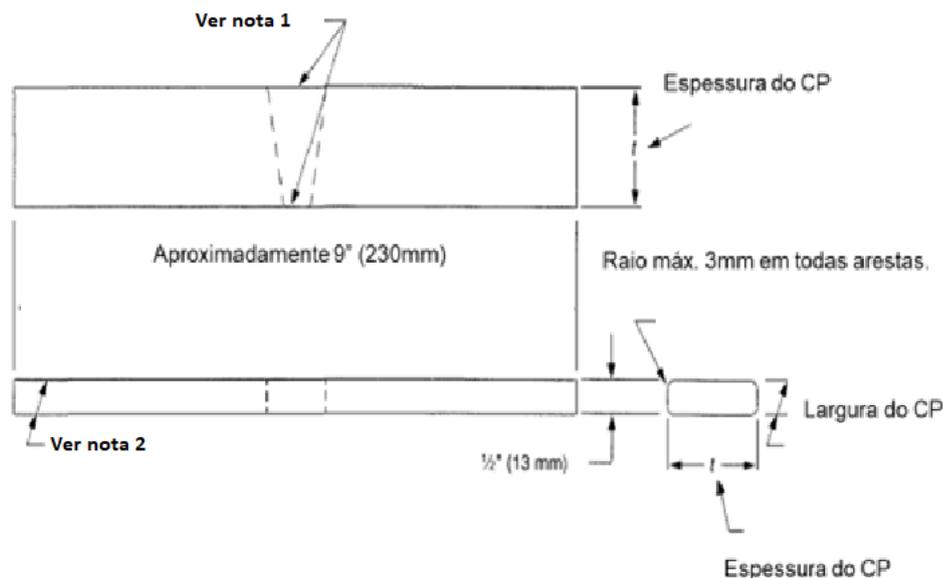


Figura 9: Corpo de prova de teste de dobramento – Side Bend (dobramento lateral)
 Fonte: API 1104 (1999) – Adaptado

- Ensaio de dobramento na face (Face Bend) (conforme item 5.6.4.3) – O ensaio de dobramento na face da solda, é similar ao ensaio de dobramento lateral, porém ao invés de realizar a carga sobre o corpo de prova lateralmente, é realizada a carga posicionando o cordão de solda no espaço vazio da matriz do cutelo. Ou seja, o cordão de solda em sua direção longitudinal estaria ao longo da medida “c”, representada na Figura 08. Os requisitos de aprovação são os mesmos mencionados para o ensaio de dobramento lateral.

Vale destacar que realizados tais ensaios, os resultados dos testes obtidos devem ser registrados e documentados através de uma RQPS (Registro da Qualificação do Procedimento de Soldagem).

3.3 Estruturação da EPS

Para atendimento às exigências da norma API 1104, uma possível EPS a ser qualificada deve atender aos requisitos essenciais descritos no Item 3.1, estando estes detalhados abaixo:

3.3.1 Processo(s) de soldagem

Para a soldagem dos aços em questão, é importante buscar, sempre que possível, processos de soldagem que impõem um aporte térmico mais baixo visando a manutenção das propriedades do material de base desde que este aporte térmico não comprometa as propriedades da junta e as condições para a soldagem.

Adicionalmente, deve-se ter critério na seleção e cuidado no manuseio dos consumíveis, em especial os que utilizam fluxo, haja visto que estes podem absorver umidade e transportar para a junta soldada o hidrogênio. Assim, é importante levar em consideração a secagem e estocagem desses consumíveis, bem como sua escolha, dando preferência aos de baixo teor de hidrogênio. Analogamente, as juntas soldadas antes de serem executadas devem ser preparadas de tal forma a remover ao máximo a umidade e impurezas presentes.

Os processos de soldagem escolhidos para este trabalho, foram o GTAW e FCAW. O processo GTAW pode ser utilizado em campo, quando os tubos são montados e soldados ou em situações em que é necessário reparo.

Além disso, o processo GTAW pode ser utilizado em qualquer posição e tem como característica a possibilidade de produzir cordões de solda de alta qualidade, sem formação de escórias e/ou respingos. Por estas características, adicionalmente ao seu elevado controle da formação do cordão, este foi selecionado para a execução da raiz da solda, do passe quente (do inglês "Hot Pass") e para os três primeiros passes de enchimento. Deve-se mencionar que o passe quente objetiva a correção de eventuais discontinuidades, como falta de fusão no passe de raiz. Os demais passes de enchimento e o acabamento da solda serão concluídos pelo processo FCAW, escolhido em função de sua taxa de deposição e alto rendimento, associado à possibilidade de soldagem em qualquer posição e dos benefícios da proteção da poça de fusão pela formação de escória através do fluxo presente no interior dos arames tubulares.

3.3.2 Especificação, classe e dimensões do material de base

De acordo com o item 5.4.2.2 da norma API 1104, a escolha do material de base, constitui uma variável essencial, sendo definidos três grupos de materiais

conforme os limites de escoamento que possuem. Abaixo, o detalhamento destes três grupos:

- Grupo A: Materiais com limite de escoamento menor ou igual a 290 MPa;
- Grupo B: Materiais com limite de escoamento maior que 290 MPa e menor que 448 MPa.
- Grupo C: Materiais com limite de escoamento maior ou igual a 448 MPa.

O aço API 5L X65, conforme mostra a Tabela 2, possui limite de escoamento entre 450 e 600 MPa. Portanto, este aço se enquadra no Grupo C. Ainda conforme a norma citada, os materiais pertencentes ao mesmo Grupo, não podem ser substituídos uns pelos outros de maneira indiscriminada com a justificativa de pertencerem ao mesmo Grupo. Devem ser analisadas de maneira mais específica as diferenças de propriedades mecânicas e metalúrgicas dos mesmos.

3.3.3 Projeto da junta e Faixa de diâmetro e espessura qualificada

Objetivando-se maior praticidade, facilidade, rapidez e baixo custo de preparação, na EPS qualificada foi escolhido o chanfro em “V” para o projeto da junta, sendo este item citado como uma variável essencial no item 5.4.2.3 da norma API 1104. Outros detalhes tais como o ângulo, abertura da raiz e do nariz da junta, não são considerados como variáveis essenciais, conforme descrito no mesmo item citado acima. Os valores destes parâmetros estão apresentados no Apêndice A e são discutidos posteriormente quanto às suas aplicabilidades.

A qualificação da EPS de referência, conforme a norma DNV-OS-F101, foi feita soldando corpos de prova de diâmetros externos que possibilitam a soldagem de produção para diâmetros ainda maiores. Ou seja, a faixa considerada durante a qualificação, visa a qualificação dos soldadores para diâmetros maiores ou iguais a 9”, tendo sido utilizado como corpos de prova tubos de 18”. Em relação à faixa de espessuras, os corpos de prova possuem 28,6mm de espessura, que estão na faixa entre 21,4 e 35,8mm. Estas informações estão resumidas na Tabela 07, abaixo:

Tabela 7- Faixa de diâmetro externo e espessura qualificada da EPS de referência.

OD qualificado	OD teste	Espessura qualificada	Espessura de teste
OD ≥ 9 in. (228,6 mm)	18 in. (457,2mm)	$0.842 \text{ in. (21,4 mm)} \leq t < 1.41 \text{ in. (35,8 mm)}$	1.126 in. (28,6mm)

Em relação às faixas de qualificação para o diâmetro externo e espessuras de parede dos tubos conforme a norma API 1104(1999), objeto deste estudo, estão relacionados na Tabela 08, abaixo:

Tabela 8- Limites de qualificação por diâmetro externo e espessura, conforme API 1104.
Fonte: API 1104(1999). Adaptado.

OD especificado(item 6.2.2d API 1104)	Espessura qualificada (item 6.2.2d API 1104)	Espessura de teste (item 6.2.2d API 1104)
<2,375 pol. (60,3 mm);	0.154 in. (3.9 mm) e 1,5xt	t < 0.154 in. (3.9 mm)
Entre 2,375 pol. (60,3 mm) e 12,750 pol. (323,9 mm);	0,75 in. (19 mm) e 1,5xt	$0.154 \text{ in. (3.9 mm)} \leq t < 0.75 \text{ in. (19 mm)}$
>12,750 pol. (323,9 mm).	Acima de 0,75 in.(19mm)	$t \geq 0.75 \text{ in. (19 mm)}$

A respeito dos comparativos que vêm sendo feitos ao longo do presente estudo, e para direcionamento da consulta e aplicabilidade das tabelas de faixas de diâmetro/ espessura e outras presentes neste trabalho, fica definido que caso fosse elaborada uma EPS qualificada conforme norma API 1104, seria para tubulações de produção com diâmetro externo acima de 323,9mm, e espessura de parede entre 19 e 35mm, conforme destacado na Tabela 08. Desta forma, fica facilitada a demonstração e os comparativos.

3.3.4 Posição e Direção de Soldagem

Na EPS qualificada, a princípio, houve a intenção de simular a soldagem de reparo e em campo. Ou seja, foram escolhidas posições de soldagem que mais se aproximariam da realidade da soldagem em campo. Optou-se então pela qualificação

na posição 5G ascendente (PG) com a tubulação na horizontal e estática conforme pode ser visto na Figura 10.

Esta posição, adicionalmente ao alto grau de dificuldade de execução, onde o soldador terá que passar pelas posições sobre cabeça, vertical e plana, tende, em relação a outras posições, exigir maior energia de soldagem.

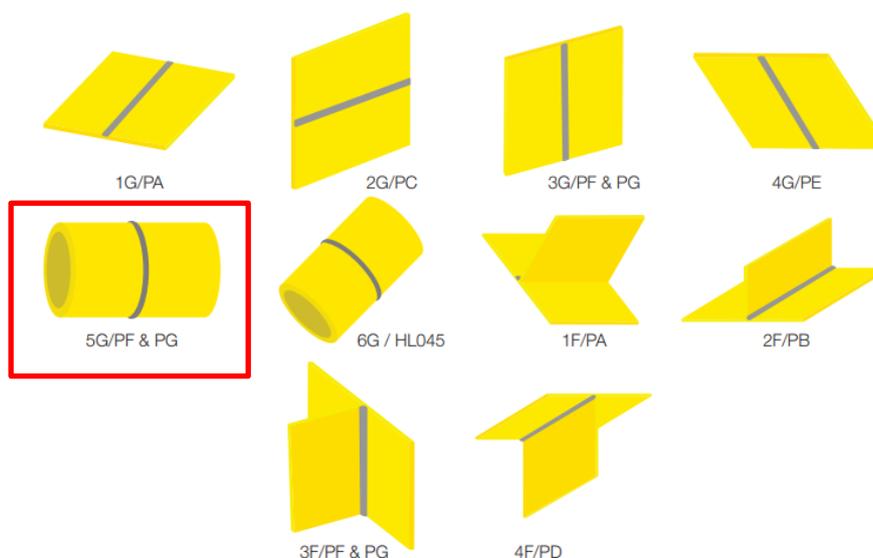


Figura 10: Posições de Soldagem
Fonte: Guia de Soldagem ESAB – pág. 06

3.3.5 Metal de adição

Os metais de adição para soldagem a serem utilizados devem ter sua composição química similar ao metal de base. A composição química do metal de base pode ser consultada na Tabela 1. Logo, com base nas características do aço em questão, fez-se pesquisas de mercado junto a especialistas, fabricantes e fornecedores de consumíveis, sendo sugerido pelos mesmos o uso dos seguintes materiais de adição para elaboração de uma EPS.

- Processo GTAW – Opção pela vareta cobreada tipo ER80S-D2. Este eletrodo se enquadra na classificação A5.28 da AWS. Ver Figura 11, que mostra as aplicações desta vareta, além de suas dimensões e das propriedades mecânicas típicas do metal depositado.

VARETA OK®	COMPOSIÇÃO DA VARETA (%)	APLICAÇÕES	PROPRIEDADES MECÂNICAS TÍPICAS	TIPO DE CORRENTE	DIÂM. (mm)	COMPR. (mm)	GÁS DE PROTEÇÃO
OK® Tigrod 13.08 SFA/AWS A5.28 ER80S-D2 EN ISO 636-B W4M3	C 0,09 Si 0,65 Mn 1,90 P 0,025 S 0,025 Ni <0,15 Mo 0,50 Cu 0,15 Outros 0,50	Vareta cobreada para soldagem, pelo processo GTAW (TIG), de aços baixa liga ligados ao manganês e ao molibdênio (1,5%Mn, 0,4%Mo), aços resistentes a fluência de composição química similar, como em tubos, vasos de pressão e caldeiras com temperatura de operação de até 500°C. Além disso, também podem ser aplicados para soldagem de aços baixa liga e alta resistência com bons resultados de tenacidade.	Como soldado: L.R. 615 MPa L.E. 520 MPa A 28% ChV (-29 °C) 200J	CC+	2,4	1000	100% Ar (EN 439 I1)

Figura 11: Características da Vareta modelo ER80S-D2
Fonte: Catálogo de Consumíveis ESAB (2018) – pág. 22

A Figura 12 relaciona as nomenclaturas dos eletrodos e fluxos conforme a norma AWS e seus respectivos grupos, para facilitar a identificação das varetas e fluxos.

Group	AWS Specification	Electrode	Flux ^c
1	A5.1	E6010, E6011	
	A5.5	E7010, E7011	
2	A5.5	E8010, E8011 E9010	
	A5.1 or A5.5 A5.5	E7015, E7016, E7018 E8015, E8016, E8018 E9018	
4 ^a	A5.17	EL8	P6XZ
		EL8K	F6X0
		EL12	F6X2
		EM5K	F7XZ
		EM12K	F7X0
		EM13K EM15K	F7X2
5 ^b	A5.18	ER70S-2	
	A5.18	ER70S-6	
	A5.28	ER80S-D2	
	A5.28	ER90S-G	
6	A5.2	RG60, RG65	
7	A5.20	E61T-GS ^d	
		E71T-GS ^d	
8	A5.29	E71T8-K6	
9	A5.29	E91T8-G	

Figura 12: Metais de adição - Grupos
Fonte: API 1104 (1999)

- Processo FCAW – Opção pelo arame tubular tipo E81T1-Ni1M J. Este consumível se enquadra classificação A5.29 da AWS. A Figura 13 mostra as aplicações desse arame, seu diâmetro, características tecnológicas e as propriedades mecânicas típicas do metal depositado.

ARAME TUBULAR OK®	METAL DEPOSITADO (%)	APLICAÇÕES	PROPRIEDADES MECÂNICAS	POSIÇÕES SOLDAGEM	DIÂM. (mm)	CORRENTE/ TENSÃO	RENDIM. (%)	DEPOS. (kg/h)	GÁS DE PROTEÇÃO TIPO DE CORRENTE
PZ 6138SR ASME SFA 5.29 E81T1-Ni1M J E551T1-Ni1MJ	C 0,05	Arame tubular tipo "flux cored" para soldagem com mistura Ar + 15-25%CO ₂ , desenvolvido para soldagem de chapas de grande espessura onde é requerido alívio de tensões após soldagem. A adição de 0,9%Ni, combinada a presença de microconstituintes de Ti e B proporciona excelente tenacidade ao impacto a -60 °C após tratamento de alívio de tensões e valores satisfatórios no ensaio de CTOD. O metal depositado apresenta teores de Hidrogênio difusível inferiores a 5ml/100g MD (H5). Apresenta arco suave, baixo índice de respingos e escória facilmente destacável. Homologações: ABS 4YSA H5 DNV V Y42MS(H5) LR 5Y42S H5, 5Y42srS H5 FBTS	"Como soldado" L.R. 570-650 MPa L.E. ≥ 470 MPa A ≥ 22% ChV (-60 °C) 47J		1,20	150A, 28V 250A, 30V 330A, 34V	87 88 90	1,90 3,85 5,75	Ar + 20% CO ₂ CC+
	Si 0,37								
	Mn 1,24								
	Ni 0,84								
			"Como tratado" ToTo 600 °C c/ 2h L.R. 520-620 MPa L.E. ≥ 420 MPa A ≥ 22% ChV (-60 °C) 47J						

Figura 13: Características do Arame Tubular modelo E81T1-Ni1M J
Fonte: Catálogo de Consumíveis ESAB (2018) – pág. 43

Nota-se que os consumíveis recomendados são os mesmos ou similares aos adotados na EPS de referência.

3.3.6 Características elétricas, Gás de proteção e Velocidade de soldagem

As características elétricas tais como polaridade, corrente e tensão, bem como o tipo e vazão do gás de proteção (ou mistura de gases) e a velocidade de soldagem podem ser determinadas conforme orientação de fabricantes de metais de adição e outros especialistas sendo tais informações descritas no Item 4 deste documento.

3.3.7 Tempo entre passes

Conforme item 5.4.2.8 (API 1104), o tempo entre o término da execução do cordão de raiz e o início da execução do segundo cordão constitui variável essencial do processo.

O tempo entre passes controla a temperatura entre passes que, por sua vez, influencia no tempo e velocidade de resfriamento.

Segundo MAXWELL (2013), entre os vários parâmetros que podem produzir mudanças na microestrutura da solda, o tempo e a velocidade de resfriamento talvez sejam os mais importantes. O aumento no tempo de resfriamento e a diminuição da velocidade de resfriamento ocasionam o aumento do tamanho de grão da região de grãos grosseiros.

Conforme OGATA (2008), com o aumento das taxas de resfriamento a microestrutura e os microconstituintes do aço API X 65 tornam-se cada vez mais refinados, levando a maiores valores de dureza sem comprometer a tenacidade.

A Figura 14 evidencia o aumento dos valores de dureza com o aumento das taxas de resfriamento, sendo o maior valor considerado de 40°C/s.

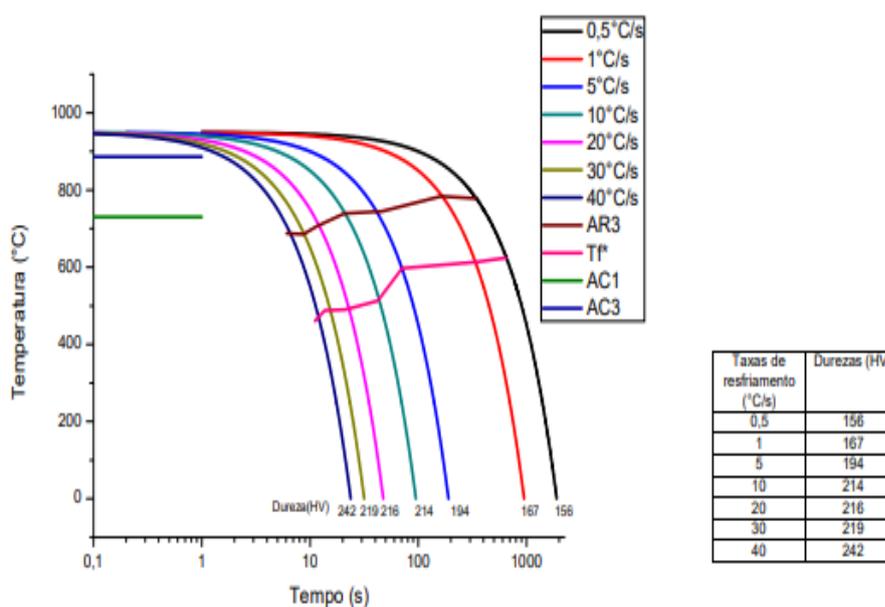


Figura 14- Influência das taxas de resfriamento na dureza de um aço API X65, a partir da temperatura de austenitização. Fonte: Ogata P.H. (2008)

Ainda segundo OGATA (2008), o aumento das taxas de resfriamento causa a diminuição do tamanho de grão, a diminuição da fração volumétrica de ferrita e o aumento da fração volumétrica de agregados eutetóides, como pode ser observado na Tabela 9, provocando o aumento da resistência no metal base.

Tabela 9- Relação taxa de resfriamento x percentual ferrita metal base onde TG= Tamanho de grão e FV= Fração volumétrica de ferrita

Fonte: OGATA P.H. (2008)

Taxa de resfriamento (°C/s)	Ferrita		Agregados eutetóides	
	TG (µm)	FV (%)	TG (µm)	FV (%)
0,5	14	70	10	30
1	14	68	12	32
5	13	61	10	39
10	10	58	9	42
20	7	43	10	57
30	6	32	8	68
40	8	31	12	69

Isto posto, poderia ser estipulado um tempo de 60 minutos entre o passe de raiz e o passe quente, para que ocorra o resfriamento a uma taxa elevada. Caso este tempo seja reduzido, o metal de solda permanece mais tempo em temperaturas que possibilitam o fornecimento de energia suficiente para o crescimento de grão, tornando a estrutura mais frágil e sujeita a trincas.

3.3.8 Métodos de Pré e Pós aquecimento

Segundo FORTES (2004), as temperaturas de pré-aquecimento podem ser determinadas de acordo com as faixas de carbono equivalente. Para a presente EPS, considerando o valor de carbono equivalente de $CE_{IIW} = 0,43\%$ destacado anteriormente na Tabela 1, foi adotada a temperatura de 150°C, ou seja, o valor médio da faixa de temperaturas (100-200°C) aplicável mostrada na Tabela 10.

Tabela 10 - Relação de C. Equivalente x Temperatura de Pré-aquecimento
Fonte: FORTES (2004)

Carbono equivalente C_{eq} (%)	Temperatura de pré-aquecimento recomendada
< 0,30	opcional
0,31 - 0,45	100 °C – 200 °C
0,45 - 0,60	200 °C – 250 °C
> 0,60	250 °C – 300 °C
Aços ferramenta, aços mola, aços de composição desconhecida	~ 300 °C

Para a qualificação conforme norma API 1104(1999) não seriam considerados tratamentos térmicos posteriores à soldagem.

4 VARIÁVEIS ESSENCIAIS- EPS REFERÊNCIA

A partir da EPS anexa, qualificada conforme a norma DNV-OS-F101 (2013), que é uma Referência Bibliográfica para o presente estudo, serão determinados os valores que poderiam ser utilizados como base para a soldagem dos corpos de prova, desta vez conforme norma API1104(1999). Estes parâmetros devem ser registrados e deve ser elaborado o Registro de Qualificação e Procedimento de Soldagem. Como está previsto na referida norma, os corpos de prova deverão ser submetidos aos devidos ensaios. E tendo os resultados apresentados os valores em conformidade com a norma, tornam-se adequados e consolidados na nova EPS conforme norma API (1999).

Portanto, os parâmetros essenciais previstos na norma API 1104, e que foram sugeridos a partir do estudo da norma e demais Referências Bibliográficas, serão citados adiante, e seus valores são adotados como àqueles previstos na EPS de referência, haja visto que esta foi qualificada para a mesma finalidade, a soldagem do aço API 5L X65.

Durante a apresentação das variáveis e seus valores, serão discutidas as possíveis razões, respaldos técnicos e/ou de custos, ou outros fatores pertinentes, para escolha dos mesmos, tendo em vista as referências que foram estudadas.

- Processo(s) de soldagem

Os processos de soldagem utilizados na EPS de referência são o GTAW e FCAW. A escolha destes processos, provavelmente foi feita devido às características, vantagens e desvantagens apresentadas no item 3.3.1 do presente documento, que envolvem de maneira resumida, a qualidade da solda, o nível de controle do processo e o grau de responsabilidade das peças em trabalho, além da produtividade.

- Especificação, classe e dimensões do material de base, faixa de diâmetro e espessura qualificada

A Tabela 11 mostra que ficou bem definida as especificações do metal base, citando as faixas de diâmetro e espessuras qualificadas.

Tabela 11 – Especificações e faixas qualificadas
 Fonte: EPS do Apêndice. Adaptado.

-	<u>EPS Apêndice</u> <u>Norma Ref.: DNV-OS-F101</u>
Especificação do material de base	API 5L X65Q PSL 2
Faixa de diâmetro e espessura qualificada	$\varnothing > 228,6\text{mm}$ (9in) / Espessura 21,4 - 35,8mm

- Projeto da junta

Os dados de projeto da junta, da EPS anexa, foram detalhados conforme desenho abaixo:

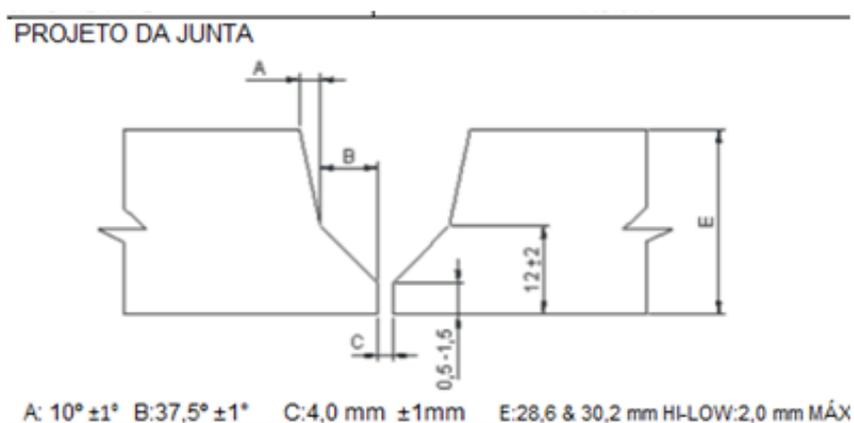


Figura 15: Projeto da Junta soldada
 Fonte: EPS do Apêndice. Adaptado.

Este tipo de chanfro provavelmente foi escolhido devido à necessidade de uma taxa de deposição relativamente alta e grande demanda em termos de produção. Além disso, tendo em vista a espessura qualificada, há necessidade de maior volume para preenchimento da junta. Para uma possível qualificação conforme a norma API 1104, poderia ser utilizado o mesmo projeto, considerando tubulações de diâmetros e espessuras de parede semelhantes.

Na soldagem de tubulações em geral, e mais especificamente nos processos de soldagem escolhidos, não há acesso pelos dois lados da junta, não sendo possível a utilização de chanfros em X, K, duplo U ou duplo J, por exemplo.

- Posição e Direção da solda

A Especificação da posição e direção de soldagem está devidamente descrita, conforme Tabela 12, proveniente da EPS anexa.

Tabela 12 – Posição e direção de soldagem
Fonte: EPS do Apêndice. Adaptado

Posição de soldagem	5G
Progressão	Ascendente

Esta posição provavelmente foi escolhida para a qualificação visando uma maior produtividade e facilidade ao soldar. Também foi citado o sentido de soldagem, que também interfere bastante na qualidade de solda, devido a habilidade do soldador em relação a este sentido.

- Tipos e número do metal de adição, conforme classificação AWS (Tabela 13).

Tabela 13 – Tipo de metal de adição e diâmetros
Fonte: EPS do Apêndice. Adaptado

Metal de Adição-GTAW	ER80S-D2
Metal de Adição-FCAW	E81T1-Ni1M-J
Diâmetro (mm):	GTAW= 2,4; FCAW= 1,2

Os metais de adição foram citados no Item 2 - Revisão Bibliográfica e são indicados para a soldagem nos processos determinados para o metal de base em questão, ou seja, API X 65, bem como para o diâmetro e faixa de espessuras dos tubos.

O metal de adição ER80S-D2 é indicado para a soldagem de aços ARBL (Alta Resistência e Baixa Liga) com boas propriedades em termos da tenacidade da junta soldada. O mesmo ocorre para o metal de adição para o processo FCAW, E81T1-Ni1M-J, que também possui boas características, tais como a facilidade de limpeza

da escória. O fluxo deste arame tubular é rutilico, tendo caráter ativo, incorporando então elementos de liga ao cordão, por exemplo o níquel (Ni), titânio (Ti) e Boro(B).

A abertura de raiz($c=4,0\text{mm}$) está compatível com o diâmetro do eletrodo ($d = 3,2\text{ mm}$) de tungstênio. É recomendado para este diâmetro, correntes 150 e 250 A para corrente CC⁻.

- Características elétricas

Os valores de corrente elétrica e tensão de soldagem definidos na EPS Qualificada estão na Tabela 14.

Tabela 14 – Relação Corrente / Tensão
Fonte: EPS do Apêndice. Adaptado.

PASSES	RAIZ	ENCHIMENTO	ACABAMENTO
Corrente GTAW (A):	90-130	140-190 (passe quente) 150-210 (demais passes)	-
Corrente FCAW (A):	-	140-230	140-230
Tensão (V):	GTAW= 8-15; FCAW=25-30		

Verifica-se que a corrente determinada para o passe de raiz é menor em relação à corrente dos demais passes.

Com relação à polaridade empregada, foi adotada a corrente contínua eletrodo positivo para os passes de enchimento e de acabamento (Tabela 15).

Tabela 15 – Corrente e polaridade
Fonte: EPS do Apêndice. Adaptado.

PASSES	RAIZ	ENCHIMENTO	ACABAMENTO
Tipo de corrente e polaridade:	CC ⁻	CC ⁺	CC ⁺

No passe de raiz e nos demais, em que foi utilizado o processo GTAW, foi empregada a polaridade negativa, para a qual ocorre penetração estreita e profunda, que também é favorável para preencher a abertura de raiz. Em alguns casos, por

exemplo na soldagem de alumínio, esta polaridade é variável para promover o efeito de limpeza do óxido formado durante a soldagem deste metal base.

Para os processos de soldagem empregados, a polaridade positiva (ou inversa), faz com que ocorre uma penetração relativamente reduzida e maior produtividade, fatores que provavelmente levaram a se considerar o contrário. Os valores de corrente e tensão estão em conformidade com as recomendadas pelo fabricante dos insumos de soldagem conforme apresentado no Item 2 - Revisão Bibliográfica.

Embora não seja uma variável essencial, como é influenciada pelos valores de corrente e tensão, o aporte térmico passa a ser um importante parâmetro a ser calculado, e está associado à quantidade de energia por intervalo de tempo na qual a solda é submetida. Segue abaixo a fórmula utilizada na EPS de referência:

$$ACM = (Amédia \times Vmédia \times 60) / (Vdmédia \times 1000) \quad (VIII)$$

Onde:

ACM= aporte de calor médio

Amédia= (amperagem mínima instantânea+amperagem máxima instantânea) /2

Vmédia= (tensão mínima instantânea+tensão máxima instantânea) /2

Vdmédia= (comprimento total do passe) / (tempo de arco aberto em segundos)

Desta forma a unidade de ACM é dada em KJ/mm, que é a quantidade de energia por unidade de comprimento da solda.

- Tempo entre passes (Tabela 16)

Tabela 16 – Tempo entre passes
Fonte: EPS do Apêndice. Adaptado.

Tempo entre passes:	60 minutos entre o passe raiz e quente
---------------------	--

A escolha do tempo relativamente longo entre o passe de raiz e o passe quente ocorreu provavelmente para que ocorra um resfriamento com taxa mais

suficientemente elevada, que produz microestrutura mais refinada. Caso o tempo entre o passe de raiz e o passe quente fosse reduzido, a taxa de resfriamento diminuiria devido a ação do calor da soldagem de um passe sobre o outro.

- Velocidade de soldagem (Tabela 17)

Tabela 17 – Velocidade de soldagem por processo
Fonte: EPS do Apêndice. Adaptado.

-	RAIZ	ENCHIMENTO	ACABAMENTO
Velocidade GTAW: (cm/min):	50-100	100-150	-
Velocidade FCAW: (cm/min):	-	140-230	140-230

A velocidade de soldagem durante o passe de raiz provavelmente foi menor justamente por não ter material depositado previamente. Ou seja, faz-se necessário um preenchimento mais lento, no qual seja depositada maior quantidade de metal líquido na poça, para preenchimento da abertura de raiz.

- Métodos de Pré e Pós-aquecimento (Tabela 18)

Tabela 18 – Pré e pós aquecimento
Fonte: EPS do Apêndice. Adaptado.

Temperaturas:	Pré-aquec.	Interpasse	Pós-aquec.	Método
Parâmetros:	150 °C	250 °C	N/A	Resistência

Conforme referências bibliográficas, para a soldagem de aços ARBL API X65, nas espessuras em questão, é necessário o pré-aquecimento a temperaturas acima de 93°C e, neste caso, não é necessário realizar o pós-aquecimento, como de fato foi adotado na EPS de referência. E conforme a referência da Tabela 07, a temperatura de 150°C é adequada.

- A composição do gás de proteção e vazão, quando aplicáveis.

Na Tabela 19 estão apresentados os gases de proteção previstos.

Tabela 19 – Gás de proteção
Fonte: EPS do Apêndice. Adaptado.

Gás de proteção e vazão:	GTAW= 99,996%Ar; FCAW= Ar (80%) +CO ₂ (20%); Vazão= 12 a 18l/min.
--------------------------	---

No processo de soldagem FCAW, a mistura de CO₂ ao argônio é mais utilizada em relação ao CO₂ puro, para que seja obtido um maior limite de escoamento e resistência a tração, para obter maior estabilidade durante a soldagem, menor penetração e menor quantidade de respingos, tendo em vista que o CO₂ é um gás reativo. Com relação ao processo GTAW, foi utilizado argônio praticamente puro. Outro gás de proteção que poderia ser utilizado seria o Hélio, mas tem a característica de produzir cordões com maior penetração, maior instabilidade de arco, menor efeito de limpeza e maior custo. A vazão de gás empregada está próxima às vazões usuais para os processos utilizados.

Apesar de não ser objetivo do trabalho estabelecer comparações entre as normas DNV-OS-F101(2013) e API 1104(1999), em linhas gerais é possível verificar que a transferência de informações da primeira para a segunda é aplicável, desde que seja feita uma análise criteriosa. Já a transferência de informações e parâmetros de uma determinada EPS qualificada pela norma API 1104(1999) para a DNV-OS-F101(2013), pode não ser aplicável, dado o maior rigor dos requisitos da norma DNV-OS-F101(2013).

5 CONCLUSÃO

O objetivo da Especificação do Procedimento de Soldagem (EPS) é determinar parâmetros essenciais de forma que a junta soldada seja capaz de atender aos requisitos e propriedades para sua aplicação efetiva. Este trabalho definiu conforme norma API 1104, referências bibliográficas e uma EPS de referência, a partir das características do material a ser soldado, sua aplicação e sua espessura, os parâmetros e processos que poderiam ser utilizados na elaboração de uma nova EPS, a ser qualificada conforme norma API 1104. Foi verificado que as variáveis essenciais e seus valores considerados, estão de acordo com os valores teóricos, de boas práticas e com os definidos pela EPS de referência, ou indicados pelos fornecedores de consumíveis.

Conclui-se que a qualificação de uma EPS conforme a norma API 1104, para soldagem em campo de tubulações do material API 5L X65, nas espessuras e condições determinadas, poderá ter bons resultados se aplicados os processos, valores e parâmetros determinados.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- AMERICAN PETROLEUM INSTITUTE. API 5L. Specification for line Pipe, 46a ed.,2018.
- AMERICAN PETROLEUM INSTITUTE. API 1104: Welding of Pipelines and Related Facilities, 9a ed., API. Washington, 1999, 70 p.
- AMERICAN SOCIETY OF METALS, High-Strength Structural and High-Strength Low-Alloy Steels: HSLA Steels. Properties and Selection: Iron Steels and HighPerformance ALLOYS. METALS HANDBOOK, Vol 6. 10ªEd., 1997
- AMERICAN WELDING SOCIETY. AWS Welding Handbook – Volume 1 –Welding Science and Technology, 9ª edição, EVA. 2001.
- BOTT, J.S.; KOJIMA, S.S.; SAMPAIO, M.A. The development of API 5L X80 steel for linepipes productions by the TMCR process. T&B Petroleum. Rio de Janeiro, 2003.
- BRANDI, S. D. – “Metalurgia da soldagem: soldabilidade de alguns materiais”. In: Zieldas, S; Tatini, I; org. Soldagem. São Paulo: SENAI, 1997.
- CALLISTER, W. Ciência e Engenharia do Materiais uma introdução, Rio de Janeiro. Ed. LTC, 2002.
- CENTRO DE CONHECIMENTO ESAB – <http://www.esab.com.br>: Processos de Soldagem com Arames Tubulares (2018).
- CENTRO DE CONHECIMENTO ESAB – <http://www.esab.com.br>: Processos de Soldagem GTAW (2018).
- CHIAVERINI, VICENTE - Tecnologia Mecânica - Processos de Fabricação e Tratamento, Vol. II, Ed. Makron Books, 2a. Edição, 1977
- DET NORSKE VERITAS (DNV). Submarine Pipeline Systems, 2007.
- ESAB (2005) - Apostila de Metalurgia de Soldagem, 48 p.
- ESAB (2018) - Catálogo de Consumíveis, 43 p.
- FORTES, Cléber (2004). Apostila da ESAB sobre Arames Tubulares do tipo Ok.
- FORTES, Cléber (2004). Apostila da ESAB sobre Metalurgia da Soldagem.
- MAINARDI (2013). Estudo do efeito do pré-aquecimento na soldagem do aço API5L X65 sobre a dureza e energia de impacto da junta soldada.
- MALCON J. G. A Guide for Understanding & Specifying Chemical Composition of High Strength Linepipe Steels. Companhia Brasileira de Metalurgia e Mineração, 2007. 37 p. (Relatório Técnico)

MODENESI, P. J. (2008). Introdução aos Processos de Soldagem. Apostila suplementar do Curso de Pós-Graduação em Engenharia e Tecnologia da Soldagem.

MODENESI, P. J. (2012). Soldabilidade dos Aços Transformáveis. Apostila suplementar do Curso de Pós-Graduação em Engenharia e Tecnologia da Soldagem.

MODENESI, P. J. (2012). Introdução à Metalurgia da soldagem. Apostila suplementar do Curso de Pós-Graduação em Engenharia e Tecnologia da Soldagem.

MARQUES, P.V; MODENESI, P. J.; BRACARENSE, A. Q. (2011). Soldagem Fundamentos e Tecnologia. Editora UFMG, 3ª edição atualizada.

MODENESI, P. J. (2012). Soldabilidade dos aços transformáveis. Apostila suplementar do Curso de Pós-Graduação em Engenharia e Tecnologia da Soldagem.

OGATA, P.H. (2008). Caracterização Microestrutural de Aço API 5L X65, austenitizado e resfriado a diferentes taxas de resfriamento, p. 08-09.

RATNAPULI, R. C. (2007). Considerações Metalúrgicas de Fabricação dos Aços para Tubos API 5L. 62º Congresso Anual da ABM, 2007, Vitória – ES. Associação Brasileira de Metalurgia e Materiais.

ROCHA, BELLENTANI, David - Estudo da soldabilidade do tubo API 5L X80 utilizando os processos de soldagem: mag com transferência controlada e eletrodo tubular

SANTOS (2003). Caracterização de Soldas em Aços API 5L Com Diferentes Arames Tubulares e Temperaturas de Pré-Aquecimento, 110 p, Dissertação (Mestrado) - Faculdade de Engenharia Mecânica, Universidade Estadual de Campinas, Campinas.

SEROPE, KALPAKJIAN, STEVEN (2009). Manufacturing, Engineering and Technology SI, 6º Ed, 1180p.

WAINER, E; BRANDI, S.D; MELO, F.D. (1995). Soldagem: Processos e Metalurgia. São Paulo: Edgar Blücher, 1995. 494 p.

WANG, Wesley (2015). The Great Minds of Carbon Equivalent, 3p.

APÊNDICE A – ESPECIFICAÇÃO DE PROCEDIMENTO DE SOLDAGEM

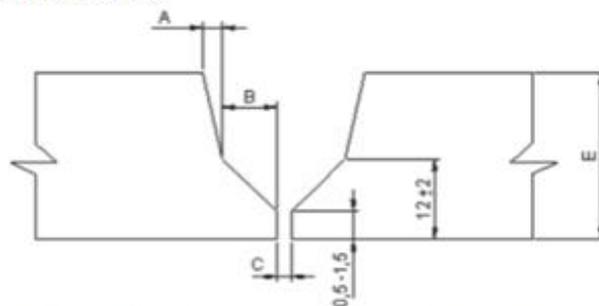
Como uma das referências para o presente trabalho, foi utilizada uma EPS cedida pelo Sr. Ricardo Cardoso dos Santos, que é o Engenheiro responsável pela elaboração da mesma. Por motivos de preservação da propriedade intelectual das informações contidas no documento original, como registros de qualificação, ensaios e seus resultados, foi feita uma compilação dos dados estritamente necessários para este estudo, embora o responsável tenha autorizado a utilização e consulta da EPS completa.

Fonte: EPS cedida pelo Eng. de Soldagem Ricardo Cardoso dos Santos(Adaptado).

Especificação de Procedimento de Soldagem- Parâmetros

Código de Referência:	DNV-OS-F101			
Material e processo:	API 5L X65Q PSL 2	GTAW + FCAW		
Diâmetro ext. e espessura.:	18in	28,6 a 30,2 mm		
Tipo de junta e chanfro:	Junta de topo, chanfro em "V"(ver desenho abaixo)			
Posição do tubo e rotação:	Eixo na horizontal - fixo			
Passes/Camadas:	Raiz	Enchimento	Acabamento	
Metal de Adição-GTAW	ER80S-D2	ER80S-D2	ER80S-D2	
Metal de Adição-FCAW	E81T1-Ni1M-J	E81T1-Ni1M-J	E81T1-Ni1M-J	
Camadas-GTAW	1	4 (incluso passe quente)	0	
Camadas- FCAW	0	4	1	
Tipo de corrente e polaridade:	GTAW: CC-		FCAW: CC+	
Diâmetro eletrodo/arame (mm):	GTAW= 2,4; FCAW= 1,2			
Corrente GTAW (A):	90-130	140-190 (passe quente) 150-210 (demais passes)	-	
Corrente FCAW (A):	-	140-230	140-230	
Tensão (V):	GTAW= 8-15; FCAW=25-30			
Velocidade GTAW: (mm/min):	50-100	100-150	-	
Velocidade FCAW: (mm/min):	-	150-300	150-300	
Gás de prot. e vazão:	GTAW= 100% Ar; FCAW= Ar (80%)+CO2 (20%); 16 a 18l/min.			
Posição de soldagem:	5G			
Direção de soldagem:	Ascendente			
Número de soldadores:	1			
Tempo entre passes:	60 minutos			
Método de limpeza:	GTAW-Escovamento(Silicato); FCAW-Esmerilhamento(Escória)			
Temperaturas:	Pré-aquec.	Interpasse	Pós-aquec.	Método
Parâmetros:	150 °C	250 °C	N/A	Resistência ou Chama
Tratamento térmico:	Aquecimento	Patamar	Resfriamento	Termopares
Parâmetros:	N/A	N/A	N/A	N/A

PROJETO DA JUNTA



A: $10^{\circ} \pm 1^{\circ}$ B: $37,5^{\circ} \pm 1^{\circ}$ C: 4,0 mm ± 1 mm E: 28,6 & 30,2 mm HI-LOW: 2,0 mm MÁX