

UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS
Curso de Especialização em Soldagem

Danilo Alberto Lima Gomes
Ítalo José Leite Campanella

**Qualificação de Procedimento de Soldagem de Tubo API 5L X70 revestido
internamente com Inconel 625**

LRSS – Laboratório de Robótica, Simulação e Soldagem

Belo Horizonte
2016

Danilo Alberto Lima Gomes
Ítalo José Leite Campanella

**Qualificação de Procedimento de Soldagem de Tubo API 5L X70 revestido
internamente com Inconel 625**

LRSS – Laboratório de Robótica, Simulação e Soldagem

Monografia apresentada ao curso de pós-graduação da Universidade Federal de Minas Gerais, como requisito parcial para obtenção do título de Especialista em Engenharia de Soldagem.

Orientador: Paulo José Modenesi

Belo Horizonte

2016

G633q

Gomes, Danilo Alberto Lima.

Qualificação de procedimento de soldagem de tubo API 5L X70 revestido internamente com Inconel 625 [manuscrito] / Danilo Alberto Lima Gomes, Ítalo José Leite Campanella.- 2016.

63 f., enc.: il.

Orientador: Paulo José Modenesi.

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.

Bibliografia: f. 62-63.

1. Soldagem. 2. Ligas de níquel. I. Campanella, Ítalo José Leite. II. Modenesi, Paulo José. III. Universidade Federal de Minas Gerais. Escola de Engenharia. IV. Título.

CDU: 621.791



Universidade Federal de Minas Gerais
ESCOLA DE ENGENHARIA
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica
Curso de Especialização em Soldagem

Ata 9ª/2016 da Defesa de Monografia de Especialização

No dia 08 de julho de 2016, às 16:00h, a Comissão Examinadora se reuniu para avaliar o trabalho:

Título: "Qualificação de Procedimento de Soldagem de Tubo API 5L X70 revestido internamente com Inconel 625"

Aluno: Danilo Alberto Lima Gomes – Matrícula: 2014725564


Local: Laboratório de Robótica, Soldagem e Simulação – LRSS, Depto. Eng^a Mecânica – Prédio da EEUFMG Av. Antônio Carlos, 6627 – Campus da UFMG, Pampulha – Belo Horizonte.

Parecer:


A Comissão Examinadora, após a apresentação pelo(a) candidato(a) durante 25 minutos e após ter argüido o(a) candidato(a) por 25 minutos, é de parecer FAVORÁVEL à aprovação do trabalho de monografia com a nota final de NOVENTA e QUATRO (com ou sem) sugestões de modificação.

Sugere-se o prazo de 30 dias para efetuar-se as modificações sugeridas com revisão final acompanhada e homologada pelo orientador Prof. Paulo José Modenesi.

Assinaturas:



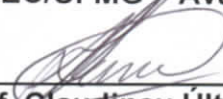
Prof. Dr. Paulo José Modenesi
DEMET/UFMG – Orientador



Prof. Dr. Ariel Rodriguez Arias
DEMEC/UFMG – Avaliador



Aluno: Danilo Alberto Lima Gomes



Prof. Claudiney Último Dumont
Avaliador



Universidade Federal de Minas Gerais
ESCOLA DE ENGENHARIA
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica
Curso de Especialização em Soldagem

Ata 8ª/2016 da Defesa de Monografia de Especialização

No dia 08 de julho de 2016, às 16:00h, a Comissão Examinadora se reuniu para avaliar o trabalho:

Título: "Qualificação de Procedimento de Soldagem de Tubo API 5L X70 revestido internamente com Inconel 625"

Aluno: Ítalo José Leite Campanella – Matrícula: 2014725769

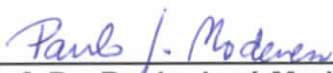
Local: Laboratório de Robótica, Soldagem e Simulação – LRSS, Depto. Eng^a Mecânica – Prédio da EEUFMG Av. Antônio Carlos, 6627 – Campus da UFMG, Pampulha – Belo Horizonte.

Parecer:

A Comissão Examinadora, após a apresentação pelo(a) candidato(a) durante 25 minutos e após ter argüido o(a) candidato(a) por 25 minutos, é de parecer FAVORÁVEL à aprovação do trabalho de monografia com a nota final de NOVENTA e CINCO (com ou sem) sugestões de modificação.

Sugere-se o prazo de 30 dias para efetuar-se as modificações sugeridas com revisão final acompanhada e homologada pelo orientador Prof. Paulo José Modenesi.

Assinaturas:



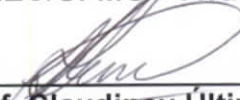
Prof. Dr. Paulo José Modenesi
DEMET/UFMG – Orientador



Prof. Dr. Ariel Rodriguez Arias
DEMEC/UFMG – Avaliador



Aluno: Ítalo José Leite Campanella



Prof. Claudiney Último Dumont
Avaliador

AGRADECIMENTOS

Agradecemos primeiramente a Deus, por nos abençoar a cada dia e nos fortalecer para superarmos este difícil curso de Pós-Graduação.

Às nossas famílias que nos abraçaram, renovaram nossas energias e nos encorajavam a cada desafio.

Às empresas Delp Engenharia Mecânica S/A e FMC Technologies por nos ceder a tecnologia e conteúdo deste procedimento de qualificação.

Ao nosso orientador, Dr. Paulo José Modenesi que, além de lecionar com excelência, se dispôs em nos orientar e se mostrou presente sempre que precisamos.

Ao coordenador do curso, Dr. Alexandre Queiroz Bracarense, que sempre nos incentivou e nos levou à frente, com muito positivismo.

À Universidade Federal de Minas Gerais, que nos recebeu no período do curso.

Também fazemos menção aos nossos professores e colegas de curso.

RESUMO

Qualificações de procedimentos de soldagem são atividades comuns em empresas de fabricação, sobretudo nas indústrias que fornecem equipamentos de maior responsabilidade, em que a falha de um componente soldado possa ocasionar desastres ambientais, acidentes envolvendo perda de vidas, dentre outros. Neste contexto, esta responsabilidade é cotidianamente vivenciada pelos Engenheiros de Soldagem. Ao fim de um trabalho de qualificação, são gerados documentos técnicos de soldagem, denominados: EPS (Especificação do Procedimento de Soldagem) e RQPS (Registro da Qualificação do Procedimento de Soldagem). O primeiro traz todas as variáveis essenciais, não essenciais e suplementares (quando aplicável), com suas respectivas faixas qualificadas, de acordo com os requerimentos estabelecidos nas normas do projeto; é um passo-a-passo para utilização na fabricação, com objetivo de obter sucesso na soldagem das juntas de produção, tal como aquele alcançado durante a qualificação. Já o RQPS é um registro fiel daqueles parâmetros obtidos durante a soldagem dos corpos de prova e é a base para obtenção da EPS. Para avaliação e qualificação do procedimento estudado neste trabalho, bem como para comprovação da aplicabilidade dos processos de soldagem e materiais aqui adotados, corpos de prova tratados termicamente pós-soldagem (alívio de tensões) foram submetidos aos seguintes testes: visual, radiográfico, dureza, tração, dobramento, charpy, macrografia e micrografia. Ao obter resultados satisfatórios nos testes realizados, foi possível constatar a aprovação e qualificação deste procedimento de soldagem.

Palavras-chave: Soldagem. Aço baixa liga. Liga de níquel. Qualificação de procedimento. Revestimento. Ensaios.

ABSTRACT

Welding procedure qualifications are activities commonly practiced by manufacturing companies, especially in industries that provide greater responsibility equipment in which the failure of a welded component can cause environmental disasters, accidents involving loss of life, among others. In this context, Welding Engineers daily experience this responsibility. Welding technical documents called WPS (Welding Procedure Specification) and PQR (welding procedure qualification record) are generated after a qualifying work. The first brings all the essential variables, non-essential and supplementary variables (where applicable), with their respective qualified groups, according to the requirements established in project standards; is a step-by-step to use in manufacturing, in order to succeed in welding together the production, such as that achieved during the qualification. The RQPS is a faithful record of those parameters obtained during the pipe welding and is the basis for obtaining the WPS. For evaluation and qualification of the procedure studied in this academic work and to prove the applicability of welding processes and materials adopted herein, the specimens were subjected to a post welding heat treatment (stress relief) and tested by: visual test, radiographic test, hardness test, bend test, charpy, macrograph and micrograph. After obtain satisfactory results in the tests, it was possible the approval and qualification of the welding procedure.

Keywords: Welding. Low alloy steel. Nickel alloy. Procedure qualification. Cladding. Tests.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Abertura da raiz, ângulo de bisél e ângulo de chanfro	15
Figura 2 – Posições de soldagem para juntas circunferenciais em tubos	15
Figura 3 – Esquema do processo de soldagem GTAW	16
Figura 4 – GTAW <i>Hot Wire</i> : esquema do processo	18
Figura 5 – Comparação entre taxas de deposição.....	19
Figura 6 – Tubos de aço API 5L X70 revestidos internamente pelo processo GTAW <i>Hot Wire</i>	20
Figura 7 – Esquema do processo de soldagem GMAW.....	21
Figura 8 – Modos de transferência de acordo com a classificação do IIV.....	22
Figura 9 – Tubos API 5L X70 utilizados na qualificação do procedimento de soldagem, após revestimento interno com Inconel 625	30
Figura 10 – Efeito dos gases de proteção argônio e hélio no perfil da solda	33
Figura 11 – Fonte de soldagem Miller PipePro 450 RFC	34
Figura 12 – Correlação de normas.....	35
Figura 13 – Local de retirada dos corpos de prova para ensaio de charpy.....	41
Figura 14 – Corpo de prova para ensaio de tração em tubo	42
Figura 15 – Corpo de prova para ensaio de dobramento.....	42
Figura 16 – Pontos de dureza Vickers para solda de chanfro com revestimento.....	43
Figura 17 – Seção transversal da solda do corpo de prova CP1 (esquemático).....	44
Figura 18 – Seção transversal da solda do corpo de prova CP2 (esquemático).....	44
Figura 19 – Carta gráfica do tratamento térmico pós-soldagem dos corpos de prova	48
Figura 20 – Aspecto visual do CP1 pós soldagem.....	49
Figura 21 – Seção transversal da solda ensaiada por dureza Vickers HV10.....	50
Figura 22 – Aspecto macrográfico da junta soldada CP1 – Ataque de Nital 5%.....	52
Figura 23 – Aspecto macrográfico da junta soldada CP2 – Ataque de Nital 5%.....	53
Figura 24 – Aspecto microestrutural do metal base – Ataque de Nital 2%.....	54
Figura 25 – Aspecto microestrutural ZTA (face) – Ataque de Nital 2%	55
Figura 26 – Aspecto microestrutural ZTA (raiz) – Ataque de Nital 2%	56
Figura 27 – Aspecto microestrutural no metal de solda (último passe) – Ataque de Nital 5%.....	57

Figura 28 – Aspecto microestrutural no metal de solda (raiz) – Ataque de Nital

5%58

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Composição química do API 5L X70	29
Tabela 2 – Propriedades mecânicas do API 5L X70	29
Tabela 3 – Composição química do consumível ASME SFA 5.14 ERNiCrMo-3.....	31
Tabela 4 – Limite de resistência esperado do metal de solda.....	31
Tabela 5 – QW-255: variáveis de soldagem para qualificação de procedimento – GMAW.....	36
Tabela 6 – QW-256: variáveis de soldagem para qualificação de procedimento – GTAW.....	37
Tabela 7 – Parâmetros de soldagem do corpo de prova CP1	46
Tabela 8 – Parâmetros de soldagem do corpo de prova CP2.....	47
Tabela 9 – Resultados dos ensaios de dureza.....	50
Tabela 10 – Resultados dos ensaios de tração.....	51
Tabela 11 – Resultados dos ensaios de dobramento lateral.....	51
Tabela 12 – Resultados dos ensaios de charpy.....	52
Tabela 13 – Microestruturas encontradas	59

LISTA DE ABREVIATURAS

Atual. – Atualizado

Ed. – Edição

Ex. – Exemplo

P. – Página

Rev. – Revisado

V. – Volume

LISTA DE SIGLAS

API – American Petroleum Institute
ARBL – Aços de alta resistência e de baixa liga
ASME – The American society of mechanical engineers
ASTM – American Society for Testing and Materials
BPV – Boiler and Pressure Vessel
BPVC – Boiler and Pressure Vessel Code
CP – Corpo de Prova
EBW – Electron Beam Welding
EPS – Especificação do Procedimento de Soldagem
EPB – Especificação do Procedimento de Brasagem
FCAW – Flux Cored Arc Welding
GMAW – Gas Metal Arc Welding
GTAW – Gas Tungsten Arc Welding
LBW – Laser Beam Welding
NACE – National Association of Corrosion Engineers
PAW – Plasma Arc Welding
PTA - Plasma Transferred Arc
RQPS – Registro da Qualificação do Procedimento de Soldagem
SAW – Submerged Arc Welding
SAE – Society of Automotive Engineers
SMAW – Shielded Metal Arc Welding
TIG – Tungsten Inert Gas
UNS – Unified Numbering System
ZAC – Zona Afetada pelo Calor
ZTA – Zona termicamente afetada
WPS – Welding Procedure Specification

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	13
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	14
2.1 Conceitos Gerais.....	14
2.2 Processo de soldagem GTAW	16
2.2.1 GTAW Hot Wire: aplicação em revestimentos (<i>cladding</i>).....	17
2.3 Processo de soldagem GMAW.....	20
2.4 Tubo API 5L X70 revestido por <i>cladding</i> e sua aplicação	22
2.5 Ligas de níquel	23
3 METODOLOGIA	25
3.1 Estratégia adotada para o estudo e análise da soldagem proposta.....	25
3.2 Materiais.....	28
3.2.1 <i>Corpos de prova</i>	28
3.2.2 <i>Consumíveis</i>	30
3.2.3 <i>Gás de proteção</i>	31
3.3 Equipamento de Soldagem	33
3.4 Procedimentos adotados.....	34
3.4.1 <i>Requisitos de qualificação</i>	34
3.4.2 <i>Técnica de Soldagem</i>	39
3.4.3 <i>Amostras para ensaios e testes</i>	40
4 RESULTADOS E DISCUSSÃO	44
4.1 Ensaios não destrutivos	48
4.2 Ensaios destrutivos	49
4.3 Análises macrográfica e micrográfica.....	52
4.4 Considerações finais	59
5 CONCLUSÕES	61
REFERÊNCIAS.....	62

1 INTRODUÇÃO

Para obtenção do sucesso durante o processo de fabricação por juntas soldadas, muitas variáveis podem se tornar um diferencial: experiência e habilidade dos soldadores, qualidade das fontes de soldagem, estudo e elaboração adequada do projeto, condições de preparação, dentre outros. Neste sentido, as Especificações de Procedimento de Soldagem (EPS) possuem importante contribuição, servindo como ferramenta de instrução ao pessoal envolvido na soldagem de um equipamento, indicando consumíveis a serem utilizados, características elétricas, temperaturas de pré-aquecimento, interpasse e pós-aquecimento, técnicas de soldagem, tratamento térmico, dentre outros.

Esta monografia tem como objetivo, a análise e o estudo de uma qualificação de procedimento de soldagem para união entre tubos de aço baixa liga API 5L X70 revestidos internamente pelo processo de soldagem GTAW *Hot Wire (cladding)* com consumível de Inconel 625 (liga de níquel); este consumível também foi adotado para a união da junta soldada. Esta combinação de materiais é amplamente utilizada na fabricação de tubulações de exploração de petróleo e seus derivados, por garantirem resistência mecânica e à corrosão requeridas para estes projetos.

Esta atividade (qualificação de procedimentos) é uma de tantas outras atribuições designadas a um Engenheiro de Soldagem sendo, portanto, objeto de estudo deste trabalho acadêmico.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

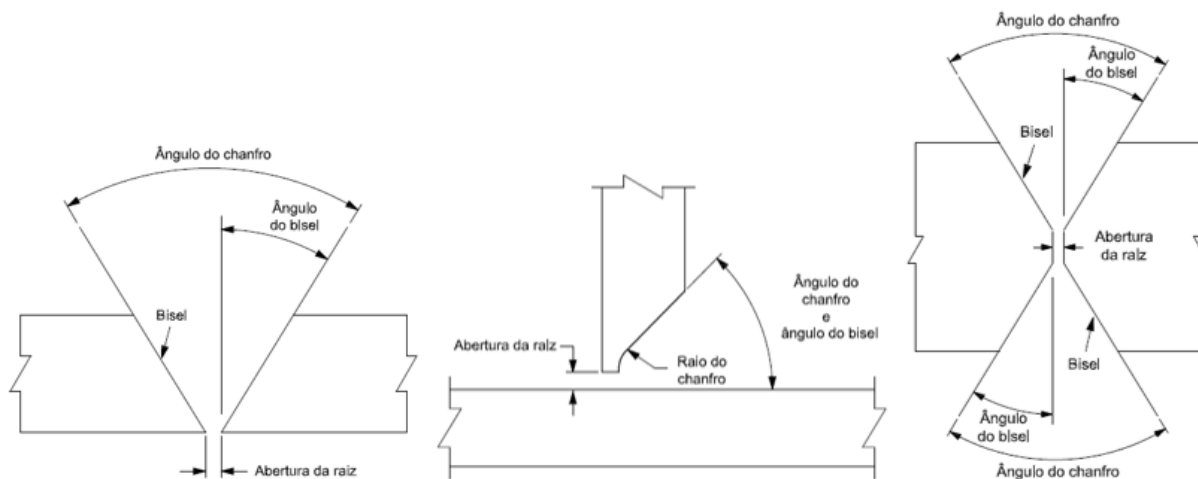
2.1 Conceitos Gerais

Para o bom entendimento deste trabalho são adotadas algumas definições, citadas pela norma PETROBRAS N-1438 (2013):

- a) Abertura da raiz (*root opening*): separação entre os componentes a serem unidos na raiz da junta;
- b) Ângulo do bisél (*bevel angle*): ângulo formado entre a borda preparada do componente e um plano perpendicular à superfície deste componente;
- c) Ângulo do chanfro (*groove angle*): ângulo integral entre as bordas preparadas dos componentes;
- d) Aporte térmico (*heat input rate*) ou energia de soldagem: energia fornecida pelo arco elétrico à peça soldada em determinado comprimento;
- e) Atmosfera protetora (*protective atmosphere*): envoltório de gás que circunda a parte a ser soldada, com a finalidade de proteger a poça de fusão;
- f) Atmosfera redutora (*reducing atmosphere*): atmosfera protetora quimicamente ativa que, em elevadas temperaturas, reduz óxidos ao seu estado metálico;
- g) Cobre-junta (*backing*): material colocado na parte posterior da junta a ser soldada, para suportar o metal fundido durante a soldagem;
- h) Escória (*slag*): produto não metálico resultante da dissolução de fluxos, revestimentos e impurezas não metálicas em alguns processos de soldagem e brasagem;
- i) Especificação de Procedimento de Soldagem – EPS (*Welding Procedure Specification – WPS*) documento escrito emitido pela executante dos serviços, com base nas especificações do projetista, dos consumíveis, dos metais de base, provendo as variáveis de soldagem necessárias para produção de juntas soldadas com as mesmas propriedades e características da junta ensaiada na qualificação;
- j) Gás de purga (*purge*): gás utilizado para criar uma atmosfera protetora da poça de fusão, pelo lado oposto em que a solda está sendo feita, promovendo sua contenção durante a soldagem;
- k) Goivagem (*gouging*): operação de remoção de material por meios mecânicos ou térmicos com o objetivo de se preparar um chanfro;
- l) Passe de revenimento: passe ou camada depositado em condições que permitam a modificação estrutural do passe ou camada anterior e de suas zonas afetadas termicamente;
- m) Registro de Qualificação do Procedimento de Soldagem – RQPS (*welding procedure qualification record*): documento, emitido pela executante dos serviços, onde são registrados os valores reais dos parâmetros de operação de soldagem da peça de teste e os resultados de ensaios de qualificação;
- n) Zona Termicamente Afetada (ZTA – *heat affected zone*) ou Zona Afetada pelo Calor (ZAC – *heat affected zone*): região do metal de base que não foi fundida durante a soldagem, mas cuja microestrutura e propriedades mecânicas foram alteradas devido à geração de calor imposta pela soldagem, brasagem ou corte (PETROBRAS N-1438, 2013, p. 2-19).

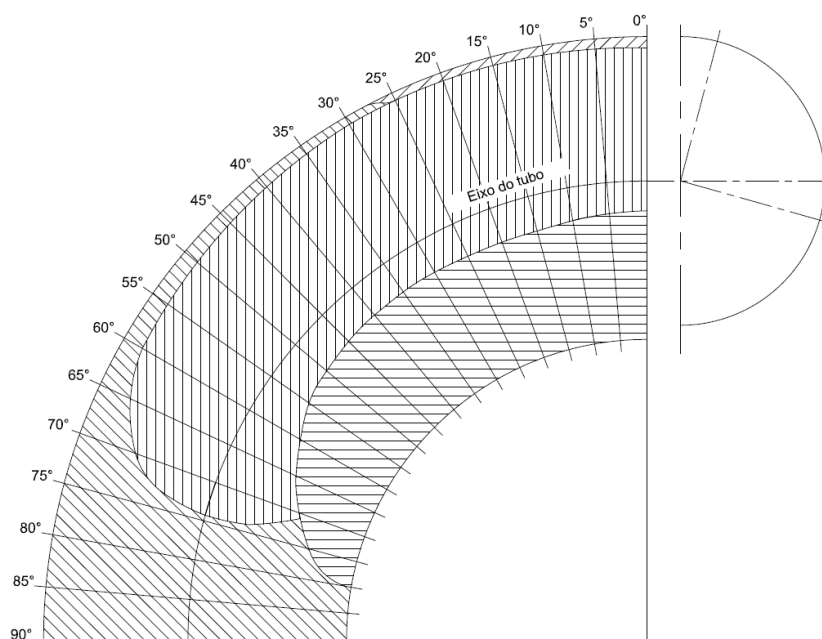
As figuras 1 e 2 apresentam algumas das definições citadas acima e um croqui de referência para posições de soldagem em tubos.

Figura 1 – Abertura da raiz, ângulo de bisel e ângulo de chanfro

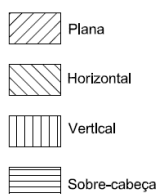


Fonte: PETROBRAS N-1438, 2013, p. 20

Figura 2 – Posições de soldagem para juntas circunferenciais em tubos



Legenda:



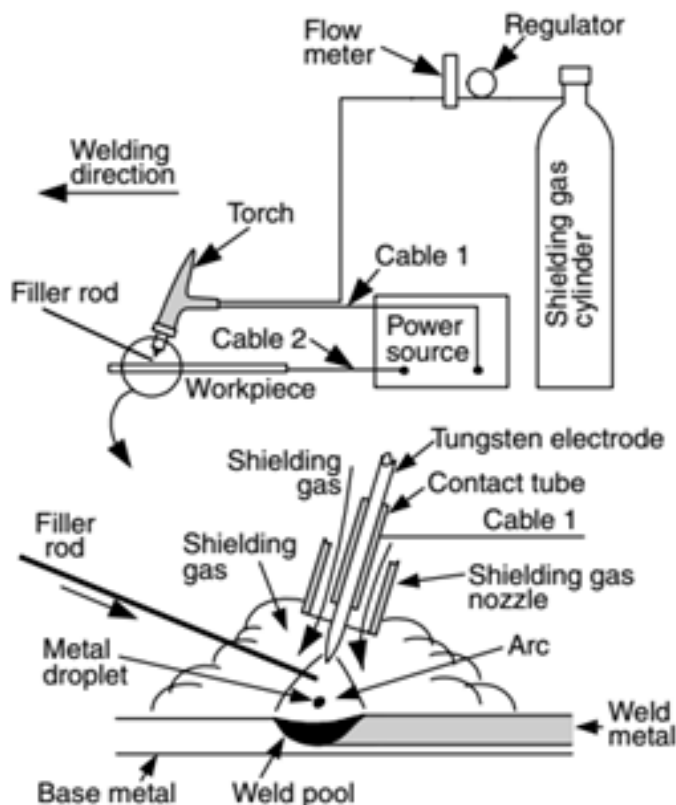
Fonte: PETROBRAS N-1438, 2013, p. 36

2.2 Processo de soldagem GTAW

O processo GTAW (*Gas Tungsten Arc Welding*), também conhecido como TIG (*Tungsten Inert Gas*), foi desenvolvido no fim da década de 1930, quando houve a necessidade da soldagem do magnésio: Russell Meredith desenvolveu um processo utilizando o gás inerte Hélio e um eletrodo de tungstênio para fundir o magnésio, substituindo a rebiteagem (ASM HANDBOOK, 1993). A temperatura necessária para fundir os materiais no processo GTAW é obtida pela manutenção de um arco elétrico entre o eletrodo de tungstênio e a peça de trabalho, alcançando elevadas temperaturas, da ordem de 10.000 a 20.000 K (MODENESI, 2012). O gás inerte (normalmente o argônio, hélio ou mistura deles) sustenta o arco elétrico e protege a poça de fusão da contaminação atmosférica. O processo também é amplamente utilizado para soldagem de aço inoxidável, alumínio, magnésio, cobre e materiais reativos, como titânio e tântalo; também pode ser usado para soldagem de aço carbono e baixa liga, sobretudo em passes de raiz (ASM HANDBOOK, 1993).

A figura 3 apresenta um esquema típico do processo de soldagem GTAW.

Figura 3 – Esquema do processo de soldagem GTAW



Segundo Zeemann et al (2016), o processo GTAW é muito utilizado para a soldagem de chapas com menos de 10 mm de espessura e em passes de raiz, especialmente em juntas estreitas como, por exemplo, em tubulações; pode ser operado com metal de adição (varetas ou arames em bobina) ou de forma autógena (sem metal de adição). Sobre sua automatização, ainda segundo Zeemann et al (2016):

Pode ser automatizado e programável de forma a oferecer o controle dos parâmetros e variáveis de soldagem, inclusive com controle remoto, e de forma quase independente pode-se controlar o aporte de calor e a taxa de deposição (ZEEMANN et al, 2016).

Para a soldagem mecanizada ou automatizada com adição do metal, se utilizam os alimentadores de arame, podendo esta ocorrer de duas maneiras: *Cold Wire*, em que o arame é alimentado na temperatura ambiente, usado normalmente para aço carbono, aço inoxidável, alumínio, cobre e ligas de cobalto para revestimento ou *Hot Wire*, em que o arame é alimentado pré-aquecido por resistência, utilizando-se efeito joule com corrente alternada. Este último modo oferece maiores taxas de deposição com velocidades de soldagem mais altas em relação ao *Cold Wire*; normalmente é utilizado na posição plana para aumento da taxa de deposição. O processo *Hot Wire* é empregado com sucesso em *cladding* e nos aços inoxidáveis, ligas de níquel e de cobre e titânio (ZEEMANN et al, 2016).

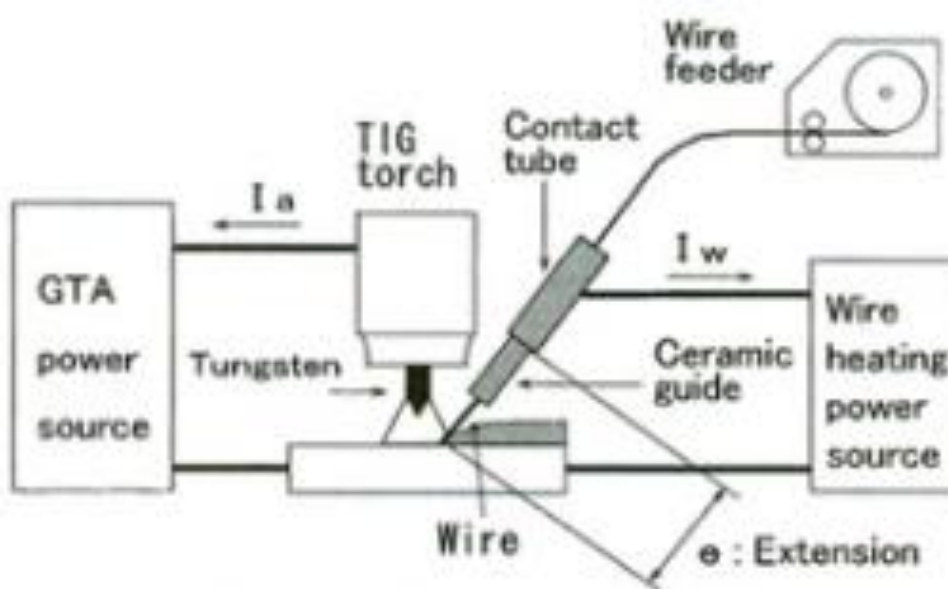
O revestimento por *cladding* é um dos assuntos deste trabalho, pois foi o método empregado no revestimento dos tubos objeto desta qualificação. No próximo tópico será discorrido um pouco mais deste tema.

2.2.1 GTAW Hot Wire: aplicação em revestimentos (*cladding*)

Segundo Henon (2013), o processo GTAW *Hot Wire*, desde sua implementação em 1966, tem tido discreto desenvolvimento e aplicação. Basicamente é utilizado em algumas soldagens em chanfro, recomposição e revestimento. O desenvolvimento de sua automatização tem levado a aplicações em indústrias nucleares, geração de energia, vasos de pressão e offshore, para as quais é requerido elevada qualidade da solda e boa produtividade.

Comparado ao processo GTAW convencional e ao processo *Cold Wire*, em que energia do arco elétrico é usada para fundir o metal de adição, diminuindo a eficiência do processo, no GTAW *Hot Wire* o arame é aquecido por resistência antes mesmo de atingir a poça de fusão (a figura 4 mostra um esquema do processo). Isto permite que quase toda energia proveniente do arco seja utilizada para gerar a poça de fusão e garantir penetração, acarretando em ganho de velocidade de soldagem, podendo esta ser aumentada em 2 a 3 vezes, mantendo a qualidade do cordão depositado.

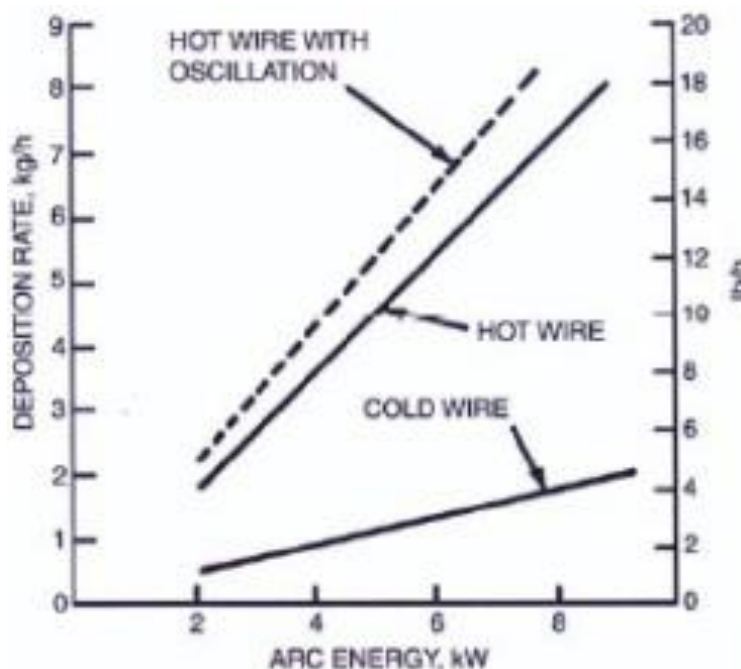
Figura 4 – GTAW *Hot Wire*: esquema do processo



Fonte: HENON, 2013, extraído de KATSUYOSHI et al, 2003

A figura 5 compara as taxas de deposição entre os processos GTAW *Hot Wire* e *Cold Wire*.

Figura 5 – Comparação entre taxas de deposição



Fonte: HENON, 2013

Henon (2013) afirma que diversas influências, que vieram ao longo de várias décadas, impulsionaram a aplicação do *Hot Wire*: a necessidade de um processo de fabricação eficiente e que apresente poucos defeitos e o aumento do uso de materiais resistentes à corrosão, caso de estudo deste trabalho. Embora esta tecnologia possa ser utilizada em outros processos, tais como SAW (*Submerged Arc Welding*), PAW (*Plasma Arc Welding*), GMAW (*Gas Metal Arc Welding*), LBW (*Laser Beam Welding*) e EBW (*Electron Beam Welding*), sua aplicação, nestes casos, se demonstrou limitada. Além disso, as vantagens experimentadas quando utilizado o processo GTAW automatizado para revestimentos sustentam sua aplicação: utilização em uma vasta gama de materiais (aços inoxidáveis austenítico e duplex, ligas de níquel e titânio, dentre tantos outros), bons resultados metalúrgicos e composição química do metal depositado, obtenção de soldas limpas e com pouca incidência de porosidade. Por outro lado, algumas desvantagens podem ser citadas, tais como: geralmente não pode ser operado manualmente, apresentando elevados custos com sua mecanização / automatização, fontes mais caras, além dos gastos com os gases inertes e com treinamento e capacitação de pessoal. A posição de soldagem tende a ser uma limitação, sendo aplicável na maioria das situações, apenas na posição plana.

A figura 6 retrata tubos revestidos internamente pelo processo GTAW *Hot Wire* antes de sua soldagem de união.

Figura 6 – Tubos de aço API 5L X70 revestidos internamente pelo processo GTAW *Hot Wire*



Fonte: Foto dos autores

2.3 Processo de soldagem GMAW

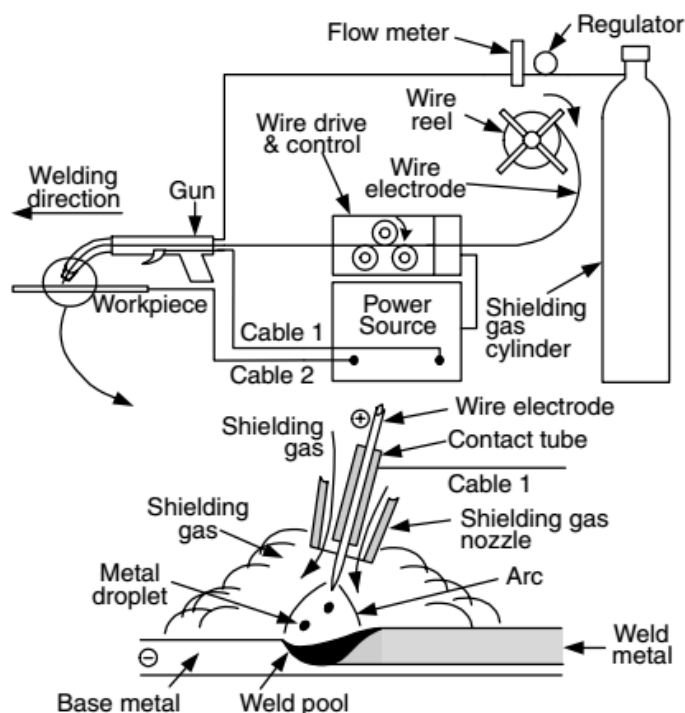
De acordo com Marques, Modenesi e Bracarense (2009), a soldagem a arco com proteção gasosa, GMAW:

É um processo em que a união de peças metálicas é produzida pelo aquecimento destas com um arco elétrico estabelecido entre um eletrodo metálico nú, consumível, e a peça de trabalho. A proteção do arco e da região da solda contra contaminação pela atmosfera é feita por um gás ou misturas de gases, que podem ser inertes ou ativos. No Brasil, o processo é referido como MIG (*Metal Inert Gas*) quando a proteção usada é inerte ou rica em gases inertes ou MAG (*Metal Active Gas*) quando o gás usado é ativo ou contém misturas ricas em gases ativos (MARQUES, MODENESI E BRACARENSE, p. 233 2009).

A soldagem GMAW é um processo normalmente semiautomático, em que a alimentação de arame eletrodo é feita mecanicamente, através de um alimentador motorizado e o soldador é responsável pela iniciação e interrupção da soldagem, além de mover a tocha ao longo da junta. A manutenção do arco é garantida pela alimentação contínua de arame eletrodo e o comprimento do arco é, em princípio, mantido aproximadamente constante pelo próprio sistema, independentemente dos

movimentos do soldador, dentro de certos limites. O calor gerado pelo arco é usado para fundir as peças a serem unidas e o arame eletrodo, que é transferido para a junta e constitui o metal de adição. A figura 7 ilustra esquematicamente o processo.

Figura 7 – Esquema do processo de soldagem GMAW



Fonte: KOU, 2002, p. 20

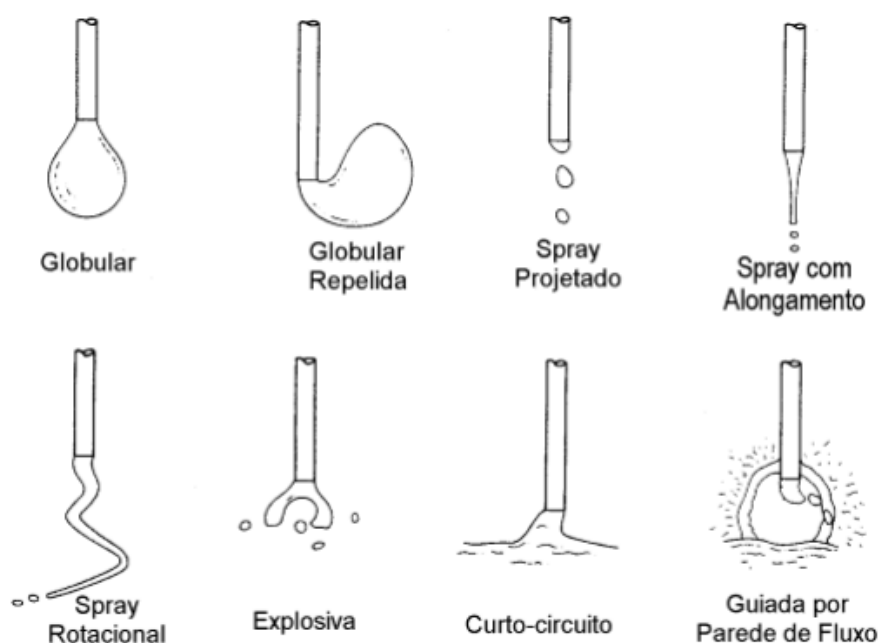
Na soldagem com eletrodos consumíveis, o metal fundido na ponta do eletrodo tem que se transferir para a poça de fusão. O modo de ocorrência desta transferência é muito importante na soldagem GMAW, pois afeta muitas características do processo, como por exemplo: a quantidade de gases (principalmente hidrogênio, nitrogênio e oxigênio) absorvidos pelo metal fundido, a estabilidade do arco, a aplicabilidade do processo em determinadas posições de soldagem e o nível de respingos gerados.

Segundo Modenesi (2012), para o processo GMAW, existem 3 formas básicas de modo de transferência, sendo elas: transferência por curto-circuito, transferência globular e transferência por *Spray* (aerossol ou goticular). Outros modos são citados na literatura; Ponomarev et al. (2004) e Ponomarev e Scotti (2004), citados por Modenesi (2012, p. 88), descrevem formas de transferência mista como curto-circuito-goticular, curto-circuito-goticular com alongamento, globular-goticular e globular-curto-circuito-goticular. Ainda, segundo Modenesi

(2012), outros modos existem em função do uso de equipamentos modernos de soldagem, que impõem mudanças em valores de corrente e velocidade de alimentação de arame (transferência com corrente pulsada, por exemplo).

A figura 8 demonstra alguns modos de transferência, segundo a classificação do IIW, citado por Modenesi (2012):

Figura 8 – Modos de transferência de acordo com a classificação do IIW



Fonte: MODENESI, 2012, extraído de LANCASTER, 1986

2.4 Tubo API 5L X70 revestido por *cladding* e sua aplicação

As atividades de produção e exploração de petróleo vêm, ao longo dos anos, agitando o mercado brasileiro, atingindo vários segmentos de atuação das indústrias, desde a fabricação e fornecimento da matéria prima, até os diversos modos de inspeção e logística, por exemplo. Dentro deste cenário, a seleção de materiais deve ser criteriosamente realizada, a fim de atender projetos rigorosos, em que, muitas das vezes, é exigido atendimento a condições críticas de corrosão, fadiga, resistência mecânica, tenacidade em baixa temperatura, além de, é claro, apresentar boa soldabilidade.

Santos, Maciel e Santana (2015) afirmam que este ramo, exploração de petróleo, cresce de forma intensa e se direciona cada vez mais para águas profundas, geralmente localizadas distantes da costa. Com isso, é necessário

realizar melhorias contínuas dos materiais empregados na fabricação dos dutos responsáveis pelo transporte de petróleo e seus derivados. Dentre os materiais utilizados para a fabricação destas tubulações, destacam-se os aços de alta resistência e de baixa liga (ARBL). No Brasil os aços ARBL API 5L X70 são os mais usados na fabricação de gasodutos por apresentarem as seguintes propriedades: boa combinação resistência mecânica, aliada à boa tenacidade, ductilidade e soldabilidade.

Porém, esses aços são sensíveis à corrosão sob tensão. Para aumentar a vida útil destes materiais, uma solução muito viável, tendo em vista a redução de custo pela não substituição total do material, são as técnicas de proteção superficial de componentes, tais como: metalização por aspersão térmica, galvanização, cladização, eletrodeposição, pintura, difusão, redução química (niquelação) e soldagem para revestimento (SANTOS, MACIEL e SANTANA, 2015).

Ainda segundo Santos, Maciel e Santana (2015), dentre as técnicas, a do revestimento por soldagem é bastante atrativa por oferecer a proteção através da aplicação de revestimentos unidos metalurgicamente ao substrato. Vários processos têm sido utilizados para este fim, tais como: processo a laser (LBW), processos GTAW ou TIG com alimentação automática de arame (frio e quente), processo GMAW e o processo à Plasma por Arco Transferido (PTA). Todos eles têm a finalidade de aplicação de uma camada protetora de um material com propriedades superiores sobre o substrato.

A técnica do revestimento por soldagem para proteção contra corrosão vem sendo bastante abordada nos últimos anos, utilizando-se aços inoxidáveis e as superligas de níquel, Inconel 625, como metal de adição para revestir componentes e equipamentos da indústria do petróleo e gás natural. Apesar da aplicação da liga Inconel 625 por soldagem ser uma alternativa desejável, em função da liga apresentar elevada resistência em alta temperatura e excelente resistência à corrosão, o custo da mesma é bastante elevada, sendo necessário que seja realizado um planejamento de estudos do processo para aplicação da liga.

2.5 Ligas de níquel

Conforme norma PETROBRAS N-133 (2015), “as ligas de níquel são utilizadas em aplicações na qual é necessário combinar média ou alta resistência

mecânica e excelente resistência à corrosão em altas temperaturas. As ligas de níquel podem ser aplicadas em ampla faixa de temperaturas, desde as criogênicas até 800°C, podendo em alguns casos chegar até 1200°C”.

As ligas de níquel são geralmente classificadas de duas formas: conforme a composição química básica (níquel comercialmente puro, ligas Ni-Cu, ligas Ni-Mo, ligas Ni-Cr, ligas Ni-Cr-Mo, ligas Ni-Cr-Fe e ligas Ni-Fe-Cr) e conforme o mecanismo de endurecimento (solução sólida ou precipitação).

Geralmente a designação destas ligas é mencionada pela sua classificação da SAE / ASTM (UNS - *Unified Numbering System*) ou, mais comumente, pela sua patente, como por exemplo, Monel 400 (N04400), Inconel 600 (N06600), Inconel 625 (N06625), Incoloy 800 (N08800), Hastelloy C4 (N06455), dentre outros.

Segundo a norma PETROBRAS N-133 (2015), as ligas de níquel, de forma geral, apresentam soldabilidade semelhante aos aços inoxidáveis austeníticos de microestrutura integralmente austenítica e aos superausteníticos, sendo susceptíveis à trinca de solidificação, liquação e ao fenômeno de redução da ductilidade, além de tendência à falta de fusão pela baixa fluidez da poça de fusão. Em algumas ligas quando soldadas com alto aporte térmico pode ocorrer a precipitação de carbeto e intermetálicos.

A norma ASME IX (2015) classifica e agrupa os materiais de base pela designação “*P-Number*”. Este agrupamento é baseado em similaridade de composição química, propriedades mecânicas e soldabilidade. As ligas de níquel são classificadas, de acordo com esta nomenclatura, como “*P-Number*” de 41 a 49. Para consumíveis, este agrupamento é realizado pela designação “*F-Number*”. A liga de níquel tratada neste trabalho, Inconel 625, é classificada como “*P-Number*” 43.

A resistência mecânica do Inconel 625 é, conforme citado por SPECIAL METALS (2013), derivado do efeito de endurecimento pela presença de molibdênio e nióbio na matriz níquel-cromo da liga. Assim, tratamentos de endurecimento por precipitação não são necessários. Esta combinação de elementos também é responsável pelo seu excelente desempenho em ambientes corrosivos e em altas temperaturas que, juntamente com sua elevada resistência mecânica, à corrosão por *pitting*, em frestas e sob tensão, à fadiga e tenacidade a baixa temperatura, fazem com que este material seja amplamente utilizado em aplicações submarinas.

3 METODOLOGIA

Este trabalho é um estudo de um caso de real de qualificação de procedimento de soldagem de tubulações fabricadas com aço API 5L X70 revestidas internamente com Inconel 625, utilizadas em águas profundas, na extração e transporte de petróleo, mais especificamente para o projeto de exploração na camada do Pré-Sal (Petrobras).

Um procedimento de soldagem determina todas as variáveis necessárias para a adequada execução da soldagem nas juntas de produção: técnicas de soldagem, metal base e consumíveis, parâmetros elétricos (corrente e tensão), velocidade de soldagem, *heat input*, processo de soldagem, dentre outros. Seguir corretamente o procedimento é o primeiro passo para se obter componentes soldados dentro dos requisitos solicitados pelo projeto.

O capítulo 3 apresenta todas as etapas necessárias para qualificação de um procedimento de soldagem, desde a identificação do equipamento que será soldado, as normas de projeto do equipamento, as normas que estabelecem as regras para soldagem, materiais de base, seleção de processos de soldagem com seus respectivos consumíveis, controles e medições, tratamento térmico pós-soldagem, soldagem dos corpos de prova, ensaios destrutivos e não destrutivos, análises dos resultados, dentre outros, até a finalização com a elaboração do procedimento de soldagem.

3.1 Estratégia adotada para o estudo e análise da soldagem proposta

Para o estudo e análise de uma soldagem é necessário um minucioso planejamento e registros confiáveis de todos os parâmetros de soldagem. Os registros dos parâmetros da soldagem é um ponto crítico de um projeto, pois todos os parâmetros envolvidos só podem ser medidos no ato da soldagem. No caso de um fracasso, todo o processo deverá ser refeito, inclusive seu planejamento. Considerando-se este fato, o planejamento torna-se a fase principal deste trabalho.

Para o devido planejamento da soldagem é necessário saber a finalidade da peça ou equipamento a ser soldado.

As qualificações de procedimentos de soldagem devem ser realizadas conforme códigos de soldagem específicos para equipamentos e produtos. No caso

de soldagem de tubulações de petróleo, os projetos utilizam em conjunto as normas ASME B31.8, ASME IX, API 6A e NACE MR0175 / ISO 15156-2. Estes códigos determinam, para qualificação do procedimento de soldagem, como deve ser realizada a soldagem dos corpos-de-prova, parâmetros de soldagem a serem registrados, ensaios e testes e os respectivos critérios de aceitação. As empresas petrolíferas (ex. Petrobras e Shell) geralmente possuem códigos internos com requisitos adicionais para soldagem, como por exemplo a norma PETROBRAS N-133 (2015).

Após definição dos códigos a serem atendidos para a qualificação do procedimento de soldagem, os mesmos devem ser analisados para o planejamento da qualificação do procedimento soldagem.

O código que estabelece as principais variáveis de qualificação é o ASME IX; ele é a referência maior para procedimentos utilizados em equipamentos submetidos a pressão, tais como vasos de pressão, caldeiras, tubulações de processos, dentre outros.

O código ASME B31.8 (2012) trata, principalmente, dos cálculos para projeto e dimensionamento das tubulações, materiais, fluidos, condições de tratamento térmico, inspeções, dentre outros, deixando a qualificação dos procedimentos de soldagem a cargo do código ASME IX. No item 823.2.1, a norma ASME B31.8 (2012) informa que:

Procedimentos de soldagem e soldadores que executam trabalho para novas construções e serviços de tubulações devem ser qualificados segundo a seção IX do ASME *Boiler and Pressure Vessel Code* ou API 1104. (THE AMERICAN SOCIETY OF MECHANICAL ENGINEERS, 2012, tradução nossa)¹.

A norma API 6A classifica os materiais de acordo com 4 categorias: PSL1, PSL2, PSL3 e PSL4, de acordo com critérios de criticidade do projeto. Estas denominações não serão abordadas, mas é importante considerar que a tubulação do projeto deste estudo é classificada como PSL3. No artigo 6 desta referida norma – *Welding* – são tratadas algumas condições específicas para qualificação de procedimentos de soldagem, as quais devem ser criteriosamente respeitadas (algumas delas serão abordadas nos capítulos que se seguem, quando são tratados

¹ Welding procedures and welders performing work for new construction and out-of-service pipelines shall be qualified under Section IX of the ASME Boiler and Pressure Vessel Code or API 1104.

os requisitos de ensaios). No item 6.3.4.1, a API 6A informa que “os requisitos para PSL1 e PSL2 são também aplicáveis para PSL3 com os requerimentos adicionais dados nos itens 6.3.4.2 até 6.3.4.4” (AMERICAN PETROLEUM INSTITUTE, 2010, tradução nossa).² Por sua vez, o item 6.3.2.3 da mesma norma estabelece que, para PSL1 e PSL2, “a soldagem deve ser realizada de acordo com Especificações do Procedimento de Soldagem (EPS) escritas e qualificadas conforme o artigo II da seção IX do Código ASME para Caldeiras e Vasos de Pressão (ASME BPVC, Boiler & Pressure Vessel. Code, 2004)”. A EPS deve descrever todas as variáveis essenciais, não essenciais e suplementares (se requerido; ver ASME BPVC:2004, seção IX)” (AMERICAN PETROLEUM INSTITUTE, 2010, tradução nossa).³ Embora seja citada a norma no ano de 2004, sua edição mais atual pode ser adotada.

Já a norma NACE MR0175 / ISO 15156-2, no item 7.3.3, informa que:

A soldagem deve ser executada em conformidade com os códigos e normas apropriadas, assim como acordado entre comprador e fornecedor. A Especificação do Procedimento de Soldagem (EPS) e o Registro da Qualificação do Procedimento de Soldagem (RQPS) devem ser avaliados pelo inspetor do usuário do equipamento. A qualificação do procedimento de soldagem para meio ácido deve incluir teste de dureza de acordo com 7.3.3.2, 7.3.3.3 e 7.3.3.4. (AMERICAN NATIONAL STANDARD INSTITUTE; INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION; NATIONAL ASSOCIATION OF CORROSION ENGINEERS, 2009, tradução nossa)⁴

Portanto, de acordo com os parágrafos anteriores, confirma-se a ideia de que a norma base para esta qualificação é o ASME IX, acrescido dos critérios estabelecidos para cada código.

Para conhecimento de todas as considerações para qualificação desta EPS / RQPS (ver definições na seção 2.1 deste trabalho), para os processos GTAW e GMAW, as tabelas QW-256 e QW-255, respectivamente, devem ser consultadas. Estas tabelas estabelecem todas as faixas a serem qualificadas para estes dois processos: projeto da junta, materiais de base e de enchimento permitidos para uso

² The requirements for PSL1 and PSL2 shall apply for PSL3 with the addition of the requirements given in 6.3.4.2 to 6.3.4.4.

³ Welding shall be performed in accordance with welding procedure specifications (WPS), written and qualified in accordance with ASME, BPVC: 2004, Section IX, Article II. The WPS shall describe all the essential, non-essential and supplementary essential (if required; see ASME, BPVC:2004, section IX) variables.

⁴ Welding shall be carried out in compliance with appropriate codes and standards as agreed between the supplier and the purchaser. Welding procedure qualifications (WPSs) and procedure qualification records (PQRs) shall be available for inspection by the equipment user. The qualification of welding procedures for sour service shall include hardness testing in accordance with 7.3.3.2, 7.3.3.3 e 7.3.3.4.

na obra, condições de temperaturas de pré-aquecimento e interpasses, tratamento térmico pós-soldagem, gases, características elétricas e técnicas de soldagem.

Dentre todas estas particularidades, as principais são mencionadas nas seções seguintes, obedecendo a uma sequência lógica do processo de qualificação.

3.2 Materiais

Nesta seção serão apresentados os principais materiais utilizados para realizar esta qualificação, bem como sua relação com as normas adotadas para este fim.

Em geral, a seleção dos consumíveis deve ser realizada baseada em condições de projeto. Neste caso, o metal depositado deve, primeiramente, atender as propriedades de resistência mecânica do metal de base; em segundo plano e em mesmo grau de importância, deve garantir resistência à corrosão na raiz da solda em mesma qualidade que o revestimento interno do tubo. Também deve possuir soldabilidade que satisfaça tanto o metal base (baixa liga) quanto o material do revestimento (liga de níquel). O consumível aqui adotado segue a norma ASME II *part C* (2013).

Para dimensionamento dos tubos é necessário que se conheça o projeto, ou seja, os materiais que serão soldados numa determinada obra. Isto porque os códigos de projetos, referências deste trabalho, impõem faixas a serem qualificadas, de modo que as condições de projeto e soldagem da junta de teste retratem similaridade com as juntas de produção. E isto faz todo sentido; não seria plausível, por exemplo, que um procedimento resultante da soldagem de um tubo de teste com espessura de 5 mm qualifique juntas de produção com 50 mm, devido as particularidades de cada condição.

3.2.1 Corpos de prova

Os tubos utilizados para a qualificação deste procedimento de soldagem foram fornecidos na condição temperado e revenido com diâmetro externo e espessura de, aproximadamente, 168 mm e 22 mm, respectivamente. A sua composição química e propriedades mecânicas devem atender aos valores

estabelecidos na norma API 5L (2004), neste caso, para a categoria PSL2. Estes limites podem ser verificados nas tabelas 1 e 2 a seguir.

Tabela 1 – Composição química do API 5L X70

Composição, % (máximo)					
Carbono	Manganês	Fósforo	Enxofre	Titânio	Outros
0,24	1,4	0,025	0,015	0,06	*

* Nióbio, vanádio ou combinação entre eles pode ser usada conforme fabricante. A soma de nióbio, vanádio e titânio não deve exceder 0,15%.

Fonte: Adaptado de API 5L, 2004, p. 36

Tabela 2 – Propriedades mecânicas do API 5L X70

Limite de resistência - ksi [MPa]	82 - 110 [565 - 758]
Tensão de escoamento - ksi [MPa]	70 - 90 [483 - 621]
Alongamento e (% min.)*	$e = 1,944 \frac{A^{0,2}}{U^{0,9}}$

* e = alongamento; A = área do corpo de prova em mm²; U = limite de resistência em MPa

Fonte: Adaptado de API 5L, 2004, p. 37

Após revestimento interno dos tubos pelo processo GTAW *Hot Wire*, as espessuras finais dos corpos de prova CP1 e CP2 foram, respectivamente, de 27,1 mm e 27,5 mm, conforme registrado do relatório de acompanhamento de soldagem da própria EPS / RQPS. Esta diferença de espessura entre os corpos de prova se deve a alguma desigualdade dos cordões de solda depositados no lado interno dos tubos, inerente ao próprio processo de revestimento por soldagem. Para manter um critério mais conservador, a menor espessura foi considerada para a faixa qualificada. A figura 9 retrata os tubos antes da soldagem de união (e após serem revestidos).

Figura 9 – Tubos API 5L X70 utilizados na qualificação do procedimento de soldagem, após revestimento interno com Inconel 625



Fonte: Foto dos autores

A tabela QW-451.1 da norma ASME IX (2013), citada pelas tabelas QW-256 e QW-255 (seção 3.1 deste trabalho), determina que corpos de prova soldados com espessura entre 19 mm e 38 mm qualificam, para a soldagem de produção, espessuras entre 5 mm e o dobro daquela soldada na qualificação. O parágrafo QW-403.6, tratado como uma variável suplementar (variáveis suplementares são definidas no ASME IX como requisitos aplicáveis somente quando há controle de tenacidade, com realização do ensaio de charpy) determina, contudo, que a mínima espessura qualificada será 16 mm ou aquela do tubo de teste (a que for menor). Sendo assim, como este procedimento é aplicável à equipamentos com tenacidade controlada, os tubos de testes soldados com espessura de 27,1 mm qualificam a soldagem em peça de produção com espessuras variando de 16 mm a 54,2 mm.

3.2.2 Consumíveis

Os consumíveis selecionados para a soldagem foram varetas e arames de liga de níquel, com bitolas de, respectivamente, 2,4mm e 1,1mm, ambos com denominação ASME SFA 5.14 ERNiCrMo-3 (Inconel 625). Este é o mesmo consumível utilizado no revestimento interno dos tubos. As Tabelas 3 e 4 indicam, respectivamente, sua composição química e limite de resistência do metal de solda na condição “como soldado”, especificados na norma ASME II *part C*.

Tabela 3 – Composição química do consumível ASME SFA 5.14 ERNiCrMo-3

Composição, % (máximo)	
Carbono	0,1
Manganês	0,5
Ferro	5,0
Fósforo	0,02
Enxofre	0,015
Silício	0,5
Cobre	0,5
Níquel	58,0 min.
Alumínio	0,4
Titânio	0,4
Cromo	20,0 - 23,0
Nióbio + Tântalo	3,15 - 4,15
Molibdênio	8,0 - 10,0
Outros	0,5

Fonte: Adaptado de ASME II *part C*, 2013, p. 378

Tabela 4 – Limite de resistência esperado do metal de solda

Limite de resistência - ksi [MPa]	110 [760]
--	-----------

Fonte: Adaptado de ASME II *part C*, 2013, p. 395

Comparando-se os valores da tabela 2 com a tabela 4, pode ser verificado que o valor limite de resistência do metal depositado atende àqueles especificados para o metal de base. Porém, como o procedimento foi submetido a tratamento térmico pós-soldagem, este dado somente será validado após aprovação nos ensaios de tração previstos na qualificação.

3.2.3 Gás de proteção

O parágrafo QW-408.2 da norma ASME IX (2013), citada pelas tabelas QW-256 e QW-255 (seção 3.1 deste trabalho), determina o capítulo SFA 5.32 da norma ASME II *part C* (2013) como referência para a composição dos gases de proteção de soldagem.

Conforme descrito na seção 3.1 deste trabalho, foi definida a soldagem da raiz e reforço da raiz pelo processo GTAW e, enchimento e acabamento, no processo GMAW.

A norma PETROBRAS N-133 (2015) estabelece que soldagem de ligas de níquel pelos processos GTAW e GMAW deve ser realizada com gás de purga na raiz da solda para proteção da zona fundida e ZTA. Esta proteção deve ser mantida até ser completada a terceira camada de solda ou 6,4 mm, o que for maior, garantindo a ausência de oxigênio.

Para o processo GTAW, esta mesma norma determina que o gás argônio (com teor mínimo de pureza de 99,99%) deve ser usado como gás de proteção e como opção de substituição ao argônio, pode ser empregado a mistura entre argônio e hélio ou somente hélio. Para esta qualificação, o argônio foi escolhido como gás de proteção, pois é o gás mais utilizado industrialmente para soldagem GTAW, tanto para aço carbono, quanto para aços inoxidáveis e ligas de não ferrosos.

A soldagem ocorreu com o corpo de prova fixo e inclinado à 45°, denominado nos conceitos de soldagem como posição 6G. Isto significa que houve soldagem nas posições plana, vertical ascendente e sobre cabeça. Porém o uso desse processo (GMAW) pode apresentar algumas limitações, pois, em comparação ao processo FCAW, por exemplo, em que a formação de escória favorece a soldagem fora de posição, o modo de transferência deve ser limitado ao pulsado. Neste caso, é possível maior controle da poça de fusão, com consequente viabilidade de soldagem nas posições vertical e sobre cabeça. Outro problema aparente é a susceptibilidade de ocorrer falta de fusão, devido à baixa molhabilidade e fluidez das ligas de níquel.

Para o processo GMAW a norma PETROBRAS N-133 (2015) especifica os seguintes gases de proteção para soldagem de ligas de níquel: argônio puro, argônio em mistura com oxigênio (2% máximo de O₂), argônio em mistura com dióxido de carbono (2% máximo de CO₂), argônio em mistura com hidrogênio (1% máximo de H₂). Porém, como resultado de uma análise crítica de engenharia, foi adotado o uso de mistura argônio e hélio, com intuito de não comprometer a penetração e diminuir a suscetibilidade de falta de fusão entre os passes, sobretudo nas posições vertical e sobre cabeça. É possível visualizar, na Figura 10, a diferença de penetração entre cordões depositados utilizando os gases de proteção argônio (esquerda) e hélio (direita).

Figura 10 – Efeito dos gases de proteção argônio e hélio no perfil da solda



Fonte: PRAXAIR, 2016

A escolha da composição dos gases, citada no parágrafo anterior, ainda está embasada pela norma ASME II *part C* (2013) que, no capítulo SFA 5.32, indica, para o processo GMAW, o uso de misturas de argônio e hélio (10 a 50%) para soldagem de metais não ferrosos com modo de transferência pulsado. Nesta qualificação foi determinado a proporção 70-30% (com hélio em menor quantidade), por ser uma composição comercialmente disponível.

3.3 Equipamento de Soldagem

O equipamento utilizado para a soldagem dos corpos de prova foi uma fonte inversora PipePro 450 RFC do fabricante Miller (figura 11). Esta fonte é aplicável para soldagem GMAW, FCAW, SMAW, GTAW e para goivagem a arco. Ela possui algumas funcionalidades que podem ser adotadas para diversas situações: arco pulsado, sinergia, RMD (curto-circuito controlado), dentre outros.

Para o processo GTAW (passes de raiz e reforço), a fonte operou em corrente constante e polaridade direta; para o GMAW, o modo pulsado foi adotado, permitindo a soldagem “fora de posição”.

Figura 11 – Fonte de soldagem Miller PipePro 450 RFC



Fonte: Foto dos autores

3.4 Procedimentos adotados

Nesta seção serão apresentados os principais procedimentos adotados: os requisitos de qualificação, a técnica de soldagem e as amostras para ensaios e testes.

3.4.1 Requisitos de qualificação

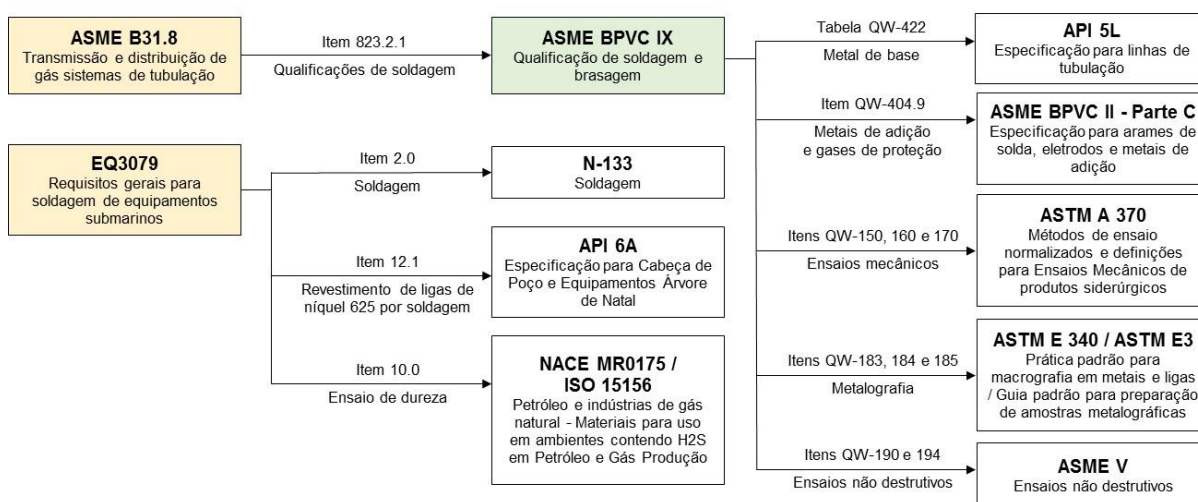
A qualificação do procedimento de soldagem objeto deste trabalho segue uma sequência de requisitos normativos definidos já na concepção do projeto do equipamento a ser fabricado, neste caso, tubulação para extração de petróleo. Para tanto, devido a reponsabilidade e risco na operação do referido equipamento, a empresa responsável tecnicamente pelo projeto, usualmente define as normas e especificações adicionais às normas de projeto da tubulação, ASME B31.8 (2012),

para maior garantia do equipamento. Neste trabalho, a empresa responsável pelo projeto do equipamento é a FMC Technologies.

A FMC Technologies determina a sua especificação interna EQ3079 (2015) – Requisitos gerais para soldagem de equipamentos submarinos.

Desta forma, ao se estabelecer a norma ASME B31.8 (2012) e a especificação EQ3079 (2015) como requisitos mandatórios para projeto e fabricação das tubulações, por consequência também estão definidas demais normas necessárias para execução da qualificação do procedimento de soldagem, pois estas estão referenciadas na norma ASME B31.8 (2012) e especificação EQ3079 (2015). O diagrama mostrado na Figura 12 correlaciona as normas com respectivos itens da qualificação.

Figura 12 – Correlação de normas



Fonte: Elaborado pelos autores

Conforme já informado na seção 3.1 deste trabalho e evidenciado na Figura 12, a norma ASME IX (2013) é código mandatório para qualificação do procedimento de soldagem objeto deste trabalho. Esta norma determina as variáveis essenciais para qualificação do procedimento de soldagem, ou seja, os parâmetros de soldagem que devem ser registrados e controlados durante a soldagem das juntas de produção. As variáveis essenciais do processo de soldagem GTAW e GMAW estão definidas na norma ASME IX (2013) através das tabelas QW-256 e QW-255, respectivamente. O conteúdo destas tabelas (QW-255 e QW-256), contidas na norma, são mostrados nas Tabelas 5 e 6 a seguir.

Tabela 5 – QW-255: variáveis de soldagem para qualificação de procedimento – GMAW

Parágrafo		Resumo das variáveis		Variável		
				Essencial	Suplementar Essencial	Não essencial
QW-402 Articulações	.1	Φ	Projeto do chanfro			X
	.4	-	Cobre-junta			X
	.10	Φ	Abertura de raiz			X
	.11	±	Backing cerâmico			X
QW-403 Metais de base	.5	Φ	Número do grupo		X	
	.6		T Limites		X	
	.8	Φ	T Qualificada	X		
	.9		t Passe >1/2 pol. (13 mm)	X		
	.10		T limites (S. cir. do arco)	X		
	.11	Φ	P - N.º qualificado	X		
QW-404 Metal de adição	.4	Φ	F - Número	X		
	.5	Φ	A - Número	X		
	.6	Φ	Diâmetro			X
	.12	Φ	Classificação		X	
	.23	Φ	Forma do metal de adição	X		
	.24	±	ou Φ Suplementar	X		
	.27	Φ	Elementos de liga	X		
	.30	Φ	t	X		
QW-405 Posições	.32		t Limites (S. cir. do arco)	X		
	.33	Φ	Classificação			X
	.1	+	Posição			X
	.2	Φ	Posição		X	
	.3	Φ	↑ ↓ Soldagem vertical			X
QW-406 Pré-aquecimento	.1		Diminuição de > 100°F (55°C)	X		
	.2	Φ	Manutenção do pré-aquecimento			X
	.3		Aumentar > 100°F (55°C) (IP)		X	
QW-407 Tratamento térmico pós-soldagem (TTAT)	.1	Φ	TTAT	X		
	.2	Φ	TTAT (T & faixa T)		X	
	.4		T Limites	X		
QW-408 Gás	.1	±	Pré ou pós-vazão			X
	.2	Φ	Único, mistura ou %	X		
	.3	Φ	Taxa de fluxo			X
	.5	±	ou Φ purga			X
	.9	-	Purga ou Φ composição	X		
	.10	Φ	Pré ou pós-vazão	X		
QW-409 Características elétricas	.1	>	Aporte térmico		X	
	.2	Φ	Modo de transferência	X		
	.4	Φ	Corrente ou polaridade		X	X
	.8	Φ	Faixa de corrente e tensão			X
QW-410 Técnica	.1	Φ	Trançado/retilíneo			X
	.3	Φ	Tamanho do bocal			X
	.5	Φ	Método de limpeza			X
	.6	Φ	Método de extração da raiz			X
	.7	Φ	Oscilação			X
	.8	Φ	Bico de contato			X
	.9	Φ	Passe único ou passes múltiplos		X	X
	.10	Φ	Único para múltiplos eletrodos		X	X
	.15	Φ	Afastamento do eletrodo			X
	.25	Φ	Manual ou automático			X
	.26	±	Jateamento			X
.64	Φ	Utilização de processos térmicos	X			

Legenda:

+ Adição
- Exclusão

> Aumento
< Diminuição

↑ Ascendente
↓ Descendente

Φ Mudança

Tabela 6 – QW-256: variáveis de soldagem para qualificação de procedimento – GTAW

Parágrafo	Resumo das variáveis			Variável		
				Essencial	Suplementar Essencial	Não essencial
QW-402 Articulações	.1	Φ	Projeto do chanfro			X
	.5	+	Cobre-junta			X
	.10	Φ	Abertura de raiz			X
	.11	±	Backing cerâmico			X
QW-403 Metais de base	.5	Φ	Número do grupo		X	
	.6		T Limites		X	
	.8		T Qualificada	X		
	.11	Φ	P - N.º qualificado	X		
QW-404 Metal de adição	.3	Φ	Tamanho			X
	.4	Φ	F - Número	X		
	.5	Φ	A - Número	X		
	.12	Φ	Classificação		X	
	.14	±	Metal de adição	X		
	.22	±	Utilização de metal de adição			X
	.23	Φ	Forma do metal de adição	X		
	.3	Φ	t	X		
	.33	Φ	Classificação			X
QW-405 Posições	.5	±	Fluxo			X
	.1	+	Posição			X
	.2	Φ	Posição		X	
QW-406 Pré-aquecimento	.3		↑↓ Soldagem vertical			X
	.1		Diminuição de > 100°F (55°C)	X		
QW-407 Tratamento térmico pós-soldagem (TTAT)	.3		Aumentar > 100°F (55°C) (IP)		X	
	.1	Φ	TTAT	X		
	.2	Φ	TTAT (T & faixa T)		X	
	.4		T Limites	X		
QW-408 Gás	.1	±	Pré ou pós-vazão			X
	.2	Φ	Único, mistura ou %	X		
	.3	Φ	Taxa de fluxo			X
	.5	±	ou Φ purga			X
	.9	-	Purga ou Φ composição	X		
	.10	Φ	Pré ou pós-vazão	X		
QW-409 Características elétricas-tiques	.1	>	Aporte térmico		X	
	.3	±	Corrente pulsada			X
	.4	Φ	Corrente ou polaridade		X	X
	.8	Φ	Faixa de corrente e tensão			X
	.12	Φ	Eletrodo de tungstênio			X
QW-410 Técnica	.1	Φ	Trançado/retilíneo			X
	.3	Φ	Tamanho do bocal			X
	.5	Φ	Método de limpeza			X
	.6	Φ	Método de extração da raiz			X
	.7	Φ	Oscilação			X
	.9	Φ	Passe único ou passes múltiplos		X	X
	.10	Φ	Único para múltiplos eletrodos		X	X
	.11	Φ	Tocha	X		
	.15	Φ	Afastamento do eletrodo			X
	.25	Φ	Manual ou automático			X
.26	±	Jateamento			X	
	.64		Utilização de processos térmicos	X		

Legenda:

+ Adição
- Exclusão

> Aumento
< Diminuição

↑ Ascendente
↓ Descendente

Φ Mudança

Todas as variáveis listas nas Tabelas 5 e 6 que possuem algum dos símbolos da legenda a frente do “Resumo das variáveis” e que adicionalmente estão assinaladas nas colunas “Essencial” ou “Suplementar essencial”, devem ser registradas e controladas na qualificação do procedimento de soldagem e durante a soldagem de produção.

Para medição das variáveis de soldagem é necessária utilização de instrumentos de medição calibrados, cujo fundo escala atendam a faixa de trabalho durante a soldagem. Para o acompanhamento da soldagem devem ser utilizados os seguintes instrumentos:

- Termômetro de contato: verificação da temperatura da peça;
- Alicates Volt-Amperímetro: verificação da tensão e corrente de soldagem;
- Cronômetro: contagem do tempo de cada passe soldado;
- Calibre de solda: verificação do chanfro e dimensional da solda (abertura da raiz, ângulo do bisel, nariz, altura do reforço);
- Paquímetro: verificação da espessura do metal base, espessura do metal de adição, comprimento do corpo-de-prova, espessura e largura dos passes;
- Fluxômetro ou Bibímetro: verificação da vazão do gás de proteção.

O aporte térmico (*heat input*), já definido no item 2.1 deste trabalho, é dado pela seguinte equação:

$$heat_input = \frac{V * A * 60}{v}$$

Sendo:

V = tensão [V]

A = corrente [A]

v = velocidade de soldagem [cm/min]

heat input = aporte térmico [J/cm]

O aporte térmico em soldagem é uma variável de fundamental importância para o controle da qualidade da solda, influenciando diretamente na microestrutura

da zona fundida e da zona termicamente afetada pelo calor, nas propriedades mecânicas e na geometria do cordão.

3.4.2 Técnica de Soldagem

As juntas soldadas são compostas por tubos fabricados de aço API 5L X70 (baixa liga de alta resistência) com revestimento interno de Inconel 625 (liga de níquel).

A norma N-133 (2015) estabelece que, quando há acesso apenas pelo lado do substrato como no caso dos tubos desta qualificação, a totalidade do chanfro deve ser preenchida utilizando metal de adição que atenda a resistência à corrosão do revestimento, a resistência mecânica do substrato e que não apresente características físicas muito diferentes quando exposta a temperatura de operação (redução da vida útil pela falha por fadiga térmica). Sendo assim, a técnica de soldagem a ser adotada foi planejada conforme os requisitos das ligas de níquel.

Para soldagem das ligas de níquel, o corte deve ser realizado por plasma, laser, hidrocorte ou disco de corte adequado, não sendo permitido o corte com eletrodo de grafite ou oxicorte. No caso de corte térmico, a ZTA deve ser removida por usinagem ou esmerilhamento. A soldagem deve ser realizada com baixo aporte térmico.

Problemas básicos de soldagem de ligas de níquel podem ser evitados com limpeza dos biseis e varetas com solventes não clorados, proteção contra o vento e umidade, uso de ferramental de apoio específico para as ligas de níquel e higiene funcional com a utilização de luvas e aventais no local de trabalho.

A falta de penetração ou fusão é controlada pelo ligeiro aumento no ângulo do chanfro, redução da altura do nariz e aumento da abertura de raiz. É fundamental o treinamento prévio do soldador, limpeza e remoção da camada de óxido aderente.

A soldagem das ligas de níquel deve ser realizada com passes retílineos. Para redução do risco de trinca de solidificação, alguns detalhes de extrema importância não devem ser negligenciados, tais como: preparação da junta, limpeza superficial, quantidade de material depositado por passe na relação largura/profundidade igual a um, ligeira convexidade dos passes e velocidade de soldagem adequada de forma a evitar poça de fusão em forma de gota.

O risco de trincas de cratera pode ser amenizado através do treinamento dos soldadores quando da extinção do arco e saída da tocha. O perfil deve ser ligeiramente convexo.

É recomendado que se faça o esmerilhamento do final do cordão anterior (“unha”) antes do início do passe seguinte para remoção de possíveis descontinuidades.

Imperfeições como mossas, mordeduras, aberturas de arco e respingos devem ser cuidadosamente eliminadas. As ferramentas de remoção de escória, de limpeza e de corte devem ser compatíveis com as ligas de níquel e utilizadas apenas para estes materiais, não devendo conter compostos de ferro e enxofre (ex: sulfeto de ferro).

A parte do dispositivo auxiliar de montagem em contato ou soldado no equipamento deve ser de material do mesmo “P number” do metal de base segundo a classificação da norma ASME IX (2013) ou então, revestido com o consumível especificado para soldagem do metal de base em depósitos de, no mínimo, duas camadas. Contaminações com carbono (carbonetação seguida de precipitação), ferro e óxido de ferro são prejudiciais à resistência a corrosão. Não é permitido uso de cunhas e martelos de cobre e aço ou calços de chumbo. Contato com andaime industrial provoca exposição ao zinco.

Após conclusão da soldagem e antes do início de operação, sabões e detergentes utilizados em ensaio de bolha e líquido penetrante devem ser removidos, uma vez que podem conter elementos de baixo ponto de fusão, especialmente enxofre.

Para o processo de soldagem GTAW foi utilizado eletrodos de tungstênio com adição de Lantânio.

3.4.3 Amostras para ensaios e testes

Para efetivar a qualificação do procedimento, uma série de ensaios destrutivos e não destrutivos devem ser realizados. Os ensaios básicos são mencionados na tabela QW-451.1 da norma ASME IX (2013): 2 testes de tração e 4 de dobramento lateral; teste de dureza é exigido no item 12.1 da especificação EQ3079 (2015) e no item 7.3.3 da norma NACE MR0175 / ISO 15156-2 (2009); teste

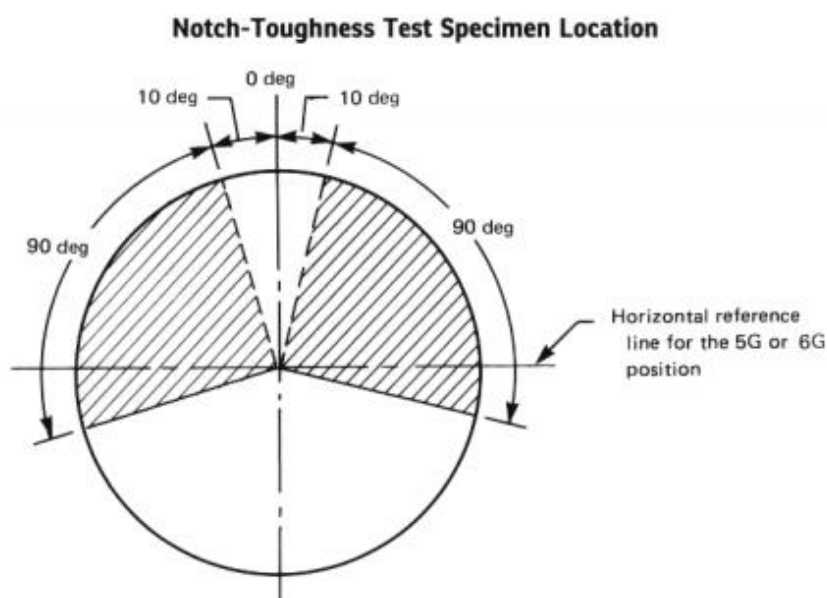
de charpy, análises macrográfica e micrográfica são requeridos, respectivamente, nos itens 5.8 e 5.3 da especificação EQ3079 (2015).

Para garantir que nenhum defeito superficial ou volumétrico afete aos resultados mecânicos, ensaio visual e radiográfico é realizado antes da usinagem dos corpos de prova. Em complemento aos ensaios citados, análises macrográficas e micrográficas também são realizadas neste procedimento.

Devido às condições de operação da tubulação a ser fabricada, detalhadas no capítulo 3 deste trabalho, devem ser realizados ensaios de impacto sob temperatura de -46°C com exigência de energia absorvida mínima individual de 29J e média mínima 42J. Devem ser realizados 15 ensaios de impacto Charpy V, sendo 3 ensaios em cada região analisada: metal base, metal de solda (face), metal de solda (raiz), linha de fusão +0,4mm (face) e linha de fusão +2,0mm (raiz). Os ensaios de impacto foram realizados conforme API 6A (2010) e ASTM A370 (2013).

Para realização de análises, testes e ensaios destrutivos, é necessária a divisão dos corpos de prova soldados em amostras específicas para cada ensaio. Para soldagem na posição 6G, a localização dos corpos de prova de charpy (ver Figura 13) é definida na figura QW-463.1(f) da norma ASME IX (2013).

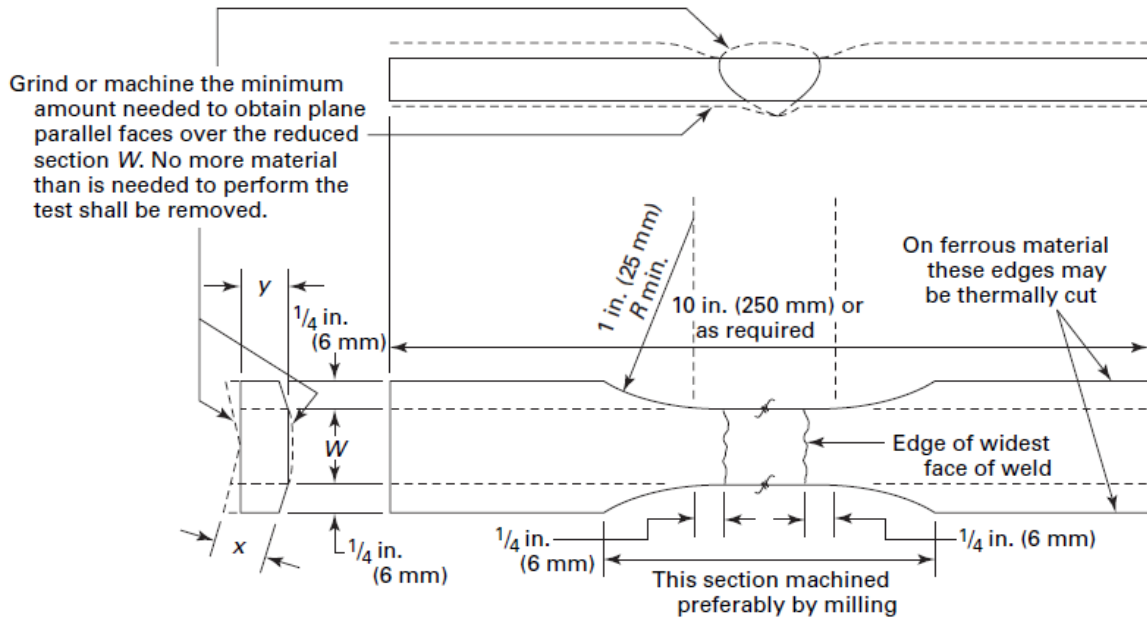
Figura 13 – Local de retirada dos corpos de prova para ensaio de charpy



Fonte: ASME IX, 2013, p. 214

As amostras para o ensaio de tração devem ser preparadas conforme figura QW-462.1(b) da norma ASME IX (2013), representada conforme Figura 14.

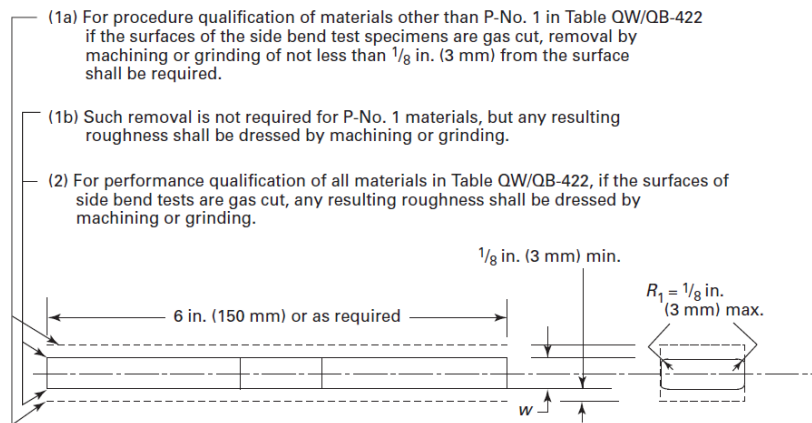
Figura 14 – Corpo de prova para ensaio de tração em tubo



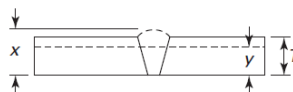
Fonte: ASME IX, 2013, p. 191

As amostras para o ensaio de dobramento lateral devem ser preparadas conforme figura QW-462.2 da norma ASME IX (2013), representada na Figura 15.

Figura 15 – Corpo de prova para ensaio de dobramento



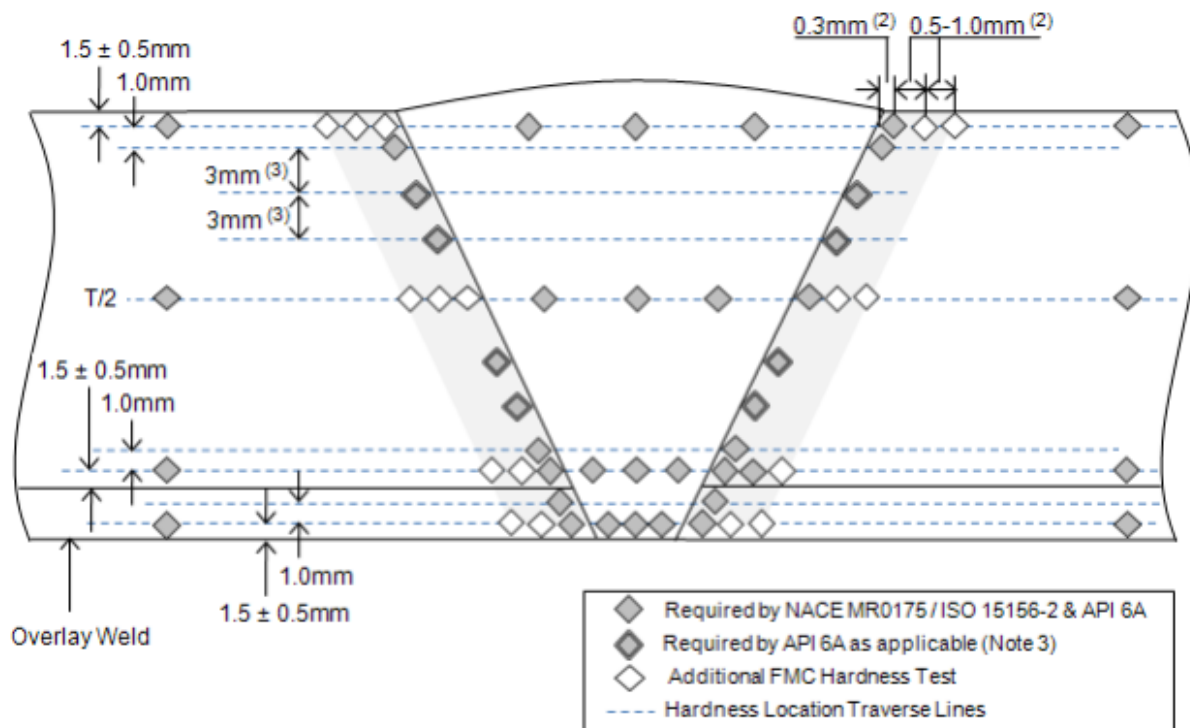
T, in. (mm)	y, in. (mm)	w, in. (mm)	
		P-No. 23, F-No. 23, F-No. 26, or P-No. 35	All other metals
$\frac{3}{8}$ to $< 1\frac{1}{2}$ (10 to < 38)	T [Note (1)]	$\frac{1}{8}$ (3)	$\frac{3}{8}$ (10)
$\geq 1\frac{1}{2}$ (≥ 38)	Notes (1) and (2)	$\frac{1}{8}$ (3)	$\frac{3}{8}$ (10)



Fonte: ASME IX, 2013, p. 194

O apêndice B da especificação EQ3079 (2015) determina a realização do teste de dureza conforme norma NACE MR0175 / ISO 15156-2 (2009), porém, solicita ainda, medições adicionais à esta norma. A metodologia utilizada para o teste de dureza é ilustrada na Figura 16.

Figura 16 – Pontos de dureza Vickers para solda de chanfro com revestimento

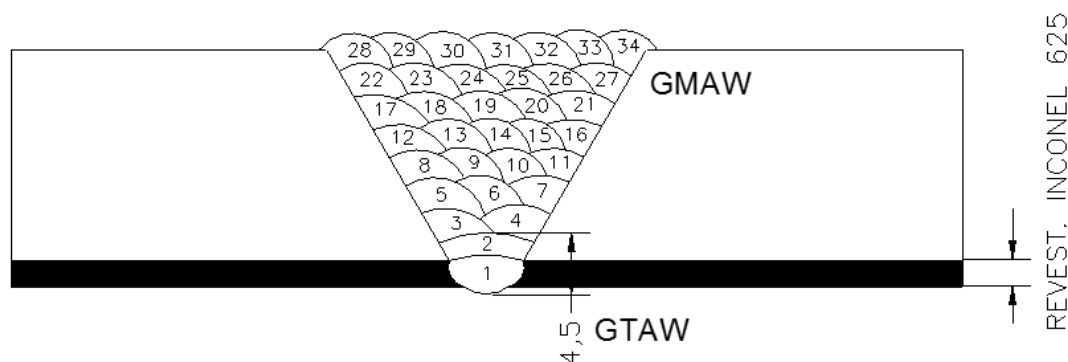


Fonte: EQ3079, 2015, p. 27

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

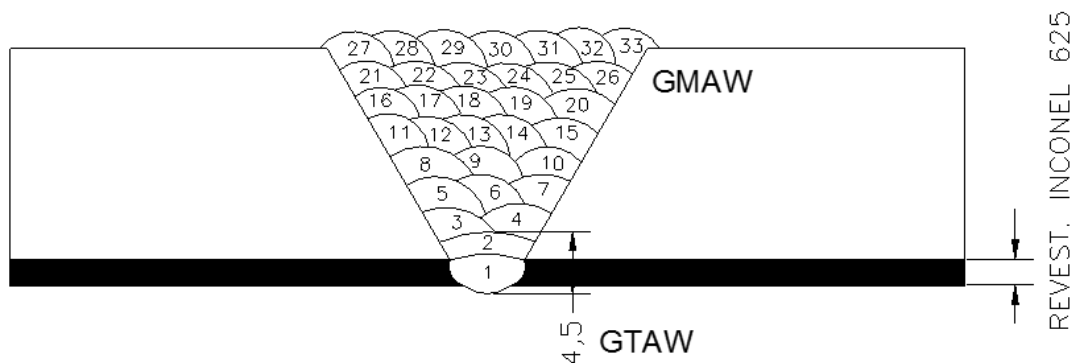
As figuras 17 e 18 trazem os esboços dos perfis das seções transversais das soldas dos CP1 e CP2, respectivamente.

Figura 17 – Seção transversal da solda do corpo de prova CP1 (esquemático)



Fonte: Criado pelos autores

Figura 18 – Seção transversal da solda do corpo de prova CP2 (esquemático)



Fonte: Criado pelos autores

Os principais parâmetros registrados durante a soldagem dos corpos de prova estão descritos nas Tabelas 7 e 8, respectivamente, para o CP1 e CP2. Os dois primeiros passes dos corpos de prova (raiz e reforço da raiz) foram depositados pelo processo GTAW e os demais, GMAW (enchimento e acabamento), conforme pode ser constatado pelas Figuras 17 e 18 e pelas duas primeiras linhas das Tabelas 7 e 8. Um ponto importante a ser observado é a diferença de *heat input* registrada para os dois primeiros passes em comparação com os de enchimento e acabamento, para ambos os corpos de prova, sobretudo no passe de raiz (primeiro cordão). Estes

elevados valores de energia de soldagem foram fortemente influenciados pela velocidade de soldagem. Como citado na seção 3.4 deste trabalho (equação para cálculo de energia de soldagem), a diminuição da velocidade de soldagem (denominador da equação) tende a aumentar o resultado do *heat input*. O primeiro passe de solda em cada CP experimentou valores inferiores em até 8 vezes deste parâmetro em comparação com alguns passes depositados pelo processo GMAW (passes 3 e 5 do CP1, por exemplo). E a grande explicação para as baixíssimas velocidades alcançadas pelos soldadores no passe de raiz é que, além de já ser uma característica inerente ao processo GTAW, nesta ocasião deve ser preenchido a abertura da junta (geralmente varia entre 4 e 6mm) e numa região em que não há material para ancorar o metal a ser depositado. Com isso, o soldador deve adotar a técnica de soldagem trançado, alcançando tempos demasiadamente superiores que dos demais passes. Outra observação é que, geralmente, o acabamento é executado com passes filetados, com velocidade de soldagem ligeiramente maior e parâmetros elétricos menores, resultando em menores valores de energia de soldagem.

Tabela 7 – Parâmetros de soldagem do corpo de prova CP1

Passe nº	Processo	Consumível	Ø (mm)	Corrente		Tensão (V)	Temperatura (°C)	Largura do Cordão (mm)	Velocidade de Soldagem (cm/min.)	Heat Input (J/cm)
				Tipo	Valor (A)					
1º	GTAW	ER NiCrMo-3	2,4	CC-	95 / 97	10 / 12	226	9	3,2	21.825
2º	GTAW	ER NiCrMo-3	2,4	CC-	148 / 156	10 / 12	234	9,2	7,9	14.218
3º	GMAW	ER NiCrMo-3	1,1	CC+	109 / 117	23 / 24	221	8	28,4	5.932
4º	GMAW	ER NiCrMo-3	1,1	CC+	118 / 123	22 / 24	236	9	17,0	10.419
5º	GMAW	ER NiCrMo-3	1,1	CC+	109 / 115	24 / 26	265	9	29,1	6.165
6º	GMAW	ER NiCrMo-3	1,1	CC+	109 / 115	23 / 25	270	9,1	27,4	6.296
7º	GMAW	ER NiCrMo-3	1,1	CC+	89 / 100	24 / 25	285	9,1	24,6	6.098
8º	GMAW	ER NiCrMo-3	1,1	CC+	109 / 112	24 / 25	301	10	24,2	6.942
9º	GMAW	ER NiCrMo-3	1,1	CC+	108 / 112	23 / 24	303	11	25,1	6.425
10º	GMAW	ER NiCrMo-3	1,1	CC+	108 / 113	23 / 24	310	10	25,9	6.283
11º	GMAW	ER NiCrMo-3	1,1	CC+	106 / 110	23 / 25	318	9	17,7	9.322
12º	GMAW	ER NiCrMo-3	1,1	CC+	108 / 112	24 / 25	320	9	24,3	6.914
13º	GMAW	ER NiCrMo-3	1,1	CC+	120 / 140	23 / 24	323	9	22,3	9.040
14º	GMAW	ER NiCrMo-3	1,1	CC+	130 / 149	22 / 23	322	10	23,3	8.825
15º	GMAW	ER NiCrMo-3	1,1	CC+	110 / 112	22 / 24	321	11	26,0	6.203
16º	GMAW	ER NiCrMo-3	1,1	CC+	109 / 112	22 / 25	323	10	20,7	8.116
17º	GMAW	ER NiCrMo-3	1,1	CC+	110 / 112	23 / 26	340	10	23,0	7.597
18º	GMAW	ER NiCrMo-3	1,1	CC+	111 / 115	24 / 25	338	11	26,2	6.584
19º	GMAW	ER NiCrMo-3	1,1	CC+	109 / 111	23 / 24	330	12	23,7	6.744
20º	GMAW	ER NiCrMo-3	1,1	CC+	107 / 112	23 / 25	221	12	22,3	7.534
21º	GMAW	ER NiCrMo-3	1,1	CC+	103 / 110	23 / 26	228	12	17,6	9.750
22º	GMAW	ER NiCrMo-3	1,1	CC+	109 / 110	23 / 25	243	12	22,0	7.500
23º	GMAW	ER NiCrMo-3	1,1	CC+	109 / 115	22 / 25	252	11	20,6	8.374
24º	GMAW	ER NiCrMo-3	1,1	CC+	93 / 110	21 / 24	320	11	18,3	8.656
25º	GMAW	ER NiCrMo-3	1,1	CC+	109 / 120	23 / 24	254	10	18,7	9.241
26º	GMAW	ER NiCrMo-3	1,1	CC+	107 / 111	24 / 25	270	10	24,9	6.687
27º	GMAW	ER NiCrMo-3	1,1	CC+	107 / 113	23 / 25	271	13	20,6	8.228
28º	GMAW	ER NiCrMo-3	1,1	CC+	93 / 109	23 / 25	241	13	15,7	10.414
29º	GMAW	ER NiCrMo-3	1,1	CC+	110 / 117	24 / 26	251	12	16,2	11.267
30º	GMAW	ER NiCrMo-3	1,1	CC+	90 / 110	21 / 23	281	12	17,0	8.929
31º	GMAW	ER NiCrMo-3	1,1	CC+	96 / 115	22 / 26	273	11	17,3	10.370
32º	GMAW	ER NiCrMo-3	1,1	CC+	115 / 129	23 / 26	268	11	18,7	10.761
33º	GMAW	ER NiCrMo-3	1,1	CC+	117 / 130	24 / 26	265	10	20,6	9.845
34º	GMAW	ER NiCrMo-3	1,1	CC+	90 / 97	20 / 23	219	11	19,4	6.900

Tabela 8 – Parâmetros de soldagem do corpo de prova CP2

Passe nº	Processo	Consumível	Ø (mm)	Corrente		Tensão (V)	Temperatura (°C)	Largura do Cordão (mm)	Velocidade de Soldagem (cm/min.)	Heat Input (J/cm)
				Tipo	Valor (A)					
1º	GTAW	ER NiCrMo-3	2,4	CC	89 / 104	9 / 11	213	8,5	3,2	21.450
2º	GTAW	ER NiCrMo-3	2,4	CC	138 / 152	10 / 12	206	10	6,9	15.861
3º	GMAW	ER NiCrMo-3	1,1	CC	120 / 142	25 / 27	225	9	16,7	13.775
4º	GMAW	ER NiCrMo-3	1,1	CC	92 / 116	22 / 24	228	9,5	17,1	9.768
5º	GMAW	ER NiCrMo-3	1,1	CC	129 / 176	25 / 27	223	11	15,1	18.882
6º	GMAW	ER NiCrMo-3	1,1	CC	118 / 126	24 / 26	244	13	15,9	12.362
7º	GMAW	ER NiCrMo-3	1,1	CC	123 / 132	23 / 25	237	12	13,7	14.453
8º	GMAW	ER NiCrMo-3	1,1	CC	119 / 125	25 / 26	250	13,5	13,6	14.338
9º	GMAW	ER NiCrMo-3	1,1	CC	110 / 124	26 / 27	260	12,5	13,6	14.771
10º	GMAW	ER NiCrMo-3	1,1	CC	118 / 129	26 / 27	244	12	14,6	14.314
11º	GMAW	ER NiCrMo-3	1,1	CC	125 / 133	25 / 26	253	10	19,0	10.920
12º	GMAW	ER NiCrMo-3	1,1	CC	123 / 175	25 / 26	257	11	18,6	14.677
13º	GMAW	ER NiCrMo-3	1,1	CC	132 / 191	25 / 26	269	10	19,8	15.048
14º	GMAW	ER NiCrMo-3	1,1	CC	123 / 128	24 / 25	276	13	16,6	11.566
15º	GMAW	ER NiCrMo-3	1,1	CC	126 / 131	24 / 25	271	10	18,1	10.856
16º	GMAW	ER NiCrMo-3	1,1	CC	125 / 130	24 / 25	277	11	17,2	11.337
17º	GMAW	ER NiCrMo-3	1,1	CC	123 / 131	25 / 26	264	10	18,1	11.291
18º	GMAW	ER NiCrMo-3	1,1	CC	125 / 132	24 / 25	257	10	16,5	12.000
19º	GMAW	ER NiCrMo-3	1,1	CC	118 / 127	25 / 27	263	9	20,4	10.085
20º	GMAW	ER NiCrMo-3	1,1	CC	102 / 113	25 / 26	254	10	19,0	9.278
21º	GMAW	ER NiCrMo-3	1,1	CC	146 / 158	24 / 26	242	11	20,3	12.142
22º	GMAW	ER NiCrMo-3	1,1	CC	135 / 147	24 / 25	251	13	20,7	10.652
23º	GMAW	ER NiCrMo-3	1,1	CC	126 / 134	23 / 25	241	11	21,6	9.306
24º	GMAW	ER NiCrMo-3	1,1	CC	134 / 142	24 / 26	289	10	23,1	9.590
25º	GMAW	ER NiCrMo-3	1,1	CC	128 / 137	24 / 25	308	10	20,7	9.928
26º	GMAW	ER NiCrMo-3	1,1	CC	125 / 134	24 / 25	312	10	17,9	11.229
27º	GMAW	ER NiCrMo-3	1,1	CC	92 / 110	22 / 24	223	11	18,8	8.426
28º	GMAW	ER NiCrMo-3	1,1	CC	113 / 130	24 / 26	217	11	21,4	9.477
29º	GMAW	ER NiCrMo-3	1,1	CC	112 / 128	24 / 26	246	9	22,9	8.720
30º	GMAW	ER NiCrMo-3	1,1	CC	138 / 147	23 / 26	245	13	22,7	10.102
31º	GMAW	ER NiCrMo-3	1,1	CC	117 / 126	23 / 24	238	11	22,2	8.173
32º	GMAW	ER NiCrMo-3	1,1	CC	113 / 125	23 / 24	264	10	25,7	7.004
33º	GMAW	ER NiCrMo-3	1,1	CC	107 / 119	24 / 26	250	10	16,8	11.050

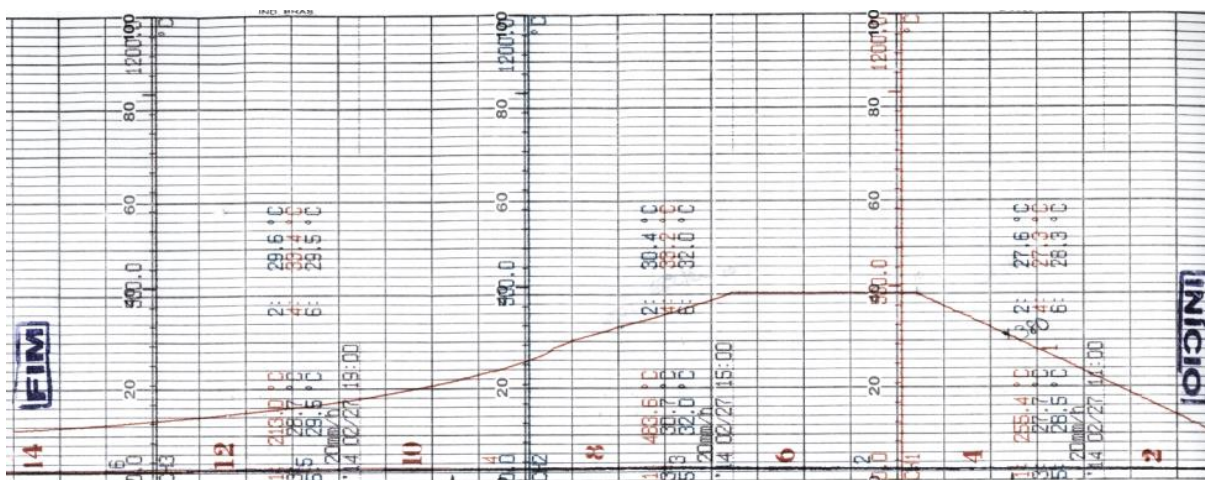
Os corpos de prova foram submetidos a tratamento térmico pós-soldagem para alívio de tensões. Este tratamento foi realizado em forno com os seguintes parâmetros:

- Velocidade média de aquecimento: 100°C/h;
- Temperatura média e tempo de patamar: 480°C durante 02:00h;

- Velocidade média de resfriamento: 74°C/h;
- Tempo total de ciclo partindo da temperatura inicial 380°C até a temperatura final 400°C: 04:05h;
- Tempo de ciclo considerando a temperatura de 120°C para início e temperatura de 132°C para término do tratamento térmico: 13:00h.
- Termopar tipo K, apoiado sobre peça.

A Figura 19 mostra o ciclo térmico registrado durante o tratamento térmico dos corpos de prova. É possível observar que foi experimentado um comportamento satisfatório e esperado para esta etapa: rampa de aquecimento suave, garantindo uniformidade de encharque do material; patamar bem definido e de acordo com a temperatura desejada, sem apresentar oscilações que pudessem comprometer o resultado e, por fim, resfriamento lento.

Figura 19 – Carta gráfica do tratamento térmico pós-soldagem dos corpos de prova



4.1 Ensaios não destrutivos

Após a soldagem, os corpos de prova foram avaliados (ensaio visual) por um Inspetor de Soldagem Nível 1. Por não apresentarem nenhuma trinca aparente, mordeduras, reforço excessivo ou insuficiente, falta de penetração na raiz, dentre outros defeitos que pudessem reprová-los, os mesmos foram considerados aprovados. O aspecto visual do CP1 pode ser verificado na Figura 20.

Figura 20 – Aspecto visual do CP1 pós soldagem



Fonte: Foto dos autores

O ensaio radiográfico nos corpos de prova revelou a presença de porosidade no CP2, porém em nível aceitável com os padrões normativos; não houve qualquer descontinuidade no CP1. O laudo de aprovação do ensaio foi dado por um Inspetor de Radiografia Nível 2.

4.2 Ensaio destrutivos

O teste de dureza foi realizado em uma seção transversal à solda (Figura 21). O laudo foi considerado aprovado, de acordo com resultados (ver Tabela 9). É possível perceber que o metal de solda experimentou os maiores valores de dureza, seguido da ZTA e do metal de base, sobretudo nos passes de acabamento, que não sofreram efeito do passe de revenimento.

Figura 21 – Seção transversal da solda ensaiada por dureza Vickers HV10



Fonte: Dados de pesquisa

Tabela 9 – Resultados dos ensaios de dureza

Identificação	Dureza (HV10)				
	Lado esquerdo		Metal fundido	Lado direito	
	Metal base	ZTA		ZTA	Metal base
CP1 Linha Superior	197	210 / 203 / 195 212 / 219 / 206 236 / 225 / 196 220 / 221 / 219 231 / 227 / 206	299 264 268	219 / 222 / 222 231 / 216 / 214 204 / 198 / 189 217 / 205 / 210 218 / 198 / 227	187
CP1 Linha Média	199		258 246 252		192
CP1 Linha Inferior	180		267 277 270		196
CP1 Clad	259	248 / 261 263 / 233	258 241 265	267 / 251 256 / 300	270

Os testes de tração também foram considerados satisfatórios. Estes foram realizados em seções transversais do CP1, extraídas das zonas do corpo de prova localizadas nas posições plana e sobre cabeça e denominadas como “12 horas” e “6 horas”, em referência a posições do relógio. Os dados referentes a este ensaio encontram-se descritos na Tabela 10. É possível perceber que, para todos os casos, houve ruptura no metal de base e que, além disso, os valores de limite de resistência experimentados atendem ao especificado para o material de base (como

já era esperado). Este fato pode ser constatado comparando os valores encontrados na Tabela 10 com os valores teóricos do tubo, citados na Tabela 2.

Tabela 10 – Resultados dos ensaios de tração

Corpo de prova	Área (mm ²)	Carga total para ruptura (kgf)	Limite de resistência (MPa)	Local da ruptura
CP1 – Face – 6 horas	238	15.167	624	Metal de Base
CP1 – Raiz – 6 horas	159	10.818	669	Metal de Base
CP1 – Face – 12 horas	237	15.077	624	Metal de Base
CP1 – Raiz – 12 horas	204	14.246	684	Metal de Base

Após ensaio de dobramento lateral, os corpos de prova não apresentaram indicações (trincas, indícios de falta de fusão, porosidades, dentre outros), o que resultou em aprovação dos testes. Os dados referentes a este ensaio encontram-se na tabela 11.

Tabela 11 – Resultados dos ensaios de dobramento lateral

Corpo de prova	Comprimento (mm)	Espessura (mm)	Largura (mm)	Avaliação
CP1.1	150	9,6	26,63	Livre de indicações
CP1.2	150	9,61	27,17	Livre de indicações
CP1.3	150	9,65	27,52	Livre de indicações
CP1.4	150	9,68	27,53	Livre de indicações

De uma forma geral, pode-se afirmar que as regiões testadas pelos ensaios de charpy apresentaram excelentes resultados. Embora a temperatura de teste tenha sido -46°C, a menor média experimentada foi de 126J. O metal de base, por apresentar microestrutura de grão fino, proveniente do tratamento térmico de beneficiamento, durante sua fabricação, registrou boa tenacidade, com média de 192J. O metal de solda, como já era esperado, experimentou a maior média, 198J. Os resultados dos ensaios de impacto são apresentados na Tabela 12.

Tabela 12 – Resultados dos ensaios de charpy

Corpo de prova	Localização do entalhe	Temperatura do teste (°C)	Valores encontrados (J)	Média (J)
CP1 / CP2 / CP3	Metal de Base	-46°C	195 / 195 / 185	192
CP1 / CP2 / CP3	Metal de solda (face)	-46°C	196 / 200 / 199	198
CP1 / CP2 / CP3	LF +0,4mm (face)	-46°C	107 / 147 / 210	155
CP1 / CP2 / CP3	Metal de solda (raiz)	-46°C	83 / 139 / 156	126
CP1 / CP2 / CP3	LF +2,0mm (raiz)	-46°C	187 / 184 / 181	184

4.3 Análises macrográfica e micrográfica

As macrografias das seções transversais dos CP1 e CP2 podem ser observadas nas Figuras 22 e 23, respectivamente e, suas micrografias, nas Figuras 24 a 28.

O teste macrográfico, neste caso, tem uma importante função: avaliar a seção transversal da solda, analisando técnicas de deposição, perfil de penetração, acabamento e penetração na raiz, por exemplo. Isto permite identificar possíveis falhas e instruir os soldadores de modo a aprimorar sua técnica de soldagem.

Figura 22 – Aspecto macrográfico da junta soldada CP1 – Ataque de Nital 5%



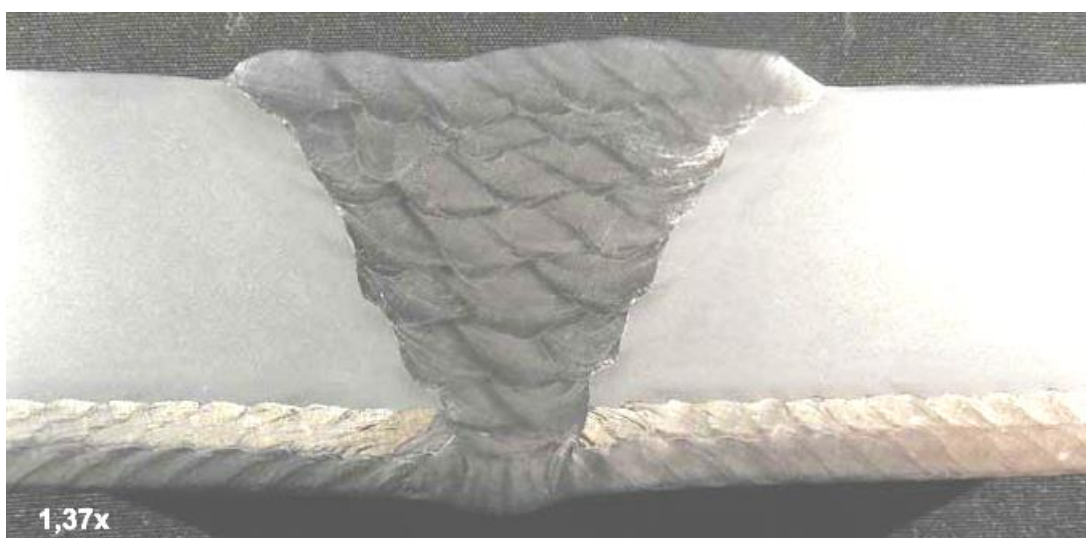
Fonte: Dados de pesquisa

No CP1 é possível perceber que o perfil de penetração, principalmente no lado esquerdo da macrografia, não é o ideal, embora não seja possível identificar

visualmente alguma falta de fusão; este perfil é ocasionado, sobretudo, pelo incorreto ângulo de ataque da tocha. Também é aconselhado que não se avance sobre o metal de base tal como no último passe do acabamento, observado no canto superior da Figura 22.

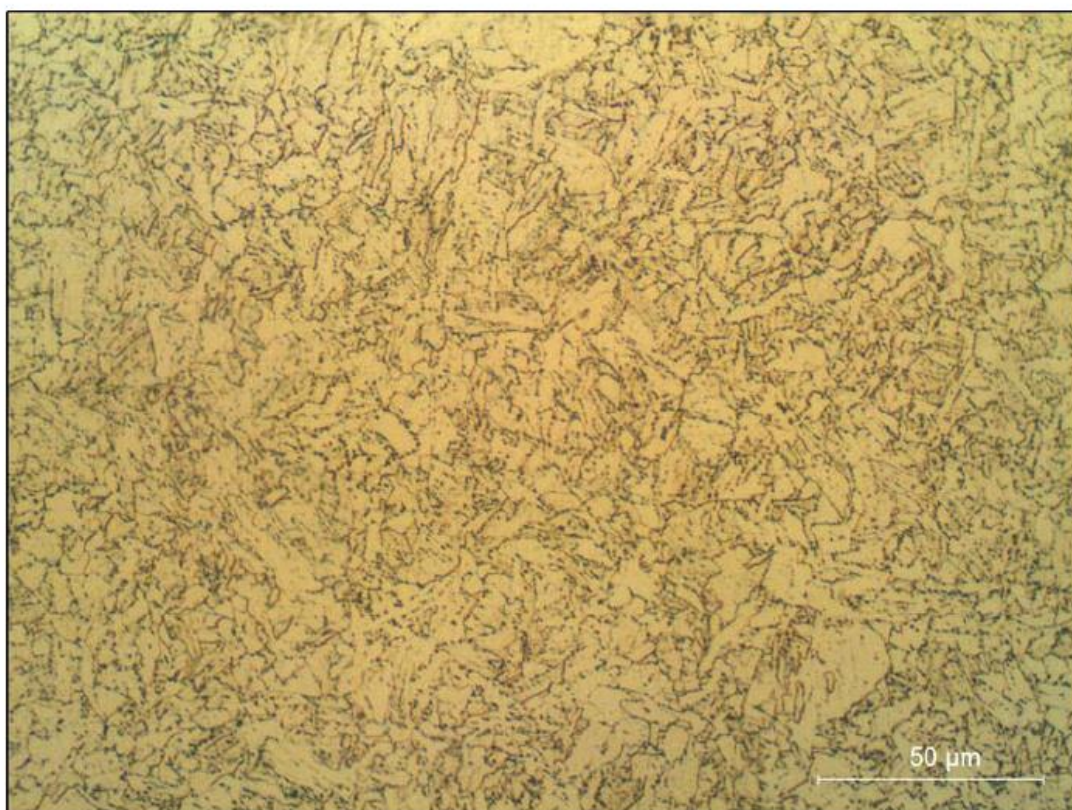
O CP2 (Figura 23), por sua vez, experimentou bom perfil de penetração, com fusão adequada ao longo da espessura do tubo; não houve avanço excessivo no metal de base nos últimos passes do acabamento.

Figura 23 – Aspecto macrográfico da junta soldada CP2 – Ataque de Nital 5%



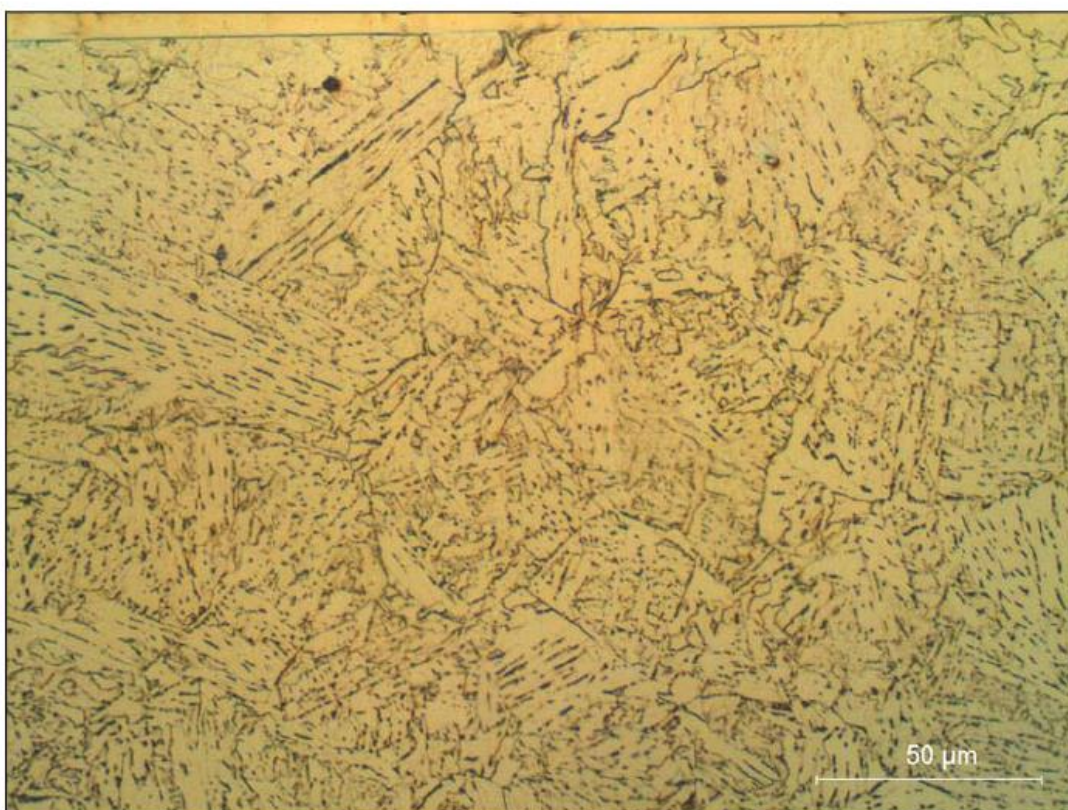
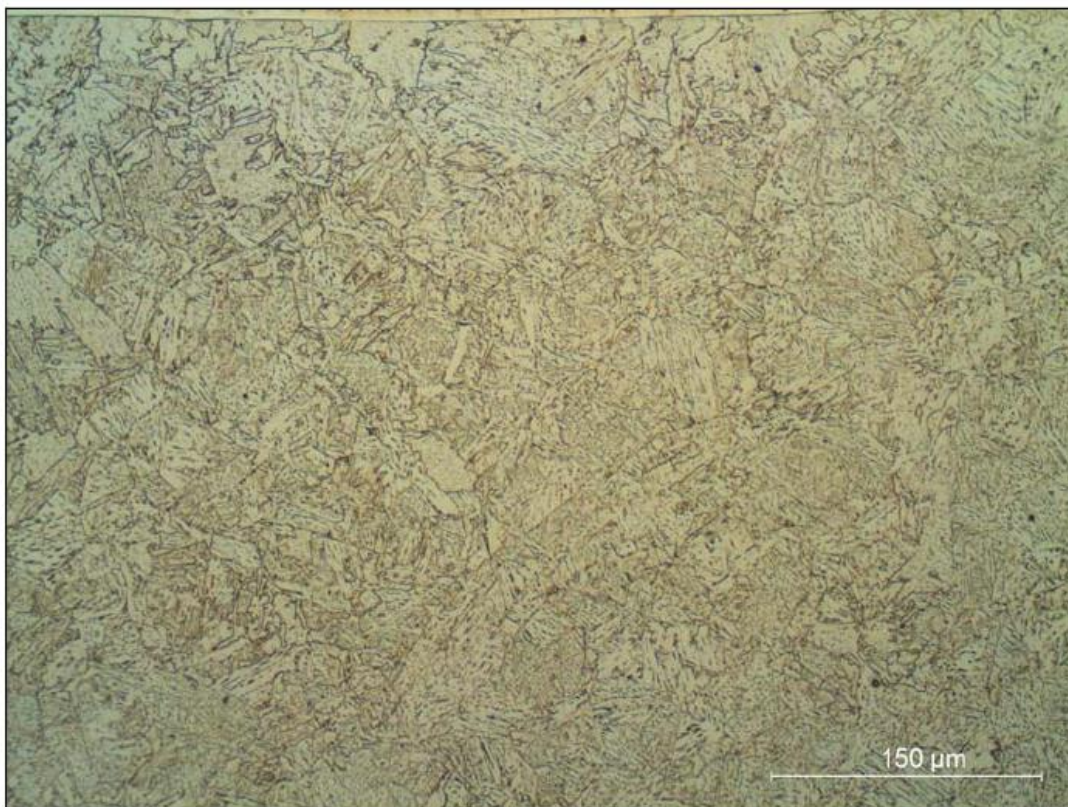
Fonte: Dados de pesquisa

Figura 24 – Aspecto microestrutural do metal base – Ataque de Nital 2%



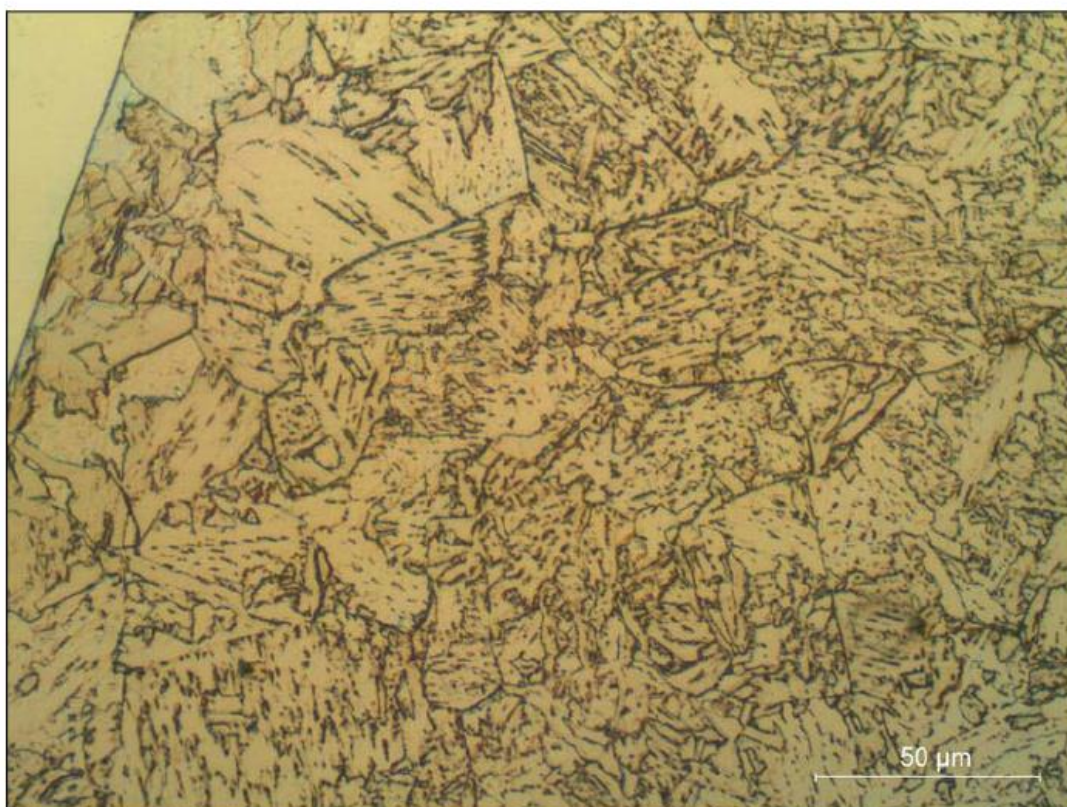
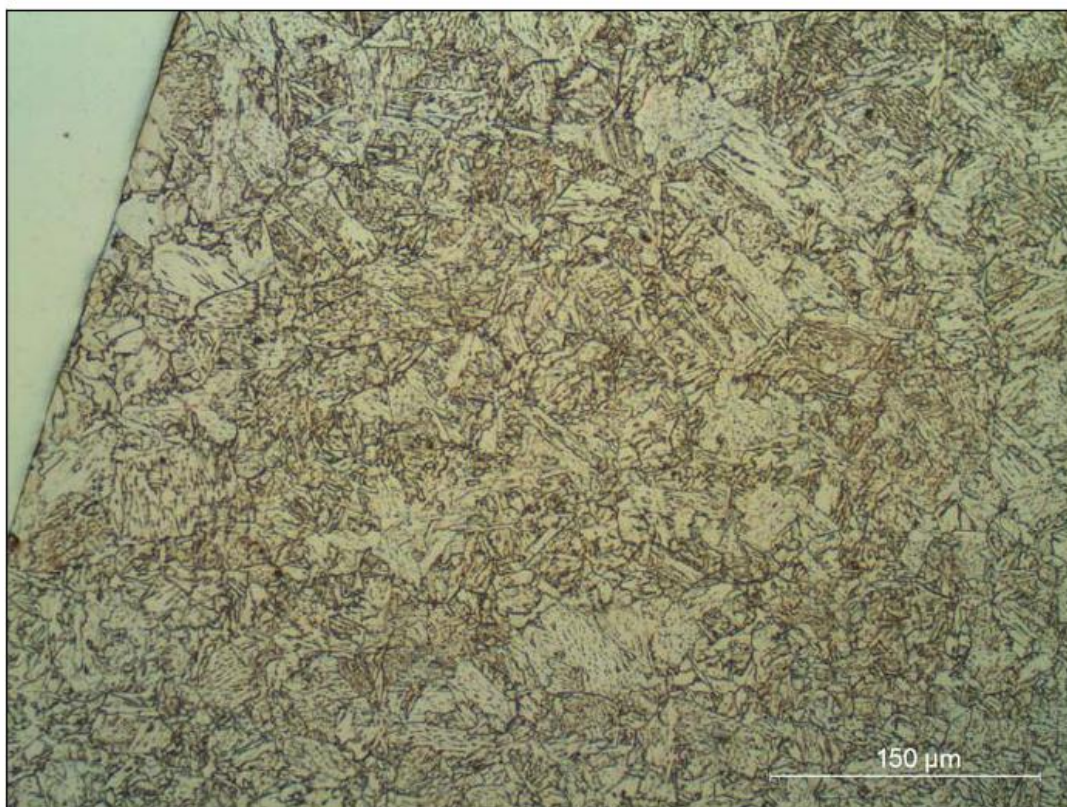
Fonte: Dados de pesquisa

Figura 25 – Aspecto microestrutural ZTA (face) – Ataque de Nital 2%



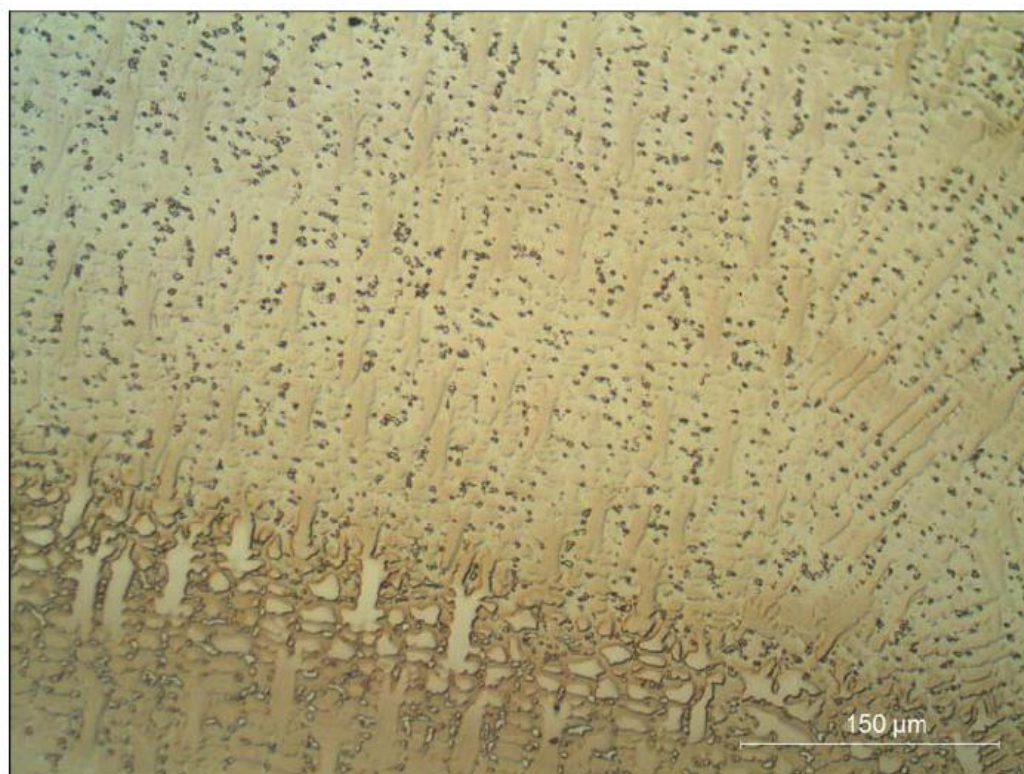
Fonte: Dados de pesquisa

Figura 26 – Aspecto microestrutural ZTA (raiz) – Ataque de Nital 2%

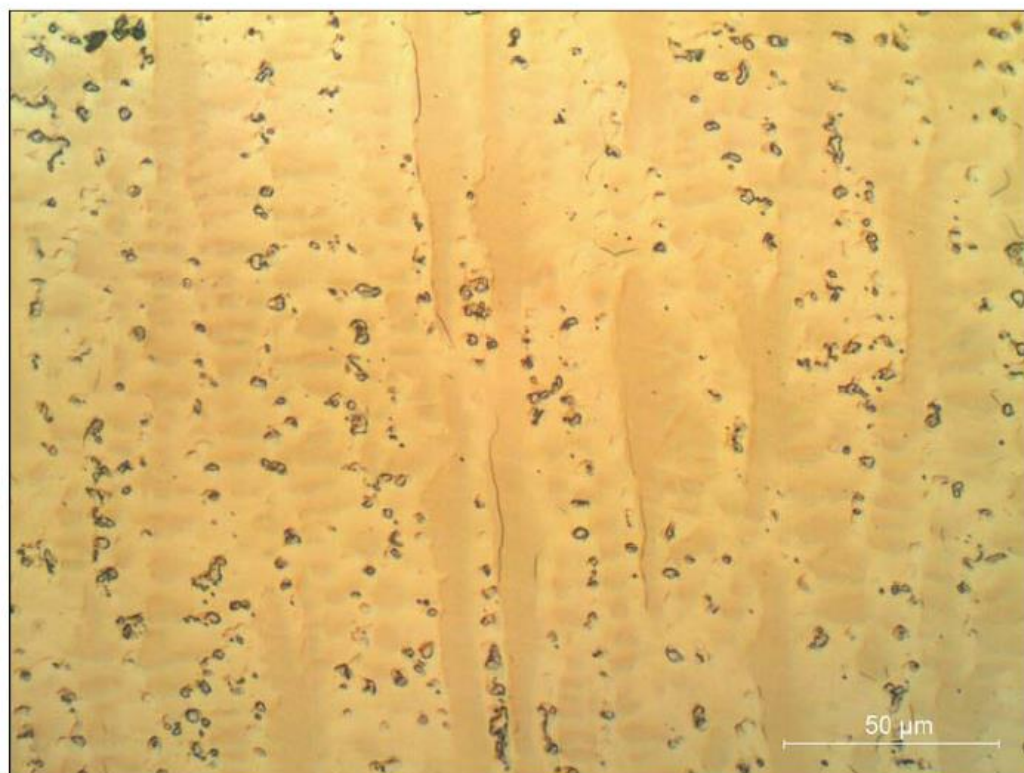


Fonte: Dados de pesquisa

Figura 27 – Aspecto microestrutural no metal de solda (último passe) – Ataque de Nital 5%



Face / Face

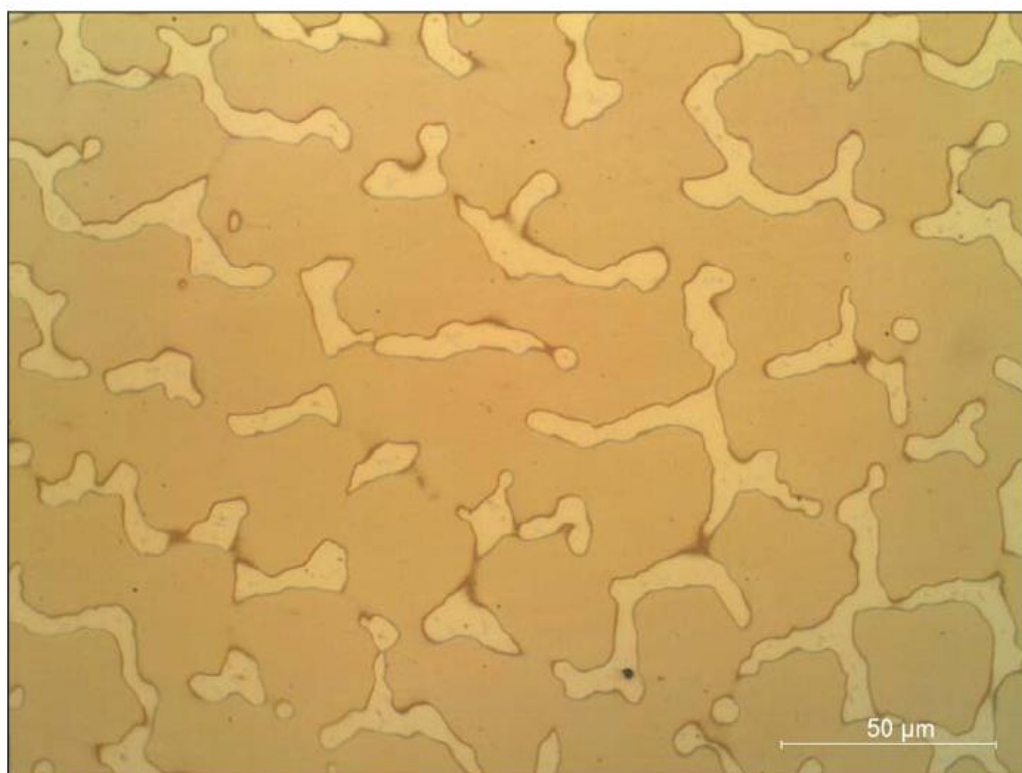


Fonte: Dados de pesquisa

Figura 28 – Aspecto microestrutural no metal de solda (raiz) – Ataque de Nital 5%



Raiz / Root



Fonte: Dados de pesquisa

Os resultados da análise macrográfica e micrográfica estão apresentados na Tabela 13, baseado nas Figuras 24 a 28.

Tabela 13 – Microestruturas encontradas

Figura	Região / CP	Ataque (Nital)	Resultados
24	Metal base	2%	Microestrutura ferrítica bainítica
25 e 26	ZTA	2%	Microestrutura bainítica
27 e 28	Metal de solda	5%	Microestrutura com matriz austenítica

A microestrutura da zona fundida indica que esta é constituída predominantemente por austenita, como esperado para uma liga a base de níquel. Foi observada a presença de um segundo constituinte que foi identificado, provavelmente, como ferrita (CCC). A presença deste deve resultar dos teores relativamente elevados de cromo nesta liga. Porém, como a pesquisa aprofundada da micrografia da zona fundida não constitui objetivo principal deste trabalho, sugerimos para trabalhos futuros um estudo da diluição, composição química e definição exata das fases presentes nesta região.

4.4 Considerações finais

Diante dos resultados expostos nas seções 4.1, 4.2 e 4.3, é possível concluir que os requerimentos para aprovação deste procedimento de soldagem foram cumpridos e que a EPS foi satisfatoriamente qualificada.

Não foi possível identificar nenhum defeito através do ensaio visual; as radiografias revelaram porosidade em níveis aceitáveis no CP2; todos os testes de tração experimentaram ruptura no metal base e com valores de limite de resistência satisfatórios; os corpos de prova de dobramento lateral não apresentaram indicações; os valores registrados nos ensaios de charpy à -46°C revelaram boa tenacidade do metal de base, ZTA e metal de solda a esta temperatura e os valores de dureza atenderam aos padrões estabelecidos para o projeto.

Caso algum teste tivesse sido reprovado, a norma prevê ensaios adicionais em caráter de reteste; se estes, por sua vez, resultassem de novas reprovações, outros corpos de prova deveriam ser novamente soldados, iniciando-se todo o

processo de qualificação. Em situações mais críticas, envolvendo materiais de difícil soldabilidade ou aqueles que requerem cuidados maiores, é aconselhado um estudo de engenharia, avaliando as possíveis causas das reprovações e tomando as devidas medidas para se obter o resultado satisfatório. Estas medidas vão desde uma reavaliação de temperaturas de pré-aquecimento ou interpasse, por exemplo, até uma possível substituição dos consumíveis ou processos de soldagem.

5 CONCLUSÕES

Nesta monografia, a qualificação de uma especificação para a soldagem de tubos de aço API 5L X70cladeados internamente com Inconel 625 foi apresentada e analisada. As principais conclusões obtidas foram:

1. O metal de adição usado (ERNiCrMo-3) e as condições de soldagem adotadas permitiram obter juntas isentas de descontinuidades e com propriedades mecânicas em conformidade com a norma do metal de base (API 5L);
2. Os valores de dureza na ZTA foram inferiores a 236 HV, indicando que esta deve ser imune a ambientes contendo H₂S;
3. Os testes de charpy revelaram que o material se demonstrou tenaz à -46°C;
4. A análise microestrutural da ZTA não indicou a presença de martensita, o que era esperado considerando os valores de dureza encontrados;
5. A microestrutura da zona fundida revelou uma matriz essencialmente austenítica (como era esperado devido ao elevado teor de níquel do consumível adotado) e também outras fases ou constituintes, que não foram detalhados neste trabalho.

REFERÊNCIAS

AMERICAN NATIONAL STANDARD INSTITUTE; INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION; NATIONAL ASSOCIATION OF CORROSION ENGINEERS. **NACE MR0175 / ISO15156-2**: Petroleum and natural gas industries: Materials for use in H₂S-containing environments in oil and gas production: part 2: Cracking-resistant carbon and low-alloy steels, and the use of cast irons. 2nd ed. Houston: NACE, 2009. 45 p.

AMERICAN PETROLEUM INSTITUTE. **API 5L**: Specification for Line Pipe. 53th ed. Washington: API, 2004. 155 p.

AMERICAN PETROLEUM INSTITUTE. **API 6A**: Specification for Wellhead and Christmas Tree Equipment. 20th ed. Washington: API, 2010. 436 p.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **A370**: Standard Test Methods and Definitions for Mechanical Testing of Steel Products. West Conshohocken: ASTM, 2013. 48 p.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **E03**: Standard Guide for Preparation of Metallographic Specimens. West Conshohocken: ASTM, 2001. 12 p.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **E0340**: Standard Test Method for Macroetching Metals and Alloys. West Conshohocken: ASTM, 2000. 11 p.

ASM HANDBOOK. **Welding, Brazing and Soldering**: Volume 6. The United States of America: ASM International, 1993.

FMC TECHNOLOGIES. **EQ3079**: Requisitos gerais para equipamentos submarinos. rev. K. [S.l.]: [s.n.], 2015. 44 p.

HENON, Barbara K. **Advances in Automatic Hot Wire GTAW (TIG) Welding**. 29 jan. 2013. Disponível em: <<http://www.arcmachines.com/news/case-studies/advances-automatic-hot-wire-gtaw-tig-welding>>. Acesso em: 28 abr. 2016.

KOU, Sindo. **Welding Metallurgy**. 2nd ed. New Jersey: John Wiley & Sons, 2002. 461 p.

MODENESI, Paulo J.; MARQUES, Paulo Villani; BRACARENSE, Alexandre Queiroz. **Soldagem**: fundamentos e tecnologia. 3. ed. atual. Belo Horizonte: Ed. UFMG, 2009. 362 p.

MODENESI, Paulo J. **Introdução à física do arco elétrico e sua aplicação na soldagem dos metais**. Belo Horizonte, abr. 2012. Disponível em: <http://demet.eng.ufmg.br/wp-content/uploads/2012/10/fisica_da_soldagem1.pdf>. Acesso em: 02 jun. 2016.

OKUMURA, Toshie; TANIGUCHI, Célio. **Engenharia de soldagem e aplicações**. Rio de Janeiro: LTC, 1982. 456 p.

PETROBRAS. **N-133**: Soldagem. rev. M. [S.l.]: [s.n.], 2015. 109 p.

PETROBRAS. **N-1438**: Terminologia Soldagem. rev. E, 1ª errata. [S.l.]: [s.n.], 2013. 45 p.

PRAXAIR. **Shielding Gases**: Selection Manual. Disponível em: <<http://catalogs.praxairdirect.com/i/30913-shielding-gases-technical-manuals/106>>. Acesso em: 28 jun. 2016.

SANTOS, A. X., MACIEL, T. M., SANTANA, R. A. C. Avaliação de revestimentos à base de Inconel 625 depositados através do processo de soldagem GMAW em aço API 5L X70 utilizando Planejamento Fatorial. **Revista Brasileira de Aplicações de Vácuo**, Campinas, v. 34, n. 3, p. 128-140, set. / dez. 2015. Disponível em: <<http://www.sbvacu.org.br/rbav/index.php/rbav/article/viewFile/995/1023>>. Acesso em: 14 jun. 2016.

SPECIAL METALS. **Inconel® alloy 625**. Jan. 2013. Disponível em: <<http://www.specialmetals.com/assets/documents/alloys/inconel/inconel-alloy-625.pdf>>. Acesso em: 28 jun. 2016.

THE AMERICAN SOCIETY OF MECHANICAL ENGINEERS. **II Materials**: part A: ferrous material specifications. New York: ASME, 2013. 1776 p.

THE AMERICAN SOCIETY OF MECHANICAL ENGINEERS. **II Materials**: part C: specifications for welding rods, electrodes, and filler metals. New York: ASME, 2013. 888 p.

THE AMERICAN SOCIETY OF MECHANICAL ENGINEERS. **ASME B31.8**: gas transmission and distribution piping systems. New York: ASME, 2012. 192 p.

THE AMERICAN SOCIETY OF MECHANICAL ENGINEERS. **Section IX**: welding, brazing and fusing qualifications: qualification standard for welding, brazing and fusing procedures, welders, brazers, and welding, brazing and fusing operators. New York: ASME, 2013. 518 p.

ZEEMANN, Annelise *et al.* A soldagem GTAW (ou TIG). **Revista da Soldagem**, [S.l.], [20--]. Disponível em: <http://www.soldaautomatica.com.br/index_arquivos/Arquivos/PDF%2011%20-%20ABS%20Soldagem%20TIG.pdf>. Acesso em: 28 abr. 2016.