

BRENO NUNES LUIZ DOS SANTOS

**Estudo da qualificação de procedimento de soldagem para tubulações de aço ASTM
A335 Gr P11 utilizado em centrais termoelétricas**

BRENO NUNES LUIZ DOS SANTOS

**Estudo da qualificação de procedimento de soldagem para tubulações de aço ASTM
A335 Gr P11 utilizado em centrais termoeletricas**

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

Orientador: Prof. Dr. Marcelino Pereira do Nascimento

S237e

Santos, Breno Nunes Luiz dos Santos

Estudo da qualificação de procedimento de soldagem para tubulações de aço ASTM A335 Gr P11 utilizado em centrais termoelétricas / Breno Nunes Luiz dos Santos – Guaratinguetá, 2016.

55 f : il.

Bibliografia: f. 54-55

Trabalho de Graduação em Engenharia Mecânica – Universidade Estadual Paulista, Faculdade de Engenharia de Guaratinguetá, 2016.

Orientador: Prof. Dr. Marcelino Pereira do Nascimento

1. Tubulações. 2. Soldagem. 3. Energia elétrica.
4. Usinas termelétricas. I. Título

CDU 621.643

BRENO NUNES LUIZ DOS SANTOS

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

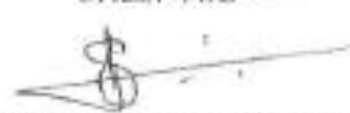
APROVADO EM SUA FORMA FINAL PELO CONSELHO DE CURSO DE
GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA

Prof. Dr. Marcelo Santo Martins
Coordenador

BANCA EXAMINADORA:


Prof. Dr. MARCELINO PEREIRA DO NASCIMENTO
Orientador/UNESP-FEG


Prof. Dr. ANGELO CAPORALI FILHO
UNESP-FEG


Prof. Dr. SÉRGIO FRANCISCO DOS SANTOS
UNESP-FEG

Novembro de 2016

AGRADECIMENTOS

Agradeço principalmente à população do Estado de São Paulo, pelo financiamento compulsório e indireto de meu privilegiado estudo nesta universidade, onde saio agora, com a capacidade e o dever de retribuição, indireta, deste favor a todos.

Pelo incentivo, ensinamentos e auxílio à realização deste trabalho, agradeço ao meu orientador, Prof. Dr. Marcelino Pereira do Nascimento.

À Petrobras e ao Eng. Paulo Vinícius, agradeço pelas informações e apoio à realização desta monografia.

Aos meus pais, Alckmin e Luzia, pelo incentivo, exemplo e amparo. Aos familiares, Letícia, Gabriel, Fábio, Livia, Rafael e Bruna, por compreender minha necessidade de dedicação à realização deste curso, o qual custou longos períodos de ausência na convivência familiar, em momentos importantes que nunca mais retornarão.

Agradeço por fim, à minha esposa Sofia, pela sua companhia, carinho e paciência sem igual, a qual foi fundamental para não me deixar desistir.

RESUMO

Tubulações para condução de vapor superaquecido em centrais termoeletricas requerem elevada resistencia mecanica em altas temperaturas. Nestes sistemas complexos de tubulações, a forma mais empregada para a uniao de tubulações e acessorios e a soldagem, principalmente por juntas de chanfro com penetracao total. Os materiais mais empregados, atualmente, para estes sistemas sao os da classificacao “*American Society for Testing and Materials*” (ASTM) A335 Gr P11 e P22, os quais contem cromo e molibdenio como elementos de liga para aumento da resistencia mecanica em temperaturas superiores aquelas em que ainda podem ser empregados os aços carbono. Neste sentido, a presente monografia tem por objetivo estudar a qualificacao de um procedimento de soldagem para tubulações de condução de vapor superaquecido para geracao de energia eletrica, projetada conforme o principal codigo de projeto para tubulações de energia, “B31.1 - *Power Piping*”, o qual estabelece que as juntas soldadas sejam realizadas pelos requisitos do “*Boiler & Pressure Vessel Code, Section IX*”(BPVC.IX), ambos da “*American Society of Mechanical Engineers*”(ASME). A soldagem para a qualificacao do procedimento estudado foi feita pelos processos a arco eletrico “*Gas Shielded Tungsten Arc Welding*” (GTAW) e “*Shielded Metal Arc Welding*” (SMAW), em uma junta de chanfro com penetracao total, em um corpo de prova de tubo de aço ASTM A335 Gr P11, com pré-aquecimento e tratamento termico de alivio de tensões. O desempenho da junta soldada foi verificado conforme ASME BPVC.IX, pelos ensaios de tracão, dobramento lateral e dureza, os quais apresentaram resultados satisfatorios, ou seja, a junta soldada demonstrou capacidade de reproduzir as propriedades mecanicas requeridas, para o material selecionado pelo projeto baseado em analise de tensões e codigo ASME B31.1.

PALAVRAS-CHAVE: Tubulacao de energia. Junta soldada. ASME B31.1.

ABSTRACT

Pipes for superheated steam driving thermoelectric plants require high mechanical strength at high temperatures. In such complex piping systems, the most used form for joining pipes and fittings is welding, and the mostly joints are chamfer with full penetration. The materials most commonly used today for these systems are the ASTM A335 Gr P11 and P22, which contain chromium and molybdenum as an alloying element mechanical strength in temperatures above those which can still be used in carbon steels. In this sense, the present monograph aims to study the qualification of a welding procedure for superheated steam conduction pipes for electric power generation, designed according to the main design code for power pipes, "B31.1 - Power Piping", Which establishes that the welded joints are performed by the requirements of the "Boiler & Pressure Vessel Code, Section IX" (BPVC.IX), both of American Society of Mechanical Engineers (ASME). The welding for the qualification of the studied procedure was done by the "Gas Shielded Tungsten Arc Welding" (GTAW) and "Shielded Metal Arc Welding" (SMAW), processes in a full penetration bevel joint in test specimen of steel tube ASTM A335 Gr P11, with preheating and post weld heat treatment. The performance of the welded joint was verified according to ASME BPVC.IX, by tensile tests, lateral bending and hardness, which presented satisfactory results, that is, the welded joint showed capacity to reproduce the mechanical properties required for the material selected by the project based in stress analysis towards ASME B31.1 code.

KEYWORDS: Power piping. Welded joint. ASME B31.1

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
API	American Petroleum Institute
ASTM	American Society for Testing and Materials
ASME	American Society of Mechanical Engineers
AWS	American Welding Society
BPVC	Boiler & Pressure Vessel Code
CP	Corpo de Prova
DN	Diâmetro Nominal
GTAW	Gas-Shielded Tungsten Arc Welding (Soldagem pelo processo TIG)
MB	Metal de Base (conforme norma de fabricação)
MS	Metal de Solda depositado
MF	Mecânica da Fratura
NBR	Norma Brasileira Registrada
N	Norma Petrobras
NR	Norma Regulamentadora
NPS	Nominal Pipe Size (diâmetro nominal de tubulação)
MTE	Ministério do Trabalho e Emprego
PH	Profissional Habilitado (Definição do Ministério do Trabalho e Emprego)
SMAW	Shielded Metal Arc Welding (Soldagem pelo processo de eletrodo revestido)
ZAC	Zona Afetada pelo Calor
ZF	Zona Fundida (pelo processo de soldagem)
ZTA	Zona Termicamente Afetada
ZAC	Zona Afetada pelo Calor
σ	Desvio Padrão
Σ	Somatório

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO.....	7
1.1	JUSTIFICATIVAS	7
1.2	OBJETIVO.....	8
1.2.1	Objetivos gerais.....	8
1.2.2	Objetivo específico.....	9
2	REVISÃO LITERÁRIA	10
2.1	TUBULAÇÕES INDUSTRIAIS.....	10
2.2	TUBULAÇÕES DE ENERGIA	10
2.2.1	Materiais para tubulações de energia.....	14
2.2.2	Material de classificação ASTM A335 Gr P11	15
2.2.3	Considerações básicas para projeto de tubulações	16
2.2.4	Juntas soldadas de tubulações	20
2.2.4.1	Processo de soldagem GTAW	20
2.2.4.2	Processo de soldagem SMAW	21
2.2.5	Efeitos térmicos da soldagem.....	21
2.2.5.1	Tratamento térmico em juntas soldadas de tubulações de energia.....	22
2.2.6	Qualificação de procedimentos de soldagem	25
2.2.6.1	Variáveis essenciais do processo de soldagem	27
2.2.6.1.1	<i>Variáveis essenciais do processo GTAW</i>	27
2.2.6.1.2	<i>Variáveis essenciais do processo SMAW</i>	28
2.2.6.2	Requisitos de dureza.....	28
2.2.6.3	Ensaio de resistência à tração.....	29
2.2.6.4	Ensaio de dobramento	31
3	MATERIAIS E MÉTODOS	34
3.1	MATERIAIS	34
3.2	MÉTODO.....	35
3.2.1	Cálculo da tensão circunferencial e espessura mínima requerida pelo ASME B31.1	35
3.2.2	Qualificação do procedimento de soldagem	36
3.2.2.1	Soldagem do corpo de prova	38
3.2.2.2	Tratamento térmico pós-soldagem	39
3.2.2.3	Preparação dos corpos de prova para ensaio de tração e dobramento ...	40
3.2.2.3.1	<i>Ensaio de tração</i>.....	41
3.2.2.3.2	<i>Ensaio de dobramento lateral</i>	42
3.2.2.3.3	<i>Medição da dureza</i>	43
4	DISCUSSÃO DOS RESULTADOS	45
4.1	ESPESSURA MÍNIMA REQUERIDA E TENSÕES ATUANTES	45
4.2	QUALIFICAÇÃO DO PROCEDIMENTO DE SOLDAGEM.....	46
4.2.1	Ensaio de tração.....	46
4.2.2	Ensaio de dobramento lateral	48
4.2.3	Medição da dureza	49
5	CONSIDERAÇÕES FINAIS E CONCLUSÕES.....	51
5.1	CONSIDERAÇÕES FINAIS	51
5.2	CONCLUSÕES.....	51
6	SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	53
	REFERÊNCIAS.....	54

1 INTRODUÇÃO

Na planta estudada, tubulações em aço carbono contendo cromo e molibdênio como elementos de liga são utilizadas principalmente no sistema de vapor superaquecido para geração de energia elétrica e acionamento de grandes turbomáquinas de processo de refino de petróleo, portanto, de grande importância para a Refinaria Henrique Lage – REVAP, da Petrobras, situada em São José dos Campos, no estado de São Paulo.

O emprego deste tipo de aço Cromo-Molibdênio, com até 2,5% de Cr, foi desenvolvido, especificamente, para serviços em temperatura elevadas e esforços mecânicos elevados, sendo o mais empregado o aço contendo 1,25%Cr e 0,5%Mo, para serviços com vapor; portanto, este material é o mais utilizado em tubulações de vapor de centrais termoeletricas (TELLES, 2003).

A concepção e manutenção de tubulações na Petrobras são regidas por um sistema próprio de normalização técnica, em que são determinados os critérios básicos e especificações de materiais e normas e códigos de projetos de instituições internacionalmente reconhecidas, tais como API, ASTM e ASME para o complemento dos requisitos. Estas normas e códigos definem expressões e procedimentos de cálculos, padrões e conceitos construtivos de todos os elementos de tubulação. Determinam métodos de ensaios e orientações de fabricação, soldagem e controle de qualidade. Isto é, fornecem requisitos completos para construção e manutenção de uma planta industrial que, no Brasil, ficam sob a responsabilidade de um Profissional Habilitado (PH), independente de normas ou códigos de projeto selecionados.

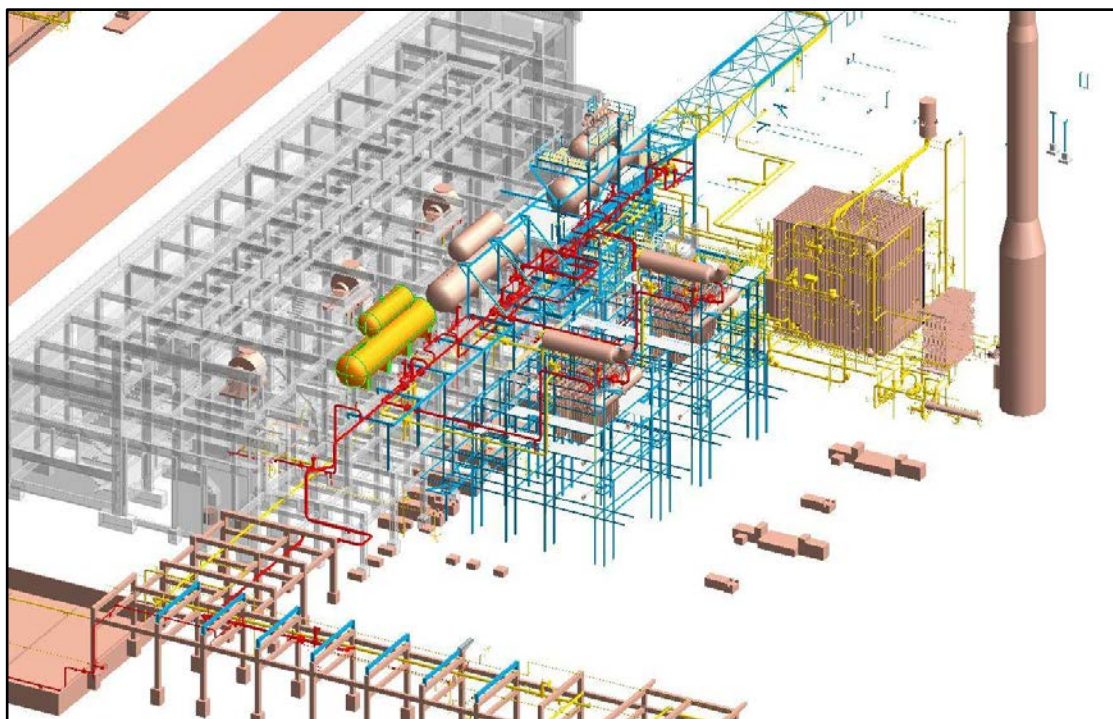
Considera-se Profissional Habilitado – PH: aquele que tem competência legal para o exercício da profissão de engenheiro nas atividades referentes a projeto de construção, acompanhamento da operação e da manutenção, inspeção e supervisão de inspeção de caldeiras, vasos de pressão e tubulações, em conformidade com a regulamentação profissional vigente no País. (Norma Regulamentadora Nº 13, 2014, Portaria 594 – MTE).

1.1 JUSTIFICATIVAS

O vapor superaquecido é conduzido das caldeiras para os turbogeradores, conforme Imagem 1, responsáveis pela geração de grande parte da energia elétrica utilizada na planta da REVAP, onde, já com mais de 30 anos de funcionamento, tornou-se necessária a substituição

e readequação de algumas destas tubulações, cujo projeto e montagem foram estudados neste trabalho.

Imagem 1 –Sistema de condução de vapor superaquecido



Fonte: Petrobras (2015)

Na implantação desta nova tubulação, mais de três mil juntas são realizadas por processos manuais de soldagem localizados, e todas devem ser capazes de reproduzir as mesmas propriedades mecânicas padronizadas para os materiais, previstas no projeto baseado na análise de tensões. Caso as juntas não reproduzam as mesmas propriedades padronizadas para o material, poderá haver falhas e graves acidentes.

1.2 OBJETIVO

1.2.1 Objetivos gerais

Estudar uma qualificação de procedimento de soldagem pelos requisitos do código “*Boiler & Pressure Vessel Code, Section IX*” (BPVC.IX), da “*American Society of Mechanical Engineers*” (ASME), para tubulações projetada pelo código ASME

B31.1 – “*Power Piping*”, do material de classificação da *American Society for Testing and Materials* (ASTM) A335 Gr P11, utilizada na condução de vapor superaquecido para geração de energia elétrica, da refinaria Henrique Lage, da Petrobras, na cidade de São José dos Campos.

1.2.2 Objetivo específico

Verificar o desempenho da junta soldada para a qualificação de um procedimento de soldagem pelos requisitos do código ASME BPVC.IX, quanto sua capacidade de reprodução das propriedades mecânicas exigidas para atendimento da premissa de projeto baseado em análises de tensões, pelo código ASME B31.1.

2 REVISÃO LITERÁRIA

2.1 TUBULAÇÕES INDUSTRIAIS

Tubulação industrial é o sistema que faz a condução de massas fluidas. Esta tubulação interliga diversas áreas em uma planta industrial, conectando equipamentos de processo e de armazenamento, para o transporte de massa de forma confinada do ambiente externo, geralmente em produção contínua. O principal elemento de uma tubulação é o tubo, um conduto fechado e cilíndrico, ao qual se define a resistência necessária para suportar as condições de projeto. Os demais elementos e acessórios são padronizados de acordo com a especificação do tubo (TELLES, 1997).

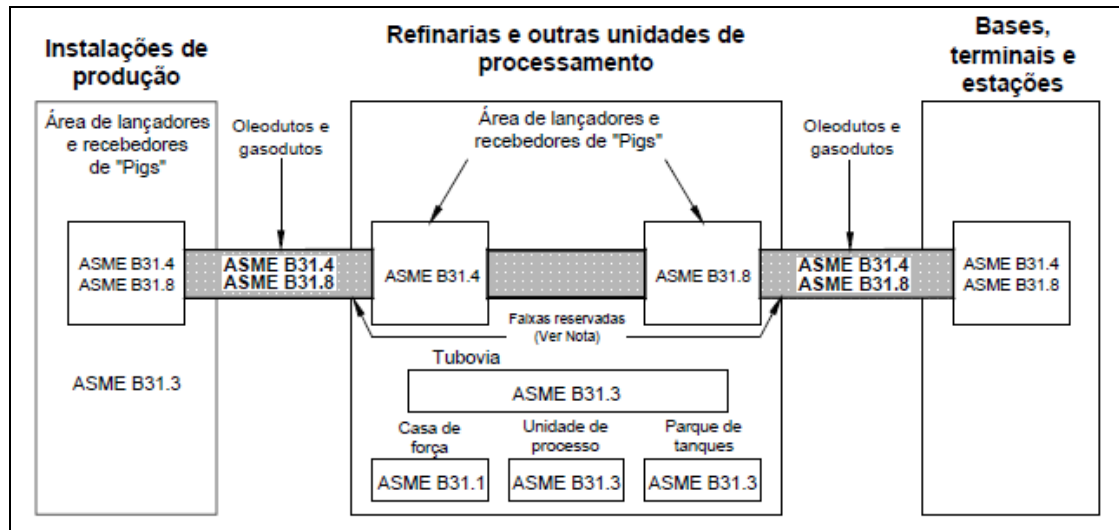
Tubos são condutos fechados, destinados principalmente ao transporte de fluidos. Todos os tubos são de seção circular, apresentando-se como cilindros ocos. Chama-se de “tubulação” um conjunto de tubos e seus diversos acessórios. [...]. Usam-se tubulações para o transporte de todos os materiais capazes de escoar, isto é, todos os fluidos conhecidos, líquidos ou gasosos, assim como materiais pastosos e fluidos com sólidos em suspensão, todos em toda a faixa de variação de pressões e temperaturas usuais na indústria: desde o vácuo absoluto até cerca de 1000 MPa, e desde próximo do zero absoluto até as temperaturas de metais em fusão. (TELLES, 1997, p1)

Tubulações são um dos ativos mais importantes nas indústrias de processos, tais como refinarias de petróleo, farmacêuticas, fertilizantes, produtos químicos, petroquímicas e termoelétricas. Neste ramo industrial, o valor investido em tubulações na construção da planta industrial é em média 25% do custo total da instalação. A montagem das tubulações atinge, em média, 45% do custo de montagem de todos os equipamentos, e o projeto das tubulações vale em média 20% do custo total do projeto da indústria (TELLES, 1997).

2.2 TUBULAÇÕES DE ENERGIA

A Petrobras (2014) estabelece códigos de projetos a serem utilizados em suas instalações. Centrais termoelétricas, por exemplo, denominada por Casa de Força, são concebidas conforme o código de projeto ASME B31.1 (“*Power Piping*”), conforme Figura 1.

Figura 1–Escopo de aplicação do código ASME B31 na Petrobras.



Fonte: Petrobras (2014, N57, 2ª Emenda).

A “*American Society of Mechanical Engineers*” (ASME) foi fundada em 1880 para fornecer um ambiente aos engenheiros discutir as preocupações trazidas pelo aumento da industrialização e mecanização. Os fundadores desta sociedade foram alguns dos fabricantes de máquinas mais proeminentes e inovadores técnicos do final do século XIX. Liderada pelo engenheiro de aço proeminente Alexander Lyman Holley, Henry Rossiter Worthington e John Edison Sweet. Em 1926, a sociedade iniciou o “*B31 Project*”, com a publicação inicial em 1935 do código B31.1, que era como o código de padrão americano para tubulações pressurizadas (ASME, 2016, tradução própria).

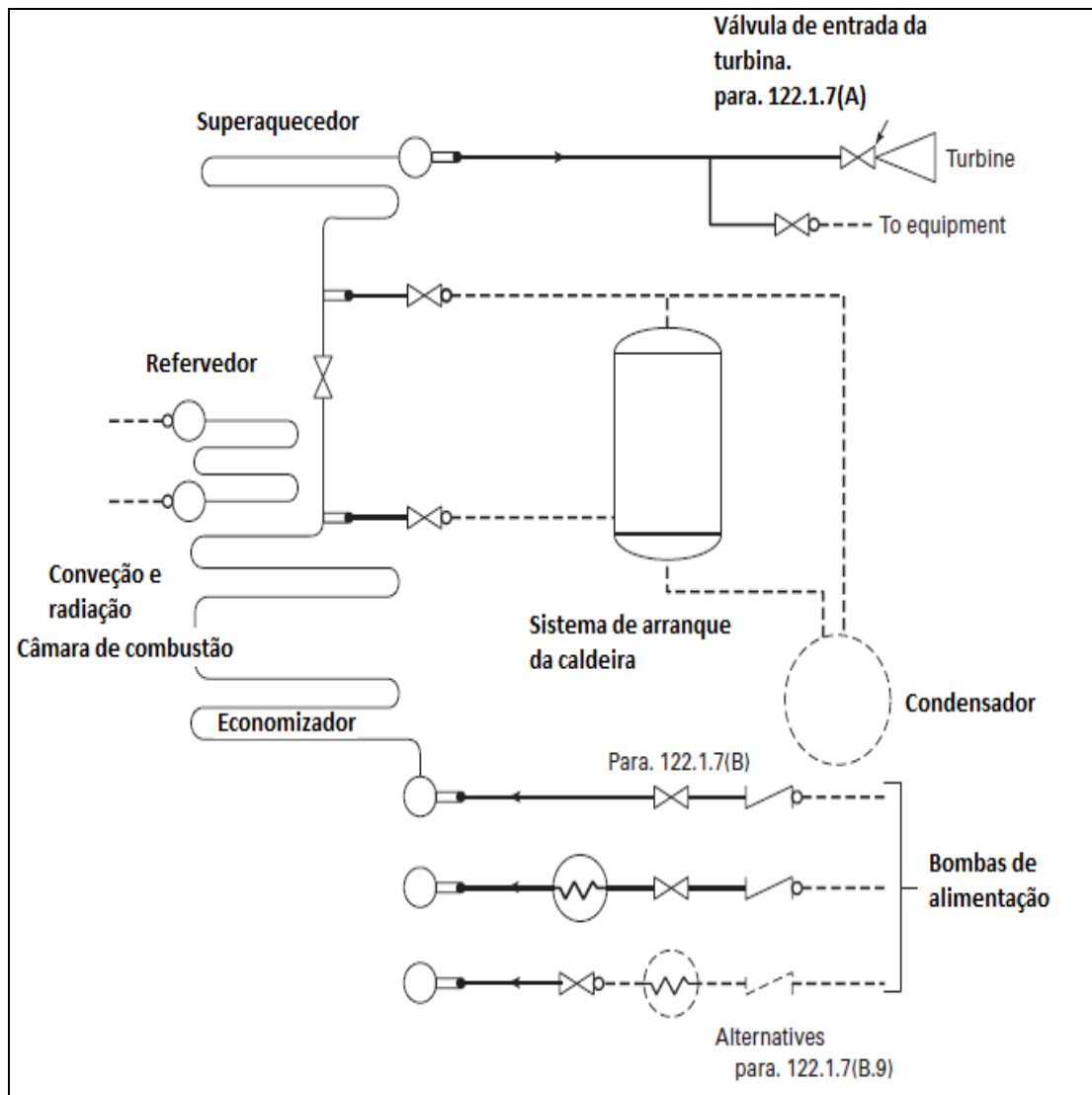
Atualmente, o B31.1, “*Code for Pressure Piping, B31 – Power Piping*” é uma das várias seções da ASME para tubulações pressurizadas, B31, publicada como um item independente das demais seções. As regras para este código foram desenvolvidas considerando as necessidades de aplicações, que incluem tubulações normalmente encontradas em estações de geração de energia elétrica em plantas industriais e institucionais (ASME B31.1, 2014, tradução própria).

Os critérios da B31.1 abrangem as classificações de temperatura e pressão para componentes padronizados e especialmente concebidos, tensões admissíveis, limites de resistência, e de vários subsídios a serem utilizados na concepção de componentes de tubulação e de tubulação (ASME B31.1, 2014, p.13, tradução própria).

A aplicação do B31.1 é limitada para as tubulações entre a caldeira e o primeiro bloqueio do equipamento externo. Este código estabelece os requisitos para a concepção,

materiais, fabricação, montagem, teste, inspeção, operação e manutenção de sistemas de tubulações, os quais incluem os tubos, flanges, parafusos, juntas, válvulas, suportes, válvulas de alívio de pressão e dispositivos de alívio de pressão (ASME B31.1, 2014, tradução própria), conforme demonstrado em destaque na Figura 2, em que atualmente está dividido, em resumo, por capítulos conforme Quadro 1.

Figura 2 – Jurisdição do código ASME B31.1



Fonte: ASME B31.1 (2014)

Quadro 1 – Conteúdo do ASME B31.1

Capítulo do código de projeto ASME B31.1	Resumo do assunto tratado em cada capítulo do código de projeto ASME B31.1
Capítulo I <i>Escopo</i>	Definições gerais do código.
Capítulo II <i>Definições para projeto</i>	Condições e critérios de projeto; Projeto por pressão (interna e externa); Seleção e limitação dos componentes; Seleção e limitação de juntas de tubulação.
Capítulo III <i>Materiais</i>	Requisitos e definições para os materiais; Requisitos gerais; Limitações dos materiais.
Capítulo IV <i>Controle dimensional</i>	Exigências dimensionais; Especificação dos materiais; Padronizações dos materiais.
Capítulo V <i>Fabricação, construção e montagem</i>	Soldagem; Pré-aquecimento de soldagem; Tratamento térmico pós-soldagem;
Capítulo VI <i>Inspeção</i>	Inspeção, exames e testes; Exigências de inspeções; Critérios de aceitação.
Capítulo VII <i>Operação e manutenção</i>	Procedimentos de operação e manutenção; Mecanismos de degradação dos materiais; Considerações para cargas dinâmicas.
Apêndices Mandatórios <i>Apêndice A até N (informações técnicas)</i>	Tensões admissíveis; Dados de expansão térmica; Módulos de elasticidade; Flexibilidade e fatores de intensificação de tensão; Referências padronizadas; Controle de qualidade.
Apêndices Não Mandatórios <i>Apêndice II até VIII (boas práticas)</i>	Regras para projeto de válvulas de segurança; Controle de corrosão; Práticas de operação, manutenção e modificação.

Fonte: ASME B31.1 (2014).

O código ASME B31 contém, em cada uma de suas seções, tabelas que dão, para todos os materiais de tubulação, as tensões admissíveis em função da temperatura, até a temperatura limite de utilização de cada material. Os valores das tabelas são as básicas, e devem ser adotadas para as tensões limites de solicitação do material em tração, compressão e flexão proveniente de cargas estáticas e permanentes (Tensões Primárias). Para cargas não permanentes, a norma ASME B31 permite exceder as tensões admissíveis, sendo o código

ASME B31.1 mais conservativo que o ASME B31.3, dado a maior severidade nos danos em caso de falha das tubulações de vapor superaquecido em termoeletricas (TELLES, 1999).

2.2.1 Materiais para tubulações de energia

Os materiais são limitados pela temperatura máxima em que ainda apresenta resistência mecânica aceitável, e evitar a oxidação superficial intensa. Para os aços carbono acalmados com silício, por exemplo, admitem utilização em temperaturas até 450 °C, porém, se for de uso contínuo, é recomendável limitar a temperatura em 427°C, a fim de evitar a grafitação e consequente redução da resistência mecânica. Já para temperaturas acima de 550°C, recomenda-se o uso de aços inoxidáveis com maiores teores de carbono, das classificações ASTM são os do tipo “H”(PETROBRAS, 2014).

O vapor de água é um fluido pouco corrosivo, e seu maior efeito a ser considerado é a redução da resistência mecânica com o aumento da temperatura, pois é geralmente acompanhado do aumento da pressão, portanto, de maior solicitação mecânica no material. Em temperaturas muito elevadas o vapor poderá se decompor, gerando O₂ livre, que reage severamente com quase todos os materiais metálicos. Entretanto, estas temperaturas são superiores às temperaturas-limite de resistência mecânica aceitável, ou seja, os processos não são projetados para atingirem tal temperatura, e este efeito pode ser desconsiderado para a seleção de materiais (TELLES, 2003).

A classe de aços-liga cromo-molibdênio possui melhor na resistência à oxidação, inclusive em temperaturas elevadas, e na resistência à corrosão em geral, sobretudo aos meios oxidantes, sendo estes efeitos tanto mais acentuados quanto maior for quantidade de cromo. Por esta razão, são empregados para serviços em temperatura mais elevadas que o permitido para o aço carbono. A composição de cromo até 2,5% demonstra aumento na resistência à fluência, e perda acentuada desta resistência em percentagens maiores, exceto nos aços inoxidáveis austenítico, contendo níquel. Por este motivo, os aços-liga com até 2,5% de Cr são específicos para serviços de alta temperatura. O segundo elemento principal de liga, molibdênio, é o elemento mais importante na melhoria da resistência à fluência do aço, contribuindo também para aumentar a resistência à corrosão alveolar (TELLES, 1997).

Um caso típico de emprego de aços-liga Cr-Mo de baixo cromo são as tubulações de vapor superaquecido, para os quais o material mais empregado é o aço contendo 1,25% de Cr e 0,5% de Mo. Quanto aos aços-liga Cr-Mo de cromo mais alto, um

caso típico de emprego são tubulações para hidrocarbonetos em temperaturas elevadas, para as quais o material mais empregado é o aço contendo 5% de Cr e 0,5% de Mo. Todos os aços-liga Cr-Mo são também indicados para serviços com hidrogênio. (Telles, 1997, p12).

“Os aços Cromo Molibdênio são largamente utilizados em indústrias químicas, estações de geração de energia, tubos superaquecidos, caldeiras, trocadores de calor e vasos de pressão” (Zampieri, 2014, dissertação, p.5). Estes elementos, principalmente o cromo, formam carbonetos complexos com o ferro, mais estáveis que o carboneto de ferro, reduzindo o efeito da grafitação em temperaturas elevadas (CHIAVERINNI, 2012).

Concentrações de cromo até 2% não alteram significativamente a temperatura de austenitização e aumenta moderadamente a temperabilidade. Durante o resfriamento do aço austenitizado, o cromo irá favorecer a formação de constituintes mais duros, como a bainita. A maior temperabilidade influencia a soldagem, principalmente no ciclo térmico a que são expostos os materiais durante o processo, exigindo controles adicionais do metal de solda, metal de base e demais zonas afetadas pelo calor (ZAMPIERI, 2014).

O molibdênio é o principal elemento responsável pelo aumento da resistência à fluência em aços Cr-Mo quando está presente em solução sólida ou em precipitados. Os átomos de Mo têm afinidade com os elementos de liga intersticiais mais forte que o cromo. Neste caso, dos aços ferríticos, o teor de até 1% em massa de molibdênio em solução é suficiente para a redução dos movimentos das discordâncias, que por sua vez aumenta a resistência (ZAMPIERI, 2014)

2.2.2 Material de classificação ASTM A335 Gr P11

A revolução industrial abriu um novo capítulo na história das especificações de materiais. Os novos materiais e técnicas inventadas durante este período precisavam de melhorias. Para evitar tais problemas, alguns fabricantes emitiam descrições detalhadas de material, para garantir que seus suprimentos respeitassem determinadas normas de qualidade, e pediam aos fabricantes de aço, amostras de cada lote, para testes simples que determinavam sua resistência à tração e elasticidade. Após anos de aprendizado na indústria americana, a ASTM se internacionalizou e hoje possui um dos maiores sistemas de padronização de materiais e testes do mundo (ASTM, 2016).

O material A335 é uma classificação de materiais da ASTM específica para tubos de aços liga e baixa liga, para serviços em temperaturas elevadas (até 590°C). O termo P11 se refere aos materiais para tubulações de aço liga com teor de 1,25% Cr e 0,5% Mo, e é a mesma para qualquer classificação da ASTM ou ASME (ASTM, 2015). Além do cromo e molibdênio, ligantes principais, esta classificação de material possui ainda outros elementos, cuja faixa de composição química, em porcentagem de massa, é definida conforme Tabela 1.

Tabela 1 – Composição química do material ASTM A335 Gr P11

Limite dos elementos químicos							
[%] em massa							
	C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo
Máximo	0.150	1.000	0.600	0.025	0.025	1.500	0.650
Mínimo	0.050	0.500	0.300	0.000	0.000	1.000	0.440

Fonte: ASTM A335 (2015)

Além da composição química, outros requisitos para a classificação do material, tais como as imperfeições superficiais, variações geométricas de espessura e diâmetro, tensão máxima de resistência à tração, alongamento mínimo requerido, dureza máxima e temperatura de tratamento térmico, também são estabelecidos na norma ASTM A335.

2.2.3 Considerações básicas para projeto de tubulações

O projeto tem por objetivo principal especificar o material e a espessura mínima para suportar a pressão interna ou externa, temperatura e vários esforços atuantes na tubulação, para a condição mais severa da pressão e esforços coincidentes. A condição mais grave é aquela que resulta na maior espessura da parede da tubulação necessária, e a mais alta classificação do flange (ASME B31.1, 2014, p.12, tradução própria).

Do ponto de vista da resistência dos materiais, cada trecho de tubulação pode ser considerado como sendo um elemento estrutural, submetido a uma série de cargas e transmitindo outras tantas ao sistema de suportes e aos equipamentos ligados à tubulação. As principais cargas atuantes na tubulação são pressão interna, peso próprio e sobrecargas de

dilatações térmicas. Tanto no projeto, como na montagem deve-se, na medida do possível, evitar ou atenuar as tensões provenientes dos fatores citados (TELLES, 1999).

O cálculo da espessura de parede, dos vãos entre suportes e das espessuras de isolamento térmico não depende do traçado e detalhamento das tubulações. A espessura de parede, por exemplo, é calculada somente em função do diâmetro, pressão do fluido e tensão admissível do material, podendo assim a espessura ser calculada previamente para várias combinações de diâmetros, pressões e tensões admissíveis (TELLES, 1999).

As tensões desenvolvidas nas paredes de um tubo, em consequência dos diversos carregamentos, podem ser classificadas em duas categorias, de comportamentos diferentes, embora atuem de forma simultânea no material, denominadas de Tensões Primárias e Tensões Secundárias, onde: Tensões Primárias são as tensões geradas para satisfazer as condições de equilíbrio estático em relação aos diversos carregamentos externos, agindo sobre a tubulação, tais como a pressão interna e sobrecargas, e Tensões Secundárias são as que resultam não de carregamentos externos, mas pelas restrições aos movimentos de dilatação térmica, ou movimento dos pontos extremos. Estas tensões, portanto, resultam da existência de restrições geométricas no sistema, que impedem ou limitam a livre dilatação ou movimentação da tubulação. No caso ideal de uma tubulação inteiramente livre para dilatações e movimentos, essas tensões secundárias não existiriam. (TELLES, 1999).

Tubulações, consideradas como vaso cilíndrico submetido à pressão interna, pode ser analisado de maneira simplificada, desde que tenha paredes finas, ou seja, ter a relação entre o raio e espessura maior que dez. Esta condição demonstra que em uma tubulação, ou vaso, de parede fina, a distribuição de tensão na sua espessura não varia significativamente, de modo que a consideremos uniforme ou constante (HIBBELER, 2004).

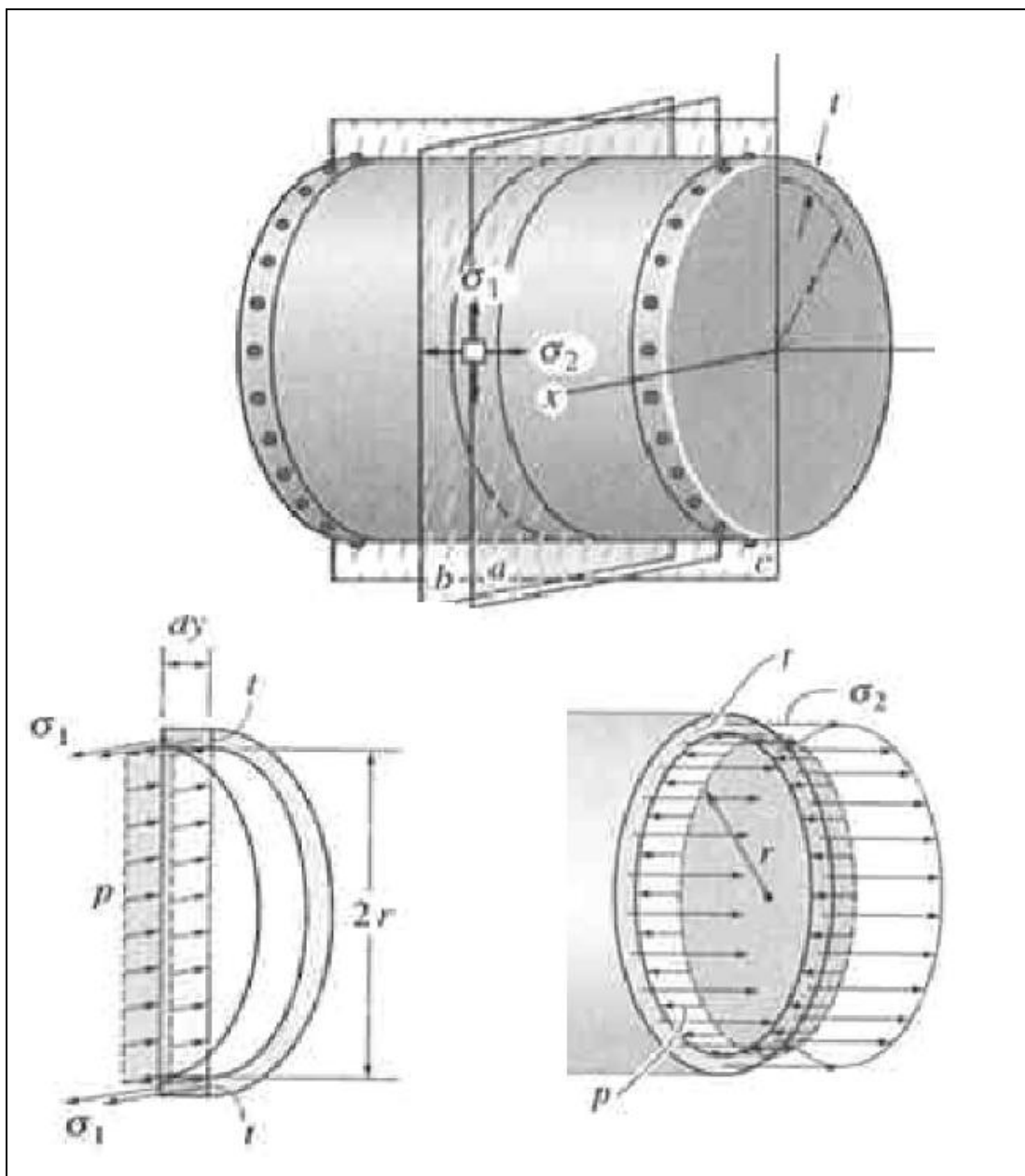
Estabelecer que os componentes de tensão normal e cisalhamento em determinado ponto do elemento quando este está submetido a vários tipos diferentes de cargas simultaneamente. Supõe-se que o material seja homogêneo e comporte-se de maneira linear-elástica. (HIBBELER, 2004, p. 325).

Considerando a tubulação um cilindro de parede delgada, sujeito a uma pressão interna, são deduzidas as expressões para as tensões desenvolvidas na parede, também denominada de tensão de membrana. (TELLES, 1999).

Devido à uniformidade do carregamento, um elemento de tubulação, está sujeito as tensões normais no sentido circunferencial e longitudinal, apresentados pela Figura 3. Como

ambos os componentes da tensão exercem tração sobre o material, e pelo o equilíbrio de forças é possível determinar a tensão atuante em cada um dos sentidos. (HIBBELER, 2004).

Figura 3 – Tensões normais na parede da tubulação



Fonte: Hibbeler (2004).

As equações de equilíbrio de forças, parametrizadas em função da pressão (p), raio (r) e espessura (t), e apresenta as tensões ilustradas na Figura 3, sendo a tensão circunferencial (σ_1) demonstrada pela equação (1) e a tensão longitudinal (σ_2) demonstrada pela equação (2). (HIBBELER, 2004).

$$\Sigma F_x = 0 \therefore 2[\sigma_1(t.dy)] - p(2.r.dy) = 0 \therefore \sigma_1 = p.r/t \quad (1)$$

$$\Sigma F_y = 0 \therefore \sigma_2(2.\pi.r.t) - p(2.r^2) = 0 \therefore \sigma_2 = p.r/2.t \quad (2)$$

Utilizando a máxima tensão atuante, tensão circunferencial (σ_1), Telles (1999), baseado no ASME B31, sugere o cálculo da espessura mínima de tubos sujeitos à pressão interna conforme a equação (3), cujos termos estão definidos no Quadro 2.

$$t = \frac{P.D_e}{2(S_h.E+P.Y)} + C \quad (3)$$

Quadro 2 - Definição dos termos da equação de cálculo de espessura de parede

Termo	Definição
P	Pressão interna de projeto
D _e	Diâmetro externo
S _h	Tensão admissível do material na temperatura de projeto
E	Coefficiente de eficiência de solda, válido para o caso de tubos com costura.
	Tubos sem costura: E=1
	Tubos com costura por solda de topo, totalmente radiografada: E=1
	Tubos com costura por solda de topo, radiografia parcial: E=0,90
	Idem, sem radiografia, solda pelos dois lados: E=0,85
	Idem, solda por um lado: E=0,80
Y	Coefficiente de redução de acordo com o material e a temperatura do tubo
	Para tubos de aço-carbono e outros ferríticos, em temperaturas até 485°C: Y=0,40 ASME B31.1 (2014), Tabela 104.1.2(A): para aços ferríticos na temperatura de 510°C, Y=0,5.
C	Soma das margens para corrosão, erosão, abertura de roscas e de chanfros. Geralmente utilizam-se valores maiores que 1,6mm. Pelo ASME B31.1 (2014), este mesmo termo é denominado A, e possui o mesmo significado.

Fonte: Telles (1999) e ASME B31.1 (2014).

Esta equação, embora empírica, pode ser empregada em qualquer sistema para todas as classes de tubulações industriais sujeitas à pressão interna, exceto para tubulações cuja

espessura seja maior que a sexta parte do diâmetro ($t > D/6$), onde necessitam de cálculo especial para a determinação da espessura (TELLES, 1999).

2.2.4 Juntas soldadas de tubulações

A soldagem é a melhor forma de união entre peças de tubulação, pois conferem resistência mecânica equivalente ao tubo, estanqueidade perfeita e permanente, boa aparência, facilidade na continuidade de aplicação de isolamento térmico e pintura, porém seus efeitos térmicos precisam ser reparados, como é o caso das ligas de cromo e molibdênio, e podem ser exigidos tratamentos térmicos de alívio de tensões (TELLES, 1997).

Juntas soldadas podem ser utilizadas em quaisquer materiais permitidos pelo ASME B31.1, para os quais é possível qualificar um procedimento de soldagem (EPS), soldadores e operadores de soldagem (ASME B31.1, 2014, p. 37, tradução própria).

Os requisitos mínimos de uma junta soldada para tubulações B31.1, são os de ter a resistência à tração nominal do metal de solda igual ou superior a resistência à tração mínima especificada de metais de base. Quando empregado metais de diferentes resistências à tração, a resistência à tração do metal de solda deve ser igual ou maior que a do material de menor resistência. A composição química do metal de solda deve ser semelhante à do metal de base, e quando ocorrer a união de diferentes metais de base, a composição química do metal de solda deve ser semelhante a um dos metais, ou uma composição intermediária entre eles (ASME B31.1, 2014, p.79, tradução própria).

Tubulações de condução de vapor superaquecido para geração de energia, geralmente são em grandes espessuras, desta forma a soldagem só é possível com processos de múltiplos passes. Assim, os processos mais usuais são o processo “*GasTungstenArcWelding*” (GTAW), também conhecido como “*TungstenInertGas*” (TIG), e o processo “*Shielded Metal ArcWelding*” (SMAW), também conhecido como processo de soldagem a arco elétrico por eletrodo revestido (ZAMPIERI, 2014).

2.2.4.1 Processo de soldagem GTAW

A soldagem a arco elétrico com eletrodo de tungstênio (GTAW) e proteção gasosa é um processo no qual a união de metais é produzida pelo aquecimento e fusão através do calor

gerador pelo arco elétrico, estabelecido entre o eletrodo de tungstênio, não consumível, e as peças a unir. A proteção da poça de fusão e do arco contra a contaminação pela atmosfera é feita por uma nuvem de gás inerte ou mistura de gases inertes. A soldagem pode ou não ser feita com adição de metal de adição e, quando usada, é feita diretamente na poça de fusão (BRACARENSE; MARQUES; MODENESI. 2009).

Uma importante característica deste processo é o excelente controle de energia transferida para a peça, devido ao controle independente da fonte de calor e da adição de metal de enchimento. Isto torna o processo adequado para soldagem de peças de pequena espessura e os passes de raiz de uma junta soldada de tubulação (BRACARENSE; MARQUES; MODENESI. 2009).

2.2.4.2 Processo de soldagem SMAW

A soldagem a arco elétrico com eletrodos revestidos (SMAW) é um processo que produz a coalescência entre metais pelo aquecimento e fusão através do calor gerado pelo arco elétrico estabelecido entre um eletrodo metálico revestido e a peça a ser soldada. O eletrodo revestido consiste em uma vareta metálica que conduz a corrente elétrica e fornece metal de adição para o enchimento da junta. O revestimento tem funções de estabilizar o arco elétrico, ajustar a composição química do metal fundido, proteger a poça de fusão através dos gases gerados e uma camada de escória formada (BRACARENSE; MARQUES; MODENESI. 2009).

2.2.5 Efeitos térmicos da soldagem

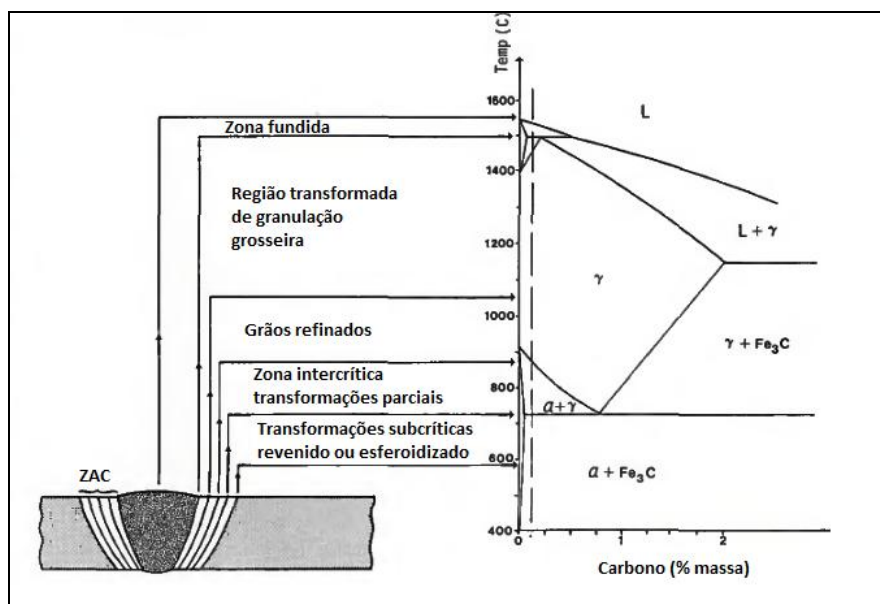
A variação de temperatura durante a soldagem em um ponto da peça é descrita pelo seu ciclo térmico, pertinente ao procedimento de soldagem. Cada região é submetida a um ciclo térmico particular que depende, entre outros fatores, da localização deste ponto em relação à solda, cujos parâmetros mais importantes são a temperatura de pico, o tempo de permanência e a velocidade de resfriamento (MARQUES; MODENESI; SANTOS, 2012).

Na soldagem por fusão, particularmente, trabalha-se com fontes de calor (arco elétrico ou uma chama, por exemplo) de elevada temperatura (entre 1.000 a 20.000°C), concentradas e, portanto, de elevada intensidade, as quais, ao serem

deslocadas ao longo da junta, resultam na formação da solda pela fusão e solidificação localizadas da junta. (MAQUES; MODENESI; SANTOS, 2012).

A velocidade de resfriamento é um dos parâmetros mais importantes na determinação da microestrutura em aços, que podem ocorrer durante o resfriamento. Em uma liga transformável, a microestrutura final de uma solda e das regiões vizinhas depende da velocidade de resfriamento na soldagem. Entretanto, esta varia continuamente com a temperatura e, para caracterizar as transformações microestruturais, ela deve ser referir a uma dada temperatura (MAQUES; MODENESI; SANTOS, 2012). O ciclo térmico de soldagem irá fazer com que cada ponto do material nas proximidades da junta, e mesmo que não sejam fundidos, irão sofrer transformações microestruturais conforme cada nível de variação de temperatura diferente, conforme pode ser observado na Figura 4.

Figura 4 – Região afetada termicamente



Fonte: Bangaru; Fairchild; Harrison; Koo; Ozekcin (1991)

2.2.5.1 Tratamento térmico em juntas soldadas de tubulações de energia

Dois tipos de tratamentos térmicos costumam ser feitos nas soldas de tubulações: são os de pré-aquecimento e os de pós-soldagens, sendo os de pré-aquecimento necessários para reduzir a taxa de resfriamento ao término da solda, evitando o resfriamento rápido do

material, que poderia causar endurecimento excessivo por possibilidade de formação de fase martensítica, de baixa ductilidade; e o tratamento térmico pós-soldagem de alívio de tensões, que além de aliviar as tensões residuais do processo de soldagem, realiza também transformações microestruturais que diminuem a dureza e aumentam a ductilidade da junta (TELLES, 1997).

Das transformações microestruturais presentes na junta, a martensita, fase metaestável, se forma por um curto movimento simultâneo de grupos de átomos, por deformação localizada, devido à grande instabilidade da austenita. Sua estrutura cristalina tetragonal de corpo centrado é semelhante à estrutura cúbica de corpo centrado, porém com arestas maiores, uma morfologia de lâminas ou agulhas, quando observada ao microscópio metalográfico. É o constituinte de maior dureza dos aços comuns. Devido suas características, a transformação martensítica ocorre instantaneamente, e depende da composição química dos aços, pois alguns elementos de liga, tais como o cromo e o molibdênio, favorecem sua formação (MAQUES; MODENESI; SANTOS, 2012).

Marques; Modenesi e Santos (2012) afirmam que tratamentos térmicos podem ser definidos como processos em que um metal, no estado sólido, é submetido a um ou mais ciclos de aquecimento e resfriamento para alterar, de forma desejada, uma ou mais de suas propriedades. Os aços podem ser submetidos a diferentes tratamentos térmicos visando, principalmente remover tensões induzidas pelo trabalho a frio, ou remover tensões originadas por um resfriamento não uniforme, e para o caso de tubulações, visa diminuir a dureza e aumentar a ductilidade, aumentando sua capacidade de deformação, permitindo ocorrer deformações para acomodações e redução de tensões localizadas.

O tratamento térmico de alívio de tensões consiste no aquecimento do aço a uma temperatura inferior à sua temperatura eutetóide e tem como objetivo causar a relaxação de tensões internas no material, resultantes de processos de conformação mecânica, soldagem. (MAQUES; MODENESI; SANTOS, 2012).

Os requisitos do ciclo térmico da soldagem são determinados pelo código de projeto, para cada grupo de material de composição e resistência mecânica semelhantes. A temperatura do metal de base das partes a serem soldadas devem ser maiores que a temperatura mínima especificada, e deve ser verificada pelo uso de lápis de térmico de fusão durante o processo de soldagem e para a indicação e registros são utilizados termopares, ou outros métodos adequados para assegurar que, as faixas de temperatura são atingidas e uniformemente mantidas durante a soldagem e ciclos térmicos requeridos. A faixa de

temperatura é especificada para os grupos de materiais, (ASME B31.1, p.95, tradução própria). Os materiais são agrupados de acordo a classe de composição química e nível de resistência à tração. Tais classes são denominadas de “*P-Number*” (P-No), em referência à faixa de composição química, e “*Group-Number*” (Gr-No), em referência ao nível de resistência à tração. Estas classificações são padronizadas pela nona seção do código de caldeiras e vasos de pressão, “*Boiler & Pressure Vessel Code, Section IX*” (BPVC.IX), da “*American Society of Mechanical Engineers*” (ASME).

Para cada classe de materiais do ASME BPVC.IX, o ASME B31.1 determina seus requerimentos de pré-aquecimento e tratamento térmico pós soldagem, conforme descritos no Quadro 3.

Quadro 3 – Ciclo térmico de soldagem ASME B31.1 para aço liga 1,25%Cr e 0,5%Mo

Etapas da soldagem	Requisitos do código de projeto ASME B31.1
Temperatura pré-aquecimento mínima: 150°C	O pré-aquecimento é obrigatório para soldagem de qualquer tipo de junta, espessura e processo de soldagem.
Temperatura entre passes máxima: 315°C	O controle de temperatura entre os passes de soldagem devem garantir a temperatura mínima (pré-aquecimento) e não ultrapassar a temperatura máxima, com a finalidade de reduzir o aporte térmico na região da junta soldada.
Temperatura pós-soldagem 650°C e 704°C	Obrigatório: para todos os tipos de juntas com espessura acima de 16 mm. • Para espessuras até 50 mm, tempo de patamar de 60 minutos para cada 25 mm de espessura, com o mínimo de 15 minutos. • Para espessuras maiores que 50 mm, tempo de patamar de 75 minutos para cada 25 mm de espessura.

Fonte: ASME B31.1 (2014)

O tratamento térmico pode ser realizado de forma localizada, por aquecimento de uma banda circunferencial em torno de todo o componente com a solda localizada no centro

aproximado da banda. A largura da banda aquecida até a faixa de temperatura especificada será de pelo menos três vezes a espessura da parede do tubo (ASME B31.1, p.102, tradução própria).

A verificação do tratamento térmico de alívio de tensões é feita através das taxas de aquecimento e resfriamento e da dureza atingida. E para verificar a dureza na zona afetada pelo calor, nas juntas de campo, é recomendável o uso de equipamentos portáteis pontuais do tipo de impedância de contato ultrassônico – UCI (PETROBRAS, N-115, 2013), sendo os valores máximos aceitáveis para aços 1,25% Cr e 0,5% Mo de 225 HB (“HardnessBrinell”) (PETROBRAS, N-133, 2015).

2.2.6 Qualificação de procedimentos de soldagem

O ASME BPVC.IX tem por objetivo estabelecer as condições de ensaios e testes para a qualificação do procedimento de soldagem e soldadores, para aplicação em todos as demais seções, o que inclui o código ASME B31.1. Os processos de soldagens a serem empregados nas tubulações B31.1 são definidos pela seção IX do ASME BPVC, e os materiais, eletrodos e metais de enchimento, devem estar em conformidade com os requisitos da seção II do ASME BPVC (ASME B31.1, 2014, p.79, tradução própria).

O procedimento de soldagem a ser utilizado nas juntas soldadas é denominado de Especificação do Procedimento de Soldagem (EPS), o qual estabelece os parâmetros e as variáveis essenciais da execução de juntas soldadas específicas para o código de projeto selecionado, para se obter as mesmas propriedades verificadas nos ensaios da Qualificação do Procedimento de soldagem (QPS) (ASME BPVC.IX, 2010, tradução própria).

O Registro da Qualificação do Procedimento de Soldagem (RQPS) é a comprovação da realização de uma junta soldada, que pode ser por mais de um processo, onde todos os parâmetros e variáveis essenciais foram detalhadamente registrados, e a junta submetida aos ensaios mecânicos, que comprovam sua capacidade de reproduzir as mesmas propriedades mecânicas essenciais do material de base (ASME BPVC.IX, 2010, tradução própria).

Salvo disposição em contrário pelo projetista, os metais de enchimento utilizados na soldagem devem produzir uma junta com a resistência igual ou maior que a tensão mínima especificada do metal de base, e a composição química do metal de solda (após a soldagem) deve ser semelhantes à análise química nominal dos metais de bases. (ASME B31.1, 2014, p.79, tradução própria).

O ASME BPVC.IX relaciona os requisitos de acordo com a espessura do metal de base para a Qualificação de Procedimento de Soldagem (QPS), conforme exposto no Quadro 4, para a qualificação dos procedimentos de soldagem. A Seção IX é referenciada para a qualificação por vários códigos de construção, tais como a secção I, III, IV e VIII e os códigos B31. Esses particulares códigos de construção se aplicam a específicos tipos de fabricação, e podem impor requisitos de soldagem adicionais às qualificações da Seção IX, e, além disso, a qualificação de acordo com a ASME BPVC.IX não é garantia de que os procedimentos e qualificações sejam aceitáveis para um código de construção particular (ASME BPVC.IX, 2010, p.xxii, tradução própria).

Quadro 4 – Requisitos de ensaios destrutivos para QPS ASME BPVC.IX

Espessura MB: T; MS: t [mm]	Espessura mínima qualificada	Espessura máxima qualificada	Teste de resistência à tração	Teste de dobramento
$T < 1,5$	T	2T e 2t	2 CP	2 CP face e 2 CP raiz
$1,5 < T < 10$	1,5 mm	2T e 2t	2 CP	4 CP lateral ou 2 CP face e 2 CP raiz
$10 < T < 19$	5 mm	2T e 2t	2 CP	4 CP lateral ou 2 CP face e 2 CP raiz
$19 < T < 38$	5 mm	2T e 2t	2 CP	4 CP lateral ou 2 CP face e 2 CP raiz
$38 < T < 150$	5 mm	2T 2t se $t < 19\text{mm}$	2 CP	4 CP lateral ou 2 CP face e 2 CP raiz
$T > 150$	5 mm	1,33T 2t se $t < 19\text{mm}$	2 CP	4 CP lateral ou 2 CP face e 2 CP raiz
Legenda: MB - metal de base; MS – metal de solda depositado. T – espessura do metal de base; t – espessura do metal de solda depositado. CP – corpo de prova.				

Fonte: ASME BPVC.IX (2010)

2.2.6.1 Variáveis essenciais do processo de soldagem

Variáveis essenciais são aquelas em que uma alteração, tal como descrito nas variáveis específicas, pode afetar nas propriedades mecânicas do conjunto soldado, e a EPS deve ser requalificada quando alteradas (ASME BPVC.IX, 2010, p.19, tradução própria).

Em geral, as EPS devem listar todas as variáveis essenciais e não essenciais, para cada processo utilizado. Se for feita uma alteração em qualquer variável essencial, é necessária a requalificação do procedimento. Se uma alteração for feita em uma variável não essencial, a EPS precisa ser apenas revisada para abordar a mudança de variável não essencial (ASME BPVC.IX, 2010, p.xxii, tradução própria).

2.2.6.1.1 Variáveis essenciais do processo GTAW

As variáveis essenciais listadas pelo ASME BPVC.IX são expostas no Quadro 5.

Quadro 5 – Variáveis essenciais para processo GTAW

Variável	Descrição da mudança
Metal de Base	Mudar a faixa de espessura qualificada Mudar o P-No qualificado (característica do metal de base)
Metal de enchimento	Mudar F-No (característica do metal de enchimento) Mudar A-No (característica do metal fundido) Acrescentar ou retirar a adição de metal Mudar a faixa de espessura
Pré-aquecimento	Diminuir mais que 55°C do mínimo
Tratamento térmico pós-soldagem	Modificar o patamar abaixo ou acima da temperatura de transformação
Gases	Mudar a proporção ou composição química Retirar a purga de raiz
Legenda: P-No – Classificação do metal de base conforme composição química; F-No – Classificação do metal de enchimento (conforme fabricado); A-No – Classificação do metal de enchimento após ter sido depositado na junta.	

Fonte: ASME BPVC.IX (2010)

2.2.6.1.2 Variáveis essenciais do processo SMAW

As variáveis essenciais listadas pelo ASME BPVC.IX são expostas no Quadro 6.

Quadro 6 – Variáveis essenciais para processo SMAW

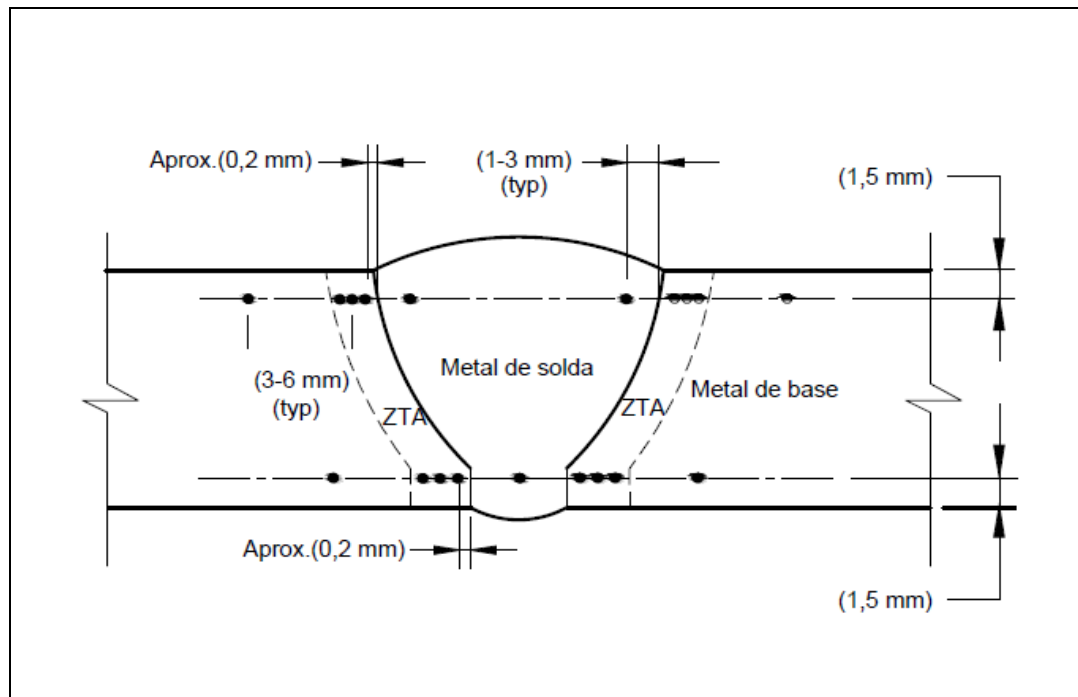
Variável	Descrição da mudança
Metal de Base	Mudar a faixa de espessura qualificada Para um passes maiores que 13 mm de espessura, o corpo de prova deverá ter 10% a mais de espessura. Mudar o P-No qualificado (característica do metal de base)
Metal de enchimento	Mudar F-No (característica do metal de enchimento) Mudar A-No (característica do metal fundido) Acrescentar ou retirar a adição de metal Mudar a faixa de espessura
Pré-aquecimento	Diminuir mais que 55°C do mínimo
Tratamento térmico pós-soldagem	Modificar o patamar abaixo ou acima da temperatura de transformação
Legenda: P-No – Classificação do metal de base conforme composição química; F-No – Classificação do metal de enchimento (conforme fabricado); A-No – Classificação do metal de enchimento após ter sido depositado na junta.	

Fonte: ASME BPVC.IX (2010)

2.2.6.2 Requisitos de dureza

Os requisitos de dureza são provenientes do código de projeto e na qualificação do procedimento devem ser registrados os valores obtidos após o término dos ciclos térmicos. Na qualificação do processo de soldagem, o método de medição de dureza deve ser “Vickers” e estar conforme ASTM E384. Deve ser utilizado durômetro de bancada com carga de 5 kgf ou 10 kgf, respeitando o que for estabelecido na norma de projeto. O perfil de dureza deve ser obtido efetuando medições na seção transversal, em todas as regiões de interesse da junta, tais como metal de base (não afetado pelo calor), zona afetada pelo calor e metal de solda depositado (PETROBRAS, N-133, 2015, p.102), conforme Figura 5.

Figura 5 - Perfil de medição de dureza para qualificação de procedimento de soldagem



Fonte: Petrobras, N-133 (2015)

Esta técnica foi introduzida inicialmente em 1925 por Smith e Sandlang, levando o nome Vickers, porque a companhia Vickers-Armstrong Ltda. fabricou as máquinas mais conhecidas para realizar este tipo de ensaio, o qual utiliza um penetrador de diamante em forma de pirâmide com base quadrada, com ângulo de 136° entre as faces opostas. Este formato produz valores de impressões semelhantes ao método de dureza Brinell (SOUZA, 1982).

Como o penetrador de diamante é praticamente indeformável, as impressões são semelhantes entre si, não importa a carga, sendo assim, o número de dureza obtido é o mesmo para qualquer que seja a carga utilizada. Para este tipo de dureza, a carga varia de 1 até 120 kgf. A mudança na carga é necessária para se obter uma impressão regular, sem deformação e de tamanho compatível para a medida de suas dimensões; isto depende da dureza do material que se está ensaiando (SOUZA, 1982).

2.2.6.3 Ensaio de resistência à tração

Com o ensaio de resistência à tração pode-se afirmar que praticamente as deformações promovidas no material são uniformemente distribuídas em todo o seu corpo, pelo menos até

ser atingida uma carga máxima próxima do final do ensaio, e como é possível fazer com que a carga aumente em uma velocidade lenta, o ensaio permite medir satisfatoriamente a resistência do material. A uniformidade de deformações termina no momento em que é atendida a carga máxima suportada pelo material, quando começa a aparecer o fenômeno da estricção ou diminuição da seção do corpo de prova, nos casos de metais com certa ductilidade. A ruptura sempre se dá na região estrita, ao menos que um defeito interno promova a ruptura em outra região (SOUZA, 1982).

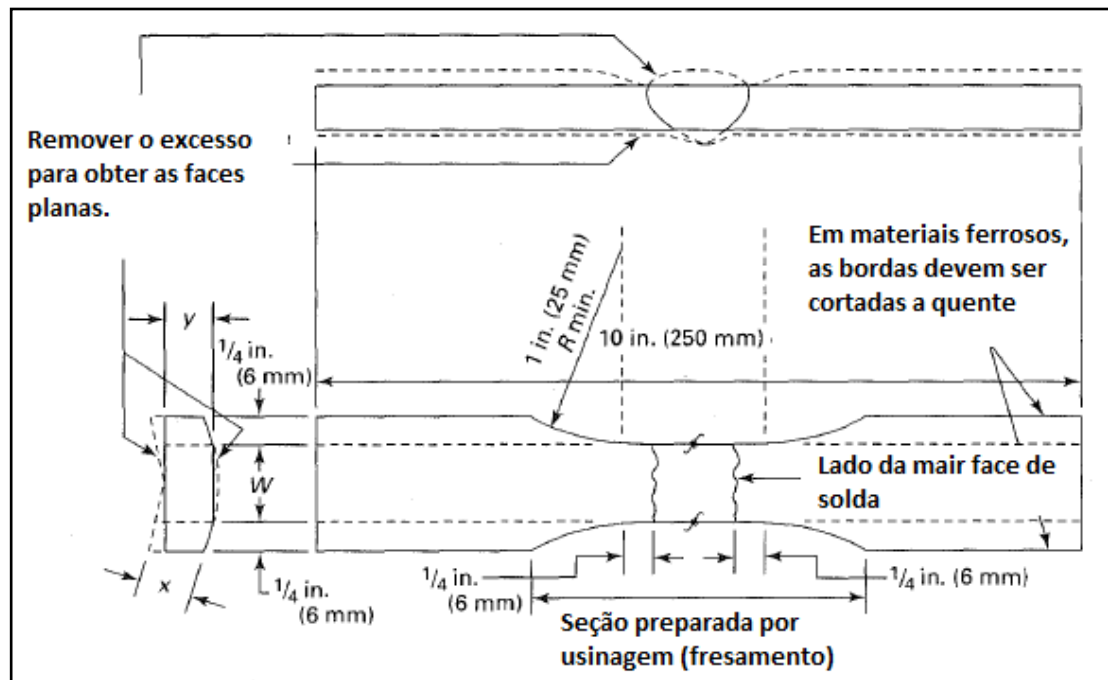
A melhor maneira para determinar as propriedades mecânicas de um metal por tração é ensaiar um corpo de prova retirado da peça. Assim, os ensaios de tração geralmente são feitos em corpos de prova normalizados. Um corpo de prova pode ter sua parte útil com seção circular ou retangular, dependendo da forma e tamanho do produto acabado do qual foi retirado, e a parte útil é a região onde são feitas as medidas das propriedades mecânicas do metal (SOUZA, 1982).

A facilidade de execução e a reprodutibilidade dos resultados tornam o ensaio de tração o mais importante de todos os ensaios para determinação de propriedades mecânicas. (Souza, 1982, p.6).

O limite de resistência é calculado pela carga máxima atingida no ensaio. Embora o limite de resistência seja uma propriedade fácil de se obter, seu valor tem pouco significado com relação à resistência dos metais dúcteis. Para esses, o valor do limite de resistência dá a medida da carga máxima que o material pode atingir sob a restrita condição de carregamento uniaxial. Mesmo nesse caso, a tensão gerada ao atingir a carga máxima é maior que o limite de resistência quando calculado pela área inicial, sem considerar a estricção (SOUZA, 1982). “Chapas ou tubos soldados são ensaiados geralmente conforme normas ASME, Seção IX [...]. O limite de resistência ou a carga máxima atingida são os únicos valores calculados”. (Souza, 1982, p. 68).

Segundo ASME BPVC.IX (2010), o teste de tração deve ser realizado até a ruptura sob a carga de tensão. A resistência à ruptura deve ser calculada pela divisão da carga final de ruptura pela área inicial da seção útil. Estes testes devem ser feitos em corpos de prova conforme demonstrado na Figura 6, e pode ser usado na proporção da espessura do tubo.

Figura 6 - Corpo de prova para ensaio de tração ASME BPVC.IX



Fonte: ASME BCV.IX (2010)

Os valores mínimos de resistência à tração para o aço ASTM A335 Gr P11, na Qualificação de Procedimento de Soldagem, é de 415 MPa. Para a junta ser aprovada no teste de tração, as amostras devem ter uma resistência à tração que não seja inferior ao mínimo especificado para o metal de base e, em caso de ruptura no metal de base ou interface, o ensaio deve ser aceito como satisfeito se houver a ruptura até 5% abaixo do mínimo especificado para o metal de base (ASME BPVC.IX, 2014, p.4,5, tradução própria).

2.2.6.4 Ensaio de dobramento

O ensaio de dobramento fornece indicação qualitativa da ductilidade do material. Por ser um ensaio de realização simples, ele é largamente utilizado na indústria. Este ensaio, em sua forma elementar, não determina nenhum valor numérico, havendo porém variações do ensaio que permite obter valores de certas propriedades mecânicas do material (SOUZA, 1982).

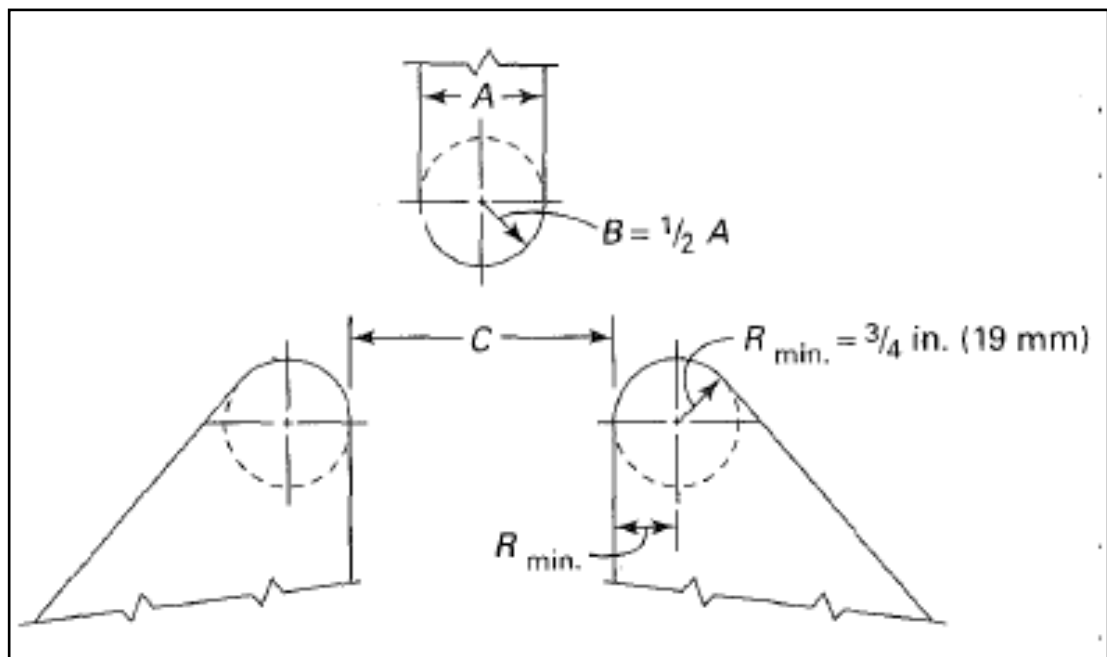
O ensaio consiste em dobrar um corpo de prova assentado em dois apoios afastados a uma distância especificada, em proporção ao tamanho do corpo de prova. Através de um

cutelo centralizado na parte oposta à face assentada é aplicada a carga resultando em um esforço de flexão no centro do corpo de prova, até que seja atingido um ângulo de dobramento. A carga, na maioria das vezes, não importa no ensaio e não é medida. E como o dobramento pode ser realizado em qualquer ponto e em qualquer direção do corpo de prova, ele é um ensaio localizado e orientado, fornecendo assim, uma indicação da ductilidade em qualquer região desejada do material (SOUZA, 1982).

Em corpos de prova com junta soldada é realizado o ensaio de dobramento guiado de 180° para a qualificação de procedimentos de soldagens, sendo a observação de fissuras ou fendas na zona tracionada o procedimento de aceitação, cujo critério de aceitação é definido em normas específicas (SOUZA, 1982).

Corpos de prova para ensaio de dobramento guiado deverão ser elaborados com secção aproximadamente retangular. As superfícies de corte serão designadas nos lados do corpo de prova, as outras duas superfícies serão chamadas superfícies de face ou raiz. A superfície da face é a que tem a maior largura da solda. A espessura da amostra e raio de curvatura são mostrados na Figura 7, cujos termos estão descritos no Quadro 7 para o ensaio de dobramento guiado sobre rolos do material de classificação ASME BPVC.IX P.No 11 (ASTM A335 Gr P11) (ASME BPVC.IX, 2010, p.5, tradução própria).

Figura 7 – Esquema de ensaio de dobramento sobre rolos ASME BPVC.IX



Fonte: ASME BCV.IX (2010)

Quadro 7 - Dimensões para o ensaio de dobramento guiado sobre rolos

Espessura = 10 mm	A = 63,5 mm; B = 31,8 mm; C = 85,8 mm; D = 42,9 mm
Espessura (t) < 10mm	A = 6,67(t); B = 3,33(t); C = 10(t)+3,2 ; D = 5(t) + 1,6

Fonte: ASME BPVC.IX (2010)

O metal de solda e a zona afetada pelo calor deverão estar completamente dentro da porção dobrada da peça após o teste. Os corpos de prova de dobramento guiado irá aprovar o procedimento de soldagem em qualificação, se não conter nenhuma descontinuidade ou fenda aberta na solda, ou na zona afetada pelo calor, maior que 3mm, medida em qualquer direção da superfície convexa após a dobra. Descontinuidades abertas que ocorrer nos cantos, não serão consideradas, ao menos que haja evidência definitiva de que resultam de falta de fusão falta ou inclusões de escória, ou outras descontinuidades internas pré-existentes (ASME BPVC.IX, 2010, p.5, tradução própria).

3 MATERIAIS E MÉTODOS

O material é uma amostra do lote empregado na implantação do novo sistema de tubulações de vapor superaquecido da Refinaria Henrique Lage, da Petrobras, o qual é projetado para as condições de 10,78 MPa de pressão manométrica interna, e temperatura de 510 °C. Para estas condições de pressão e temperatura, foram verificadas as tensões máximas atuantes para cada diâmetro empregado no sistema, cuja soldagem deverá também garantir juntas com propriedades mecânicas equivalentes ao material de base.

3.1 MATERIAIS

Utilizou-se uma amostra de tubo ASTM A335 Gr P11 CL 2, de composição química padronizada, conforme Tabela 1 do item 2.2.2 desta monografia, cuja composição química do material foi fornecida pelo fabricante, com laudo técnico, demonstrando que todos os componentes químicos estão dentro das faixas estabelecidas, e que também se enquadram nos critérios da classificação ASME BPVC.IX P-No 4 e Gr 1, o qual agrupa materiais, cujo limite de tensão admissível na temperatura, pelo código de projeto pelo ASME B31.1, estão demonstrados na Tabela 2.

Tabela 2 – Tensão admissível pelo ASME B31.1 e composição química fornecida

Tensão Admissível: "ASME B31.1, Table A-2. Epec. No A335 Gr P11"							
Temp. [°C]	454	482	510	538	566	593	621
Tensão [MPa]	96,53	93,77	64,12	43,44	28,96	19,30	N/A
Composição química do material fornecido							
E. Químico	C	Mn	P	S	Si	Cr	Mo
Resultado [%]	0,11	0,42	0,014	0,003	0,56	1,05	0,46

ASME B31.1. p127 (2014); Petrobras (2015).

Para a qualificação do procedimento de soldagem, foi utilizado um tubo com 700 mm comprimento e diâmetro nominal ("*Nominal PipeSize*") NPS 6, com diâmetro externo igual a 168 mm e espessura igual a 15,87 mm (de acordo com a padronização e limites dimensionais ASME B36.10, 2004, p.6).

Para a soldagem, foram empregados os materiais de enchimento, para cada um dos processos:

- GTAW: ER80S-B2 para a soldagem dos passes de raiz (vareta sólida, com tensão de escoamento mínima de 470 MPa e limite de resistência à tração mínimo de 550 MPa, contendo 0,09% C, 1,25% Cr, 0,19% Cu, 0,59% Mn, 0,43% Mo, 0,05% Ni, 0,52% Si e S e P menores que 0,007%)
- SMAW: E2018-B2 H8 para soldagem dos passes de enchimento, reforço e acamamento (eletrodo revestido, com hidrogênio difusível de no máximo 8 ml de hidrogênio por 100 g de metal depositado (H8), com tensão de escoamento maior que 460 MPa e limite mínimo de resistência à tração de 550 MPa, conteúdo 0,063% C, 1,35%Cr, 0,63% Mn, 0,355% Si e S e P menores que 0,016%).

3.2 MÉTODO

3.2.1 Cálculo da tensão circunferencial e espessura mínima requerida pelo ASME B31.1

Definidas as condições de projeto do sistema de vapor superaquecido à temperatura de 510°C e pressão manométrica de 10,78 MPa. A tensão máxima atuante é definida pelo equilíbrio de forças, conforme a equação (1), demonstrada no item 2.2.3 desta monografia, e a espessura mínima requerida, para tubulações de energia ASME B31.1, é calculada pela equação (3), também demonstrada no item 2.2.3 desta monografia.

- Tensão máxima atuante, equação (1), apresentado por Hibbeler (2004):

Sendo:

p: pressão manométrica interna igual a 10,78 MPa;

r: raio interno;

t: espessura mínima requerida, calculada pela equação (3);

σ_1 : tensão circunferencial.

- Espessura mínima requerida, equação (3), conforme ASME B31.1:

Sendo:

P: pressão manométrica interna igual a 10,78 MPa.

S_h : tensão admissível na temperatura de 510°C conforme ASME B31.1 igual a 64,12 MPa, conforme Tabela 2 do item 3.1 desta monografia.

D_e : diâmetro externo (padronização ASME B36.10).

E: coeficiente de eficiência da solda igual a 1 (ASME B31.1-Table 102.4.3(b)).

Y: coeficiente de redução conforme temperatura igual a 0,5 (ASME B31.1-Table 104.1.2-A).

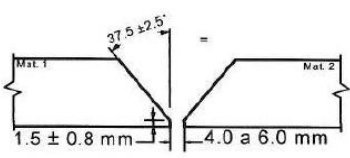
C: soma das margens para corrosão e erosão, igual a 1,5 mm (Petrobras, N-57).

Por tolerância dimensional da norma de fabricação do tubo, ASTM A335-Table-7, reduções de até 12,5% na espessura são aceitáveis, portanto consideradas para a seleção da espessura padronizada pela norma ASME B36.10-Table 1.

3.2.2 Qualificação do procedimento de soldagem

O corpo de prova foi preparado para qualificação de procedimento de soldagem conforme ASME BPVC.IX sob o código de projeto B31.1, pelos processos de soldagem GTAW e SMAW. O ciclo térmico foi executado sob definições do código ASME B31.1 para o material de base ASTM A/SA335 Gr P11, conforme Quadro 3 do item 2.2.5.1 desta monografia, e as variáveis são essenciais, conforme ASME BPCB.IX, para cada um dos processos, foram pré-determinadas para aplicação e registro durante a soldagem corpo de prova, conforme apresentado no Quadro 8.

Quadro 8 – Variáveis pré-determinadas para qualificação do procedimento de soldagem

Variáveis	Descrições
Projeto da junta	Topo com chanfro em “V” 
Processos de soldagem	Raiz: GTAW Enchimento e acabamento: SMAW

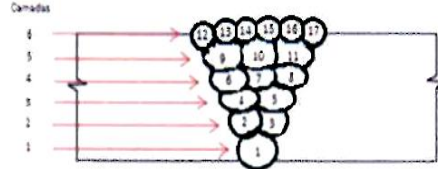
Cobre-junta (“backing”)	GTAW: não; SMAW: sim.
Faixa de espessura	Espessura (T) mínimo igual a 5 mm; Espessura (T) máxima igual a 31,7 mm. Cada passe menor que 13 mm
Metal de Base (MB)	ASME/ASTM A 335 Gr P11 CL2 ASME BPVC.IX P-No 4 Liga nominal 1,25% Cr 0,5% Mo Resistência à tração nominal 415 Mpa
Materiais para o processo GTAW	Vareta sólida de diâmetro 2,4 mm e 3,2 mm de classificação SFA 5.28/AWS ER80S-B2 / ASME BPCV.IX F-No 6/A-No3; Espessura (t) maior que 5 mm, menor que 12 mm Eletrodo de tungstênio tipo AWS 5.12 EWTh-2 toriado ϕ 2,5 mm. Proteção da tocha: argônio 99,99%; vazão 10 a 15 l/min.
Material para o processo SMAW	Eletrodo revestido de diâmetro 2,4 e 3,2 mm de classificação SFA 5.5/AWS E8018-B2; ASME BPVC.IX F-No 4 / A-No 3 Espessura (t) maior que 5 mm, menor que 19,7 mm Sem gases de proteção complementar
Pré-aquecimento	Mínimo 150 °C; Máximo 300 °C.
Tratamento térmico pós-soldagem (alívio de tensões)	Patamar entre 650 e 704°C Tempo de patamar mínimo 60 min; Temperatura de controle acima de 315°C Taxa de aquecimento: 315 °C por hora Taxa de resfriamento: 315 °C por hora
Características de energia de soldagem para o processo GTAW	Polaridade (CC-): corrente contínua direta; Corrente mínima igual a 130 A; Corrente máxima igual a 150 A; Tensão mínima igual a 10 V; Tensão máxima igual a 15 V; Velocidade de deposição máxima 170 mm/min; Velocidade de deposição mínima 120 mm/min; Energia (potência) mínima igual a 1300 W Energia (potência) máxima igual a 2250 W.
Características de energia de soldagem para o processo SMAW	Polaridade (CC+): corrente contínua inversa. Corrente mínima igual a 100 A; Corrente máxima igual a 160 A; Tensão mínima igual a 10 V; Tensão máxima igual a 15 V; Velocidade de deposição máxima 120 mm/min; Velocidade de deposição mínima 260 mm/min; Energia (potência) mínima igual a 1100 W Energia (potência) máxima igual a 2400 W.

Fonte: Petrobras (2015)

3.2.2.1 Soldagem do corpo de prova

A soldagem do corpo de prova foi realizada por máquina de solda de fonte inversora, conforme parâmetros pré-determinados no Quadro 8, e o registro de todas informações da soldagem está apresentado no Quadro 9.

Quadro 9 – Registro da soldagem do corpo de prova

Parâmetros pré-determinados				
Variáveis		Descrições		
Passes e camadas				
Metal de base		Diâmetro igual a 168,00 mm; Espessura igual a 15,87 mm;		
Gases de soldagem para o processo GTAW		Vazão na tocha igual a 12 l/min Vazão de purga igual a 14 l/min		
Pré-aquecimento		Temperatura mínima maior que 200 °C; Temperatura máxima menor que 300 °C Aquecimento localizado por resistência elétrica.		
Tratamento térmico pós-soldagem (alívio de tensões)		Patamar aproximadamente 730 °C Tempo de patamar de 2 horas Temperatura de controle acima de 300°C Taxa de aquecimento menor que 150°C por hora Taxa de resfriamento menor que 150 °C por hora		
Parâmetros de soldagem				
Passe / Camada	Consumível	Característica elétrica	Velocidade [mm/min]	Oscilação [mm]
1 / 1	ER80S-B2 ϕ 3,2 mm	10 V / CC- / 130 A	140	9,0
2 / 2	ER80S-B2 ϕ 3,2 mm	13 V / CC- / 145 A	170	9,5
3 / 2	ER80S-B2 ϕ 3,2 mm	15 V / CC- / 145 A	175	9,0
4 / 3	E8018-B2 H8 ϕ 3,2 mm	22 V / CC+ / 110 A	160	9,5
5 / 3	E8018-B2 H8 ϕ 3,2 mm	32 V / CC+ / 122 A	180	9,5
6 / 4	E8018-B2 H8 ϕ 3,2 mm	20 V / CC+ / 115 A	190	9,0
7 / 4	E8018-B2 H8 ϕ 3,2 mm	22 V / CC+ / 125 A	195	9,5
8 / 4	E8018-B2 H8 ϕ 3,2 mm	22 V / CC+ / 128 A	195	9,5
9 / 5	E8018-B2 H8 ϕ 3,2 mm	25 V / CC+ / 125 A	200	9,5
10 / 5	E8018-B2 H8 ϕ 3,2 mm	23 V / CC+ / 128 A	190	9,5
11 / 5	E8018-B2 H8 ϕ 3,2 mm	22 V / CC+ / 128 A	200	9,5
12 / 6	E8018-B2 H8 ϕ 2,5mm	20 V / CC+ / 80 A	195	8,0
13 / 6	E8018-B2 H8 ϕ 2,5 mm	23 V / CC+ / 94 A	200	7,0
14 / 6	E8018-B2 H8 ϕ 2,5 mm	25 V / CC+ / 94 A	185	7,5
15 / 6	E8018-B2 H8 ϕ 2,5 mm	22V / CC+ / 95 A	190	7,5

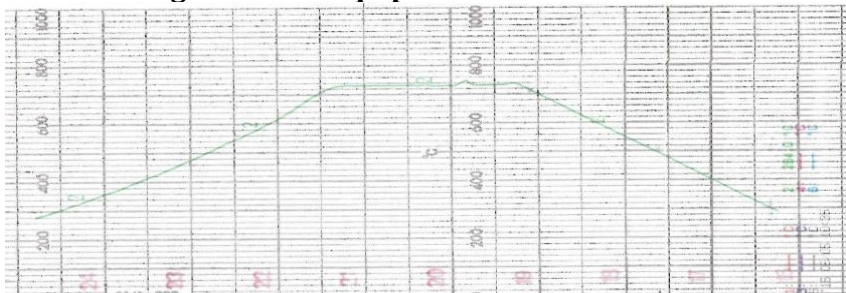
16 / 6	E8018-B2 H8 ϕ 2,5 mm	23 V / CC+ / 95 A	200	7,0
17 / 6	E8018-B2 H8 ϕ 2,5 mm	23 V / CC+ / 95 A	200	7,0
Instrumentos e equipamentos: Paquímetro 015; calibre de solda (HI-LO) Hi 020; termômetro infravermelho MTB350014496; alicate amperímetro AP 001; calibre de solda (FBTS)1200.				

Fonte: Petrobras (2015)

3.2.2.2 Tratamento térmico pós-soldagem

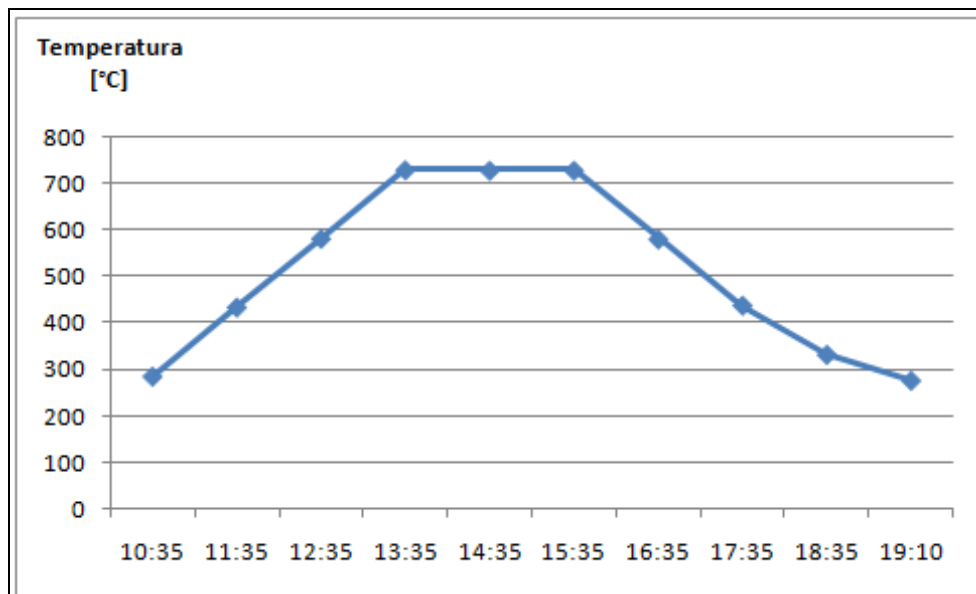
O tratamento térmico do corpo de prova está apresentado no Quadro 10 e Gráfico 1.

Quadro 10 – Tratamento térmico pós-soldagem

Parametrização	
Variáveis	Descrições
Técnica de aquecimento	Localizado por resistências elétricas
Temperatura de controle	Acima de 300 °C
Taxa de aquecimento	Parametrizado para 150 °C por hora
Patamar	Parametrizado para 730 °C e 2 horas
Taxa de resfriamento	Parametrizado para 150°C por hora
Controle de temperatura	Termopar do tipo K
Leitura do registro gráfico	
Horário	Temperatura
10h35min (início de registro)	284 °C
11h35min (aquecimento)	433 °C
12h35min (aquecimento)	581 °C
13h35min (início do patamar)	729 °C
14h35min (patamar)	728 °C
15h35min (fim do patamar)	728 °C
16h35min (resfriamento)	580 °C
17h35min (resfriamento)	437 °C
18h35min (resfriamento)	331 °C
19h10min (fim do controle)	275 °C
Gráfico registrado no equipamento de tratamento térmico	
	

Fonte: RQPS AL 002

Gráfico 1 – Tratamento térmico pós-soldagem



Fonte: Petrobras (2015)

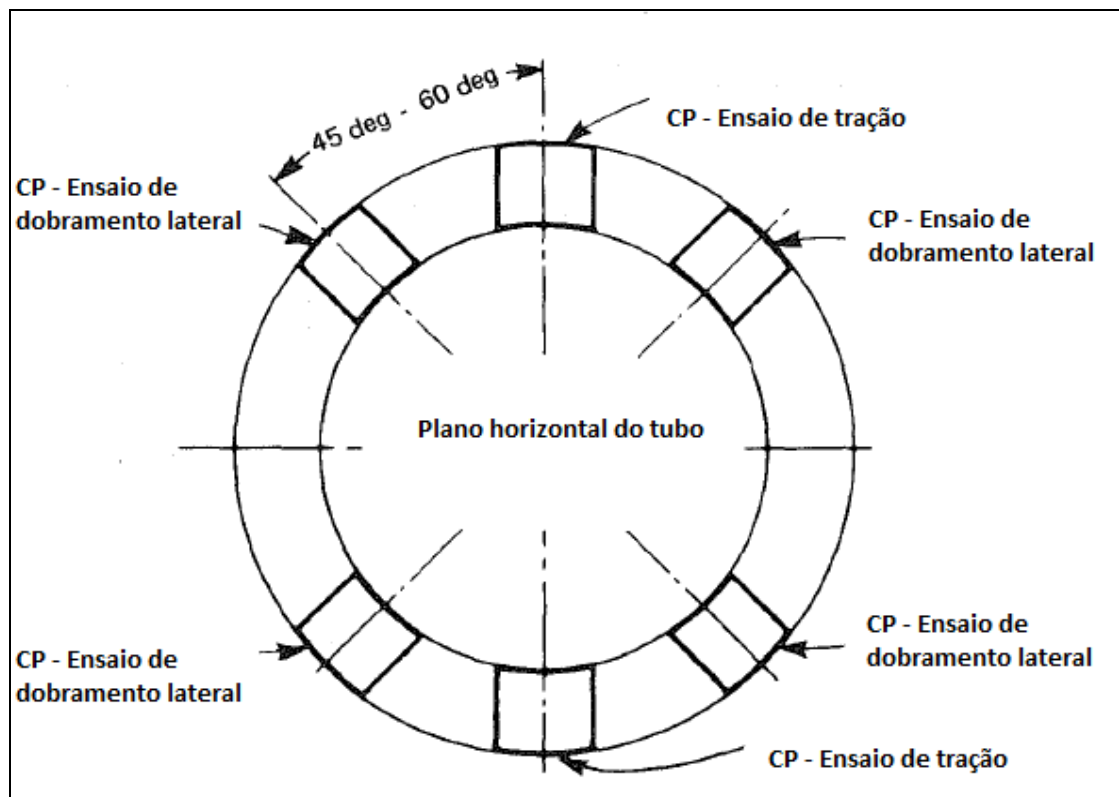
Por semelhança de triângulo, é possível verificar as taxas de aquecimento e resfriamento, e ambas estão nos parâmetros especificados pelo procedimento de soldagem.

- Taxa de aquecimento aproximadamente 140 °C por hora.
- Taxa de resfriamento aproximadamente 120 °C por hora.
- Tempo de patamar aproximadamente duas horas.
- Temperatura de patamar aproximadamente 720 °C.

3.2.2.3 Preparação dos corpos de prova para ensaio de tração e dobramento

Os corpos de prova foram retirados do corpo de prova soldado, seguindo as orientações do código de soldagem ASME BPVC.IX, em seu artigo QW-463.1(e), conforme apresentado na Figura 8.

Figura 8 – Orientação para de retirada de corpo de prova de tração e de dobramento



Fonte: ASME BPVC.IX (2010)

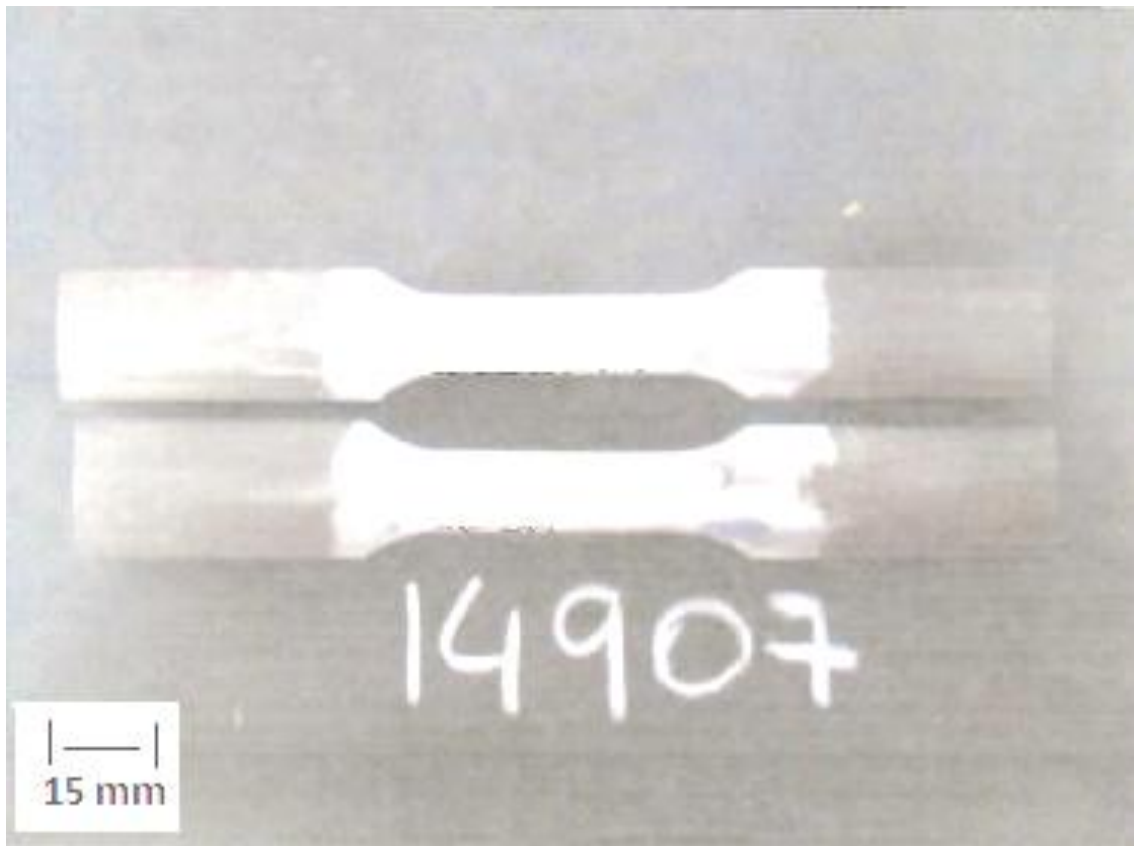
3.2.2.3.1 Ensaio de tração

Após a extração dos corpos de prova, houve a preparação conforme recomendações do código de soldagem ASME BPVC.IX, em seu artigo QW 462.1(b), cuja avaliação dos resultados será realizada conforme artigo QW 150, ambos descritos no item 2.2.6.3 desta monografia.

Para a realização do ensaio, foi utilizado a máquina marca Lbmt, com certificado de calibração DNTT/545c/14, em ambiente à temperatura de 23 °C.

Os corpos de prova preparados, antes do rompimento pelo ensaio de tração, estão apresentados na Fotografia 1.

Fotografia 1 – Corpos de prova antes do ensaio de tração



Fonte: Petrobras (2015)

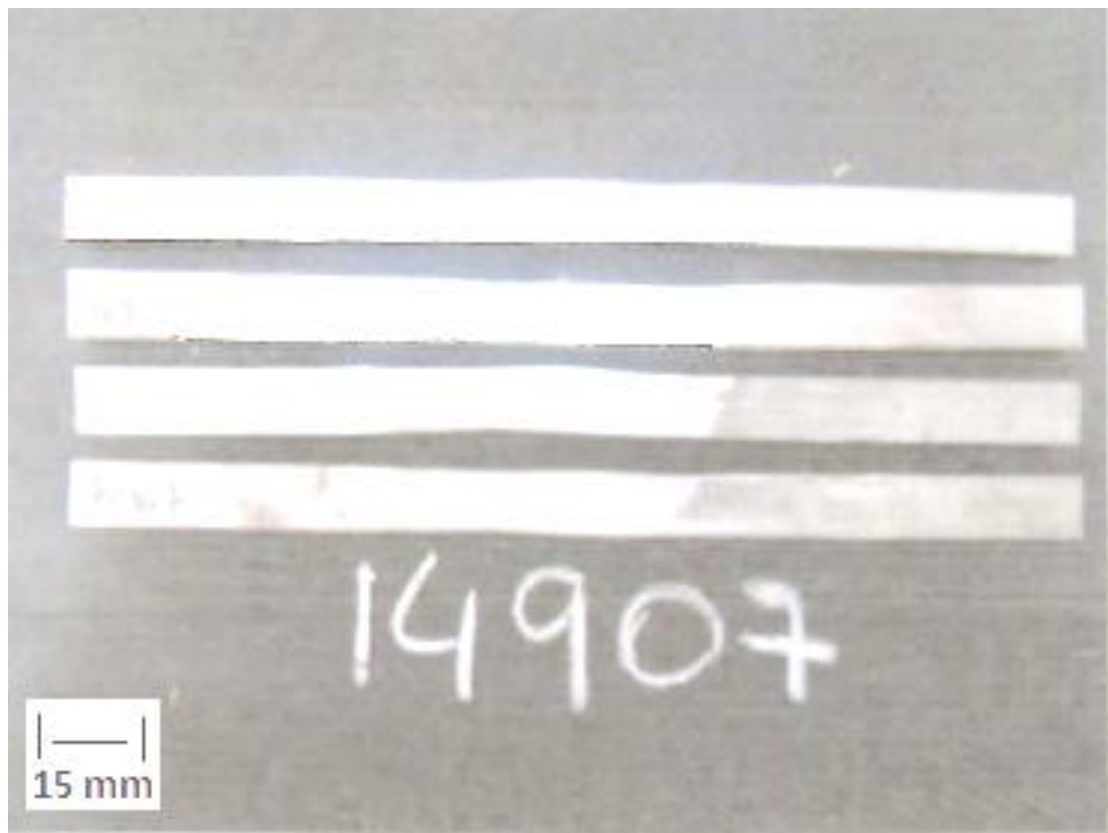
3.2.2.3.2 *Ensaio de dobramento lateral*

Após a extração dos corpos de prova, houve a preparação conforme recomendações do código de soldagem ASME BPVC.IX, em seu artigo QW 462.2, cuja avaliação dos resultados será realizada conforme artigo QW 160, ambos descritos no item 2.2.6.4 desta monografia.

Para a realização do ensaio, foi utilizado a máquina marca Lbmt, com certificado de calibração DNTT/545c/14, em ambiente à temperatura de 23 °C.

Os corpos de prova preparados, antes do rompimento pelo ensaio de tração, são apresentados na Fotografia 2.

Fotografia 2 – Corpos de prova antes do ensaio de dobramento lateral

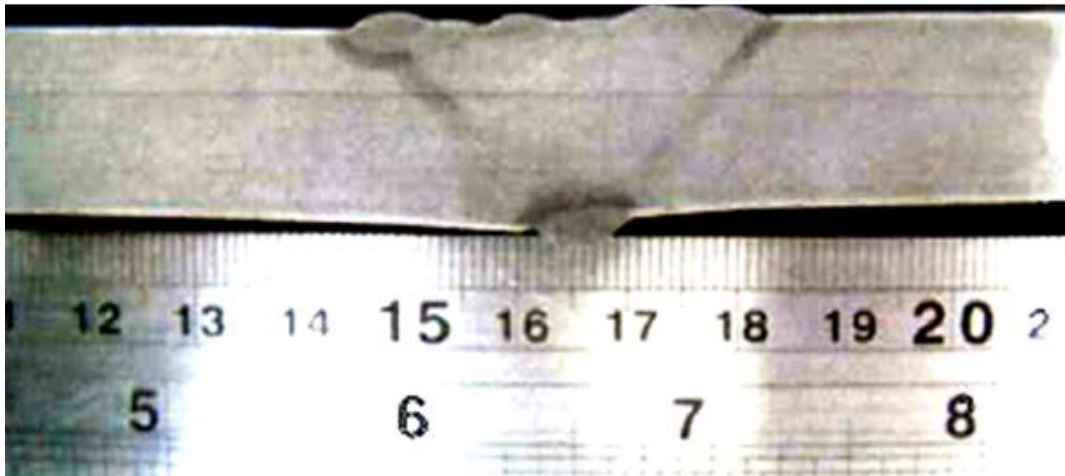


Fonte: Petrobras (2015)

3.2.2.3.3 Medição da dureza

Uma amostra da face soldada foi preparada por lixamento manual (# 200) e ataque com Nital 5% para revelação da zona afetada pelo calor, apresentada na Fotografia 3.

Fotografia 3 – Face preparada para a medição de dureza



Fonte: Petrobras (2015)

Para a realização das medidas de dureza nas regiões de interesse, foi utilizado o microdurômetro MD-01 – Microteste HV-10 (dureza Vickers com carga de 10 kgf), com certificado de calibração CC.15.011904, registrando a média de três medidas para cada um dos pontos das regiões determinada pela norma N-133 da Petrobras, conforme descrito no item 2.2.6.2 desta monografia.

4 DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

4.1 ESPESSURA MÍNIMA REQUERIDA E TENSÕES ATUANTES

O cálculo realizado conforme o procedimento mencionado no item 3.2.1 desta monografia, e os resultados para cada um dos diâmetros de tubulações do sistema estão apresentados na Tabela 3, a qual demonstra a espessura mínima, a tensão circunferencial atuante e a proporção desta tensão com a tensão admissível pela norma ASME B31.1 na temperatura de projeto;

Tabela 3 – Espessura mínima requerida e tensão atuante

Diâmetro nominal (NPS)	Diâmetro externo [mm] ASME B36.10	Espessura mínima [mm] calculada pela equação (3)	Tensão máxima [MPa] Calculada pela equação (1)	Relação da tensão máxima pela tensão admissível [%]
½	21,3	3,2	25,6	40,0
¾	26,7	3,6	29,5	46,1
1	33,40	4,1	33,2	51,8
1 ½	48,30	5,2	38,9	60,6
2	60,30	6,2	41,8	65,3
4	114,3	10,4	48,7	75,9
6	168,3	14,6	51,6	80,4
8	219,1	18,5	53,1	82,8
10	273,0	22,7	54,1	84,4
12	323,8	26,6	54,8	85,5

Fonte: própria, resultados calculados

Utilizando a espessura mínima calculada pela equação (3), conforme item 3.2.1 desta monografia, para o cálculo das tensões circunferenciais, observa-se que as tensões normais aumentam na medida em que aumenta o diâmetro da tubulação, ou seja, em tubulações de grande diâmetro o risco é tanto maior pelas condições de transporte de maior quantidade de matéria com energia interna, quanto pela maior proximidade das tensões atuantes com as tensões admissíveis do material. E nestes casos, cuidados especiais com as tensões secundárias devem ser considerados no projeto de tubulações acima de NPS 2, pois os efeitos das dilatações térmicas podem ultrapassar a tensão máxima admissível do material.

E para a seleção da espessura comercial, padronizada pela norma ASME B36.10, é apresentada na Tabela 4, a qual também leva em consideração a tolerância de redução de 12,5% da norma de fabricação do tubo ASTM A335.

Tabela 4 – Espessuras padronizadas B36.10 e selecionadas

Diâmetro nominal (NPS)	Espessura mínima calculada [mm]	Espessura padronizada B36.10 [mm]				
		SCH 80		SCH 160		Padrão de espessura selecionada
		Nominal	Redução 12,5%	Nominal	Redução 12,5%	
1/2	3,2	3,73	3,26	4,78	4,18	SCH 80
3/4	3,6	3,91	3,42	5,56	4,87	SCH 160
1	4,1	4,55	3,98	6,35	5,56	SCH 160
1 1/2	5,2	5,08	4,45	7,17	6,27	SCH 160
2	6,2	5,54	4,85	8,74	7,65	SCH 160
4	10,4	8,56	7,79	13,49	11,80	SCH 160
6	14,6	10,97	9,60	18,26	15,98	SCH 160
8	18,5	12,7	11,11	23,01	20,13	SCH 160
10	22,7	15,09	13,20	28,58	25,01	SCH 160
12	26,6	17,48	15,30	33,32	29,16	SCH 160

Fonte: própria, resultados calculados e comparados com ASME B36.10

A condição de tolerância dimensional deve ser bem observada para não selecionar padrões de espessuras (séries), que possam atingir valores menores que o mínimo calculado pela equação (3).

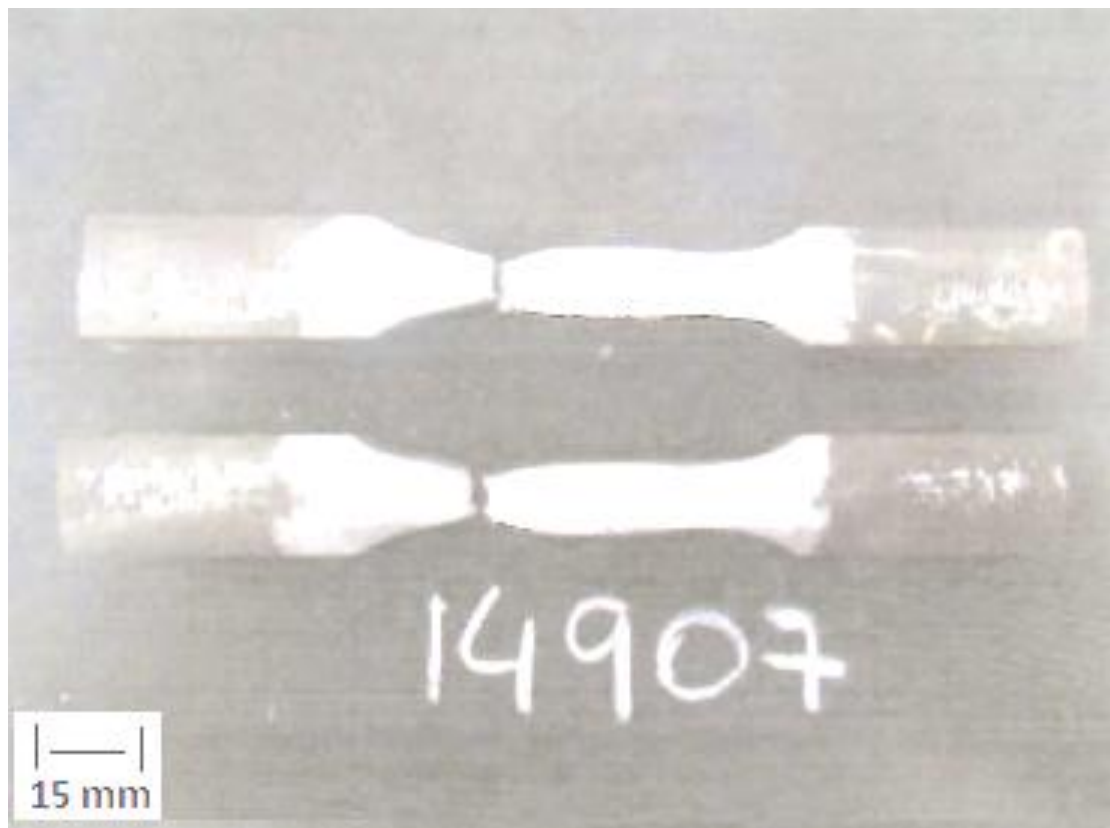
4.2 QUALIFICAÇÃO DO PROCEDIMENTO DE SOLDAGEM

4.2.1 Ensaio de tração

O ensaio de tração demonstra que a junta soldada, no requisito de resistência à tração, possui resistência mecânica superior a do material do tubo, pois a ruptura ocorreu no metal de base.

Os corpos de prova após o rompimento pelo ensaio de tração, estão apresentados na Fotografia 4.

Fotografia 4 – Corpo de prova após o ensaio de tração



Fonte: Petrobras (2015)

Os resultados estão apresentados na Tabela 5.

Tabela 5 – Resultados do ensaio de tração

Descrição	Amostra 01	Amostra 02
Dimensões [mm]	15,86 x 19,96	15,57 x 20,23
Área de seção [mm ²]	316,57	314,98
Carga de ruptura [N]	15.648	15.648
Limite de resistência [MPa]	485	478
Local de ruptura	Metal de base	Metal de base
Resistência à tração padronizada para o material de base ASTM A335 Gr P11	415 [MPa]	415 [MPa]

Fonte: Petrobras (2015)

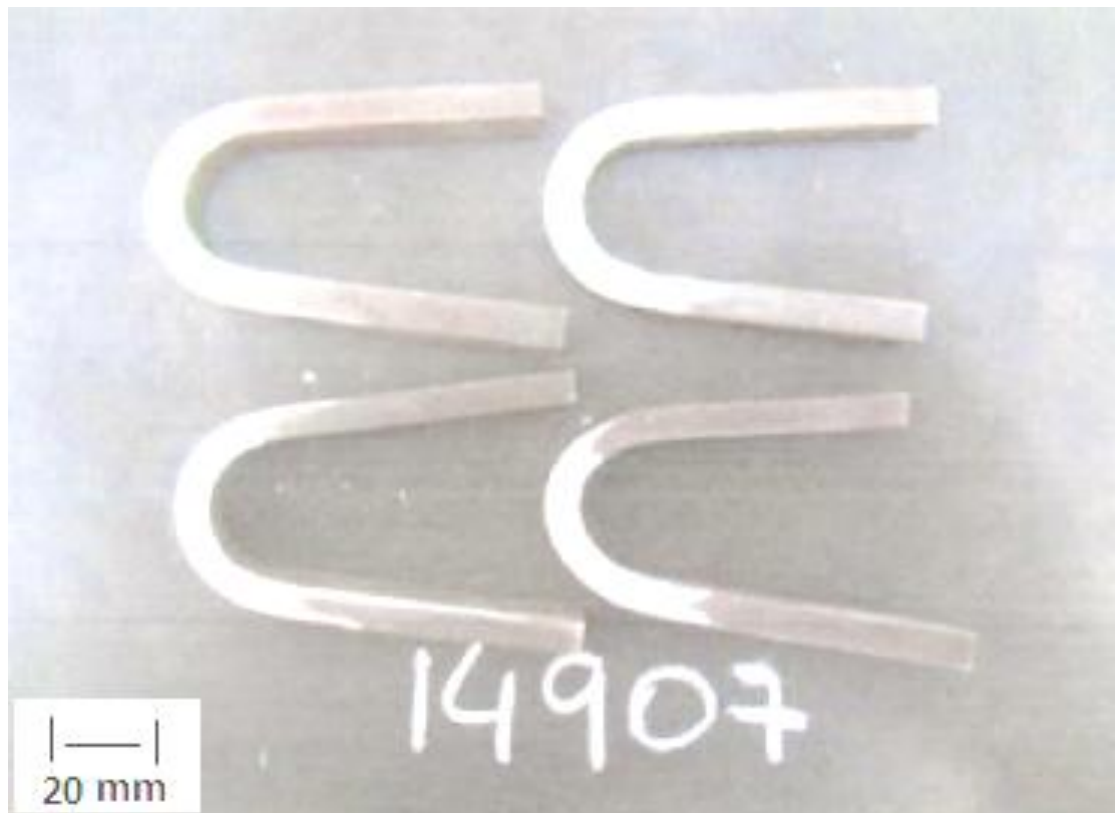
Pela análise da imagem e dos resultados da Tabela 5, observa-se que o processo de soldagem não reduziu a resistência à tração do metal de base, pois o limite de resistência foi maior que o mínimo estabelecido para o material ASTM A 335 Gr P11, satisfazendo a condição do código de soldagem ASME BPVC.IX, em seu critério de aceitação apresentado no item 2.2.6.3 desta monografia.

4.2.2 Ensaio de dobramento lateral

O ensaio de dobramento lateral demonstrou a capacidade de deformação uniforme da junta, e isenta de fissuras.

Os corpos de prova após o dobramento lateral estão apresentados na Fotografia 5.

Fotografia 5 – Corpos de prova após o ensaio de dobramento lateral



Fonte: Petrobras (2015)

Os resultados estão apresentados na Tabela 6.

Tabela 6 – Resultados do ensaio de dobramento lateral

Amostras	Dimensões [mm]	Resultados
01	16 x 10 x 200	Isento de descontinuidades superficiais
02	16 x 10 x 200	Isento de descontinuidades superficiais
03	16 x 10 x 200	Isento de descontinuidades superficiais
04	16 x 10 x 200	Isento de descontinuidades superficiais

Fonte: Petrobras (2015)

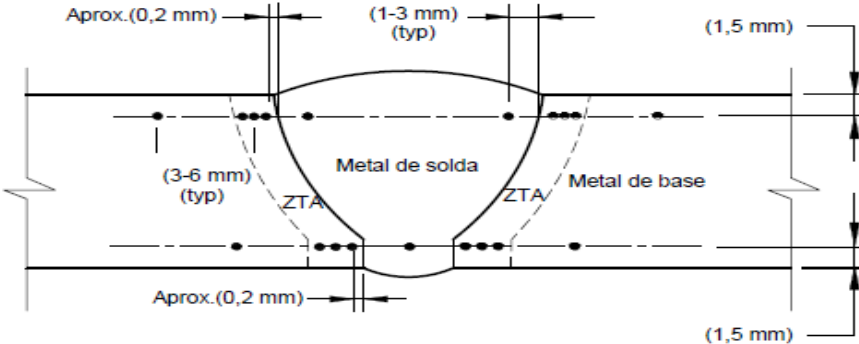
A isenção de descontinuidades superficiais apresenta a capacidade de deformação da junta soldada, garantindo os critérios de aceitação estabelecidos pelo ASME BPVC.IX QW 160, apresentado no item 2.2.6.4 desta monografia.

4.2.3 Medição da dureza

Os resultados da dureza medida conforme requisito da norma N-133 da Petrobras foram satisfatórios, e em todos os pontos ficam abaixo de 237 HV-10, que é o máximo permitido.

Os resultados da dureza estão apresentados no Quadro 11.

Quadro 11 – Resultados da medição de dureza

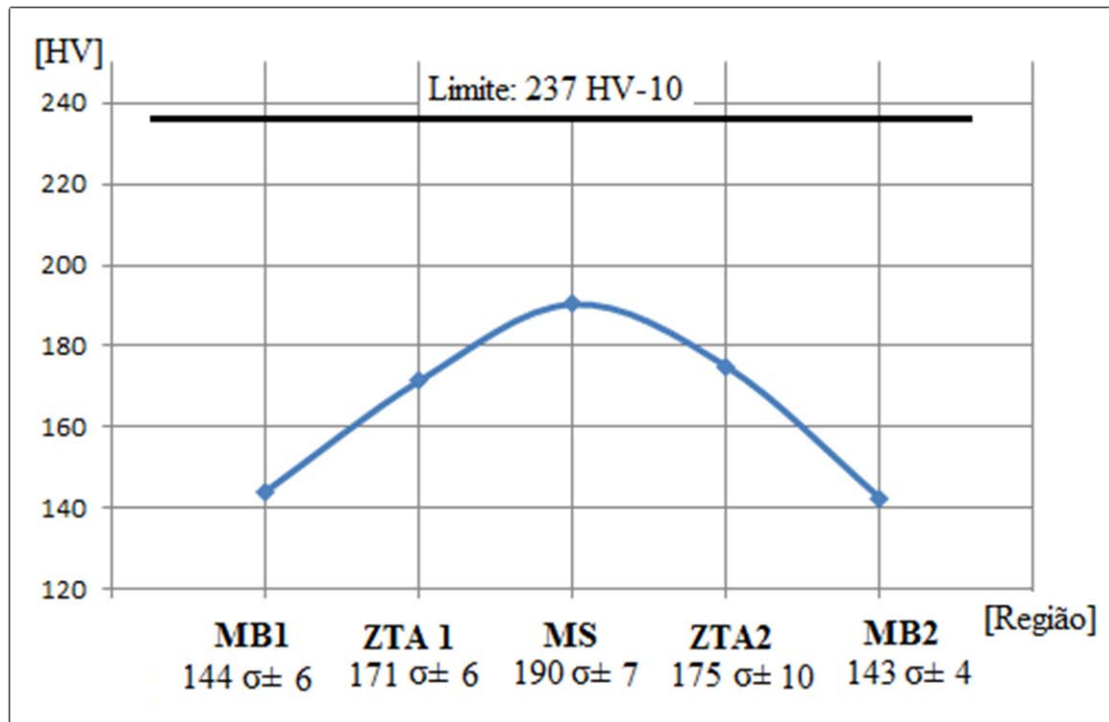
HV - 10kgf									
									
MB 1	ZTA 1			MS		ZTA 2			MB 2
148	170	173	181	193	196	187	188	171	140
140	161	170	173	182		170	170	164	145
Legenda: MB – Metal de base; MS – Metal de solda; ZTA – Zona afetada pelo calor; HV – Dureza Vickers									

Fonte: Petrobras (2015)

A dureza atingida após a soldagem e todo o ciclo térmico do tratamento pós-soldagem satisfaz a condição da norma N-133 da Petrobras, a qual determina os valores admissíveis em suas instalações, conforme exposto no item 2.2.6.2 desta monografia.

Com a média aritmética dos resultados, observa-se que a região de maior dureza se concentra no metal depositado, conforme demonstrado no Gráfico 2.

Gráfico 2 – Perfil de dureza nas regiões da junta soldada



Fonte: Petrobras (2015)

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS E CONCLUSÕES

5.1 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Projetos de tubulações baseados na análise tensões utilizam as propriedades mecânicas padronizada por normas e códigos de projeto, para a seleção de materiais que poderão ser soldados. As uniões soldadas destas tubulações devem então garantir a validade desta premissa, e apresentar resultados condizentes com os materiais empregados, para garantir uniformidade das propriedades mecânicas padronizadas.

Sendo assim, para que as juntas soldadas satisfaçam os requisitos estabelecidos para os materiais de base (tais como tubos e acessórios), elas devem ser também padronizadas pela mesma norma, a qual estabeleceu as expressões de cálculos, tensões admissíveis, e requisitos de inspeções, manutenções e operação do sistema. Exceto com condições atípicas e específicas, por disposição em contrário pelo projetista, os metais de enchimento utilizados na soldagem, devem produzir uma junta com a resistência igual ou maior que a especificada do metal de base.

Observa-se que o procedimento de soldagem de uma junta qualificada estabelece todos os itens importantes, que devem ser considerados na união de partes por soldagem. Contém limites ou faixas de parâmetros tais como tipo de corrente, espessura do metal de base, tipo de metal de base, tipo de consumível, e é válido somente dentro dos limites nele especificados.

5.2 CONCLUSÕES

A partir dos resultados obtidos, constatou-se que, pelo ensaio de tração, a junta soldada possui resistência mecânica superior ao metal de base (material do tubo), pois a ruptura ocorreu fora da região soldada, com tensão maior que 415 MPa, mínima estabelecida pela padronização do material. Desta forma, conclui-se que a junta soldada, conforme todos os requisitos estabelecidos não interferem na resistência à tração da tubulação.

Os resultados do ensaio de dobramento lateral apresentaram a capacidade de deformação da junta soldada, de maneira uniforme e sem a ocorrência de trincas ou fissuras, garantindo os critérios de ductilidade requeridos pelo código de soldagem. Com este resultado, conclui-se que a ductilidade do material soldado é semelhante à do material do tubo.

Em relação aos valores de dureza, toda a região soldada e as regiões afetadas pelo calor apresentaram resultados abaixo de máximo estabelecido, de 237 HV-10, e apresentou um perfil de dureza com valores maiores na região do metal de solda depositado, com média de 190 HV-10. Com estes dados, concluiu-se que a soldagem e os demais ciclos térmicos permitem que a junta soldada não ultrapasse os níveis máximos de dureza exigidos pelo código de soldagem.

Conclui-se por fim que a junta soldada pelo código ASME BPVC.IX, para aplicação em para tubulações de energia, projetadas e fabricadas pelo código ASME B31.1, com o material ASTM A335 Gr P11, pelo processos GTAW e SMAW nas condições estabelecidas, é capaz de reproduzir as propriedades mecânicas necessárias para a manutenção da premissa de projeto por análise de tensões.

6 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

As variáveis de soldagem, controladas em oficina ou laboratórios são facilmente asseguradas e registradas, ou seja, suas alterações são previsíveis, e permitem avaliações de desempenho. Entretanto, as aplicações dos parâmetros estabelecidos pelos procedimentos de soldagem qualificados são também para soldagem em campo, em condições adversas, sujeita a vento, chuva, falha em equipamentos e falhas humanas, embora utilizem soldadores e inspetores qualificados. Tais variáveis tender a ocorrer, e não são quantificadas e analisadas.

Como sugestão para trabalhos futuros, verificara influência de variações de parâmetros não controláveis, tais como vento ou chuva, ocorrido em uma etapa da soldagem. Avaliar o quão significativo é uma variação desta, para comparar com os resultados dos ensaios de desempenho da qualificação de um procedimento, que é feito de forma extremamente controlada e segura.

REFERÊNCIAS

AMERICAN SOCIETY OF MECHANICAL ENGINEERS. **Power piping**: ASME code for pressure piping, B31.1. New York: ASME International, 2014. 340p.

AMERICAN SOCIETY OF MECHANICAL ENGINEERS. **Welded and seamless wrought**: ASME code for steel pipe, B36.10. New York: ASME International, 2004. 18p.

AMERICAN SOCIETY OF MECHANICAL ENGINEERS. **Boiler and pressure vessel code, section IX**: ASME code for qualification standard for welding and brazing procedures, welders, brazers, and welding and brazing operators. New York: ASME International, 2010. 497p.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **The history of ASTM International**. West Conshohocken: ASTM-International, 2016. Disponível em: <https://www.astm.org/ABOUT/history_book.html>. Acesso em: 19 out. 2016.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **A335/A335M**: standard specification for seamless ferritic alloy-steel pipe for high-temperature service. West Conshohocken: ASTM-International, 2015. 10p.

BANGARU, N. V; FAIRCHILD, D. P; HARRISON, P. L; KOO, J. Y; OZEKIN, A. **A study concerning intercritical HAZ microstructure and toughness in HSLA steel**. Welding Journal, p. 321s-329s, 1991. Disponível em: <https://app.aws.org/wj/supplement/WJ_1991_12_s321.pdf>. Acesso em: 23 nov. 2016.

BRACARENSE, A. Q.; MARQUES, P. V.; MODENESI, P. V. **Soldagem**: fundamentos e tecnologia. 3.ed. Belo Horizonte: Editora UFMG. 2009. 363p.

BRASIL, Ministério do Trabalho e Emprego. **Norma Regulamentadora Nº 13**: caldeiras, vasos de pressão e tubulações. Brasília: portaria MTE nº 594, 2014.

CHIAVERINI, VICENTE. **Aços e ferros fundidos**: características gerais, tratamentos térmicos, principais tipos. 7.ed. São Paulo: Associação Brasileira de Metalurgia, Materiais e Mineração, 2012. 599p.

HIBBELER, R. C. **Resistência dos materiais**. 5.ed. São Paulo: Pearson Prentice Hall, 2004. 670p.

PETRÓLEO BRASILEIRO S.A. **N-115**: fabricação e montagem de tubulações metálicas. Revisão G. Rio de Janeiro: Nortec - Contec – SC 17, 2013. 51p.

PETRÓLEO BRASILEIRO S.A. **N-133**: soldagem. Revisão M. Rio de Janeiro: Nortec - Contec – SC 17, 2015. 108p.

PETRÓLEO BRASILEIRO S.A. **N-57**: projeto mecânico de tubulações industriais. Revisão G. Rio de Janeiro: Nortec – Contec – SC 17, 2014. 73p.

PETRÓLEO BRASILEIRO S.A. **N-76**: materiais de tubulação para instalações de refino e transporte. Revisão H. Rio de Janeiro: Nortec - Contec – SC 17, 2016. 160p.

SOUZA, Sérgio, A. **Ensaaios mecânicos de materiais metálicos**: fundamentos teóricos e práticos. 5.ed. São Paulo: Interciência, 1982. 286p.

TELLES, Pedro. C. Silva. **Materiais para equipamentos de processo**. 6.ed. Rio de Janeiro: Interciência, 2003. 275p.

TELLES, Pedro. C. Silva. **Tubulações industriais**: cálculo. 9.ed. Rio de Janeiro: LTC, 1999. 163p.

TELLES, Pedro. C. Silva. **Tubulações industriais**: materiais, projeto e montagem. 9.ed. Rio de Janeiro: LTC, 1997. 251p.

ZAMPIERI JUNIOR, C. R. **Determinação da tenacidade à fratura da região da solda de um tubo de aço ASTM A 335 Gr. P22 através do deslocamento da abertura da ponta da trinca (CTOD)**. 2014. 111 f. Dissertação (Mestrado – Programa de Pós-Graduação em Ciência e Engenharia de Materiais e Área de Concentração em Desenvolvimento, Caracterização e Aplicação de Materiais) – Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo. São Paulo, 2014.