

**CENTRO FEDERAL DE EDUCAÇÃO TECNOLÓGICA CELSO
SUCKOW DA FONSECA – CEFET/RJ**

**Qualificação de Procedimento de Soldagem de Junta Dissimilar de Aço API
X70 e Inconel 625**

Brunno Barroco Moura Rodrigues

Prof. Orientador: Jorge Carlos Ferreira Jorge, D.Sc.

Prof. Coorientador: Matheus Campolina Mendes, D.Sc.

Rio de Janeiro

Outubro de 2021

**CENTRO FEDERAL DE EDUCAÇÃO TECNOLÓGICA CELSO
SUCKOW DA FONSECA – CEFET/RJ**

**Qualificação de Procedimento de Soldagem de Junta Dissimilar de Aço API
X70 e Inconel 625**

Brunno Barroco Moura Rodrigues

Prof. Orientador: Jorge Carlos Ferreira Jorge, D.Sc.

Prof. Coorientador: Matheus Campolina Mendes, D.Sc.

Projeto final apresentado em cumprimento às normas do Departamento de Educação Superior do CEFET/RJ, como parte dos requisitos para obtenção do título de Bacharel em Engenharia Mecânica.

Rio de Janeiro

Outubro de 2021

Ficha catalográfica elaborada pela Biblioteca Central do CEFET/RJ

R696 Rodrigues, Brunno Barroco Moura
Qualificação de procedimento de soldagem de junta dissimilar
de aço API X70 e Inconel 625 / Brunno Barroco Moura Rodrigues –
2021.
41f.: il. color. + anexo, enc.

Projeto Final (Graduação) Centro Federal de Educação
Tecnológica Celso Suckow da Fonseca, 2021.
Bibliografia: f. 38-41
Orientador: Jorge Carlos Ferreira Jorge, D.Sc.
Coorientador: Matheus Campolina Mendes, D.Sc.

1. Engenharia mecânica. 2. Solda e soldagem. 3. Tecnologia
de materiais. 4. Aço inoxidável. I. Jorge, Jorge Carlos Ferreira
(Orient.). II. Mendes, Matheus Campolina (Coorient.). III. Título.

CDD 620.1

Elaborada pelo bibliotecário Leandro Mota de Menezes – CRB/7 n° 5281

AGRADECIMENTOS

À Deus, pela minha vida e saúde;

À minha família, por ter me dado a base e o suporte necessários, ao longo da vida, para encerrar mais esse ciclo;

Ao meu amor, Mariana, pelo apoio incondicional e compreensão durante a execução deste trabalho. Sei que não foi fácil acreditar em mim quando nem eu acreditava!

Aos meus orientadores, professores Jorge Carlos Ferreira e Matheus Campolina Mendes pelo suporte e ensinamentos durante esse período. Obrigado por não desistirem de mim!

Aos amigos que fiz ao longo do curso, pelo companheirismo e momentos que levarei comigo para sempre. Sem vocês, a faculdade não teria tido a menor graça!

RESUMO

A busca por novas fontes de energia tem sido a tônica do desenvolvimento tecnológico desde a primeira revolução industrial. Na indústria offshore, a busca por petróleo ou gás natural, em leitões cada vez mais profundos, impõe severas condições de trabalho ao maquinário e tubulação envolvidos. Para que a extração seja viável, os tubos devem resistir a grandes pressões em ambientes altamente corrosivos. Uma solução encontrada pelo setor foi construir os tubos com aços de alta resistência e revesti-los internamente com ligas resistentes à corrosão. Esse recurso vem sendo amplamente utilizado e aperfeiçoado pela indústria, criando, além de medidas práticas para o dia a dia, um sólido arcabouço teórico sobre o comportamento dessas composições. Apesar de extensa, a literatura atual é concentrada em aços até o API 5L Gr. X60, sendo escassa para aços mais resistentes. Disso, veio a motivação de analisar a viabilidade de soldagem dissimilar de aço API 5L Gr. X70 com liga Inconel 625 como consumível, uma vez que a raiz dessas uniões é parte relevante e crítica do revestimento interno dos tubos. Assim, este trabalho partiu dos resultados obtidos por Claussen e Carmo (2021), que estudaram o efeito das alterações dos parâmetros de soldagem, principalmente do aumento da corrente nos passes intermediários. Os autores concluíram, entre outras coisas, que a manutenção da corrente nos passes intermediários resulta em uma união com menor ocorrência de defeitos. Assim, este trabalho buscou seguir os mesmos parâmetros e qualificar o procedimento de soldagem pela norma ASME IX (2015), uma vez que o objetivo é que este estudo sirva de base para a construção de tubulações revestidas. Na análise dos resultados, foi possível observar que a junta não apresentou defeitos rejeitáveis e houve boa adesão do metal de solda ao metal base. Ainda, os resultados dos testes de dobramento e tração comprovaram a segurança estrutural e a viabilidade da união proposta. Por fim, foi possível elaborar uma Especificação do Procedimento de Soldagem (EPS), objetivo deste estudo, para ajudar a padronizar e guiar futuras aplicações, seja nos meios industrial ou acadêmico.

Palavras-chave: TIG, GTAW, Soldagem Dissimilar, Especificação do Procedimento de Soldagem, API 5L Gr. X70, Inconel 625.

ABSTRACT

The search for new energy sources has been the keynote of technological development since the first industrial revolution. In the offshore industry, the search for oil or natural gas, in deeper beds, imposes severe working conditions on the machinery and piping involved. For extraction to be feasible, pipes must withstand high pressures in highly corrosive environments. One solution found by the industry was building the tubes with high-strength steels and coat them internally with corrosion-resistant alloys. This resource has been widely used and improved by the industry, creating, in addition to practical measures for everyday life, a solid theoretical framework on the behavior of these compositions. Although extensive, the current literature is concentrated on steels up to API 5L Gr. X60, being scarce for higher resistant steels. From this came the motivation to analyze the feasibility of dissimilar welding of API 5L Gr. X70 steel with Inconel 625 alloy, since the root of these joints is a relevant and critical part of the internal cladding of the pipes. Thus, this work was based on the results obtained by Claussen and Carmo (2021), who studied the effect of changes in welding parameters, especially the increase in current in the intermediate passes. The authors concluded, among other things, that maintaining the current in the intermediate passes results in a weld with less defects. Thus, this work sought to follow the same parameters and qualify the welding procedure by the ASME IX (2015) code, since the goal is that this study serves as a basis for the construction of cladded pipelines. Analysing the results, it was possible to observe that the joint did not present rejectable defects and that there was good adhesion of the weld metal to the base metal. Furthermore, the results of the bending and tensile tests proved the structural safety and viability of the proposed weld. Finally, it was possible to produce a Welding Procedure Specification (WPS), the aim of this study, to help standardize and guide future applications, whether in industrial or academic environments.

Keywords: GTAW, Dissimilar Welding, Welding Procedure Specification, API 5L Gr. X70, Inconel 625.

SUMÁRIO

Capítulo 1	7
Introdução	7
Capítulo 2	9
Revisão Bibliográfica	9
2.1 Aço API 5L Gr. X70	9
2.2 Liga de níquel Inconel 625	12
2.3 Problemas na soldagem de juntas dissimilares	17
2.4 Qualificação de procedimentos de soldagem	20
Capítulo 3	23
Materiais e Métodos	23
3.1 Materiais	23
3.2 Soldagem da junta	24
3.3 Ensaios não-destrutivos	25
3.4 Ensaios Mecânicos	26
3.4.1 Ensaios de dobramento	26
3.4.2 Ensaios de tração	28
3.5 Ensaios metalográficos	29
3.5.1 Diluição	29
Capítulo 4	30
Resultados e Discussão	30

Capítulo 5	36
Conclusões e Sugestões	36
5.1 Conclusões.....	36
5.2 Sugestões para trabalhos futuros	37
Capítulo 6	38
Referências Bibliográficas.....	38
ANEXO 1 – Especificação de Procedimento de Soldagem (EPS).....	42

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Desenvolvimento dos aços API 5L ao longo dos anos. (Soeiro Junior et al., 2013)	10
Figura 2: Principais processos e elementos de liga na evolução dos aços API 5L. (Soeiro Junior et al., 2013).....	11
Figura 3: Representação esquemática do processo de amanteigamento (Kejelin et al., 2006)	18
Figura 4: Geometria da junta. Cotas em mm.....	24
Figura 5: Algumas fases do processo de soldagem.....	25
Figura 6: Localização das posições de retirada dos corpos de prova (ASME IX, 2015) [adaptado].....	26
Figura 7: Geometria dos corpos de prova para ensaios de dobramento de face e raiz (ASME IX, 2015) [adaptado].....	27
Figura 8: Geometria dos corpos de prova para ensaios de tração. (ASME, 2015) [adaptado].	28
Figura 9: Desenho esquemático da diluição (Marques et al., 2011)	29
Figura 10: Representação esquemática do perfil da junta soldada.....	30
Figura 11: Junta Soldada.	31
Figura 12: Macrografia da junta soldada. Aumento: 2X. Ataque: Nital 2% para o metal base e ácido oxálico a 10% para o metal de solda.....	32
Figura 13: Corpo de prova após testes de dobramento de face (a) e de raiz (b).....	33

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Características do aço API 5L Gr. X70. (API 5L, 2004).....	11
Tabela 2: Composição química típica da liga de níquel Inconel 625. (ASTM B444, 2006) ...	13
Tabela 3: Propriedades Mecânicas da liga de níquel Inconel 625 em temperatura ambiente. (ASTM B444,2006).....	13
Tabela 4: Distribuição, em peso, dos elementos presentes na liga nas regiões dendríticas e interdendríticas e seus respectivos coeficientes k.....	15
Tabela 5: Comparativo de requisitos de normas de qualificação de procedimentos de soldagem para aplicações industriais (ASME IX, 2015; AWS D1.1, 2006; API 1104, 2010; IACS W28, 2012; MIL STD-248, 1973).....	21
Tabela 6: Composição química do aço API 5L Gr. X70, especificada pela norma API 5L (API 5L, 2004)	23
Tabela 7: Composição química especificada do consumível AWS A 5.14M: ER NiCrMo3 (AWS A5.14, 1997).....	24
Tabela 8: Parâmetros de soldagem utilizados.....	25
Tabela 9: Dimensões padronizadas de corpos de prova para ensaios de dobramento de face e de raiz. (ASME IX, 2015)	27
Tabela 10: Resultados dos ensaios de tração transversal da junta soldada.	34

Capítulo 1

Introdução

A crescente demanda global por energia impõe novos desafios diariamente a todos os setores da sociedade. Na engenharia, podem-se destacar dois desses desafios: a obtenção de matéria-prima de fontes cada vez mais difíceis e a distribuição desses insumos a locais cada vez mais distantes. Para transportar esses fluidos, as tubulações precisam lidar com condições de trabalho progressivamente mais severas.

Na indústria offshore, a busca por novos poços de petróleo e gás natural, exige que a extração seja feita em leitos mais profundos. A construção de oleodutos ou gasodutos precisa considerar não só a pressão a que esses equipamentos estão submetidos, como a corrosividade de seus entornos e dos fluidos transportados. Para isso, devem ser fabricados em materiais com alta resistência mecânica e boa resistência a corrosão.

Como a construção de tubulações feitas inteiramente de materiais nobres apresenta custos elevados, tornou-se necessário o desenvolvimento de novas composições de diferentes ligas que entregassem as mesmas propriedades. Uma solução encontrada foi fabricar o equipamento com um material e revesti-lo com outro. Na indústria offshore, a fabricação de tubos em aço de alta resistência mecânica para suportar a pressão externa com revestimento interno de ligas altamente resistentes à corrosão se popularizou. Isso cria uma camada de proteção entre o aço e o fluido, protegendo a estrutura. Segundo Farkade (2015), o uso de revestimentos pode representar uma economia de 80% se comparado ao custo de fabricação de equipamentos feitos integralmente com materiais nobres.

Assim, surgiu a motivação para o presente trabalho. A análise das propriedades obtidas por tubulações revestidas é passo fundamental para viabilizar o desenvolvimento das operações de extração e transporte de fluidos em ambientes marítimos. Como essas tubulações são construídas pela união de segmentos de tubos já revestidos, este estudo visa qualificar esse procedimento de soldagem dissimilar de união de tubos em aço API 5L Gr. X70 com Inconel 625 como consumível. Uma vez que as raízes dessas juntas, presentes no

interior do tubo, são o ponto mais crítico do revestimento com liga de níquel, surge a necessidade desta análise.

O uso desse tipo de soldagem dissimilar é bastante comum no dia a dia da indústria. Normalmente, as uniões com Inconel 625 são feitas em aço API 5L de grau até X60, o que ajuda a manter a literatura sobre o uso do aço de grau X70 ainda escassa. Por isso, este trabalho busca oferecer uma forma viável de realizar essas uniões com aços de grau X70, além de expandir o arcabouço técnico-teórico sobre essa liga. Assim, pode-se criar tubulações mais finas e leves ao utilizar um aço de maior resistência mecânica.

Claussen e Carmo (2021) analisaram a influência da alteração dos parâmetros de soldagem de tubos de aço API 5L Gr. X70 com ligas de Inconel 625 pelo processo TIG. Uma das conclusões dos autores foi a importância de limitar a corrente de soldagem para a obtenção de uma junta com menor incidência de defeitos. Assim, o presente trabalho seguiu essa recomendação e manteve os parâmetros de soldagem, buscando obter uma junta com propriedades satisfatórias.

Diante do exposto, este projeto visou a qualificação de um Procedimento de Soldagem para a união proposta. Para isso, foi realizada uma revisão da literatura em busca dos principais problemas que podem ocorrer na soldagem de aços API com Inconel 625. Em seguida, a junta foi soldada pelo processo TIG na posição 5G. Após a soldagem, foram realizados os ensaios de tração e de dobramento de face e de raiz para aprovação do procedimento segundo a norma ASME IX (2015). Além disso, ainda que não sejam obrigatórios para o processo de qualificação, foram executados ensaios não destrutivos por ultrassom e líquido penetrante, além da inspeção visual, para melhor entendimento e análise da junta soldada.

Capítulo 2

Revisão Bibliográfica

2.1 Aço API 5L Gr. X70

Segundo Santos Neto (2003), a forma mais barata de transportar óleo e gás é através de dutos. Esses dutos, normalmente, possuem grandes diâmetros e precisam suportar altas pressões de trabalho. Para isso, devem ser feitos de materiais com alta resistência mecânica.

A API (*American Petroleum Institute*) define, por meio da norma API 5L, os requisitos para a fabricação de tubos. Os materiais são categorizados pelas letras A, B e X – sendo X a indicação de que o aço é de alta resistência – seguindo pelo seu limite de escoamento em ksi. Esses tubos podem transportar água, óleo ou gás.

Desde 1948, quando foi introduzido o grau X42, os tubos são fabricados com aços de alta resistência e baixa liga (ARBL) para atender as especificações da norma API 5L. Esses aços possuem baixo teor de carbono e são endurecidos pela microadição de Nb, Ti ou V, melhorando a soldabilidade e a tenacidade da liga. Segundo Hippert Júnior (2004), isso explica o uso constante desses materiais em estruturas, uma vez que apresentam deformação plástica antes de romperem.

Soeiro Junior et al. (2013), em seu trabalho, estudou a evolução dos aços API 5L ao longo da história, analisando os avanços nas rotas de fabricação e a adição de elementos de liga a composição química dos materiais. Segundo o autor, inicialmente os aços eram fabricados por laminação a quente e, em sequência, normalização. Esse processo foi o responsável pela criação dos aços de grau X42 até os X60.

No início da década 1970, a laminação controlada (TMCR – Thermomechanical Controlled Rolling) foi desenvolvida. Como explica Plaut (2008), esse processo, ao suprimir a recristalização da austenita, diminui o tamanho desses grãos e aumenta seu encruamento,

resultando em uma microestrutura ferrítica final refinada. Assim, é possível obter aços com melhor tenacidade e soldabilidade.

Com o avanço dessa técnica, novas ligas puderam ser criadas. O aço de grau X70, utilizado neste trabalho, surge na década de 1970 e dá início a uma nova era de aços microligados graças a laminação controlada. Posteriormente, ainda de acordo com Soeiro Junior et al. (2013), o resfriamento acelerado (TMCP – Thermomechanical Controlled Process) foi elaborado. A rota de fabricação passou a usar o TMCP como passo seguinte ao TMCR, possibilitando o desenvolvimento de novas ligas, como o aço de grau X80.

A figura 1 ilustra o desenvolvimento dos aços API 5L como ARBL ao longo dos anos e a figura 2 mostra os processos e elementos de ligas utilizados desde a década de 1960.

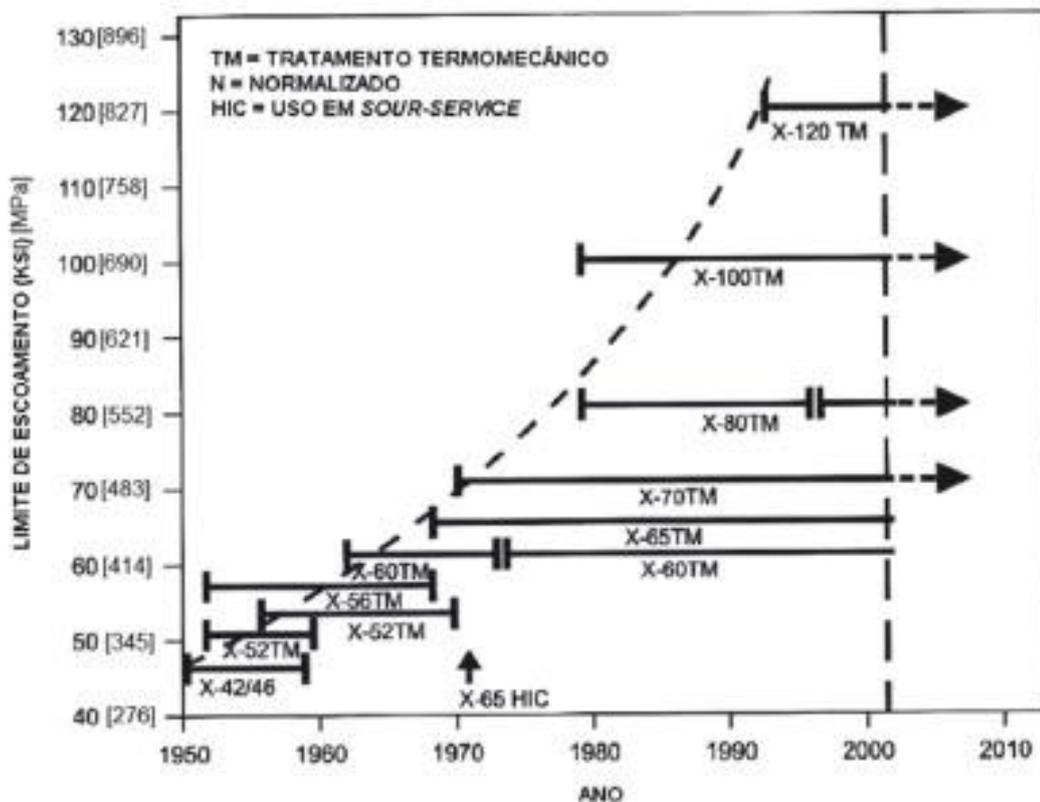


Figura 1: Desenvolvimento dos aços API 5L ao longo dos anos. (Soeiro Junior et al., 2013)

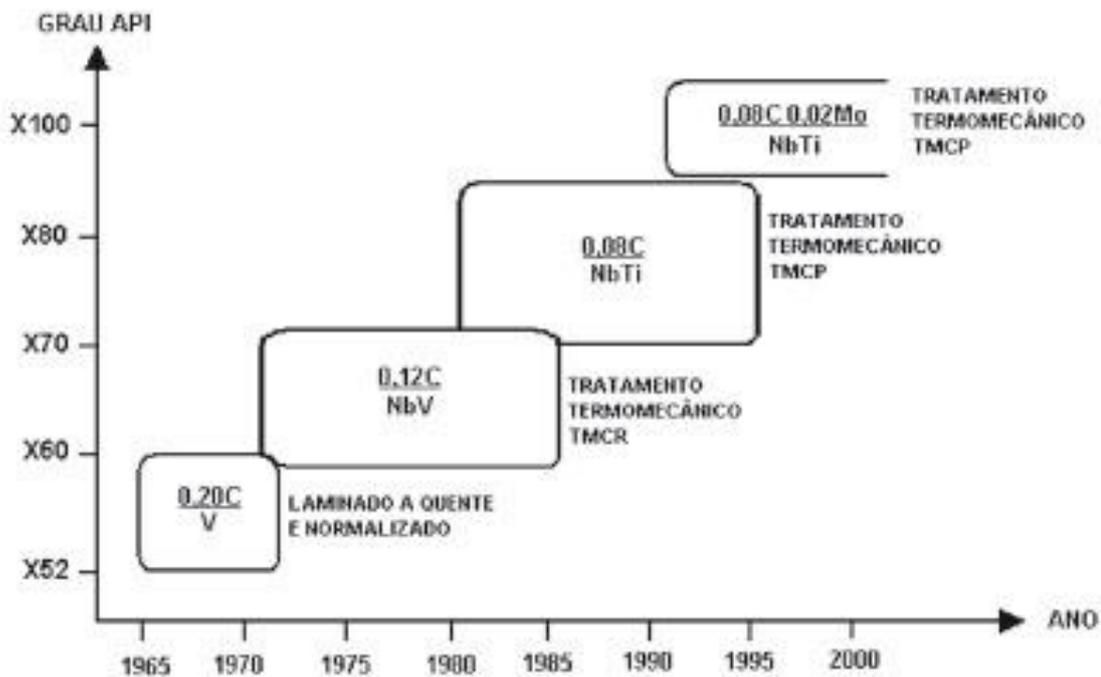


Figura 2: Principais processos e elementos de liga na evolução dos aços API 5L. (Soeiro Junior et al., 2013)

O aço API 5L Gr. X70 é, aqui, utilizado uma vez que este trabalho é uma continuação ao estudo de Claussen e Carmo (2021). Este projeto visa analisar a viabilidade das sugestões propostas por eles para diminuir a espessura da parede de tubulações. Assim, é possível reduzir o peso total do equipamento e os custos de fabricação e manutenção da tubulação.

A tabela 1 mostra a as características definidas pela norma API 5L para esse aço.

Tabela 1: Características do aço API 5L Gr. X70. (API 5L, 2004)

Características API 5L Gr. X70								
	C	Mn	P	S	Ti	Outros	L.E.	L.R.
Concentração máxima	0,26%	1,65%	0,03%	0,03%	0,06%	$Nb + Va + Ti \leq 0,15\%$	483 MPa	565 MPa

2.2 Liga de níquel Inconel 625

H. L. Eiselstein e D. J. Tillack entraram com um pedido de patente de uma nova liga a base de níquel em 24 de janeiro de 1962. Em 1991, eles publicaram um artigo explicando todo o processo de criação e desenvolvimento de seu produto: a liga de níquel Inconel 625.

Segundo Eiselstein e Tillack (1991), a demanda por materiais de alta resistência para utilização nas indústrias a vapor era alta na década de 1950. O objetivo dos autores era criar uma liga com boa soldabilidade, boa resistência a fluência, que não endurecesse por envelhecimento e que pudesse ser usado para fabricar tubos seguindo o código ASME. Essa liga seria a base de níquel e seu endurecimento viria da composição de sua matriz.

À época, já existiam diversos estudos sobre o uso de elementos de liga, como Cr, Mo, Nb, Al e Ti no endurecimento de ligas. Como o uso individual desses elementos não produzia efeitos significativos, Eiselstein e Tillack (1991) lembram que decidiram analisar a combinação de Mo e Nb com diferentes concentrações, em peso, de níquel. Ao envelhecerem algumas amostras, notaram que essa liga endurecia consideravelmente, o que deu início a um estudo que culminou na criação da liga de níquel Inconel 718 em 1958.

Após a elaboração da liga 718, a demanda por uma liga de níquel para suportar altas pressões de vapor supercrítico diminuiu, o que suspendeu as pesquisas para novas ligas. Quando retornaram, Eiselstein e Tillack (1991) partiram de uma composição química que resultava em um material um pouco mais duro que o Inconel 600. Esse produto, chamado de MS-2 naquele momento, era composto, em peso, por aproximadamente: 60% Ni, 15% Cr, 3% Nb, 2% Mo, 0,5% Al, 0,5% Ti e o restante em Fe.

Para melhorar a competitividade de seu produto no mercado, os autores começaram a utilizar Cr e Mo para aumentar a resistência à tração, em temperatura ambiente, dessa composição. Como resultado, aliado ao aumento de resistência, notaram uma grande melhoria: a resistência à corrosão. Ainda, notaram que a soldabilidade não foi prejudicada, apesar da maior resistência à tração. Essa descoberta mudou o rumo do desenvolvimento da MS-2, o que resultou, finalmente, na liga de níquel Inconel 625.

A liga de níquel Inconel 625 é uma liga de Ni-Cr-Mo-Nb-Fe amplamente utilizada na indústria pela sua excelente fabricabilidade e alta resistência mecânica e à corrosão. Segundo Stevens e Ross (1986), essa resistência é causada pela introdução de molibdênio e nióbio na

matriz de níquel-cromo da liga, o que a endurece. Esses elementos também são responsáveis pela alta resistência a ambientes corrosivos e aos efeitos de operações em altas temperaturas – maiores que 3000°C – como a oxidação. As tabelas 2 e 3 mostram, respectivamente, a composição química e as principais propriedades dessa liga.

Tabela 2: Composição química típica da liga de níquel Inconel 625. (ASTM B444, 2006)

	C	Mn	Fe	P	S	Si	Cu	Ni	Al	Ti	Cr	Nb + Ta	Mo
Concentração máxima	0,1%	0,5%	5%	0,015 %	0,015 %	0,5%	0,5%	58% (mín)	0,4 %	0,4%	20% a 23%	3,15 % a 4,15 %	8% a 10%

Tabela 3: Propriedades Mecânicas da liga de níquel Inconel 625 em temperatura ambiente. (ASTM B444,2006)

Limite de Resistência (MPa)	Limite de Escoamento (MPa)	Alongamento Mínimo (%)
827	414	30

A presença de elementos de liga, e suas quantidades em peso, altera as propriedades mecânicas de uma liga. Alvarães (2020), em seu estudo, resumiu a literatura existente sobre o papel dos principais elementos presentes na liga de níquel Inconel 625 nas características finais da liga. Esses efeitos são:

- a. Cromo (Cr): contribui para o aumento da resistência mecânica através do endurecimento por solução sólida. Além disso, cria uma camada protetora de Cr_2O_3 que dificulta a entrada de oxigênio na liga e a saída de elementos de liga. Em teores superiores a 20%, aumenta a resistência à corrosão à altas temperaturas;
- b. Molibdênio (Mo): aumenta a resistência à corrosão localizada – por pites e frestas – em meios com cloretos e a resistência em atmosferas redutoras, apesar de possuir tendência de segregação em direção a regiões interdendríticas, o que diminuiria a resistência à corrosão graças ao gradiente de composição química entre o centro da dendrita e suas extremidades. Além disso, colabora no endurecimento por solução sólida;

- c. Nióbio (Nb): contribui para a formação e fases que minimizam a ocorrência de corrosão intergranular. Proporciona, também, aumento da resistência mecânica a altas temperaturas;
- d. Carbono (C): é utilizado, em baixas concentrações, para precipitar na forma de carbeto nos contornos de grão. Assim, dificulta o deslocamento dessas regiões, o que aumenta a resistência mecânica da liga; e
- e. Ferro (Fe): auxilia no endurecimento da liga por solução sólida. No entanto, sua concentração deve ser controlada pois podem diminuir a resistência à corrosão do material. O teor máximo de Fe, amplamente estabelecido pela literatura, é de 5%.

De acordo com Pessoa (2014), a grande variedade de aplicações das ligas de níquel se deve a capacidade de englobar esses vários elementos de liga. Os ciclos térmicos existentes em um procedimento de soldagem são de extrema importância para a microestrutura final da liga por induzirem a precipitação de diversas fases. Se o metal for puro, a composição química do líquido é a mesma do sólido, o que resulta em uma matriz de apenas uma fase. No caso de ligas com teores relevantes de elementos de liga, o produto da solidificação é uma combinação de uma matriz austenítica com precipitações de fases complexas.

As fases complexas resultantes da solidificação podem ser deletérias ou não para as propriedades desejadas. Como destaca Pessoa (2014), o surgimento das fases γ' e γ'' é desejado pois aumentam a resistência mecânica da liga. No entanto, essas mesmas fases podem servir de ponto de partida para a precipitação de outras fases secundárias, que são prejudiciais a resistência mecânica e à corrosão, durante a solidificação da liga.

Outra consequência dos ciclos térmicos que a soldagem impõe as ligas é a microsegregação de elementos de liga durante sua solidificação. Segundo Aguiar (2010), o processo de redistribuição dos elementos de liga durante a solidificação é governado pelas características termodinâmicas de cada um deles. Isso significa que quando um desses elementos tem sua solubilidade excedida durante o crescimento dendrítico, constituintes deletérios podem ser formados, prejudicando, principalmente, a resistência à corrosão da liga. Quando isso ocorre, há uma segregação desses solutos para as regiões interdendríticas, deixando o interior dessas dendritas com baixas concentrações desses elementos.

Para Silva et al. (2012), um parâmetro relevante na análise da microsegregação é o coeficiente de redistribuição de soluto (k), representado pela equação 1. Esse coeficiente expressa a tendência de segregação de um elemento, ou fase, durante a solidificação. Se $k > 1$,

esses elementos tendem a segregar para o líquido, ou seja, para a região interdendrítica. Já para $k < 1$, os elementos tendem a segregar para o sólido, ou seja, tendem a ficar concentrados na região central do interior das dendritas.

$$k = \frac{\text{Concentração, em peso, na fase sólida } (C_s)}{\text{Concentração, em peso, na fase líquida } (C_l)} \quad (1)$$

Em seu trabalho, Silva et al. (2012), analisaram o comportamento metalúrgico de revestimento de superliga à base de Inconel 625 depositado por TIG. Apesar do presente trabalho não envolver revestimentos, a literatura sobre esse tema é extensa e diversos resultados e comportamentos podem ser aproveitados na soldagem de juntas dissimilares. Além disso, a soldagem de união com liga de níquel Inconel 625 como consumível representa um pré-requisito a união de tubos já revestidos internamente.

Silva et al (2012) utilizaram microscopia eletrônica de varredura (MEV) e transmissão (MET) e espectroscopia de energia dispersiva de raios-X (EDS) na caracterização microestrutural do revestimento. Ao observarem as fases resultantes do procedimento de soldagem, os autores puderam calcular os coeficientes de redistribuição de soluto (k) para diversos elementos. A tabela 4 mostra a distribuição, em peso, dos elementos presentes na liga nas regiões dendríticas e interdendríticas e o coeficiente k de cada um deles.

Tabela 4: Distribuição, em peso, dos elementos presentes na liga nas regiões dendríticas e interdendríticas e seus respectivos coeficientes k

Elemento	C_s	C_l	k
Ni	60,1 ± 2,9	52,6 ± 1,5	1,03
Cr	21,6 ± 0,7	19,6 ± 0,8	1,02
Mo	7,7 ± 1,5	12,3 ± 1,2	0,95
Nb	1,6 ± 0,9	6,5 ± 2,0	0,50
Fe	8,8 ± 1,0	8,9 ± 0,8	1,09

Ao analisar esses resultados, nota-se que Ni, Fe e Cr apresentaram valores superiores a 1. Isso significa que esses elementos têm uma tendência a segregar em direção ao centro da dendrita. Já o Mo e o Nb tiveram coeficientes inferiores a 1, o que mostra uma preferência por segregação em direção ao líquido, nas regiões interdendríticas. Segundo os autores, a

segregação do Nb é a principal responsável pela formação de fases secundárias deletérias as propriedades da liga. Além disso, também constataram que a segregação de Mo foi intensa. Isso é de extrema relevância, uma vez que esse elemento é um dos principais responsáveis, junto com o Cr, pela resistência a corrosão localizada – pites e frestas – da liga.

Esses resultados estão em concordância com outros trabalhos existentes nesse sentido. Cielask (1987), por exemplo, analisou o processo de solidificação da liga de níquel Inconel 625. Ele observou que os centros das dendritas foram enriquecidos com Ni e Fe. Em contrapartida, Nb, Mo e Si foram segregados para a região interdendrítica.

A microsegregação de elementos de liga também explica, segundo revisão feita por Aguiar (2010), porque a resistência a corrosão do metal de solda AWS ER NiCrMo-3 é menor que a da liga de níquel Inconel 625 em si. Os gradientes de concentração ao longo das dendritas, até as regiões interdendríticas, aliados as fases secundárias deletérias existentes podem iniciar um processo de corrosão acelerada. A baixa concentração, em peso, de Mo no centro das dendritas torna o ataque seletivo a essas regiões mais fácil.

Um problema comum de ligas a base de níquel é a formação de trincas de solidificação. Segundo Gould (2010), essas trincas são frequentes em metais que solidificam, primariamente, como austenita. Nos metais de adição, o autor explica que S e P possuem forte tendência a aumentarem a faixa de temperatura de solidificação quando adicionados ao Ni.

Nos metais de adição à base de ligas de níquel, isso faz com que esses elementos sejam segregados para a região interdendrítica e promovam a distribuição de filmes de líquido ao longo dos contornos de grão. Assim, esses filmes líquidos podem não conseguir acomodar a deformação, fazendo com que os contornos de grão permaneçam separados, como explicam Gould (2010) e Aguiar (2010). Gould (2010) ressalta ainda que os principais responsáveis por esse fenômeno – em ligas ricas em Nb, Cr e Mo – são as fases intermetálicas formadas durante a solidificação e que adições de Mn, Si, Al e Ti contribuem para a redução de sua ocorrência.

De modo geral, os metais de adição à base de ligas de níquel, como o AWS ER NiCrMo-3 utilizado neste trabalho, possuem boa soldabilidade, como destaca Gould (2010). Apesar da baixa resistência a formação de trincas de solidificação, normalmente o metal líquido ainda é suficiente para preencher essas trincas. Além disso, o controle de elementos de liga e a pequena faixa de temperatura de solidificação contribuem para essa boa soldabilidade desses materiais.

2.3 Problemas na soldagem de juntas dissimilares

Bauly e Andrade (2000) definem a junta dissimilar como uma junta soldada entre dois materiais com composições químicas consideravelmente distintas entre si. Neste trabalho, pretende-se analisar as propriedades obtidas com a união do aço API 5L Grau X70 com a liga de níquel Inconel 625. O objetivo é unir a alta resistência e tenacidade do aço com a resistência à corrosão da liga. Isso permite que tubulações e estruturas possam ser mais baratas, uma vez que não precisam ser constituídas integralmente de materiais nobres, e possuam paredes mais finas, diminuindo o peso final da estrutura. No entanto, apesar da popularização desse tipo de procedimento, a soldagem dissimilar requer atenção pela possibilidade de gerar inconvenientes na microestrutura final da união.

A ocorrência de zonas parcialmente diluídas (ZPD) é um problema comum nesse tipo de soldagem. Segundo Kejelin et al. (2006), essas zonas são regiões próximas a linha de fusão que possuem dureza elevada, podendo apresentar valores superiores a 400 HV, e composições químicas intermediárias entre os metais de base e de solda. Isso indica a presença de martensita, o que faz com que essas áreas sejam mais frágeis e com maior propensão a ocorrência de trincamento a frio durante a soldagem. O fato de apresentarem até dezenas de microns de largura faz com que se tente impedir, ao máximo, sua formação para manter a segurança estrutural da solda.

Para Silva et al. (2010), as ZPD são formadas quando o metal base fundido se mistura parcialmente, com o metal de adição durante a soldagem. Quando a temperatura líquidus do metal de solda for menor que a temperatura líquidus do metal base, este é impulsionado para dentro da poça de fusão pela convecção atuante na poça. Já quando a temperatura líquidus do metal base for menor que a temperatura líquidus do metal de solda, a convecção gerada pelo arco elétrico faz com que o metal de solda líquido penetre no metal base líquido. Isso causa intrusões e forma penínsulas e ilhas de orientações aleatórias.

Kejelin et al. (2006) acreditam que a realização de tratamentos térmicos pós-soldagem para diminuir a dureza das ZPD pode ser danosa ao material. Apesar de reaver a junta e, conseqüentemente, aliviar as tensões residuais existentes, eles acreditam que a manutenção da junta a temperaturas acima de 500°C pode contribuir para a precipitação de fases intermetálicas e a difusão do carbono através da interface da linha de fusão. Para reduzir

a dureza da ZPD, os autores recomendam que seja realizado o procedimento que se segue, representado no esquema da figura 3.

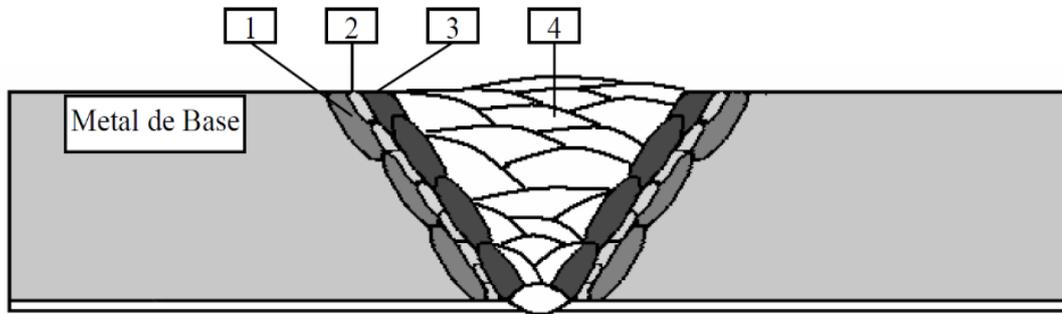


Figura 3: Representação esquemática do processo de amanteigamento (Kejelin et al., 2006)

Onde:

1. Amanteigamento do aço X60 com material similar;
2. Camada de junta dissimilar com a mínima corrente de soldagem possível;
3. Camada de junta dissimilar com alta energia de soldagem; e
4. Passes de preenchimento subsequentes.

De acordo com Freitas (2017) o amanteigamento tem como objetivo coibir a cinética de segregação de elementos indesejáveis do metal base para o metal de solda. Esse processo consiste na adição de uma ou mais camadas de um metal de adição a junta a ser soldada. Isso diminui o gradiente de temperatura entre a poça de fusão e o metal base, além de oferecer uma maneira de aliviar as tensões residuais dos passos posteriores de soldagem através da deformação plástica da camada amanteigada.

Kejelin et al. (2006) recomendam que a primeira camada de passes sobre a junta amanteigada deve ser feita com a menor corrente de soldagem possível. Desse modo, a diluição do metal de base será menor e a taxa de solidificação seja alta. Esses dois parâmetros inibem a microsegregação de elementos de liga durante a solidificação, podendo até inibir a formação das ZPD.

Ainda assim, a alta taxa de resfriamento favorece o aumento da dureza na zona termicamente afetada de grãos grosseiros (ZTA-GG). Diante disso, os autores (Kejelin et al., 2006) propõem que os passes da segunda camada sejam realizados com alta energia de soldagem. Esse aporte térmico visa refinar os grãos da ZTA-GG endurecidos após a primeira

camada e, assim, diminuir a dureza da junta dissimilar. Por fim, os passes subsequentes podem ser executados com os parâmetros adequados para a melhor produtividade da operação.

No entanto, ao analisar a viabilidade econômica desse procedimento, Ferrari (2011) se mostra contrário ao uso do amanteigamento. Seu estudo buscou, entre outras questões, mostrar uma solução que não envolvesse a deposição de outros materiais, o que exigiria a posterior usinagem dessa junta e ensaios não-destrutivos adicionais para garantir a integridade da união. A solução encontrada pelo autor, apesar de fugir ao escopo deste trabalho, é trazida a seguir de forma a enriquecer a base teórica deste estudo e poder servir como sugestão para trabalhos futuros:

- Uso do processo TIG nos passes de raiz e reforço;
- Realização dos passes de enchimento por eletrodo revestido;
- Atenção ao dimensionamento das juntas; e
- Menor aporte de calor possível para os passes de raiz e reforço.

Além das ZPD, a presença de ferro na microestrutura final de revestimentos obtidos com ligas de níquel é considerada um problema para a integridade estrutural da junta ao diminuir sua resistência à corrosão. Em seu trabalho, Ferrari (2011) também buscou maneiras de manter a concentração de ferro na raiz em teores menores que 5%. Como resultado, além das recomendações descritas anteriormente neste trabalho, o autor também propõe que tanto o revestimento dos tubos quanto a vareta do metal de adição devem ter a menor concentração possível de ferro. À título de contextualização, o autor utilizou uma vareta com 0,28% de Fe e um aporte térmico de $0,61 \frac{kJ}{mm}$ na raiz.

Além dos já citados anteriormente, outro ponto de atenção é o grau de diluição presente na junta soldada. Segundo Kejelin (2006), a diluição é a medida percentual de quanto de metal base fica contido no metal de solda após a soldagem. Ainda de acordo com o autor, essa medida é de suma importância para que se possa estimar a composição química final da junta, uma vez que ela é responsável pelas propriedades mecânicas da união.

A diluição, por ser influenciada pela penetração, é resultante direta dos parâmetros de soldagem empregados. Para Dupont (2009), a diluição é diretamente proporcional ao aporte térmico. Uma alta taxa de diluição pode modificar o caminho de solidificação da junta, segregando elementos de liga e podendo formar fases deletérias ao desempenho da estrutura.

Claussen e Carmo (2021) analisaram a influência dos parâmetros de soldagem, principalmente da alteração da corrente, de juntas dissimilares de aço API 5L Gr. X70 com liga de níquel Inconel 625 como consumível de soldagem. Os autores notaram que o aumento da corrente nos passes intermediários contribuía para ocorrência de ZPDs na junta. Nas duas amostras que testaram, eles verificaram níveis de diluição de 19,83% e 12,55%. Assim, como alcançaram valores satisfatórios de diluição, este trabalho seguiu os mesmos parâmetros de soldagem da segunda amostra.

2.4 Qualificação de procedimentos de soldagem

Em 27 de abril de 1865, três das quatro caldeiras do barco a vapor Sultana explodiram com 2200 passageiros a bordo. Em 10 de março de 1905, uma das caldeiras de uma fábrica de sapatos em Massachusetts explodiu atingindo 175 pessoas. Estes desastres – além de outros – serviram de motivação para que uma norma voluntária fosse criada em 1915: o *ASME Boiler Code*. O objetivo desta norma, inicialmente, era padronizar a execução de ensaios não-destrutivos nas soldas presentes em caldeiras. (AWS, 2021)

Com a ascensão da soldagem como forma de substituir as juntas rebitadas, que ofereciam baixa eficiência estrutural, a norma ASME começou a ganhar relevância. Na década de 1920, os próprios fabricantes investiam em pesquisas nessa área e enviavam seus resultados para que o comitê responsável pela norma os avaliassem. Em 1931, o código foi atualizado e passou a englobar vasos de pressão. (AWS, 2021)

O *ASME Boiler Code* foi um marco no avanço dos procedimentos de soldagem. Representou o início da busca pelo desenvolvimento de métodos padronizados de executar uma soldagem e atestar tanto a sua qualidade, quanto a do soldador que a fez. Hoje, existe uma enorme gama de normas e códigos, visando cobrir o máximo de aplicações possíveis.

Considerando que cada aplicação apresenta características específicas de segurança, diferentes requisitos são observados nas diversas normas. A tabela 5 mostra um comparativo entre algumas normas extensamente aplicadas na indústria. Em função destas diferenças, deve-se ressaltar que um procedimento de soldagem aprovado para um aço específico pode não ser adequado para outras aplicações mais críticas. Mesmo em casos inversos, embora seja possível uma discussão sobre o aproveitamento de procedimentos pré-aprovados, é usual que

um novo procedimento seja executado com acompanhamento de inspetores de cada área. Algumas normas de Sociedades Classificadoras Navais, como a *American Bureau of Shipping*, permitem que o inspetor que acompanha cada projeto possa aceitar procedimentos que julgue adequados, mesmo que ele não tenha participado da qualificação, de modo a contribuir para redução de custos do projeto.

Tabela 5: Comparativo de requisitos de normas de qualificação de procedimentos de soldagem para aplicações industriais (ASME IX, 2015; AWS D1.1, 2006; API 1104, 2010; IACS W28, 2012; MIL STD-248, 1973).

Norma	Aplicação	Ensaios exigidos
ASME IX	Vasos de Pressão	Tração transversal e dobramento
AWS D1.1	Estruturas Metálicas	Tração transversal, dobramento e macrografia
API 1104	Tubulações	Tração transversal, dobramento e fratura (<i>nick break test</i>)
IACS W28	Embarcações e estruturas marítimas	Tração transversal e longitudinal, dobramento, impacto Charpy-V, dureza e macrografia
MIL STD-248	Submarinos	Tração transversal, dobramento e impacto Charpy-V

Neste trabalho, tanto o procedimento de soldagem, quanto sua qualificação são regidos pela ASME IX (2015). Essa norma determina os requisitos de testagem e os critérios de aprovação de procedimentos de soldagem para vasos de pressão e caldeiras. Assim, para aprovação, são necessários 6 corpos de prova que devem ser submetidos a ensaios de tração e dobramento de face e de raiz. Além disso, neste trabalho, também foram realizados ensaios não-destrutivos de ultrassom e líquidos penetrantes, assim como a análise da macrografia da junta.

Na inspeção visual, nos ensaios não-destrutivos e na análise macrográfica, não podem ser observadas trincas de qualquer tamanho. Ainda, deve-se observar fusão completa do metal de solda no metal de base. Apesar de a norma ASME IX (2015) só exigir ensaios

mecânicos como critérios para qualificação, a análise dos resultados desses outros testes permite uma avaliação mais completa da junta soldada.

Nos ensaios de dobramento de face e de raiz, a norma ASME IX (2015) exige que tanto a solda, quanto a zona termicamente afetada (ZTA), devem possuir a mesma proporção anterior e posteriormente ao ensaio. Além disso, a solda e a ZTA não podem conter descontinuidades maiores que 3 mm.

Já para que os ensaios de tração sejam aprovados, essa norma determina que o limite de resistência encontrado pelo teste não deve ser inferior a:

- a) O limite de resistência mínimo, especificado por norma, para o metal base; ou
- b) O menor limite de resistência, especificados por norma, caso sejam utilizados mais de um metal base; ou
- c) O limite de resistência mínimo, especificado por norma, do metal de solda se, para a soldagem em questão, o metal de solda possuir limite de resistência inferior ao metal base em temperatura ambiente;
- d) Se o rompimento ocorrer no metal de base, fora a interface de soldagem, o ensaio pode ser aprovado se o limite de resistência encontrado for, no máximo, 5% menor que o limite de resistência, especificado por norma, do metal base;
- e) O limite de resistência mínimo, especificado por norma, em casos de corpos de prova de espessura total, incluindo revestidos por alumínio (P-No 21 a P-No 23) menores que 13 mm. Para espessuras iguais ou maiores que 13 mm, o valor mínimo do limite de resistência devem incluir tanto o revestimento quanto o material revestido.

Capítulo 3

Materiais e Métodos

Este capítulo tem por objetivo mostrar os procedimentos que foram empregados na soldagem da junta dissimilar de aço API 5L X70 com Inconel 625. Alguns dos processos aqui descritos já foram empregados por Claussen e Carmo (2021), uma vez que este projeto é uma continuação daquele trabalho.

3.1 Materiais

O presente trabalho consiste na união de dois segmentos de tubo de aço API 5L Gr. X70 (API 5L, 2013) de diâmetro externo de 457 mm – ou 18” – e 9,5 mm de espessura. A junção foi realizada por meio do processo TIG com varetas da classe AWS A 5.14M: ER NiCrMo3 (1997) de 2,4mm de diâmetro. A composição química do aço e do consumível de soldagem utilizados encontram-se nas tabelas 6 e 7, respectivamente, assim como seus limites estabelecidos por norma.

Tabela 6: Composição química do aço API 5L Gr. X70, especificada pela norma API 5L (API 5L, 2004)

Composição química do aço API 5L Gr. X70				
	C (*)	Mn (*)	P	S
Concentração máxima	0,26%	1,65%	0,03%	0,03%
Corrida utilizada	0,081%	1,45%	0,019%	<0,005

(*) Para cada redução de 0,01% abaixo da concentração máxima especificada para o carbono, o acréscimo de 0,05% de Mn acima da concentração máxima é permitido, desde que não ultrapasse o total de 2,00%

Tabela 7: Composição química especificada do consumível AWS A 5.14M: ER NiCrMo3 (AWS A5.14, 1997)

Composição química do consumível AWS A 5.14M: ER NiCrMo3													
	C	Mn	Fe	P	S	Si	Cu	Ni	Al	Ti	Cr	Nb + Ta	Mo
Concentração máxima	0,1%	0,5%	5%	0,02%	0,015%	0,5%	0,5%	58% (mín)	0,4%	0,4%	20% a 23%	3,5% a 4,15%	8% a 10%
Corrida utilizada	0,007%	0,03%	0,1%	0,003%	0,001%	0,06%	0,01%	64,8%	0,1%	0,21%	22,2%	3,67%	8,7%

3.2 Soldagem da junta

Primeiramente, as peças foram preaquecidas a 100°C para remover qualquer umidade que pudesse existir. A junta possuía chanfro em V de 60°, com abertura de raiz de 3,0 mm e altura de 1,0 mm, como esquematizado na figura 4. Em seguida, na posição 5G, foram realizados 7 passes com os parâmetros indicados na tabela 8: 1 de raiz, 3 de enchimento e 3 de acabamento. A atmosfera inerte foi de gás argônio, a uma vazão de $10 \frac{l}{min}$, com duas aplicações de gás de purga de argônio, nos dois primeiros passes e a temperatura máxima interpasso de 300°C.

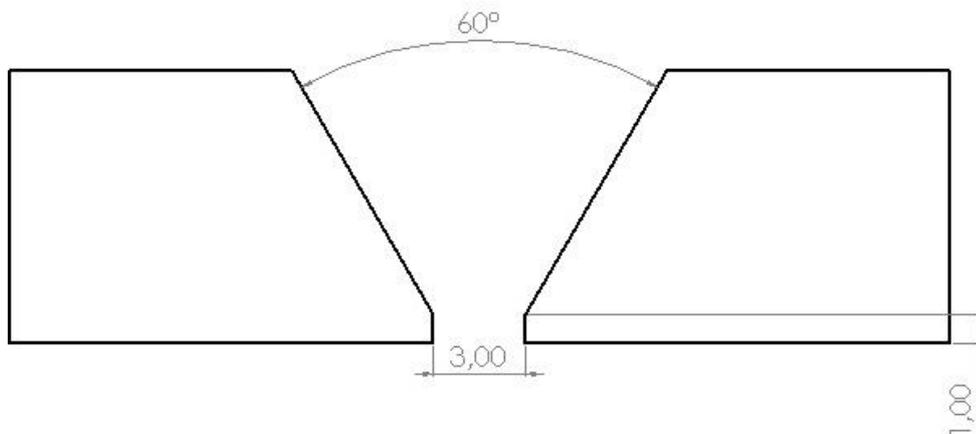


Figura 4: Geometria da junta. Cotas em mm.

Tabela 8: Parâmetros de soldagem utilizados.

Passe	Camada	Corrente (tipo)	Corrente (A)	Tensão (V)	ES (kJ/mm)
1	1	CC (-)	80 - 84	10-12	1,74
2	2	CC (-)	106 - 110	10-12	1,63
3	3	CC (-)	106 - 110	10-12	0,94
4	3	CC (-)	106 - 110	10-12	1,19
5	4	CC (-)	106 - 110	10-12	0,55
6	4	CC (-)	106 - 110	10-12	0,51
7	4	CC (-)	106 - 110	10-12	0,57

A figura 5 ilustra alguns momentos do procedimento de soldagem.



Figura 5: Algumas fases do processo de soldagem.

3.3 Ensaios não-destrutivos

Apesar de não serem requisitos para a qualificação do procedimento de soldagem pela norma ASME IX (2015), que rege este trabalho, esses ensaios foram realizados para melhor entendimento da junta soldada. Primeiramente, a junta soldada foi inspecionada visualmente a procura de descontinuidades ou defeitos do procedimento de soldagem. Em seguida, foi realizado ensaio de ultrassom com procedimento e inspetor qualificados pela ABENDE (Associação Brasileira de Ensaios Não Destrutivos).

3.4 Ensaios Mecânicos

Para a realização de ensaios mecânicos, foram extraídos corpos de prova ao longo da junta em conformidade com a norma ASME IX (2015). Para conexões tubulares com penetração total, os corpos de prova devem ser retirados de acordo com a figura 6. De posse dessas amostras, foram realizados ensaios de dobramento e tração. Esses testes visam analisar as propriedades mecânicas da união e servirão de base para a qualificação do procedimento de soldagem.

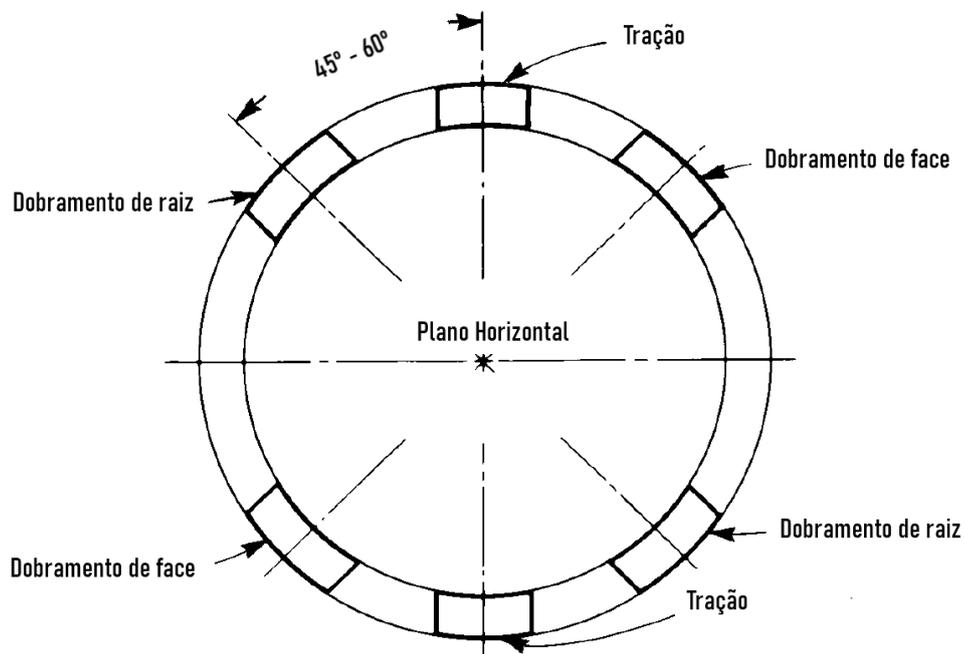


Figura 6: Localização das posições de retirada dos corpos de prova (ASME IX, 2015) [adaptado]

3.4.1 Ensaios de dobramento

Estes ensaios servem para analisar a ductilidade da junta assim como a ocorrência de defeitos. Caso a peça dobrada apresente alguma trinca ou descontinuidade maior que o permitido, o processo deverá ser rejeitado conforme determinação da norma. Além disso, também é possível avaliar a adesão do metal de solda ao metal base.

Foram retirados 4 corpos de prova para ensaios de dobramento de face e de raiz nas posições mostradas na figura 6, como especificado pela norma ASME IX (2015). Esses corpos de prova foram usinados para que ficassem com geometria conforme a figura 7 e a tabela 9, onde T é igual a 6,3 mm.

Os ensaios de dobramento guiado a 180° foram realizados a temperatura ambiente.

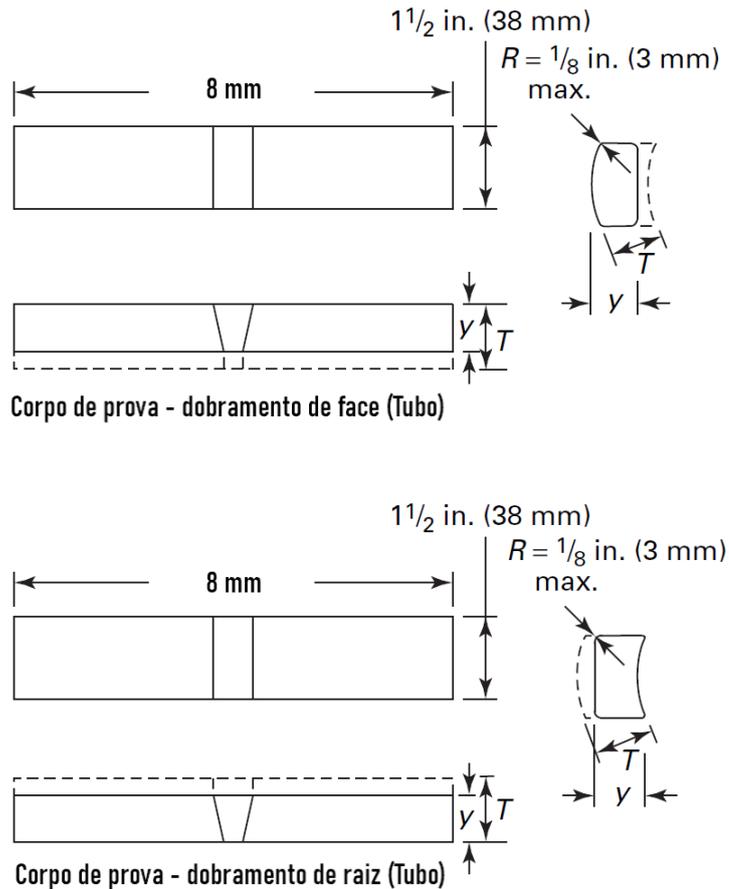


Figura 7: Geometria dos corpos de prova para ensaios de dobramento de face e raiz (ASME IX, 2015) [adaptado]

Tabela 9: Dimensões padronizadas de corpos de prova para ensaios de dobramento de face e de raiz. (ASME IX, 2015)

T (mm)	Y (mm)
1,5 – 3	T
3 – 10	T
> 10	10

3.4.2 Ensaios de tração

Neste ensaio, busca-se observar a carga necessária para romper o corpo de prova bem como a localização dessa fratura. Caso o rompimento ocorra na região da junta soldada, o procedimento de soldagem não deve ser necessariamente reprovado. Se, apesar de romper na área soldada, a carga necessária for superior aos requisitos determinados pela norma para essa região, o ensaio poderá ser validado e a junta não precisará ser rejeitada.

Para os ensaios de tração, foram extraídos 2 corpos de prova do tubo nas posições mostradas na figura 6. A geometria dessas amostras está esquematizada na figura 8, onde W é igual a 19 mm, e Y é igual a 8 mm, conforme determinado pela norma ASME IX (2015). Por fim, essas amostras foram tracionadas, transversalmente ao cordão de solda, até seu rompimento para obtenção do limite de resistência da junta.

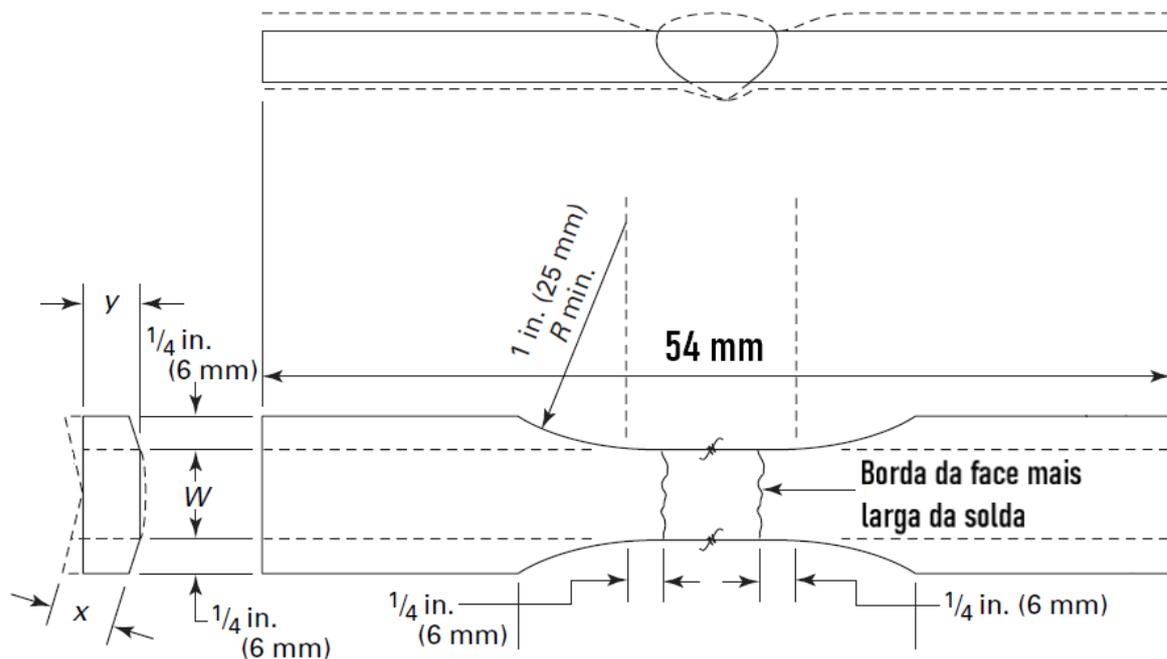


Figura 8: Geometria dos corpos de prova para ensaios de tração. (ASME, 2015) [adaptado]

3.5 Ensaios macrográficos

Apesar de não serem obrigatórios para a qualificação do procedimento de soldagem pela ASME IX (2015), os ensaios macrográficos possibilitam a análise das descontinuidades ao longo da junta e os perfis de penetração alcançados com a soldagem. Para tal, cortaram-se amostras de 18 x 15 x 5 mm ao longo da junta soldada com a máquina de corte Cor-80. Essas amostras foram lixadas na ordem de granulometrias 100, 220, 320, 400, 600 e 1200, sendo resfriadas por água. Em seguida, foram polidas com pastas de diamante de 6, 3 e 1,0 μm , refrigeradas com álcool. Enfim, foram atacadas quimicamente com Nital 2% e o metal de solda foi atacado com ácido oxálico a 10%, por 10 segundos, a uma tensão de 5V.

3.5.1 Diluição

Segundo Modenesi (2012), a diluição é a proporção de metal base na zona fundida. Assim, é possível estimar a composição química final da junta soldada. A diluição pode ser calculada pela equação 2 ao se utilizar a metodologia de cálculo representada na figura 9.

$$D(\%) = \frac{2B}{A + 2B} \quad (2)$$

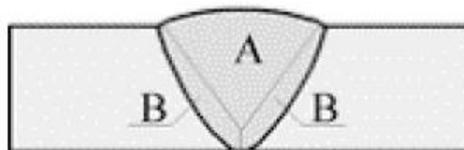


Figura 9: Desenho esquemático da diluição (Marques et al., 2011)

Capítulo 4

Resultados e Discussão

Após a preparação das juntas, conforme esquematizado na figura 4, pôde-se dar início ao procedimento de soldagem. A figura 10 mostra um esboço da seção transversal da solda após os 7 passes realizados.

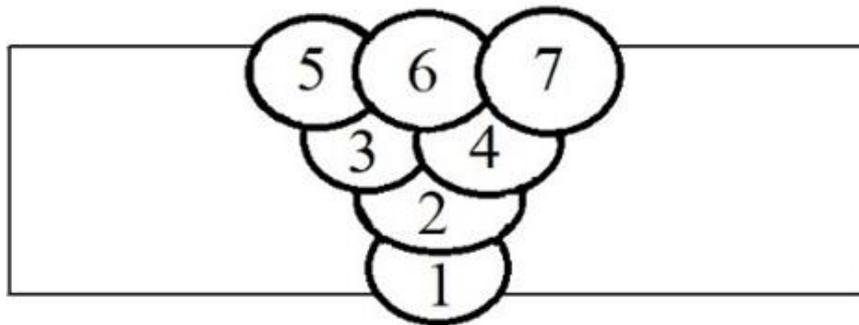


Figura 10: Representação esquemática do perfil da junta soldada.

Os parâmetros de soldagem empregados neste projeto, descritos na tabela 8, são os mesmos executados por Claussen e Carmo (2021). Os autores, que se propuseram a analisar a influência de variações nos parâmetros da mesma soldagem dissimilar aqui realizada, notaram que o uso de altas correntes de soldagem nos passes intermediários aumenta a ocorrência das ZPDs. Essa relação também foi observada por Kejelin et al. (2006), que analisaram o comportamento de uma junta soldada de aço API 5L Gr. X60 com Inconel 625 utilizando 50, 70 e 90A como corrente em velocidades de soldagem de 8, 12, 16, 20 e 24 cm/min.

Neste trabalho, buscou-se avaliar se o conjunto dissimilar proposto é viável ao seguir os parâmetros propostos por Claussen e Carmo (2021). Assim, após a análise dos ensaios executados, que se encontram no decorrer deste capítulo, foi possível qualificar o procedimento de soldagem, de acordo com a norma, e gerar, finalmente, uma Especificação do Procedimento de Soldagem (EPS). Isso mostra que a ocorrência de pequenas áreas com

ZPDs, observadas por Claussen e Carmo (2021), não comprometeu a integridade da junta soldada a ponto de prejudicar seu processo de qualificação.

Para qualificar o procedimento de soldagem, os ensaios exigidos pela norma ASME IX (2015), que rege este trabalho, foram realizados. Os resultados obtidos, assim como sua concordância com os requisitos serão apresentados a seguir.

Inicialmente, foi realizada a inspeção visual da junta soldada. Ao longo de toda a união, representada na figura 11, não foram observadas descontinuidades que violassem os requisitos descritos no capítulo 2 deste trabalho. Assim, o teste pôde ser considerado válido e a junta aprovada, mesmo que esse ensaio não seja pré-requisito para o processo de qualificação do procedimento de soldagem.



Figura 11: Junta Soldada.

Em seguida, foram realizados ensaios não-destrutivos de ultrassom e de líquido penetrante. Os testes foram conduzidos por inspetor externo qualificado pela ABENDE. Assim como na inspeção visual, o ensaio foi aprovado, uma vez que não foram detectadas trincas, mordeduras, excessos ou falta de reforços ou falta de penetração na raiz ao longo da junta soldada.

Este comportamento também é confirmado pela análise macrográfica da junta soldada, presente na figura 12. Ao observar a macrografia, nota-se que não há falta de fusão entre o metal de solda e o metal de base. Ainda, também não foram observados defeitos, como trincas ou mordeduras. Assim, apesar de a norma ASME IX (2015) não exigir essa análise para qualificação do procedimento de soldagem, a macrografia ajuda a mostrar a boa adesão do metal de solda ao metal base e contribui para um melhor entendimento da junta soldada.



Figura 12: Macrografia da junta soldada. Aumento: 2X. Ataque: Nital 2% para o metal base e ácido oxálico a 10% para o metal de solda.

Os ensaios de dobramento de face e de raiz obtiveram resultados significativos. A inspeção visual não constatou a presença de trincas ou discontinuidades ao longo da região soldada do corpo de prova. Ainda, a geometria do cordão de solda resultante dos testes mostrou uma boa adesão do metal de adição ao metal base, como pode ser observado na figura 13.

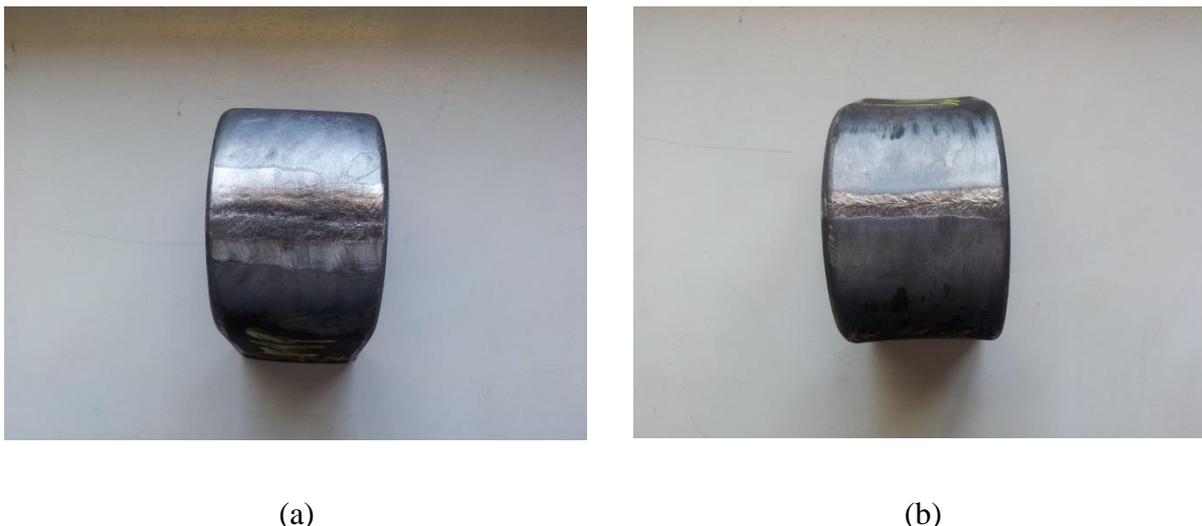


Figura 13: Corpo de prova após testes de dobramento de face (a) e de raiz (b).

Gomes e Campanella (2021) também obtiveram resultados semelhantes ao qualificarem um procedimento de soldagem de tubo também de aço API 5L Gr. X70, mas revestido internamente com Inconel 625 e não unido. Os autores soldaram duas amostras diferentes com os dois primeiros passes por GTAW e os subsequentes por GMAW. Para corrente, utilizaram faixas que não ultrapassaram os 146A. Em ambas as amostras, conseguiram realizar ensaios de dobramento lateral que resultaram em juntas com boa adesão e sem ocorrência de trincas ou defeitos rejeitáveis.

Além deles, Claussen e Carmo (2021) também alcançaram resultados semelhantes com os mesmos parâmetros de soldagem aqui empregados. Eles realizaram o ensaio em duas amostras diferentes, uma com 19,83% de diluição e outra com 12,55%. Ambas apresentaram boa adesão, no entanto, a segunda foi mais uniforme. Eles explicam que esse fato deve ser resultado do menor nível de diluição obtido e da manutenção da corrente, em valores constantes, durante os passes intermediários.

Visto que este trabalho é uma continuação ao estudo de Claussen e Carmo (2021), as amostras, aqui, utilizadas foram as mesmas. Utilizando o diagrama de Schaeffler, os autores observaram que a microestrutura resultante do metal de solda é austenítica. Esse resultado vai ao encontro com os estudos de diversos outros autores, como DuPont et al. (2009), Pessoa (2014) e Gould (2010), que mostraram que as ligas de níquel se solidificam como austenita.

Além disso, o valor de 12,55% é relativamente baixo se comparado aos valores médios de diluição para soldagens por TIG. Segundo Avery (1991), a diluição comumente

observada em soldagens por esse processo é de 20 a 50%. Isso reforça a importância da utilização de correntes baixas durante o processo de soldagem, proposto por autores como Kejelin (2006) e Claussen e Carmo (2021). Dessa forma, é possível melhorar a qualidade e a integridade do conjunto dissimilar. No presente trabalho, não foram observados quaisquer problemas que possam ter sido causados ao seguir essa recomendação.

Ao serem carregados transversalmente à junta, os corpos de prova romperam no metal base com um limite de resistência superior ao mínimo exigido pela norma API 5L para o Grau X70, conforme mostrado na tabela 10.

Tabela 10: Resultados dos ensaios de tração transversal da junta soldada.

Corpo de Prova	Dimensões (mm)	Área (mm²)	Carga Máxima (kN)	LR (MPa)
CP 1	8,0x19,0	152,0	92,5	609
CP 2	8,0x19,0	152,0	94,0	618
MÉDIA				614
Mínimo API 5L Gr. X70				565

Onde: LR – Limite de Resistência,

Após a análise dos resultados, pôde-se gerar a EPS, objetivo deste trabalho. A elaboração desse documento é de suma importância tanto para o dia a dia da indústria, quanto para o meio acadêmico. Para a indústria, ela descreve um guia, uma forma viável, testada e aprovada, de como realizar um procedimento de soldagem de determinada liga com segurança, otimizando tempo e recursos. Para a academia, pode propor um procedimento pioneiro e servir de ponto de partida para o estudo dos comportamentos mecânico e estruturais e abrir um leque de possibilidades de melhoria nos processos já amplamente utilizados. Além disso, pode enriquecer o arcabouço teórico acerca de um tema já estudado, contribuindo para a especialização da análise de certos materiais e suas combinações.

Visto que grande parte da literatura foca em aços até o API 5L Gr. X60 e no uso de ligas de níquel Inconel 625 no revestimento interno de tubulações, este trabalho busca

contribuir para uma nova linha de raciocínio. Além disso, com a soldagem de união de aços API 5L Gr. X70 se mostrando viável e factível, pode-se evoluir para estudos sobre revestimentos nesses aços. Assim, será possível aproveitar a maior resistência mecânica oferecida pelas ligas de aço de grau X70 e diminuir a espessura das paredes das tubulações, que hoje são feitas em aço de grau X60 ou inferiores. Com isso, a estrutura se torna mais leve e financeiramente mais barata.

Capítulo 5

Conclusões e Sugestões

5.1 Conclusões

O intuito deste trabalho foi qualificar um procedimento de soldagem dissimilar de Inconel 625 sobre chapa de aço API 5L Gr. X70 pela norma ASME IX (2015). Para isso, a soldagem foi realizada em um tubo pelo processo TIG e amostras foram retiradas dos locais estabelecidos pela norma. Após a soldagem, foram realizados ensaios não destrutivos, ensaios mecânicos e macrográficos. De posse dos resultados desses ensaios, foi possível concluir que:

- i. A junta não apresentou defeitos rejeitáveis visualmente, nem nos ensaios de ultrassom e de líquido penetrante;
- ii. Nos ensaios de dobramento guiado a 180°, foi observada fusão completa e não se verificou a ocorrência de trincas;
- iii. Nos ensaios de tração, o corpo de prova rompeu na região do metal base a uma carga 9,38% maior que o mínimo previsto em norma;
- iv. A união proposta do aço de alta resistência API 5L Gr. X70 com Inconel 625 é viável, uma vez que os testes apresentaram resultados significativos e respeitaram os requisitos presentes em norma; e
- v. Foi possível a qualificação de um procedimento de soldagem com as condições aplicadas no presente trabalho. O Anexo I mostra a EPS aprovada.

5.2 Sugestões para trabalhos futuros

Para continuidade do presente trabalho, permite-se sugerir:

- i. Realizar análise metalográfica detalhada no metal de solda e ZTA para evidenciar a microestrutura existente;
- ii. Realizar a soldagem pelo processo GMAW para avaliar o aumento de produtividade
- iii. Realizar o mesmo procedimento executado neste trabalho em tubos já revestidos com a liga de níquel Inconel 625 e avaliar a resistência à corrosão da junta soldada.

Capítulo 6

Referências Bibliográficas

AGUIAR, W. M.; **REVESTIMENTO POR SOLDAGEM MIGMAG EMPREGANDO LIGAS DE NÍQUEL PARA APLICAÇÕES EM COMPONENTES DO SETOR DE PETRÓLEO E GÁS NATURAL**. Tese (Doutorado em Engenharia e Ciência de Materiais) - Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, Ceará, 2010.

ALVARÃES, C. P.; **COMPORTAMENTO MICROESTRUTURAL E DE CORROSÃO DE REVESTIMENTOS DE LIGA DE NÍQUEL 625 DEPOSITADOS PELO PROCESSO ELETROESCÓRIA**. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica e Tecnologia de Materiais) – Centro Federal de Educação Tecnológica Celso Suckow da Fonseca, CEFET/RJ, Rio de Janeiro, nov/2020.

API Specification 1104. **WELDING OF PIPELINES AND RELATED FACILITIES**, 2010.

API Specification 5L. **SPECIFICATION FOR LINE PIPE**, 2004.

ASME. **ASME BOILER AND PRESSURE VESSEL CODE – QUALIFICATION STANDARD FOR WELDING, BRAZING, AND FUSING PROCEDURES; WELDERS; BRAZERS; AND WELDING, BRAZING, AND FUSING OPERATORS**. The American Society of Mechanical Engineers. ASME IX, 2015

ASTM. **STANDARD SPECIFICATION FOR NICKEL-CHROMIUM-MOLYBDENUM-COLUMBIUM ALLOYS (UNS N06625 AND UNS N06852) AND NICKEL-CHROMIUMMOLYBDENUM-SILICON ALLOY (UNS N06219) PIPE AND TUBE**. ASTM B 444, 2006.

AVERY, R. E.; **PAY ATTENTION TO DISSIMILAR-METAL WELDS. GUIDELINE FOR WELDING DISSIMILAR METALS**. Nickel Development Institute, n. 14018, 1991.

AWS A5.14/5.14M. **SPECIFICATION FOR NICKEL AND NICKEL-ALLOYBARE WELDING ELECTRODES AND RODS**, 1997

AWS D1.1. STRUCTURAL WELDING CODE – STEEL, 2006

BAULY, J. C.; ANDRADE, A. H. P.; CARACTERIZAÇÃO MICROESTRUTURAL E PROPRIEDADES DE JUNTAS DISSIMILARES UTILIZADAS NO ACOPLAMENTO DO MAB DOS REATORES PWR. 8º Congresso geral de energia nuclear, 12º Encontro nacional de física de reatores e termohidraulica. São Paulo, 15-20 out/2000.

BHAVSAR, A. N.; PATEL, V. A.; INFLUENCE OF PROCESS PARAMETERS OF TIG WELDING PROCESS ON MECHANICAL PROPERTIES OF SS304L WELDED JOINT. International Research Journal of Engineering and Technology (IRJET), Índia, v. 3, n. 5, p. 977-984, mai/2016.

CLAUSSEN, E. V. R.; CARMO, N. C.; INFLUÊNCIA DE PARÂMETROS DE SOLDAGEM NAS PROPRIEDADES DE JUNTAS SOLDADAS PELO PROCESSO GTAW COM INCONEL 625 EM AÇO API 5L X70. Monografia (Bacharelado em Engenharia Mecânica) – Centro Federal de Educação Tecnológica Celso Suckow da Fonseca, CEFET/RJ, Rio de Janeiro, mai./2021

DAR, N. U.; EXPERT SYSTEM FOR OPTIMIZATION OF WELDING PROCESS OF THIN WALLED HSLA STEEL STRUCTURES. Dissertação (Doutorado em Engenharia Mecânica) – Universidade de Engenharia e Tecnologia, Taxila, Paquistão, nov./2009.

DNV-OS-F101. SUBMARINE PIPELINE SYSTEMS, out/2013

DUPONT, J. N. et al.; WELDING METALLURGY AND WELDABILITY OF NICKEL-BASE ALLOYS. John Wiley & Sons, Inc. New Jersey, EUA, 2009.

FARKADE, N. V.; RAVANAN, P. M.; MODIFICATION IN WELD OVERLAY FOR PRODUCTIVITY AND CORROSION RESISTANCE. International Journal of Science Technology & Engineering, vol. 2 (2), 2015.

FERRARI, M.; QUALIFICAÇÃO DE PROCEDIMENTOS DE SOLDAGEM PARA JUNTAS DE UNIÃO EM TUBULAÇÕES DE API 5L-X60 REVESTIDAS INTERNAMENTE COM LIGA DE NÍQUEL 625. XXVII CONSOLDA - Congresso Nacional de Soldagem, Natal - RN, out./2011.

FREITAS, F. H. C. D.; AVALIAÇÃO DAS PROPRIEDADES MECÂNICAS DO AMANTEIGAMENTO E9018G EM AÇOS BAIXA LIGA CR-MO-V. RETEC, Ourinhos, v. 10, n. 3, p. 30-48, jul./2017.

GOMES, D. A. L.; CAMPANELLA, I. J. L.; **QUALIFICAÇÃO DE PROCEDIMENTO DE SOLDAGEM DE TUBO API 5L X70 REVESTIDO INTERNAMENTE COM INCONEL 625**. Monografia (Especialização em Engenharia de Soldagem) – Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, Minas Gerais, jul/2016.

HIPPERT JÚNIOR, E. **INVESTIGAÇÃO EXPERIMENTAL DO COMPORTAMENTO DÚCTIL DE AÇOS API-X70 E APLICAÇÃO DE CURVAS DE RESISTÊNCIA J-ΔA PARA PREVISÃO DE COLAPSO EM DUTOS**. Tese (Doutorado em Engenharia Naval e Oceânica) - Universidade de São Paulo, São Paulo, 2004.

IACS W28, **WELDING PROCEDURE QUALIFICATION TESTS OF STEELS FOR HULL CONSTRUCTION AND MARINE STRUCTURES**, 2012.

IRVING, B.; **WELDING'S VITAL PART IN MAJOR AMERICAN HISTORICAL EVENTS**. AWS, 2021. Disponível em: <https://app.aws.org/about/blockbuster>. Acesso em: 01/10/2021.

KEJELIN, N. Z.; BUSCHINELLI, A. J. D. A; BOHÓRQUEZ, C. E. N. **SOLDAGEM DISSIMILAR DO AÇO X-60 COM INCONEL 625**. XXXXII CONSOLDA - Congresso Nacional de Soldagem, Belo Horizonte - MG, out./2006

KEJELIN, N. Z.; **INFLUÊNCIA DOS PARÂMETROS DE SOLDAGEM NA FORMAÇÃO DE ZONAS PARCIALMENTE DILUÍDAS EM SOLDA DE METAIS DISSIMILARES**. Dissertação (Mestrado em Ciência e Engenharia de Materiais) - Programa De Pós-Graduação Em Ciência E Engenharia De Materiais, Universidade Federal De Santa Catarina. Santa Catarina, fev/ 2006

MARQUES, P. V.; MODENESI, P. J.; BRACARENSE, Alexandre Queiroz. **SOLDAGEM: FUNDAMENTOS E TECNOLOGIA**. 3. ed. Belo Horizonte: UFMG, 2011. p. 93-93.

PESSOA, E. F.; **SOLDAGEM DE REVESTIMENTO COM LIGAS DE NÍQUEL EMPREGANDO O PROCESSO MIG/MAG COM DUPLO ARAME PARA APLICAÇÕES EM COMPONENTES DO SETOR DE PETRÓLEO E GÁS NATURAL**. Tese (Doutorado em Engenharia e Ciência dos Materiais com foco em Propriedades Físicas e mecânicas dos Materiais) – Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, Ceará, set/2014.

PLAUT, R. L. et al.; **ESTUDO DAS PROPRIEDADES MECÂNICAS DO AÇO API X70 PRODUZIDOS ATRAVÉS DE LAMINAÇÃO CONTROLADA**. 45º Seminário de

Laminação - Processos e Produtos Laminados e Revestidos. Tecnologia em Metalurgia, Materiais e Mineração, v. 6, n. 1, p. 7-12, Porto de Galinhas – PE, out./2008

SANTOS NETO, N. F.; **CARACTERIZAÇÃO DE SOLDAS EM AÇOS API 5L COM DIFERENTES ARAMES TUBULARES E TEMPERATURAS DE PRÉ-AQUECIMENTO.** Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) - Faculdade de Engenharia Mecânica, Universidade Estadual de Campinas, São Paulo, 2003.

SILVA, C. C.; et al.; **ASPECTOS METALÚRGICOS DE REVESTIMENTOS DISSIMILARES COM A SUPERLIGA A BASE DE NÍQUEL INCONEL 625.** Soldagem & Inspeção, v. 17, n. 3, p. 251-263, São Paulo, jul-set/2012.

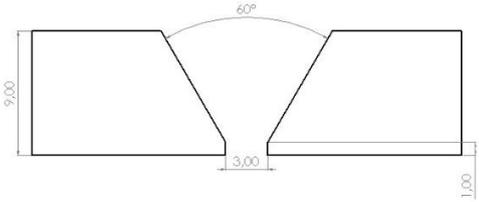
SILVA, M. M. D. et al.; **CARACTERIZAÇÃO DE SOLDA DE REVESTIMENTO DE AWS 317L DEPOSITADOS POR GMAW DUPLO ARAME EM AÇOS ASTM A 516 GR 60 PARA USO NA INDÚSTRIA DO PETRÓLEO.** Soldagem & Inspeção, São Paulo, v. 15, n. 3, p. 225-233, jul-set/2010.

SOEIRO JUNIOR, J. C. et al.; **UMA BREVE REVISÃO HISTÓRICA DO DESENVOLVIMENTO DA SOLDAGEM DOS AÇOS API PARA TUBULAÇÕES.** Soldagem & Inspeção, v. 18, n. 2, p. 176-195, mai/2013.

STEVENS, C. E.; ROSS, R. W. **PRODUCTION, FABRICATION, AND PERFORMANCE OF ALLOY 625 CLAD STEEL FOR AGGRESSIVE CORROSIVE ENVIRONMENTS.** Journal of Materials for Energy Systems, v. 8, 1ª edição, p. 7-16, jun/1986.

XU, L. et al. **INSIGHTS INTO THE INTERGRANULAR CORROSION OF OVERLAY WELDED JOINTS OF X65- INCONEL 625 CLAD PIPE AND ITS RELATIONSHIP TO DAMAGE PENETRATION.** Corrosion Science, v. 160, ago/2019. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.corsci.2019.108169>.

ANEXO 1 – Especificação de Procedimento de Soldagem (EPS)

<p>EPS No.</p> <p>Processo de Soldagem: GTAW</p> <p>Tipo: Manual</p> <p>Norma de Referência: ASME IX</p>	<p>DESENHO DO CHANFRO</p> 
<p>Tipo de junta: Chanfro – V – 60°</p> <p>Desenho do chanfro: Ver desenho</p> <p>Mata-junta: N/A</p> <p>Outros: Purga na raiz</p>	<p>METAL BASE</p> <p>Especificação do material: API 5L X70</p> <p>Tipo ou Grau: N/A</p> <p>Diâmetro qualificado: >457mm (18’)</p> <p>Espessura qualificada: 3<E<20mm</p> <p>Outros: N/A</p>
<p>METAL DE ADIÇÃO</p> <p>Especificação: AWS 5.14 ERNiCrMo-3</p> <p>Diâmetro: 2,4mm</p> <p>Marca Comercial: Metrode 62-50</p> <p>Outros: NA</p>	<p>POSIÇÃO</p> <p>Posição do chanfro: 5G</p> <p>Progressão da Soldagem: Ascendente</p> <p>Outros: N/A</p> <hr/> <p>PREAQUECIMENTO</p> <p>Temperatura: 100°C</p> <p>Interpasses: 100°C<T<300°C</p> <p>Outros: Controle por pirômetro ótico</p>

<p>TRATAMENTO TÉRMICO PÓS-SOLDAGEM</p> <p>Temperatura: N/A</p> <p>Tempo: N/A</p> <p>Outros: N/A</p>	<p>GÁS</p> <p>Gás de proteção: Argônio</p> <p>Composição: Ar-99%</p> <p>Vazão: 10 l/min</p> <p>Outros: Purga na raiz do primeiro e segundo passes.</p>
<p>CARACTERÍSTICAS ELÉTRICAS</p> <p>Corrente: Contínua</p> <p>Polaridade: Negativa</p> <p>Amperagem: 80-110</p> <p>Voltagem: 10-12</p> <p>Aporte térmico: 0,50-1,8 kJ/mm</p> <p>Outros: N/A</p>	<p>TÉCNICA</p> <p>Deposição: Retilínea</p> <p>Oscilação: N/A</p> <p>Passes simples ou múltiplos: Múltiplo</p> <p>Consumíveis simples ou múltiplos: Simples</p> <p>Outros: N/A</p>
<p>LIMPEZA</p> <p>Inicial: Escovamento</p> <p>Entre passes: Escovamento e esmerilhamento</p> <p>Método de goivagem: N/A</p> <p>Outros: N/A</p>	<p>ENSIAOS NÃO DESTRUTIVOS</p> <p>Inicial: Visual e LP na raiz.</p> <p>Final: Visual e ultrassom</p>