

Fernando Antônio Pavão de Carvalho

Comparação das normas ASME IX, API 1104 e DNV-OS-F101 para qualificação de procedimentos de soldagem em tubos API 5L X 65, X80, X 100.

Monografia apresentada ao Programa de Educação Continuada em Engenharia da Escola Politécnica da Universidade de São Paulo para conclusão de curso de Especialização.

São Paulo

Outubro/2012

Fernando Antônio Pavão de Carvalho

(Engenheiro Mecânico e de Automóvel, Instituto Militar de Engenharia,
1988)

**Comparação das normas ASME IX, API 1104 e DNV-
OS-F101 para qualificação de procedimentos de
soldagem em tubos API 5L X 65, X80, X 100.**

Monografia apresentada ao Programa de Educação
Continuada em Engenharia da Escola Politécnica da
Universidade de São Paulo para conclusão de curso de
Especialização.

Área de Concentração: Engenharia de Soldagem

Orientador: Professor Dr. José Pinto Ramalho.

São Paulo

Outubro/2012

“Quando os ventos de
mudança sopram, umas
pessoas levantam barreiras,
outras constroem moinhos de
vento”.

Érico Veríssimo

DEDICATÓRIA

Dedico este trabalho
à mãe dos meus
filhos Magda e aos
meus filhos Thiago e
Daniel.

AGRADECIMENTOS

Ao Professor Doutor José Ramalho pelo apoio permanente à realização deste trabalho e pela orientação constante e segura com relação aos aspectos da execução e do conteúdo.

Ao Sr. Adelino de Souza da empresa TECNOSOLDA pelas informações relativas à execução de obras colocadas à disposição para ilustrar exemplos de aplicação de qualificação de procedimentos de soldagem.

Aos meus colegas do curso de Especialização em Engenharia de Soldagem pela amizade e pelos momentos de convívio prazeroso e enriquecedor.

CURICULUM VITAE

1. Formação acadêmica

- a. Engenharia Mecânica – Instituto Militar de Engenharia - Rio de Janeiro - RJ –1988.
- b. Oficial do Exército – Academia Militar das Agulhas Negras - Resende- RJ - 1975.

2. Treinamentos

- a. Gerência Técnica – Centro de Instrução de Aviação do Exército – Exército Brasileiro- 1992.
- b. Manutenção de sistemas de transmissão de helicópteros, EUROCOPTER – França – 1993.
- c. Pás de rotores de helicópteros de material composto – EUROCOPTER – França – 1993.
- d. Sistemas de Calibração – Requisitos para a Certificação – Qualitas Engenharia - São Paulo-SP- 1996.
- e. Auditor Líder ISO 9001:2000 – ATSG – Avaliações, Treinamentos, Sistemas e Gestão – Guarulhos-SP – 2003.
- f. SAE AS 9100 Requisitos - ATSG – Avaliações, Treinamentos, Sistemas e Gestão – São José dos Campos-SP – 2004.
- g. *IAQG - Sanctioned Aerospace Auditor Transition Training – 9100 – 2011*

Treinamento sancionado pelo “International Aerospace Quality Group” para a transição para a norma AS9100 versão 2009 - Sistemas de Gestão da Qualidade – Requisitos para organizações de aeronáutica, espaço e defesa.

3. Conhecimento de idiomas

Inglês e Francês

4. Vivência Profissional

- a. Oficial de Intendência do Exército Brasileiro, por dez anos – Fevereiro de 1976 – Fevereiro de 1986.
- b. Engenheiro da Diretoria de Material de Aviação do Exército, por 14 anos – Julho de 1989 – Junho de 2003.
- c. Auditor da Det Norske Veritas Certificadora Ltda. desde 2003.

5. Experiência

- a. Apoio de manutenção de helicópteros, motores e equipamentos.
- b. Programas de transferência de tecnologia de manutenção, de acordo com contrato de compensação entre os governos do Brasil e da França.
- c. Desenvolvimento de requisitos e normas da Aviação do Exército para certificar fornecedores e centros de reparo para apoiar helicópteros, motores e equipamentos.
- d. Certificação de mais de 40 fornecedores e centros de reparo que apoiam a Aviação do Exército desde 1989, inclusive os principais centros de manutenção:
 - i. HELIBRAS – Itajubá-MG- Produção e manutenção de helicópteros, inspeções, reparo e revisão geral de helicópteros e sistemas, sistemas de transmissão, pás de rotor de material composto, etc....;
 - ii. Rolls-Royce do Brasil – Manutenção, inspeções, reparo, revisão geral e testes de motores e acessórios;

- iii. EMBRAER LIEBHERR EQUIPAMENTOS DO BRASIL -
Manutenção, inspeções, reparo, revisão geral e testes de trens de pouso,
servo-controles hidráulicos e outros;
- iv. TURBOMECA DO BRASIL INDÚSTRIA E COMÉRCIO LTDA -
Manutenção, inspeções, reparo, revisão geral e testes de motores e
acessórios;
- e. Desenvolvimento de requisitos e normas para certificação de laboratórios de calibração
de instrumentos conforme a norma ISO GUIDE 25.
- f. Certificação de laboratórios de calibração para a prestação de serviços para a Aviação
do Exército.
- g. Implantação de laboratório de análise de fluidos hidráulicos.
- h. Implantação de oficinas de manutenção de motores (turbinas)TURBOMECA.
- i. Instalações de equipamentos, sistemas e armamento embarcados em helicópteros.
- j. Realização de auditorias ISO 9001:2000 desde outubro de 2003 e auditorias SAE AS
9100 desde setembro de 2004.

RESUMO

Um dos segmentos de máxima importância estratégica para a economia é o de transporte através de dutos, de petróleo e seus derivados. Na sua construção predomina o processo de soldagem. Os riscos inerentes exigem acurados critérios de engenharia e rigoroso controle da execução dos projetos.

Este trabalho compara algumas das normas para a qualificação de procedimentos de soldagem de tubos fabricados coma aço de Alta Resistência e Baixa Liga (ARBL) que são usados na construção dos citados dutos. As normas analisadas foram as seguintes: norma API STANDARD 1104 TWENTY EDITION, NOVEMBER 2005 – Welding of Pipelines and Related Facilities, emitida pelo American Petroleum Institute, USA, norma ASME IX, 2011 emitida pela AMERICAN SOCIETY OF MECHANICAL ENGINEERS, USA e norma OFFSHORE STANDARD - DNV-OS-F101 - SUBMARINE PIPELINE SYSTEMS - OCTOBER 2010, emitida pela Det Norske Veritas, Noruega.

Identificou-se neste estudo diferenças quanto aos ensaios requeridos para a qualificação dos procedimentos de soldagem e quanto às variáveis essenciais estabelecidas por cada uma delas, bem como as variações de custo de qualificação decorrentes destas diferenças. E, como resultado das avaliações, notou-se com relação aos custos, considerando um único diâmetro de tubo, que com a norma DNV-OS-F101 atinge-se o maior valor para o total de ensaios mecânicos de qualificação de procedimento de soldagem). Quanto às variáveis essenciais, somente a norma DNV-OS-F101 considera o valor do carbono equivalente e somente a norma API 1104 não determina como variáveis essenciais a energia de soldagem nem a temperatura de interpasse.

ABSTRACT

One of the segments of utmost strategic importance to the economy is the transportation through pipelines, oil and its derivatives. In its construction dominates the welding process. The risks inherent engineering criteria require accurate and strict control of project execution.

This paper compares some of the standards for the qualification of welding procedures for pipes made from steel High Strength Low Alloy (HSLA) that are used in the construction of said pipeline. The standards were analyzed as follows: API standard 1104 TWENTY STANDARD EDITION, NOVEMBER 2005 - Welding of Pipelines and Related Facilities, issued by the American Petroleum Institute, USA, ASME IX, 2011emitida by AMERICAN SOCIETY OF MECHANICAL ENGINEERS, USA and standard OFFSHORE STANDARD - DNV-OS-F101 - SUBMARINE PIPELINE SYSTEMS - OCTOBER 2010, issued by Det Norske Veritas, Norway.

This study identified differences in the tests required for qualification of welding procedures and about the key variables established by each of them, as well as variations in the cost of qualification resulting from these differences. And as a result of the reviews, it was noted with respect to costs, considering a single pipe diameter, which with standard DNV-OS-F101 is reached the highest value for the total mechanical testing of welding procedure qualification. As for the essential variables, only the standard DNV-OS-F101 considers the value of the carbon equivalent and only the API 1104 standard does not dictate how essential variables energy welding or interpass temperature.

LISTA DE FIGURAS

| | Pág. |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------|
| Figura 1.1 –Acidentes em dutos - Fonte: US Department of Transportation [15]. | 7 |
| Figura 1.2 – Causas de acidentes em dutos de Óleo e Gas - Fonte: US Department of Transportation [15]. | 8 |
| Figura 3.1 - Corpo de Prova para ensaio de Tração conforme API 1104 [3]. | 33 |
| Figura 3.2 - Corpo de Prova para ensaio de Nick-break conforme API 1104 [3]. | 34 |
| Figura 3.3 - Corpo de Prova para ensaio de Nick-break para soldagem automática e semi-automática conforme API 1104 [3]. | 35 |
| Figura 3.4 - Dimensionamento de imperfeições nas superfícies expostas da soldagem (Superfícies de Ruptura) do ensaio de Nick-break conforme API 1104 [3]. | 36 |
| Figura 3.5 - Corpo de Prova para ensaios de Dobramento de Face ou de Raiz conforme API 1104 [3]. | 37 |
| Figura 3.6 - Corpo prova para ensaio de Dobramento Lateral conforme a norma API 1104 [3]. | 38 |
| Figura 3.7 - Locais de retirada de corpos de prova em tubos de menor diâmetro [3]. | 39 |
| Figura 3.8 - Locais de retirada de corpos de prova em tubos de maior diâmetro [3]. | 39 |
| Figura 3.9 - Locais para retirada dos Corpos de Prova para ensaio de Nick-break de juntas de ângulo para qualificação de procedimento e também de soldador conforme API 1104 [3]. | 41 |
| Figura 3.10 - Corpos de Prova para ensaios de Nick-break para juntas de ângulo para qualificação de procedimento e de soldador conforme API 1104 [3]. | 42 |
| Figura 3.11 - Corpo de Prova para ensaio de Tração Seção Reduzida para qualificação de procedimento de soldagem conforme ASME IX [11]. | 44 |
| Figura 3.12 - Corpos de prova para dobramento de face e de raiz para a qualificação de procedimentos de soldagem conforme ASME IX [11]. | 45 |
| Figura 3.13 - Corpo de prova para ensaio de dobramento lateral para qualificação de procedimento conforme ASME IX [11]. | 46 |
| Figura 3.14 - Juntas de ângulo conforme ASME IX [11]. | 47 |
| Figura 3.15 - Locais para a retirada de corpos de prova para ensaios de qualificação de procedimentos de soldagem de juntas de topo, segundo a ASME IX, para espessuras de parede a partir de 1,5 mm e menores que 19 mm [11]. | 48 |
| Figura 3.16 - Locais para a retirada de corpos de prova para ensaios de qualificação de procedimentos de soldagem de juntas de topo, segundo a ASME IX, para espessuras de parede iguais ou maiores que 19 mm [11]. | 48 |
| Figura 3.17 - Corpo de prova de tração para a determinação da curva tensão / deformação do metal de solda na direção transversal [10]. | 51 |
| Figura 3.18 - Corpos de prova para ensaios de dobramento de face e de raiz [10]. | 52 |

| | |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Figura 3.19 - Corpo de prova para ensaio de dobramento lateral [10]. | 52 |
| Figura 3.20 - Ensaio de Carpy-V [10]. | 53 |
| Figura 3.21 - Pontos para ensaio de dureza [10]. | 54 |
| Figura 3.22 - Locais para a retirada de corpos de prova para ensaios de qualificação de soldagem, conforme a DNV-OS-F101[10]. | 55 |
| Figura 3.23 - Local para a retirada dos corpos de prova para os ensaios de qualificação de soldadores conforme API 1104, diâmetros menores [3]. | 59 |
| Figura 3.24 - Locais para a retirada dos corpos de prova para os ensaios de qualificação de soldadores conforme API 1104, diâmetros maiores [3]. | 59 |
| Figura 3.25 - Corpos de prova para dobramento de Face e de Raiz para a qualificação de soldador conforme ASME IX [11]. | 66 |
| Figura 3.26 - Corpo de prova de ensaio de dobramento lateral para qualificação de soldador conforme ASME IX [11]. | 67 |
| Figura 3.27 - Indicação de corpos de prova de juntas de ângulo para qualificação de soldador pela ASME IX [11]. | 67 |
| Figura 3.28 - Locais para a retirada de corpos de prova para ensaios de qualificação de soldadores para juntas de topo, segundo a ASME IX, para espessuras de parede menores que 19 mm [11]. | 68 |
| Figura 3.29- Locais para a retirada de corpos de prova para ensaios de qualificação de soldadores para juntas de topo, segundo a ASME IX, segundo a ASME IX, para espessuras de parede iguais ou maiores que 19 mm [11]. | 68 |
| Figura 3.30 - Relação entre o valor do carbono equivalente e a temperatura de pré-aquecimento [5]. | 74 |
| Figura 3.31 - Taxa de resfriamento. Redução da temperatura T em função do tempo t. Pré-aquecimento com os aportes de energia e com a velocidade soldagem mantidos [9]. | 78 |
| Figura 3.32- Taxa de resfriamento. Redução da temperatura T em função do tempo t. Pré-aquecimento com a diminuição do aporte de energia e com a velocidade soldagem mantida [9]. | 79 |
| Figura 3.33 - Taxa de resfriamento. Redução da temperatura T em função do tempo t. Pré-aquecimento com o aporte de energia mantido e com aumento da velocidade de soldagem [9]. | 79 |
| Figura 6.1 - Estação de Controle. | 94 |
| Figura 6.2 - Duto vindo do trecho longo, em branco. | 94 |

LISTA DE TABELAS

| | Pág. |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------|
| Tabela 3.1 – Grau dos tubos e dos aços e condições de entrega [4]. | 13 |
| Tabela 3.2 – Processos de fabricação e nível de fabricação de produto [4]. | 13 |
| Tabela 3.3 – Roteiros de fabricação para tubos PSL 2, X80 e X100 [4]. | 14 |
| Tabela 3.4 – Composição Química do Tubo X65 com espessura de parede ($t \leq 25$ mm conforme a especificação PSL 1 [4]. | 14 |
| Tabela 3.5 – Composição Química dos Tubos X 65, X80 e X100 com espessura de parede $t \leq 25$ mm, especificação PSL 2, sem costura e soldados [4]. | 15 |
| Tabela 3.6 – Requisitos para resultados de testes de tração para o tubo X65, especificação PSL 1, com costura e soldados [4]. | 16 |
| Tabela 3.7 – Requisitos para resultados de testes de tração para os tubos X65, X80 e X100, especificação PSL 2, com costura e soldados [4]. | 16 |
| Tabela 3.8 – Variáveis essenciais estabelecidas pelas normas API 1104, DNV-OS-1101 e ASME IX [3,10,11]. | 20 |
| Tabela 3.9 - Ensaio Requerido para a qualificação de procedimentos conforme a Norma API 1104, Ed.: 20 [3]. | 32 |
| Tabela 3.10 - Ensaio requerido para qualificação de procedimentos de soldagem de juntas de topo – Norma ASME IX [11]. | 43 |
| Tabela 3.11 - Ensaio requerido para qualificação de procedimentos de soldagem de juntas de ângulo pela norma ASME IX [11]. | 47 |
| Tabela 3.12 - TIG-AS e TIG-ER Ensaio Requerido – Off Shore Standard DNV-OS-F101, October 2010 [10]. | 49 |
| Tabela 3.13 - Ensaio Requerido para a qualificação de soldadores norma API 1104, Ed.: 20 [3]. | 56 |
| Tabela 3.14 Metais de Adição. | 60 |
| Tabela 3.15 - Variáveis essenciais à qualificação do soldador conforme ASME IX [11]. | 63 |
| Tabela 3.16 - Ensaio para a qualificação de soldadores segundo ASME IX [11]. | 65 |
| Tabela 3.17 - Espessura do metal de solda para a qualificação do soldador [11]. | 65 |
| Tabela 3.18- Diâmetros limites de juntas de topo para a qualificação do soldador [11]. | 65 |
| Tabela 3.19 - Ensaio de pequenos diâmetros e junta de ângulo para a qualificação do soldador [11]. | 65 |
| Tabela 3.20 - Ensaio de juntas de ângulo para qualificação de soldador [11]. | 66 |
| Tabela 3.21 - Valores do Carbono Equivalente de aços API 5L X80 pela Equação 1. | 74 |

| | |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Tabela 3.22 - Valores do Carbono Equivalente de aços API 5L X42 pela Equação 2. | 74 |
| Tabela 3.23 - Relação entre a energia de soldagem, temperatura de pré-aquecimento, tempo de solidificação, tamanho da ZAC e velocidade de resfriamento, considerando o aço carbono como metal de base e os processos de soldagem TIG, Eletrodo Revestido e Arco Submerso. | 77 |
| Tabela 5.1 - Ensaios requeridos para a qualificação de procedimentos de soldagem para tubo de aço carbono API 5 L considerando diâmetros maiores que 350 mm e espessuras maiores que 25 mm. | 82 |
| Tabela 5.2 - Ensaios requeridos para a qualificação de soldadores para tubo de aço carbono API 5 L considerando diâmetros maiores que 350 mm e espessuras maiores que 25 mm. | 82 |
| Tabela 5.3 - Ensaios requeridos para a qualificação de procedimentos de soldagem para tubo de aço carbono API 5 L considerando diâmetros menores ou iguais a 300 mm e espessuras menores ou iguais a 25 mm e seus valores comparativos de custos. | 87 |
| Tabela 5.4 - Ensaios requeridos para a qualificação de procedimentos de soldagem para tubo de aço carbono API 5 L considerando diâmetros maiores que 350 mm e espessuras maiores que 25 mm e seus valores comparativos de custos. | 88 |
| Tabela 5.5 - Resumo da comparação de custos para qualificação de procedimentos. | 88 |
| Tabela 5.6 - Ensaios requeridos para a qualificação de soldadores para tubo de aço carbono API 5 L considerando diâmetros menores ou iguais a 300 mm e espessuras menores ou iguais a 25 mm e seus valores comparativos de custos. | 89 |
| Tabela 5.7 - Ensaios requeridos para a qualificação de soldadores para tubo de aço carbono API 5 L considerando diâmetros maiores que 350 mm e espessuras maiores que 25 mm e seus valores comparativos de custos. | 90 |
| Tabela 5.8 - Resumo da comparação dos custos para qualificação de soldadores. | 90 |

LISTA DE SIMBOLOS, SIGLAS E ABREVIATURAS.

| | |
|-------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------|
| ARBL | Alta Resistência e Baixa Liga |
| HSLA | High Strenght Low Alloy |
| CE _{IIW} | Valor do carbono equivalente calculado Equação utilizada pelo International Institute for Welding |
| CE _{Pem} | Valor do carbono equivalente calculado Equação de Ito-Bessyo |
| R _{t0,5} | Limite de escoamento (0,5% da extensão total) |
| R _m | Resistência à tração |
| A _f | Alongamento |
| ϕ | Diâmetro Externo |
| t | Espessura de parede |
| t' | Espessura do metal de solda depositado |
| ZAC | Zona Afetada pelo Calor |
| TIG | Eletrodo de Tungstênio e Gás Inerte |
| AS | Arco Submerso |
| ER | Eletrodo Revestido |
| CTOD | Crack Tip Opening Displacement |
| τ | Número adimensional |
| h | Espessura na Equação 4 |
| ρC | Calor específico volumétrico |
| T _c | Temperatura onde a velocidade de resfriamento é calculada |
| T _o | Temperatura de pré-aquecimento |
| η | Eficiência do processo de soldagem |
| v | Velocidade de Soldagem |
| E | Energia de Soldagem |
| V | Tensão |
| I | Corrente |
| T _p | Temperatura máxima |

| | |
|-------|-------------------------------------|
| T_m | Temperatura de fusão |
| y | Extensão da zona afetada pelo calor |
| St | Tempo de solidificação |
| L | Calor latente de fusão |
| k | Condutividade |
| R | Velocidade de resfriamento |

SUMÁRIO

| Item | Pág. |
|---------------------------------------------------------|-------------|
| DEDICATÓRIA | II |
| AGRADECIMENTOS | III |
| CURRICULUM VITAE | IV |
| RESUMO | VII |
| ABSTRACT | VIII |
| LISTA DE FIGURAS | IX |
| LISTA DE TABELAS | XI |
| LISTA DE ABREVIATURAS, SIMBOLOS E SIGLAS. | XIII |
| SUMÁRIO | XV |
| 1. INTRODUÇÃO E JUSTIFICATIVA | 1 |
| 2. OBJETIVO | 4 |
| 3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA | 6 |
| 3.1 AÇOS DE ALTA RESISTÊNCIA E BAIXA LIGA (ARBL) | 9 |
| 3.1.1 TUBOS API 5L | 11 |
| 3.1.2 GRAU DO TUBO E DO AÇO | 11 |
| 3.1.3 CONDIÇÕES DE FORNECIMENTO | 12 |
| 3.1.4 FABRICAÇÃO | 13 |
| 3.1.5 COMPOSIÇÃO QUÍMICA | 14 |
| 3.1.6 CARBONO EQUIVALENTE | 15 |
| 3.1.7 LIMITE DE ESCOAMENTO E RESISTÊNCIA À TRAÇÃO | 16 |
| 3.2 NORMAS DE QUALIFICAÇÃO DE PROCEDIMENTOS DE SOLDAGEM | 17 |

| Item | Pág. |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------|
| 3.2.1 VARIÁVEIS ESSENCIAIS CONFORME AS NORMAS API 1104, DNV-OS-F101 e ASME IX. | 19 |
| 3.2.2 QUALIFICAÇÃODOS PROCEDIMENTOS DE SOLDAGEM CONFORME AS NORMAS API 1104, DNV-OS-F101 e ASME IX. | 27 |
| 3.2.2.1 ENSAIOS REQUERIDOS PARA A QUALIFICAÇÃO DOS PROCEDIMENTOS DE SOLDAGEM E DE SOLDADORES | 27 |
| 3.2.2.1.a ENSAIO DE TRAÇÃO | 27 |
| 3.2.2.1.b ENSAIOS DE DOBRAMENTO | 28 |
| 3.2.2.1.c ENSAIO DE NICK-BREAK | 28 |
| 3.2.2.1.d ENSAIO DE CHARPY-V | 29 |
| 3.2.2.1.e ENSAIO DE DUREZA. | 30 |
| 3.2.2.1.f MACROGRAFIA | 30 |
| 3.2.2.2 QUALIFICAÇÃO DE PROCEDIMENTOS DE SOLDAGEM CONFORME A NORMA API 1104, Ed.: 20. | 31 |
| 3.2.2.2.a ENSAIOS REQUERIDOS PARA JUNTAS DE TOPO CONFORME NORMA API 1104 | 31 |
| 3.2.2.2.b ENSAIO DE TRAÇÃO | 32 |
| 3.2.2.2.c ENSAIO DE NICK-BREAK | 33 |
| 3.2.2.2.d ENSAIO DE DOBRAMENTO DE FACE E DE RAIZ | 36 |
| 3.2.2.2.e ENSAIO DE DOBRAMENTO LATERAL | 37 |
| 3.2.2.2.f LOCAIS PARA A RETIRADA DOS CORPOS DE PROVA | 39 |
| 3.2.2.2.g ENSAIOS REQUERIDOS PARA JUNTAS DE ÂNGULO CONFORME NORMA API 1104 | 40 |
| 3.2.2.3 QUALIFICAÇÃO DE PROCEDIMENTOS DE SOLDAGEM CONFORME A NORMA ASME IX. | 42 |
| 3.2.2.3.a ENSAIO DE TRAÇÃO | 43 |
| 3.2.2.3.b ENSAIOS DE DOBRAMENTO | 44 |
| 3.2.2.3.c ENSAIOS DE DOBRAMENTO FACE E DE RAIZ | 44 |
| 3.2.2.3.d ENSAIOS DE DOBRAMENTO LATERAL | 45 |
| 3.2.2.3.e JUNTAS DE ÂNGULO | 46 |
| 3.2.2.3.f LOCAIS PARA A RETIRADA DOS CORPOS DE PROVA | 47 |

| Item | Pág. |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------|
| 3.2.2.4 QUALIFICAÇÃO DE PROCEDIMENTOS DE SOLDAGEM CONFORME A NORMA OFFSHORE STANDARD DNV-OS-F101, October2010. | 49 |
| 3.2.2.4.a ENSAIO DE TRAÇÃO TRANSVERSAL | 50 |
| 3.2.2.4.b ENSAIO DE TRAÇÃO TOTAL | 50 |
| 3.2.2.4.c ENSAIO DE TRAÇÃO TRANSVERSAL TOTAL | 50 |
| 3.2.2.4.d ENSAIOS DE DOBRAMENTO | 51 |
| 3.2.2.4.e ENSAIOS DE DOBRAMENTO | 52 |
| 3.2.2.4.f ENSAIOS DE MACROGRAFIA | 53 |
| 3.2.2.4.g ENSAIOS DUREZA | 54 |
| 3.2.2.4.h LOCAIS PARA A RETIRADA DOS CORPOS DE PROVA | 54 |
| 3.2.3 QUALIFICAÇÃO DE SOLDADORES | 55 |
| 3.2.3.1 QUALIFICAÇÃO DE SOLDADORES CONFORME A NORMA API 1104 | 56 |
| 3.2.3.1.a QUALIFICAÇÃO ÚNICA DO SOLDADOR CONFORME API 1104 | 56 |
| 3.2.3.1.b QUALIFICAÇÃO MÚLTIPLA DO SOLDADOR CONFORME API 1104 | 60 |
| 3.2.3.2 QUALIFICAÇÃO DE SOLDADORES CONFORME A NORMA ASME IX | 62 |
| 3.2.3.3 QUALIFICAÇÃO DE SOLDADORES CONFORME A NORMA DNV-OS-F101 | 69 |
| 3.3 IMPORTÂNCIA DAS VARIÁVEIS ESSENCIAIS NÃO COMUNS ÀS NORMAS ESTUDADAS | 69 |
| 3.3.1 VALOR DO CARBONO EQUIVALENTE | 69 |
| 3.3.2 ENERGIA DE SOLDAGEM | 75 |
| 3.3.3 TEMPERATURA DE INTERPASSE | 79 |
| 4. MATERIAIS E METODOS PARA A ANÁLISE E COMPARAÇÃO DAS NORMAS | 81 |
| 5. RESULTADOS E DISCUSSÃO | 82 |
| 5.1 ENSAIOS REQUERIDOS E CRITÉRIOS DE ACEITAÇÃO | 83 |
| 5.1.1 ENSAIOS DE DOBRAMENTO | 83 |

| Item | Pág. |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------|
| 5.1.2 ENSAIOS DE TRAÇÃO | 84 |
| 5.1.3 ENSAIO DE NICK-BREAK | 84 |
| 5.1.4 ENSAIO DE CHARPY – V | 85 |
| 5.1.5 MACROGRAFIA. | 85 |
| 5.1.6 DUREZA. | 86 |
| 5.1.7 ABRANGÊNCIA DOS ENSAIOS PARA QUALIFICAÇÃO DOS PROCEDIMENTOS DE SOLDAGEM. | 86 |
| 5.1.8 CUSTOS DOS ENSAIOS. | 87 |
| 5.2 VARIÁVEIS ESSENCIAIS. | 90 |
| 5.2.1 CARBONO EQUIVALENTE. | 91 |
| 5.2.2 CONTROLE DE PASSES. | 91 |
| 5.2.3 ENERGIA DE SOLDAGEM. | 92 |
| 5.2.4 TEMPERATURA DE INTERPASSE. | 92 |
| 6. ANÁLISE DE UM CASO PRÁTICO – A APLICAÇÃO DAS NORMAS ASME IX E API 1104 PARA A QUALIFICAÇÃO DE PROCEDIMENTOS DE SOLDAGEM EM DUTO DE GÁS | 93 |
| 7. CONCLUSÕES | 95 |
| 8. SUGESTÕES DE TRABALHOS FUTUROS | 99 |
| 9. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS | 100 |

1. INTRODUÇÃO E JUSTIFICATIVA.

A construção para inúmeras aplicações de equipamentos, estruturas, vasos e demais itens utilizando processos de união de partes soldadas em aço carbono, aço inoxidável e outros materiais devem atender requisitos de projeto rigorosos quanto à adequação das juntas soldadas em vista das propriedades mecânicas, dos esforços a suportar, das condições de operação e outras a que devem ser submetidos os produtos assim fabricados [2].

Isto leva à necessidade do estrito controle sobre os processos industriais cujos resultados não podem ser verificados *“por monitoramento ou medição subsequente e, como consequência, deficiências tornam-se aparentes somente depois que o produto estiver em uso ou o serviço tiver sido entregue”* [1].

Deve-se garantir e atestar que um procedimento de soldagem tenha como resultado uma junta soldada adequada aos requisitos estabelecidos por meio da qualificação do mesmo, o que cria a necessidade de padronização e normalização [2].

A realização de processos de soldagem sem atender requisitos de execução e de controle que possam garantir o cumprimento das exigências de um projeto, pode levar a resultados catastróficos. Isso mostra a importância da qualificação dos procedimentos de soldagem, bem como a dos executantes destes com base em experimentos, ou seja, em ensaios para fixar parâmetros ajustados na preparação de corpos de prova a serem testados, conforme requisitos normalizados [2].

Ater-se às normas adequadas, na elaboração dos procedimentos de soldagem, contribui para uma padronização da produção, um melhor monitoramento da conformidade do produto e uma rastreabilidade mais segura sobre a matéria prima, os consumíveis e o processo de produção como um todo para demonstrar o atendimento aos requisitos especificados do produto e, se necessário, permitir investigação de possíveis falhas e sua correção [2].

Para as diversas aplicações as normas pertinentes requerem que o procedimento de soldagem especificado a ser adotado seja qualificado antes da realização da produção para demonstrar e garantir que as juntas produzidas estejam em conformidade com os requisitos estabelecidos em uma determinada norma, projeto ou contrato.

Assim a qualificação dos procedimentos de soldagem é realizada com base em corpos de prova submetidos a ensaios mecânicos, ensaios visuais da junta soldada, macrográficos e ensaios não destrutivos. Sua realização implica em custo e tempo.

Quanto aos executantes, ou seja, os soldadores há necessidade que sua habilidade para a execução de procedimentos especificados em condições estabelecidas, seja também comprovada com base em ensaios de corpos de prova.

Em vista da existência de mais de uma norma para uma mesma aplicação, há que se definir pela que seja mais adequada aos requisitos do projeto e do cliente e a mais viável do ponto de vista econômico e técnico.

Este trabalho visa comparar as normas para a qualificação de procedimentos de soldagem de tubulações de aço de Alta Resistência e Baixa Liga (ARBL) construídas para o transporte de petróleo bruto e seus derivados inclusive gases.

2. OBJETIVO.

Este trabalho tem por objetivo a comparação das normas API STANDARD 1104 TWENTY EDITION, NOVEMBER 2005 – Welding of Pipelines and Related Facilities, emitida pelo American Petroleum Institute, USA, a norma ASME IX, 2011 emitida pela AMERICAN SOCIETY OF MECHANICAL ENGINEERS, USA e a norma OFFSHORE STANDARD - DNV-OS-F101 - SUBMARINE PIPELINE SYSTEMS - OCTOBER 2010, emitida pela Det Norske Veritas, Noruega.

A norma ASME IX trata da qualificação de procedimentos de soldagem, inclusive de tubulações, a norma API 1104 aborda a soldagem de tubulações para o transporte de petróleo e seus derivados e a norma OFFSHORE STANDARD - DNV-OS-F101 aplica-se a tubulações para o transporte de petróleo e seus derivados em instalações submarinas podendo também ser aplicada em outros ambientes. Esta última tem um caráter bem mais abrangente e apresenta critérios e orientações para a concepção, desenvolvimento, projeto, fabricação, operação e abandono de sistemas de dutos submarinos. Dentro da fabricação aborda a soldagem e a qualificação de procedimentos de soldagem.

Na norma API 1104 não há especificação nem restrição com relação ao ambiente de instalação dos dutos, se terrestres ou submarinos.

As citadas normas foram comparadas quanto à qualificação dos procedimentos de soldagem de tubos fabricados com aços de alta resistência e baixa liga como metal de

base, na construção de dutos de petróleo, seus derivados e gás, considerando as variáveis essenciais e os ensaios requeridos por cada norma.

A comparação das normas citadas foi feita com foco nos processos de soldagem TIG, Arco Submerso e Eletrodo Revestido e vista do seu emprego na união de tubos para construção de dutos em instalações industriais e no campo.

Foram levados em conta os custos, a viabilidade técnica e eficácia dos critérios em assegurar a perfeita adequação das soldagens considerando grau de responsabilidade e a busca das melhores condições técnicas de fabricação.

A finalidade é auxiliar na compreensão destas diferentes normas, tendo em vista que muitas vezes os produtos poderão ser fabricados com qualquer uma das normas estudadas e, algumas vezes ocorrerão casos em que instalações construídas com procedimentos qualificados com diferentes normas possam vir a ser interligadas.

Para os casos em que o produto puder ser fabricado com mais de uma das normas estudadas este trabalho apresenta um estudo comparativo de custos de ensaios requeridos para qualificação de procedimento de soldagem com as diferentes normas.

3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.

Um dos setores mais críticos onde são largamente empregados os processos de soldagem é o da construção de dutos de transporte de petróleo, derivados e hidrocarbonetos em geral. Pelo seu impacto econômico, pela grande extensão de suas tubulações e pelos riscos que sua operação oferece à vida, ao ambiente e à propriedade, um alto grau de rigor técnico é requerido para seus projetos e construções.

Dado o nível atual das reservas de petróleo e gás existentes e a descoberta de novas, inclusive no Brasil, pode-se vislumbrar que são grandes as perspectivas de expansão das redes de dutos de petróleo e seus produtos derivados principalmente em vista das distâncias entre os locais de extração, refino e consumo.

Em tubulações de petróleo e gás acidentes podem ser catastróficos. Enquanto as tubulações de gases apresentam potencial de incêndio e explosão, as tubulações de petróleo bruto e seus derivados no estado líquido apresentam os riscos acima somados ao potencial de contaminação ambiental.

Os acidentes com dutos de petróleo e derivados podem ser definidos como eventos inesperados que afetam direta ou indiretamente a segurança, a empresa e a saúde da população envolvida, causando impacto ao ambiente e gerando altos custos de operação [15].

Os custos decorrentes destes acidentes têm ultrapassado cifras enormes incluídas as perdas das grandes corporações no mercado de ações, como no caso do vazamento ocorrido no Golfo do México em 2010 [15].

Desastres como os da Figura 1.1 poderiam ser evitados com o alerta de um sistema de detecção de vazamentos [15], mas antes é imprescindível o rigor na elaboração dos projetos, especificações e controle sobre os processos de fabricação e construção.



Figura 1.1 –Acidentes em dutos - Fonte: US Department of Transportation [15].

Como causas principais aparecem as que são afetas ao material e à soldagem, como pode ser visto no gráfico da Figura 1.2.

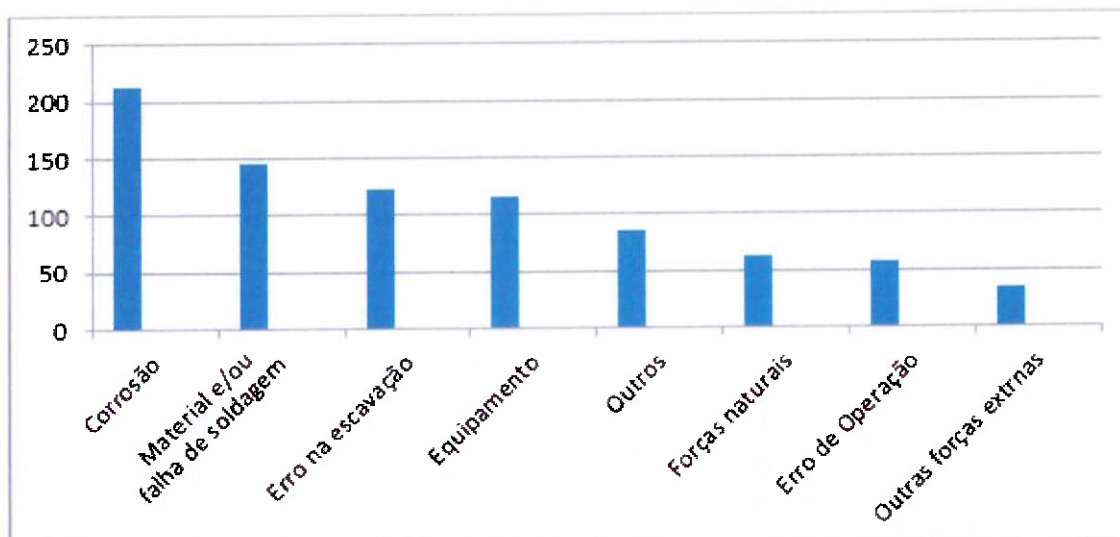


Figura 1.2 – Causas de acidentes em dutos de Óleo e Gás - Fonte: US Department of Transportation [15].

Os acidentes de origem tecnológica (corrosões, trincas, erro de escavação, etc.) são, em sua maioria, previsíveis, razão pela qual há que se trabalhar principalmente na prevenção destes episódios, sem esquecer obviamente da preparação e intervenção quando da ocorrência dos mesmos [15].

Nesta revisão são apresentados os aspectos dos aços alta resistência e baixa liga - ARBL muito utilizados na fabricação de tubos para a construção de dutos, suas formas de fornecimento, condições de entrega e propriedades em geral. Os dutos de petróleo e gás são construídos com este material para suportar as pressões elevadas a que são submetidos. Este material possui alta resistência mecânica e os tubos com eles fabricados podem ter espessuras de parede menores, o que proporciona economia e produtividade na construção [5].

As espessuras de parede menores proporcionam economia na matéria prima e também na construção das tubulações quanto ao manuseio dos tubos e à soldagem. Os

diâmetros maiores e as pressões de operação mais elevadas dos tubos fabricados com aços ARBL permitem maior capacidade de transporte das tubulações [5].

3.1 AÇOS DE ALTA RESISTÊNCIA E BAIXA LIGA (ARBL).

Os aços de Alta Resistência e Baixa Liga são aqueles que têm propriedades mecânicas melhoradas pela adição de elementos de liga em até 5%, no que diferem do aço carbono comum [6]. Atualmente esses aços são os mais adequados à fabricação de tubos para dutos de petróleo e gás. Uma das vantagens do uso dos aços ARBL na fabricação desses tubos é a já citada redução do peso devido à redução da espessura [14].

Se um aço contiver exclusivamente ferro e carbono ele será chamado de aço ao carbono comum ou, simplesmente, um aço ao carbono. Usa-se o termo aços de baixa liga para aços em que se adicionam elementos de liga tais como o níquel, o cromo, o molibdênio, o manganês ou o silício. Os elementos de liga são adicionados fundamentalmente para fazer com que seja reduzida a velocidade de decomposição da austenita durante o resfriamento do tratamento térmico. O resultado tende a ser um aço muito mais duro [6].

A austenita é uma fase estável do ferro puro entre temperaturas de 912 °C a 1394 °C e é macia e dúctil nessa condição sendo bastante proveitosa nos processos de fabricação. A maioria das operações de forjamento e laminação de aços é conduzida a temperatura igual ou superior a 1100 °C [6].

Os aços de baixa liga têm sido submetidos a recentes testes propiciando o surgimento de produtos de alta resistência. Seu desenvolvimento tem fornecido à

engenharia aços estruturais cujos limites de escoamento tem sido seguidamente superados [6].

Os aços de Alta Resistência e Baixa Liga ou em sua denominação na língua inglesa HSLA (High Strength Low Alloy) obtêm sua grande resistência através de um grão muito pequeno, finamente distribuído, que se precipita na ferrita que é uma configuração estrutural do ferro puro à temperatura ambiente bastante macia e dúctil [6].

Esses aços tem composição química similar à do aço carbono com a diferença das microadições de elementos de liga que garantem melhores propriedades mecânicas [14].

Se formadores de carbeto (que são compostos de um metal com carbono) tais como o vanádio ou nióbio, estiverem na presença de carbono entre 0,05% e 0,2%, pode-se obter uma fase simples (austenita) em temperaturas de laminação a quente. Assim sendo, vigas, tubos, etc. podem ser rapidamente processados. Portanto como a ferrita se forma durante a decomposição da austenita, há uma precipitação simultânea de carbeto dos elementos de liga. A precipitação ocorre, não pelo decréscimo da curva de solubilidade para uma fase, mas também pelo fato de que aqueles carbeto têm menor solubilidade em ferrita do que em austenita [6].

Ao contrário dos aços temperados e revenidos, os aços HSLA têm a vantagem de ser soldáveis, mantendo suas propriedades mecânicas sem subseqüentes tratamentos térmicos.

Como resultado, estes materiais são atraentes para os engenheiros projetistas automobilísticos, de grandes estruturas, de vasos de pressão, de tubulações, etc. [6].

O estudo realizado neste trabalho se ateve a aços de alta resistência e baixa liga (ARBL) que são normalizados especificamente para aplicação em tubulações de dutos para o transporte de petróleo e seus derivados inclusive gases para os quais as normas de qualificação de procedimentos de soldagem e de soldadores utilizadas para comparação são aplicáveis. Esta normalização afeta a composição química, as propriedades mecânicas, processos de fabricação e condições de entrega.

3.1.1 TUBOS API 5L.

Os tubos API 5L são normalizados pela API Specification 5L [4], emitida pelo American Petroleum Institute (API). Esta norma internacional especifica requisitos para a fabricação de dois níveis de especificação de produtos (PSL 1 e PSL2) de tubos de aço sem costura e soldados para uso em sistemas de transporte em tubulação na indústria petróleo e gás natural [4].

3.1.2 GRAU DO TUBO E DO AÇO.

O grau do tubo para o PSL1 é idêntico ao grau do aço (designado pelo nome do aço) e é apresentado na Tabela 3.1. Consiste de uma designação alfanumérica que identifica o nível de resistência à tração do tubo que é ligada à composição química do aço [4].

A designação para as classes A e B não contem nenhuma menção com respeito à tensão de escoamento mínima. No entanto a porção numérica das outras designações corresponde com a mínima tensão de escoamento especificada em unidades do SI ou com a mínima tensão de escoamento, arredondada para cima, especificada em libras por polegada quadrada [4].

O grau do tubo para o PSL 2 é dado na Tabela 3.1 e consiste de uma designação alfa ou alfanumérica que identifica o nível de resistência à tração do tubo. O nome do aço (designação do grau do aço), ligado à sua composição química, adicionalmente inclui um sufixo que consiste de uma única letra (R, N, Q, ou M) que identifica a condição de entrega (conforme apresentado na Tabela 3.3) [4].

3.1.3 CONDIÇÕES DE FORNECIMENTO.

Para cada número de ordem a condição de entrega para tubos de especificação PSL 1 deve ser opção do fabricante a menos que uma condição entrega específica seja determinada na ordem de compra[4].

Para os tubos de especificação PSL 2 as condições de entrega devem ser de acordo com a ordem de compra como especificado no nome do aço[4].

Na norma técnica denominada “*SPECIFICATION for Line Pipe: API Specification 5L, 44th Edition*”[4]o tubo API 5L X65 é apresentado nas especificações PSL 1 e PSL2 em condições de fornecimento diversas. Os tubosX80 e X100 são

apresentados na especificação PSL 2, nas condições de entrega da Tabela 3.3 [4]. Tabela

3.1 – Grau dos tubos e dos aços e condições de entrega [4].

Tabela 3.1 – Grau dos tubos e dos aços e condições de entrega [4].

| PSL | Condições de Entrega | Grau do tubo/Grau do aço |
|-------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------|
| PSL 1 | Como laminado, normalizado laminado, termomecânicamente laminado, termomecânicamente conformado, normalizado conformado, normalizado, normalizado e temperado ou temperado e revenido. | L450 ou X65 |
| PSL 2 | Termomecânicamente laminado ou termomecânicamente conformado. | L555M ou X80M |
| PSL 2 | Termomecânicamente laminado. | L690M ou X100M |

3.1.4 FABRICAÇÃO.

Para o tubo X 65, especificações PSL 1 PSL2, os processos de fabricação aceitáveis são na Tabela 3.2 e para os tubos X80 e X100 os roteiros de fabricação são indicados na Tabela 3.3[4].

Tabela 3.2 – Processos de fabricação e nível de fabricação de produto [4].

| PSL | Processos de fabricação | Grau do tubo |
|-------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------|
| PSL 1 | Tubo sem costura (conformação a quente); Com cordão de solda contínuo longitudinal); Soldagem com corrente de baixa frequência < 70 kHz; Corrente de alta frequência > 70 kHz; Uma soldagem laser longitudinal; Um ou dois cordões de longitudinais a arco submerso; Um cordão de solda helicoidal a arco submerso; Um ou dois cordões de solda longitudinais pela combinação de MAG e Arco Submerso; Um cordão de solda helicoidal pela combinação de MAG e Arco Submerso. | X65 |
| PSL 2 | Tubo sem costura (conformação a quente); Com um cordão de solda contínua longitudinal; Soldagem com corrente de baixa frequência < 70 kHz; Corrente de alta frequência > 70 kHz; Um ou dois cordões de solda longitudinais a arco submerso; Uma soldagem helicoidal a arco submerso; Uma ou duas soldagens longitudinais pela combinação de MAG e Arco Submerso; Uma solda helicoidal pela combinação de MAG e Arco Submerso. | X65 |
| PSL 2 | Um ou dois cordões de longitudinais a arco submerso; Um cordão de solda helicoidal a arco submerso. | X80 e X100 |

Tabela 3.3 – Roteiros de fabricação para tubos PSL 2, X80 e X100 [4].

| Tipo de Tubo | Matéria Prima | Processo de Fabricação | Tratamento Térmico |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------|----------------------------------------------------------|------------------------------------------------------|
| Corrente de alta frequência > 70 kHz | Tira termomecanicamente laminada. | Conformado a frio | Apenas da soldagem |
| | Tira laminada a quente. | Conformado a frio | Da soldagem e para alívio de tensões de todo o tubo. |
| Um ou dois cordões de longitudinais longitudinais ou um helicoidal a arco submerso ou combinação de MAG e arco submerso. | Tira laminada normalizada ou normalizada. | Conformado a frio. | ---- |
| | Tira termomecânica-mente laminada ou placa. | Conformado a frio seguido de termomecanicamente formado. | ---- |

3.1.5 COMPOSIÇÃO QUÍMICA.

Para os tubos X65 a especificação API 5L_[4] apresenta os níveis PSL1 e PSL2 que diferem basicamente em sua composição química e em suas condições de fornecimento, que são apresentadas nas Tabelas 3.4 e 3.5. Os tubos X80 e X100 constam nesta especificação apenas no nível PSL 2, conforme pode ser observado na Tabela 3.5 [4].

Tabela 3.4 – Composição Química do Tubo X65 com espessura de parede (t) ≤ 25 mm conforme a especificação PSL 1_[4].

| | C | Mn | P | P | S | V | Nb | Ti |
|------------------|----------|-----------|----------|----------|----------|----------|-----------|-----------|
| | % Max | % Max | % Max | % Min. | % Max | | | |
| Tubo sem costura | 0,28 | 1,40 | 0,03 | --- | 0,03 | (1) | (1) | (1) |
| Tubo soldado | 0,26 | 1,45 | 0,03 | --- | 0,03 | (1) | (1) | (1) |

(1) A menos que haja outra especificação, a soma das concentrações de Vanádio, Nióbio, Titânio deve ser ≤ 0,15%.

Tabela 3.5 – Composição Química dos Tubos X 65, X80 e X100 com espessura de parede $t \leq 25$ mm, especificação PSL 2, sem costura e soldados^[4].

| | C | Si | Mn | P | S | V | Nb | Ti | Outras Notas | CE IIW | CE Pcm |
|------|----------|----------|----------|----------|----------|-----|-----|-----|-----------------|-----------|-----------|
| | % Max | % Max | % Max | % Max | % Max | | | | | % Max | % Max |
| X65 | 0,18 | 0,45 | 1,9 | 0,025 | 0,015 | (1) | (1) | (1) | (2) (3) | 0,43 | 0,25 |
| X80 | 0,12 | 0,45 | 1,85 | 0,025 | 0,015 | (1) | (1) | (1) | (2) (3) | 0,43 | 0,25 |
| X100 | 0,10 | 0,55 | 2,1 | 0,020 | 0,010 | (1) | (1) | (1) | (2) (3) | ---- | 0,25 |

(1) A menos que haja outra especificação, a soma das concentrações de Vanádio, Nióbio e Titânio deve ser $\leq 0,15$

(2) A menos que haja outra especificação, máximo, 0,50% para o cobre, no máximo 1,00% de níquel, no máximo, 0,50% para o cromo e 0,50% máxima para o molibdênio.

(3) Máximo 0,004% de boro.

A composição do metal de base deve ser conhecida para se determinar a temperatura de pré-aquecimento correta, pois ela deve ser baseada em dois principais fatores: o teor de carbono do metal de base e o teor de liga do metal de base [7]. Basicamente, quanto maior for o teor de carbono do metal de base maior será a temperatura de pré-aquecimento requerida. Esse raciocínio se aplica também ao teor de ligas, mas num grau levemente menor [7].

3.1.6 CARBONO EQUIVALENTE.

A temperabilidade de um aço está relacionada ao seu teor de carbono acrescido do teor de certos elementos de liga [7]. O valor do carbono equivalente é diretamente proporcional à temperabilidade do aço que é em detrimento da sua soldabilidade.

3.1.7 LIMITE DE ESCOAMENTO E RESISTÊNCIA À TRAÇÃO.

Os limites de escoamento e de resistência à tração para os tubos de especificação PSL 1 e PSL 2 são apresentados nas Tabelas 3.6 e 3.7, que foram adaptadas da especificação API Specification 5L[4].

Tabela 3.6 – Requisitos para resultados de testes de tração para o tubo X65, especificação PSL 1, com costura e soldados [4].

| Limite de escoamento | Resistência à tração | Alongamento |
|---------------------------|---------------------------|-------------------|
| Rt MPa (PSI) Mínima | Rm MPa (PSI) Mínima | Af % Mínimo |
| 450 (65 300) | 535 (77 600) | (1) |

(1) O alongamento mínimo especificado, expresso em % e arredondado para o valor mais próximo deve ser calculado pela equação:

$$A_f = C \frac{A_{xc}^{0,2}}{U^{0,9}} \quad [4]$$

C é 1 940 para cálculos em SI e 625000 para cálculos em d USC.

A_{xc} é a área da seção reta do corpo de prova submetida à tração.

U é resistência à tração mínima especificada.

Tabela 3.7 – Requisitos para resultados de testes de tração para os tubos X65, X80 e X100, especificação PSL 2, com costura e soldados [4].

| Grau do tubo | Limite de escoamento | | Resistência à Tração | | Razão R _{t0,5} / R _m | Alongamento |
|--------------|----------------------|------------------|----------------------|------------------|------------------------------------------------|-------------|
| | Rt MPa (PSI) | Rt MPa (PSI) | Rt MPa (PSI) | Rt MPa (PSI) | Rt MPa (PSI) | Af % |
| | Mínima | Mínima | Mínima | Máxima | | Mínimo |
| X65 | 450 (65 300) | 600 (87 000) | 535 (77 600) | 760 (110 200) | 0,93 | (1) |
| X80 | 555 (80 500) | 705 (102 300) | 625 (90 600) | 825 (119 700) | 0,93 | (1) |
| X100 | 690 (100 100) | 840 (121 800) | 760 (110 200) | 990 (143 600) | 0,97 | (1) |

(1) O alongamento mínimo especificado, expresso em % e arredondado para o valor mais próximo deve ser calculado pela equação:

$$A_f = C \frac{A_{xc}^{0,2}}{U^{0,9}} \quad [4]$$

C é 1 940 para cálculos em SI e 625000 para cálculos em d USC.

A_{xc} é a área da seção reta do corpo de prova submetida à tração.

U é resistência à tração mínima especificada.

R_{10,5} = Tensão de escoamento (0,5% da extensão total)

R_m = Resistência à tração.

3.2 NORMAS DE QUALIFICAÇÃO DE PROCEDIMENTOS DE SOLDAGEM.

As normas de qualificação de procedimentos de soldagem aplicáveis consideradas neste trabalho são: API STANDARD 1104 TWENTY EDITION, NOVEMBER 2005 – Welding of Pipelines and Related Facilities, American Petroleum Institute, OFFSHORE STANDARD - DNV-OS-F101 - SUBMARINE PIPELINE SYSTEMS - OCTOBER 2010, Det Norske Veritas e ASME IX 2010 – Boiler & Pressure Vessel Code Copyright, 2011, American Society of Mechanical Engineers, conforme as respectivas Referências Bibliográficas citadas neste trabalho.

A norma API STANDARD 1104 TWENTY EDITION, NOVEMBER 2005 – Welding of Pipelines and Related Facilities é uma publicação do “American Petroleum Institute” e tem como escopo a soldagem de tubulação de aço carbono e de baixa liga usados na compressão, bombeamento e transmissão de petróleo bruto e seus derivados, gases combustíveis, dióxido de carbono e nitrogênio. Onde aplicável cobre a soldagem em sistemas de distribuição e se aplica à soldagem na construção e ou em sistemas em serviço [4].

A norma OFFSHORE STANDARD - DNV-OS-F101 - SUBMARINE PIPELINE SYSTEMS - OCTOBER 2010 é emitida pela Det Norske Veritas, Noruega, com objetivo fornecer critério e orientação para a concepção, desenvolvimento, projeto, construção, operação e abandono de tubulação submarina (dutos) [10]. Seu escopo abrange sistemas de petróleo e gás natural, sistemas submarinos com aplicação de tubulação metálica rígida sem limites de dimensões, pressão ou profundidade.

A norma ASME IX 2010 – Boiler & Pressure Vessel Code, emitida pela American Society of Mechanical Engineers, diz respeito à qualificação de soldadores, operadores de soldagem e procedimentos de soldagem de acordo com a ASME VIII, Caldeiras e Vasos de Pressão e ASME B31 para a tubulação de pressão.

As normas para qualificação de procedimentos de soldagem fixam quais são as variáveis que não podem ser alteradas na execução de um processo produtivo com base no procedimento qualificado. Exemplos de variáveis essenciais são: diâmetro do consumível, posição de soldagem, gás de proteção, metal de base, etc. A realização da produção com alteração das variáveis essenciais de um procedimento qualificado ou com valores que extrapolam os intervalos determinados para essas variáveis requer a qualificação de outro procedimento.

A norma API 1104 determina variáveis essenciais específicas para qualificação de processos, soldadores, processos mecanizados, processos de soldagem em tubulações em construção e em serviço.

A norma DNV-OS-F101 estabelece as variáveis essenciais de uma maneira geral e específica para os processos Arco Submerso, Arame Tubular, MIG/MAG, TIG e Plasma.

A norma ASME IX especifica variáveis essenciais e variáveis essenciais suplementares por processos de soldagem propriamente ditos e para processos de revestimento.

Devido a uma norma ser ampla e considerar diferentes aspectos em sua elaboração, não seria possível a comparação entre todos os itens das mesmas. Este trabalho visou essencialmente a comparação das normas citadas com foco nos ensaios requeridos para a qualificação dos procedimentos e da mão de obra, ou seja, dos soldadores e nas variáveis essenciais que quando alteradas ou quando ultrapassam limites estabelecidos requerem nova qualificação.

3.2.1 VARIÁVEIS ESSENCIAIS CONFORME AS NORMAS API 1104, DNV-OS-F101 e ASME IX.

A Tabela 3.8 a seguir apresenta uma comparação entre as especificações das variáveis essenciais pelas normas API 1104, DNV-OS-F101 e ASME IX.

| | | ASME IX | | | |
|----------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Variáveis essenciais | API 1104 | DNV-OS-F101 | TIG | AS | ER |
| <p>Metal de base</p> | <p>Na soldagem de materiais de grupos separados o procedimento para o de maior resistência deve ser utilizado. Três grupos são considerados: LE ≤ 290MPa; 290MPa ≤ LE < 448MPa; LE ≥ 448MPa Nota: Metais de base ou de adição de um mesmo grupo e de análises diferentes, usados na qualificação, não devem ser substituídos indiscriminadamente sem uma análise da compatibilidade com os metais de adição do ponto de vista químico, mecânico e de requisitos de tratamento térmico.</p> | <p>Mudança para um metal de base de maior resistência, mas não o contrário. Mudanças nas condições de entrega (Como laminado, temperado, revenido, etc...). Mudança de fornecedor para aços com LE ≥ 450 MPa. Composição química: Aumento do Carbono Equivalente de mais de 0,03 % (Pcm de mais de 0,02%) e teor de carbono de mais de 0,02% para C-Mn e aços de baixa liga. Mudança no processo de fabricação (Laminado, sem costura, etc...).</p> | <p>Mudança no P Number. Mudança na espessura qualificada.</p> | <p>Para a soldagem de passe único ou multipasse em qualquer passe maior do que 13 mm de espessura, um aumento da espessura do metal de base para além de 1,1 vezes do corpo de prova de qualificação. Mudança na espessura qualificada. Mudança no P Number qualificado. Group Number Espessura Limite.</p> | <p>Group Number ou P Number qualificado. Espessura qualificada. Para a soldagem de passe único ou multipasse em qualquer passe maior do que 13 mm de espessura, um aumento da espessura do metal de base para 1,1 vezes do corpo de prova de qualificação.</p> |

| Variáveis essenciais | ASME IX | | | ER |
|-------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| | API 1104 | DNV-OS-F101 | TIG | |
| Metal de adição | <p>1) Mudança de grupo, conforme definido na própria norma.</p> <p>2) Para aços com LE \geq 448MPa a mudança na classificação AWS deve ser considerada.</p> | <p>1) Mudanças de diâmetro, tipo, classificação ou marca;</p> <p>2) Lote não testado quando o teste de lote é requerido;</p> <p>3) Uso de algum lote de consumível com redução de mais de 10% de propriedades de resistência e impacto com relação ao lote usado na qualificação do procedimento.</p> | <p>Mudança no tipo e composição química (F Number e A Number)</p> <p>Inclusão ou eliminação do metal de adição.</p> <p>Espessura do metal depositado.</p> | <p>F Number</p> <p>A Number</p> <p>Diâmetro >16mm</p> <p>Espessura do passe.</p> <p>Classificação.</p> |
| Gás de proteção e vazão | <p>Mudança de um gás para outro ou de mistura.</p> <p>Grandes mudanças na vazão.</p> | <p>Mudança de um gás para outro ou mudança de mistura.</p> <p>Grandes mudanças na vazão.</p> | <p>Gás único para mistura e vice versa o % da mistura.</p> | |
| Gás de purga | | <p>Taxa de oxigênio contido no gás de purga.</p> | <p>Eliminação do gás de purga ou mudança na composição.</p> | |
| Fluxo | <p>Substituições que resultem no mesmo número de especificação AWS podem ser feitas sem requalificação do procedimento.</p> | <p>1) Mudança de tipo classificação ou marca;</p> <p>2) Acréscimo na proporção do reciclado ao novo fluxo</p> | | <p>Liga do fluxo.</p> <p>Tipo de Fluxo.</p> |
| Diâmetro do tubo | | <p>Mudança no diâmetro interno além de 0,5 DI a 2 DI.</p> | | |

| Variáveis essenciais | API 1104 | DNV-OS-F101 | TIG | ASME IX AS | ER |
|------------------------------|----------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|---------------|----|
| Alinhamento e soldagem ponto | | <p>1) Alguma mudança ou remoção de soldas ponto ou absorção das soldas ponto pela solda.</p> <p>2) Omissão de dispositivos de alinhamento ou mudanças de dispositivos de alinhamento de externo para interno.</p> <p>3) Alguma redução no comprimento de cada sessão do passe de raiz soldada; espaçamento de seções, número de seções e porcentagem da circunferência soldada por braçadeira de alinhamento externa.</p> <p>4) Qualquer alteração no número e comprimento de passes por dispositivo de alinhamento interno.</p> <p>Qualquer desalinhamento por "clad" ou revestimento.</p> | | | |

| Variáveis essenciais | API 1104 | DNV-OS-F101 | ASME IX | | |
|---------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| | | | TIG | AS | ER |
| Espessura de parede [t] | Mudança de um grupo de espessura para outro, conforme especificado na norma. | a) - $p/t < 25$ mm m mudanças além de 0,75 a 1,5 - $p/t > 25$ mm mudanças além de 0,75 a 1,25 b) – para utilização em meio corrosivo mudanças além de 0,75 a 1,25. | Mudanças nas faixas de espessura qualificadas como especificado na norma. | Mudanças nas faixas de espessura qualificadas como especificado na norma. Para soldagem de um único passe ou múltiplos passes que qualquer passe seja maior do que 13 mm de espessura, um aumento na espessura do metal de base para além 1,1 vezes maior do que do corpo de prova. | Mudanças nas faixas de espessura qualificadas como especificado na norma. Para soldagem de um único passe ou múltiplos passes que qualquer passe seja maior do que 13 mm de espessura, um aumento na espessura do metal de base para além 1,1 vezes maior do que do corpo de prova. |
| Posição de soldagem | Mudança de posição fixa para soldagem com rotação e vice versa. | Mudança de mais de 15° na posição do tubo. | | | |
| Direção de soldagem | Modificação de vertical ascendente para vertical descendente. | Modificação de vertical ascendente para vertical descendente. | | | |
| Largura do passe. | | Modificação na largura do passe mais que 3X o diâmetro do eletrodo/arame. | | | |
| Seqüência de deposição de diferentes consumíveis. | | Qualquer mudança na seqüência de deposição. | | | |
| Seqüência dos lados soldados. | | Alteração na seqüência. | | | |
| Passes soldados de cada lado. | | Mudança de único para múltiplos passes e vice versa. | Mudança de único para múltiplos passes e vice versa. | | Mudança de único para múltiplos passes e vice versa. |

| Variáveis essenciais | API 1104 | DNV-OS-F101 | TIG | | ASME IX | |
|---------------------------|----------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------|--|
| | | | AS | ER | | |
| Tempo entre passes | Um aumento do tempo máximo entre o término da raiz e o início da segunda camada. | Para eletrodos revestidos celulósicos. | | | | |
| Término da soldagem. | | Redução do número de passes completados antes do resfriamento abaixo da temperatura de pré-aquecimento. | | | | |
| Velocidade de avanço | Mudança de faixa definida | | | | | |
| Características elétricas | Mudanças de corrente contínua para alternada e mudanças de polaridade. | Mudanças de corrente contínua para alternada e mudanças de polaridade. Mudanças de Corrente pulsada para não pulsada e frequência da corrente pulsada e alterações de pico e tempo que excedam a +/- 10%. Amudança dearcospray, arcoaglobularou arco pulsantede arco curto-circuitos e vice-versa. | Para mudança de corrente contínua para alternada ou vice versa. Mudança de polaridade. | Para mudança de corrente contínua para alternada ou vice versa. Mudança de polaridade. | Para mudança de corrente contínua para alternada ou vice versa. Mudança de polaridade. | |
| Energia de soldagem | | Para C-Mn e Baixa Liga com LE <= 450 MPa mudança > +/- 15%. Para C-Mn com LE > 450MPa, mudança > +/- 10%. Para ligas resistentes à corrosão, mudança > +/- 10%. | Aumento na energia de soldagem. | Aumento na energia de soldagem. | Aumento na energia de soldagem. | |

| Variáveis essenciais | API 1104 | DNV-OS-F101 | ASME IX | | |
|-------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------|
| | | | TIG | AS | ER |
| Pré-aquecimento | Para a diminuição da temperatura mínima de pré-aquecimento. | Para a diminuição da temperatura mínima de pré-aquecimento. Mudança na temperatura inicial quando o pré-aquecimento não é usado. | Redução ou acréscimo na temperatura do pré-aquecimento em mais de 55° C ou redução. | Redução ou acréscimo na temperatura do pré-aquecimento em mais de 55° C ou redução. | Redução ou acréscimo na temperatura do pré-aquecimento em mais de 55° C ou redução. |
| Temperatura de interpasso Máxima e Mínima | | Acréscimo acima de 25° C para C-Mn e baixa liga, algum acréscimo para ligas resistentes à corrosão e para reduções abaixo da temperatura de pré-aquecimento. | Acréscimo acima de 55° C além da máxima estabelecida. | Acréscimo acima de 55° C além da máxima estabelecida. | Acréscimo acima de 55° C além da máxima estabelecida. |
| Tratamento térmico pós-soldagem | Para introdução de tratamento térmico pós-soldagem e mudança de intervalos ou valores. | Para mudanças em tempo ou temperatura ou eliminação de tratamento térmico para liberação de hidrogênio, mas não para introdução. Para mudanças de temperatura > +/-20% ou de tempo > 5%. | Mudança no tratamento térmico. Mudança no intervalo de temperatura. Mudança na espessura. | Mudança no tratamento térmico. Mudança no intervalo de temperatura. Mudança na espessura. | Mudança no tratamento térmico. Mudança no intervalo de temperatura. Mudança na espessura. |
| Especificamente para Arco Submerso | | Cada variante do processo deve ser qualificada. Tipo classificação ou marca do fluxo. Mudança do intervalo da tensão do arco além +/- 10%. | | | |
| Especificamente para TIG | | Mudança na especificação e diâmetro do eletrodo de Tungstênio. Mudança de arame aquecido para não aquecido e vice versa. | | | |

3.2.2 QUALIFICAÇÃO DOS PROCEDIMENTOS DE SOLDAGEM CONFORME AS NORMAS API 1104, DNV-OS-F101 e ASME IX.

Uma soldagem deve ser realizada com um procedimento qualificado de maneira a demonstrar que a junta soldada resultante atende aos requisitos estabelecidos para as suas propriedades mecânicas e sanidade, conforme métodos e critérios de aceitação definidos.

Cada uma das normas estudadas estabelece uma série específica de ensaios mecânicos e de exame do interior do cordão de solda dos corpos de prova obtidos para a qualificação dos procedimentos e dos soldadores.

3.2.2.1 ENSAIOS REQUERIDOS PARA A QUALIFICAÇÃO DOS PROCEDIMENTOS DE SOLDAGEM E DE SOLDADORES.

3.2.2.1.a ENSAIO DE TRAÇÃO.

O ensaio de tração de engenharia é amplamente usado para a obtenção de informações básicas sobre a resistência de materiais e como um ensaio de controle de especificações [13]. Num ensaio de tração um corpo de prova é submetido a uma força de tração uniaxial continuamente crescente enquanto são feitas observações simultâneas de alongamento do corpo de prova [13]. Uma curva de tensão-deformação é construída a partir das medições da carga e do alongamento [13].

A tensão considerada para a construção da curva tensão-deformação é a tensão longitudinal média no corpo de prova. Ela é obtida dividindo-se a carga pela seção reta inicial do corpo de prova [13].

A deformação usada para traçar a curva é a deformação linear média, que é obtida pela divisão do alongamento do comprimento útil do corpo de prova pelo seu comprimento original [13]. Os parâmetros que são usados para descrever a curva de tensão deformação são: resistência à tração, tensão limite de escoamento, alongamento percentual e redução de área. Os dois primeiros são parâmetros de resistência e os dois últimos uma indicação de ductilidade [13].

3.2.2.1.b ENSAIOS DE DOBRAMENTO.

Os ensaios de dobramento (de raiz, de face ou lateral) são usados para verificar a ductilidade e a sanidade de uma junta soldada pela verificação de possíveis defeitos localizados na superfície externa da região tensionada pelo dobramento [19].

Estes ensaios são realizados pelas normas em estudo que estabelecem os critérios de aceitação.

3.2.2.1.c ENSAIO DE NICK-BREAK.

O ensaio de Nick-break é usado para determinar a sanidade do metal de solda. Este ensaio revela vários defeitos internos de um cordão de soldagem, como bolha de gás, inclusões de escória, falta de fusão e metal oxidado ou perfurações [17].

O ensaio em um corpo de prova de uma junta de topo é preparado fazendo-se um entalhe com serra no centro do cordão de solda, apoiando-se as extremidades do corpo de prova e aplicando-se um impacto no centro da região entalhada para produzir uma fratura^[17] cujas superfícies devem examinadas para verificar os possíveis defeitos conforme o critério estabelecido pela norma API 1104.

3.2.2.1.d ENSAIO DE CHARPY-V.

O ensaio de Charpy com entalhe V é um ensaio em um corpo de prova entalhado para determinar a tendência de um material a se comportar de maneira frágil. A principal medida obtida de um ensaio é a energia absorvida fraturar a amostra (corpo de prova) ^[13].

Uma outra medida importante obtida do ensaio de Charpy se refere à observação da superfície da fratura para determinar se a fratura é fibrosa (fratura cisalhante), granular (fratura por clivagem) ou uma mistura destas duas. Estes diferentes modos de falhas são prontamente distinguíveis mesmo a olho nu. A superfície facetada da fratura por clivagem (frágil) possui alta refletividade e aparência brilhante, enquanto que a superfície da fratura dúctil fibrosa (composta de pequenas cavidades, *dimples*) absorve luz incidente, tendo, como consequência, aparência escura. Geralmente faz-se uma estimativa da porcentagem da fratura fibrosa (ou por clivagem) através da observação visual da superfície de fratura ^[13].

O ensaio de impacto com amostra (corpo de prova) entalhada é mais significativo quando conduzido em um intervalo de temperaturas, de maneira que se pode determinar a temperatura de transição dúctil-frágil [13]. A energia absorvida diminui com o decréscimo da temperatura [13]. Com base no texto da referência [13] quanto menor a energia absorvida na ruptura menor a ductilidade.

3.2.2.1.e ENSAIO DE DUREZA.

O ensaio de dureza visa medir a resistência à penetração de um material, representa uma quantidade específica facilmente medida que fornece alguma informação sobre a resistência de um metal ou o seu tratamento térmico [13].

Entre os vários métodos existentes, o ensaio de dureza Vickers, citado pela norma DNV-OS-F101, usa um penetrador de diamante piramidal de base quadrada e o número de dureza é definido pela carga aplicada dividida pela área superficial da penetração calculada a partir de medidas microscópicas das diagonais da impressão [13].

3.2.2.1.f MACROGRAFIA.

Macrografia é uma análise de uma seção de um corpo de prova previamente polida e em geral atacada por um reagente apropriado para o tipo do metal examinado para expor sua macroestrutura, sendo que diferentes tipos de reagentes revelam diferentes aspectos e defeitos a serem observados com auxílio de lupa ou não [18].

Na solda o interesse é verificar a geometria e as dimensões de seções retas de cordões de solda, bem como a organização da deposição de passes e camadas, possíveis defeitos, a zona de ligação e a zona afetada pelo calor [18].

3.2.2.2 QUALIFICAÇÃO DE PROCEDIMENTOS DE SOLDAGEM CONFORME A NORMA API 1104, Ed.: 20.

A API 1104 especifica os tipos e define a quantidade de corpos de prova para os ensaios de qualificação de procedimentos considerando a espessura de parede e diâmetro dos tubos, bem como estabelece os métodos de preparação, realização e os critérios de aceitação.

3.2.2.2.a ENSAIOS REQUERIDOS PARA JUNTAS DE TOPO CONFORME NORMA API 1104.

A Tabela 3.9 define os ensaios e a quantidade de corpos de prova de juntas de topo para faixas específicas de diâmetro e espessura de parede.

Tabela 3.9 - Ensaio Requeridos para a qualificação de procedimentos conforme a Norma API 1104, Ed.: 20 [3].

| Diâmetro Externo ϕ [mm] | Espessura t [mm] | Tração | Nick-Break | Dobramento | | | Total |
|------------------------------|--------------------|--------|------------|------------|------|---------|-------|
| | | | | Raiz | Face | Lateral | |
| $\phi < 60,3$ | $t < 12,7$ | 0(2) | 2 | 2 | 0 | 0 | 4 |
| $60,3 \leq \phi \leq 114,3$ | $t < 12,7$ | 0(2) | 2 | 2 | 0 | 0 | 4 |
| $114,3 \leq \phi \leq 323,9$ | $t < 12,7$ | 2 | 2 | 2 | 2 | 0 | 8 |
| $\phi \geq 323,9$, | $t < 12,7$ | 4 | 4 | 4 | 4 | 0 | 16 |
| $\phi \leq 114,3$ | $t > 12,7$ | 0(2) | 2 | 0 | 0 | 2 | 4 |
| $114,3 \leq \phi \leq 323,9$ | $t > 12,7$ | 2 | 2 | 0 | 0 | 4 | 8 |
| $\phi \geq 323,9$ | $t > 12,7$ | 4 | 4 | 0 | 0 | 8 | 16 |

Notas:

1) Um corpo de prova de ensaio Nick-break e um de ensaio de dobramento de raiz devem ser obtidos de cada dois testes de soldas, ou para tubos de diâmetro $\leq 33,4$ mm uma seção completa de corpos de prova de tração devem ser tomadas.

2) Para metais de base com Resistência ao Escoamento mínima especificada maior que 290 MPa, no mínimo um ensaio de tração deve ser requerido.

3.2.2.2.b ENSAIO DE TRAÇÃO.

Os corpos de prova de tração devem ser de aproximadamente 230 mm de comprimento por 25 mm de largura, conforme Figura 3.1, cortados por processo de usinagem ou oxicorte. Não é necessária outra preparação a não ser que os lados sejam entalhados ou não paralelos. Pode ser necessária usinagem para tornar os lados lisos e paralelos [3].

A resistência à tração, incluindo a zona fundida, deve ser maior ou igual à resistência à tração do metal de base, mas não é necessário ser maior. Se a ruptura ocorrer fora da soldagem e da zona de fusão e atende o requisito de resistência à tração mínima especificada a soldagem deve ser aceita.

Se a ruptura ocorrer na soldagem ou na zona fundida, a resistência à tração observada for maior ou igual à mínima do metal de base e forem atendidos os requisitos

de sanidade especificados para o ensaio Nick-break descrito a seguir, a soldagem deve ser aceita.

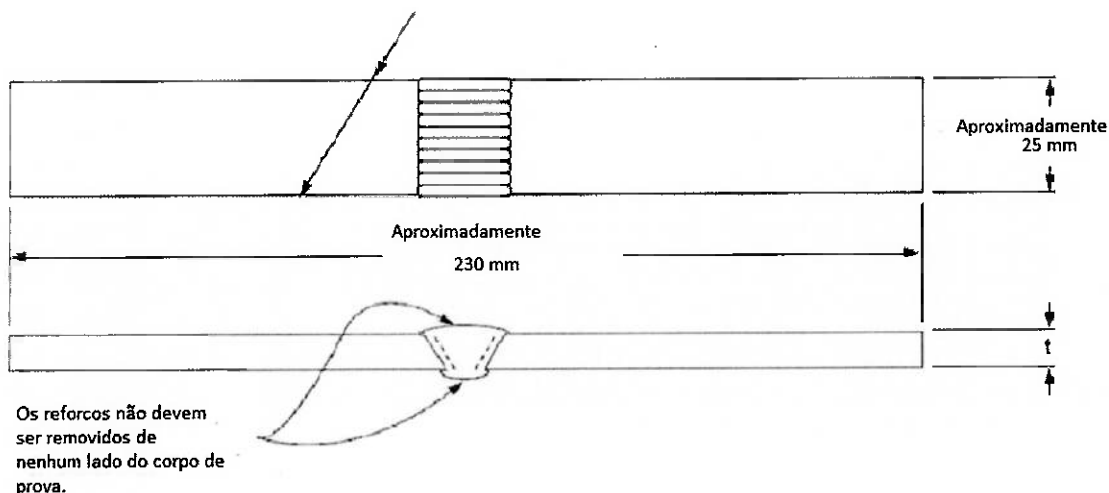


Figura 3.1 - Corpo de Prova para ensaio de Tração conforme API 1104 [3].

3.2.2.2.c ENSAIO DE NICK-BREAK.

Os corpos de prova para o ensaio Nick-break devem ser de aproximadamente 230 mm de comprimento por 25 mm de largura, conforme Figura 3.2, cortados por processo de usinagem ou oxicorte. Devem ser entalhados com serra em cada lado do centro da soldagem e cada entalhe deve ter aproximadamente 3 mm de profundidade.

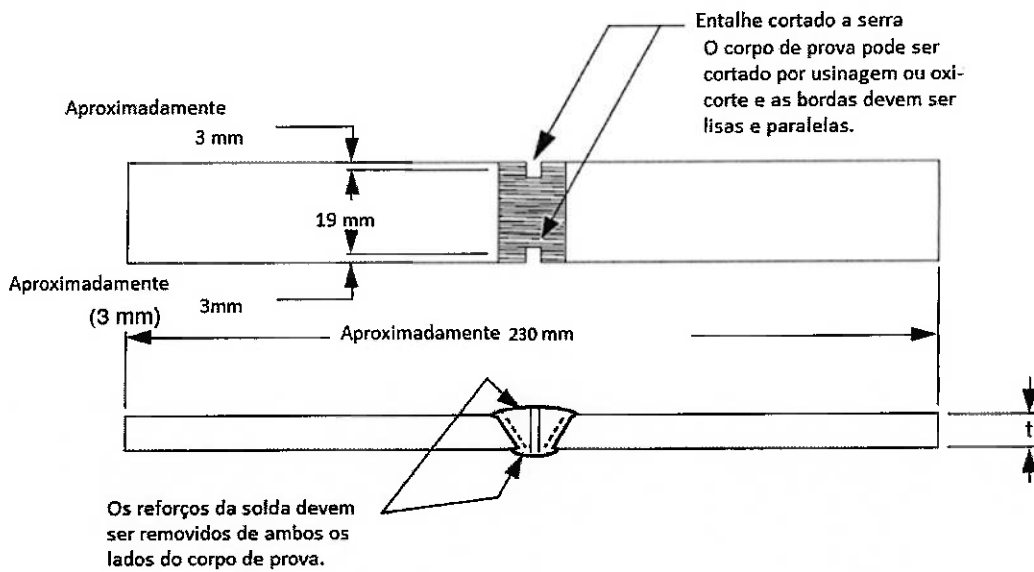


Figura 3.2 - Corpo de Prova para ensaio de Nick-break conforme API 1104 [3].

Corpos de prova, preparados dessa maneira, que são obtidos de soldagens realizadas com processos mecanizados ou semi-automáticos, podem se romper no metal de base ou na solda.

Se a experiência indicar que a ruptura no metal de base é esperada, reforços podem ser feitos com entalhes de 1,6 mm de profundidade, a partir das superfícies da solda, conforme Figura 3.3 [3].

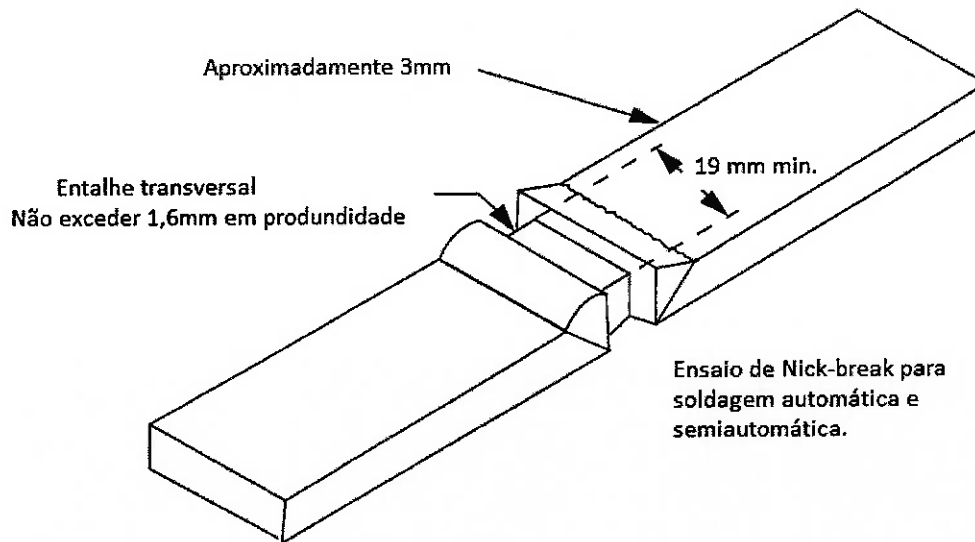
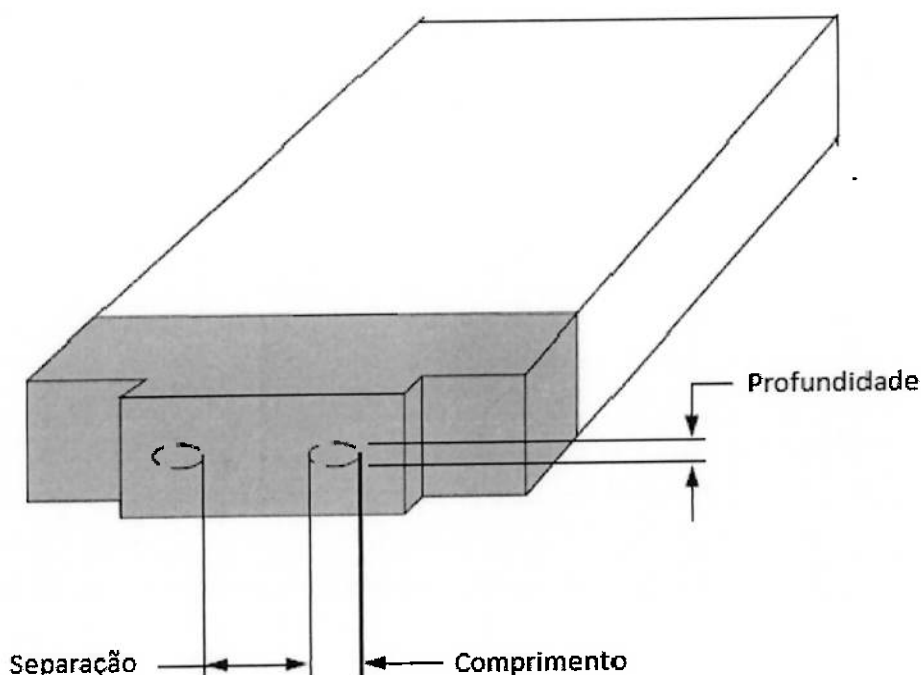


Figura 3.3 - Corpo de Prova para ensaio de Nick-break para soldagem automática e semi-automática conforme API 1104 [3].

Os corpos de prova devem ser quebrados por impacto no centro da junta soldada, com as extremidades fixas, ou por impacto em uma extremidade com a outra fixa [3].

As superfícies de fratura expostas de cada corpo de prova devem apresentar fusão e penetração completas. A maior dimensão para um poro não deve exceder 1,6 mm e a soma das áreas da porosidade não deve exceder 2% da área total exposta. Uma inclusão de escória não deve ser superior a 0,8 mm em profundidade e seu comprimento não deve ser maior que 3 mm ou maior que a metade da espessura de parede nominal, o que for menor. A distância mínima entre as inclusões de escória deve ser de 13 mm e as medições devem ser feitas como indicado na Figura 3.4 [3].



NOTA: A fratura do corpo de prova de ensaio de Nick-break é mostrada, no entanto, este método de dimensionamento é igualmente aplicável à ruptura por tração e ensaios em soldas de ângulo.

Figura 3.4 - Dimensionamento de imperfeições nas superfícies expostas da soldagem (Superfícies de Ruptura) do ensaio de Nick-break conforme API 1104 [3].

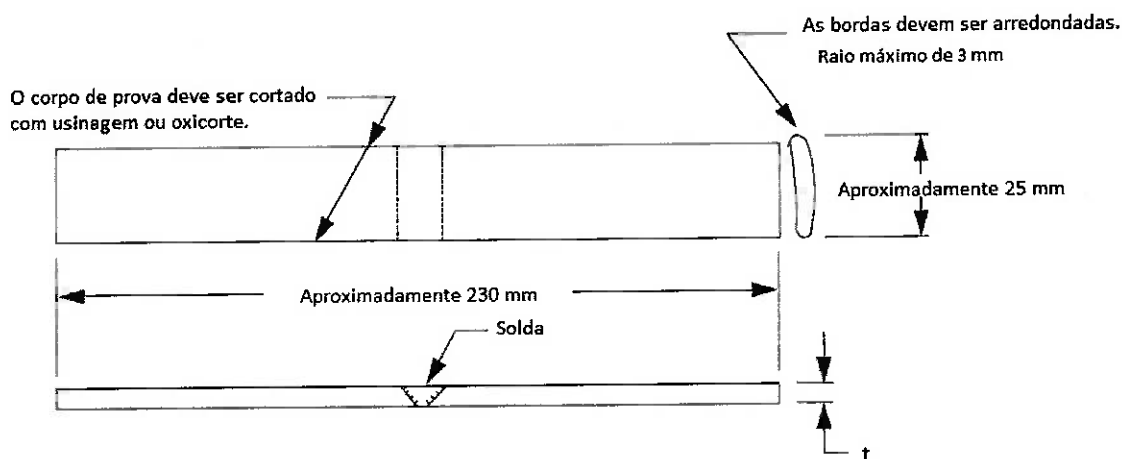
3.2.2.2.d ENSAIOS DE DOBRAMENTO DE FACE E DE RAIZ.

Os corpos de prova de dobramento de face e de raiz devem ser de aproximadamente 230 mm de comprimento por 25 mm de largura, conforme Figura 3.5, e suas bordas longitudinais devem ser arredondadas. Podem ser cortados por processo de usinagem ou oxicorte. Os reforços de face e raiz devem ser removidos e nivelados com as superfícies que devem ser lisas e se houver riscos estes devem ser leves e transversais à soldagem [3].

Os corpos de prova dobrados devem ter o formato aproximado de U [3]. Os resultados dos ensaios devem ser aceitos se não houver trincas ou outras imperfeições

maiores que 3 mm ou maiores que a metade da espessura de parede nominal, o que for menor, em qualquer direção, presentes na solda ou entre a solda e a zona fundida, após o dobramento [3].

Trincas originadas durante o ensaio, fora do raio de dobramento ao longo das bordas, que forem menores que 6 mm, medidas em qualquer direção, não devem ser consideradas a menos que imperfeição óbvia sejam observadas. [3]. Cada corpo de prova sujeito ao dobramento deve atender estes requisitos [3].



NOTA:

- (1) Os reforços devem ser removidos de ambos os lados da superfície do corpo de prova.
- (2) O corpo de prova não deve ser aplainado antes do ensaio

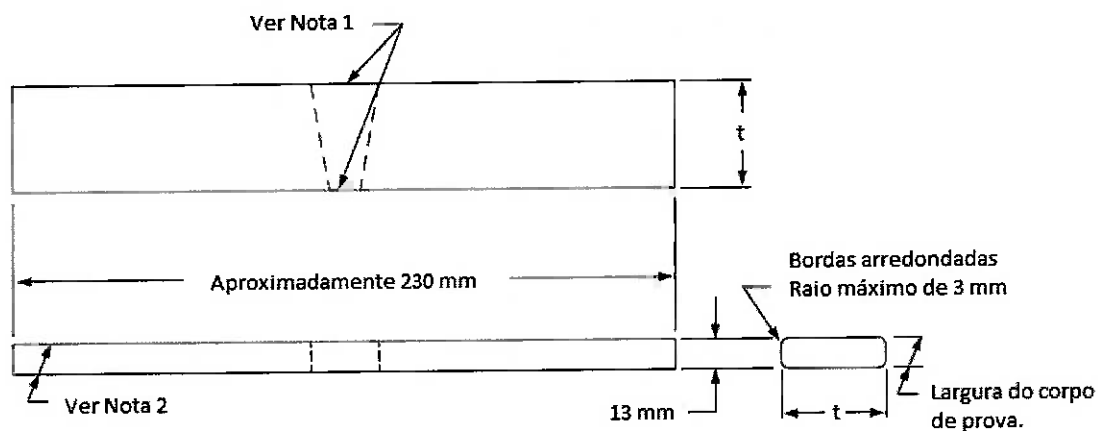
Figura 3.5 - Corpo de Prova para ensaios de Dobramento de Face ou de Raiz conforme API 1104 [3].

3.2.2.2.e ENSAIO DE DOBRAMENTO LATERAL.

Os corpos de prova de dobramento lateral devem ser de aproximadamente 230 mm de comprimento por 13 mm de largura, conforme a Figura 3.6, e suas bordas

longitudinais devem ser arredondadas. Podem ser cortados por processo de usinagem ou oxicorte com 19 mm de largura e, a seguir usinados para 13 mm de largura.

Os lados devem ser lisos e paralelos e os reforços de face e de raiz devem ser removidos e nivelados com os lados. Os corpos de prova dobrados devem ter o formato aproximado de U e os critérios de aceitação são os mesmos aplicados aos dobramentos de face e raiz [3].

**NOTAS:**

- (1) Os reforços da solda devem ser removidos de ambas as faces niveladas com a superfície da amostra.
- (2) As amostras podem ser cortadas com usinagem para uma largura de 13 mm, ou com oxicorte a uma largura de cerca de 19 mm e, em seguida, usinada ou esmerilhada para uma largura de 13 mm. Superfícies de corte devem ser lisas e paralelas.

Figura 3.6 - Corpo prova para ensaio de Dobramento Lateral conforme API 1104 [3].

3.2.2.2.f LOCAIS PARA A RETIRADA DOS CORPOS DE PROVA.

As Figuras 3.7 e 3.8 indicam os locais para a retirada dos corpos de prova conforme API 1104

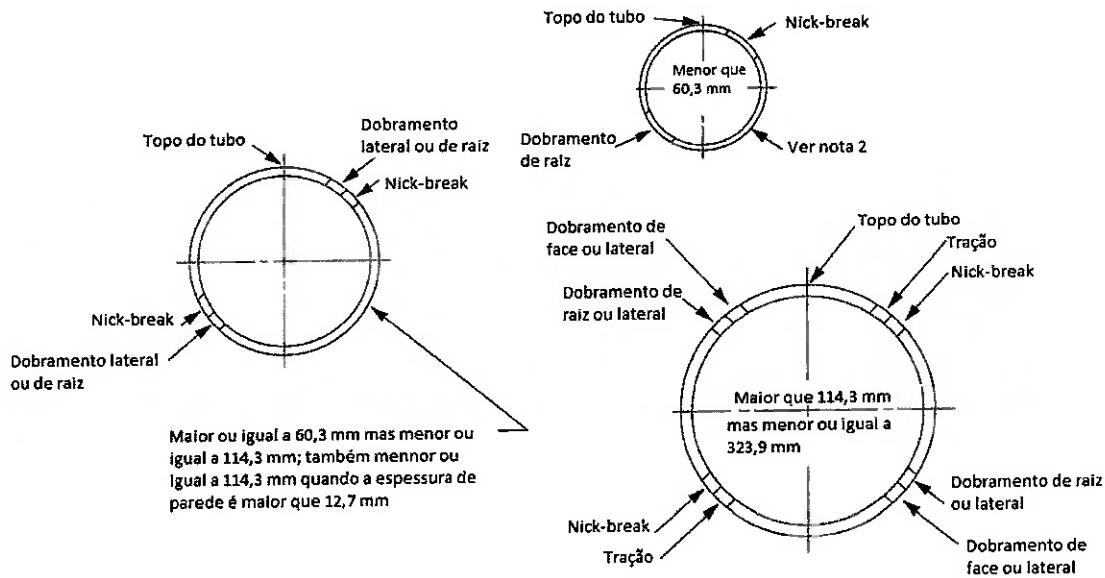
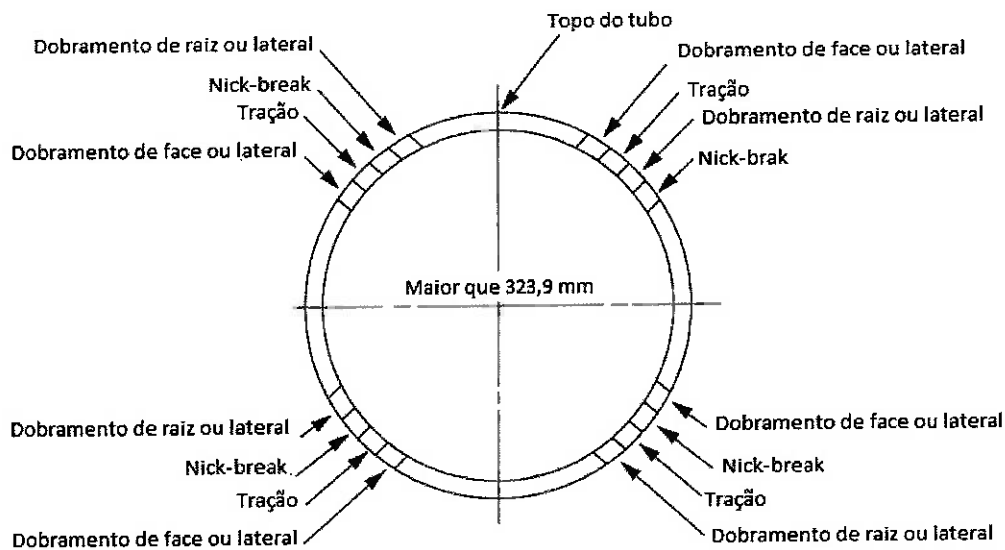


Figura 3.7 - Locais de retirada de corpos de prova em tubos de menor diâmetro [3].



Notas:

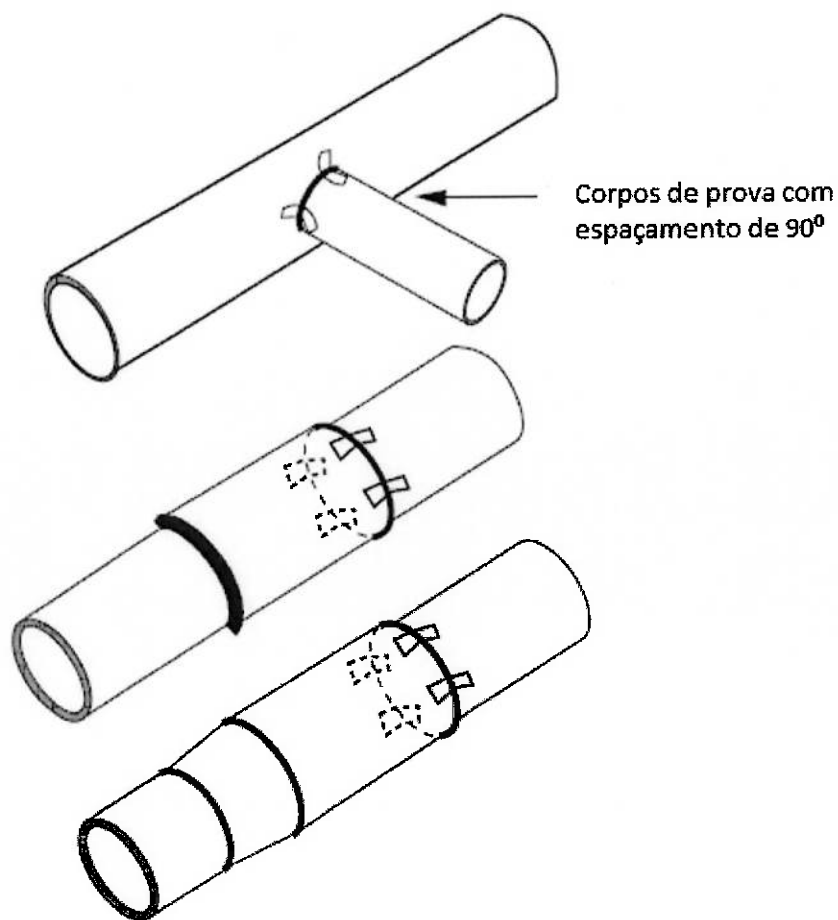
1. Por opção da empresa, os locais podem ser girados, desde que sejam igualmente espaçados em torno da tubulação, no entanto, as amostras não devem incluir a soldagem longitudinal.
2. Um corpo de prova de tração de seção completa pode ser utilizado para tubo com um diâmetro externo menor do que ou igual a 33,4 mm.

Figura 3.8 - Locais de retirada de corpos de prova em tubos de maior diâmetro [3].

3.2.2.2.g ENSAIOS REQUERIDOS PARA JUNTAS DE ÂNGULO CONFORME NORMA API 1104.

As juntas de ângulo soldadas para ensaio devem ser de uma das configurações mostradas na Figura 3.9, que indica também as posições para a obtenção dos corpos de prova [3]. Ao menos quatro corpos de prova para ensaio de Nick-break devem ser cortados por processos de usinagem ou oxicorte, conforme a Figura 3.10, com 25 mm de largura e comprimento suficiente para que possam ser rompidos no metal de solda.

Para tubos com diâmetro externo menor que 60,3 mm podem ser necessários dois ensaios para obter a quantidade de corpos de prova necessários. Os corpos de prova devem ser resfriados ao ar à temperatura ambiente e rompidos na soldagem por algum método conveniente [3].



Nota: Esta figura mostra a localização dos corpos de prova de ensaio para juntas com diâmetro maior ou igual a 60,3 mm. Para as juntas com um diâmetro externo inferior a 60,3 mm, os corpos de prova devem ser cortados a partir da mesma localização geral, mas dois corpos de prova devem ser removidos a partir de cada uma das duas soldas de teste.

Figura 3.9 - Locais para retirada dos Corpos de Prova para ensaio de Nick-break de juntas de ângulo para qualificação de procedimento e também de soldador conforme API 1104 [3].

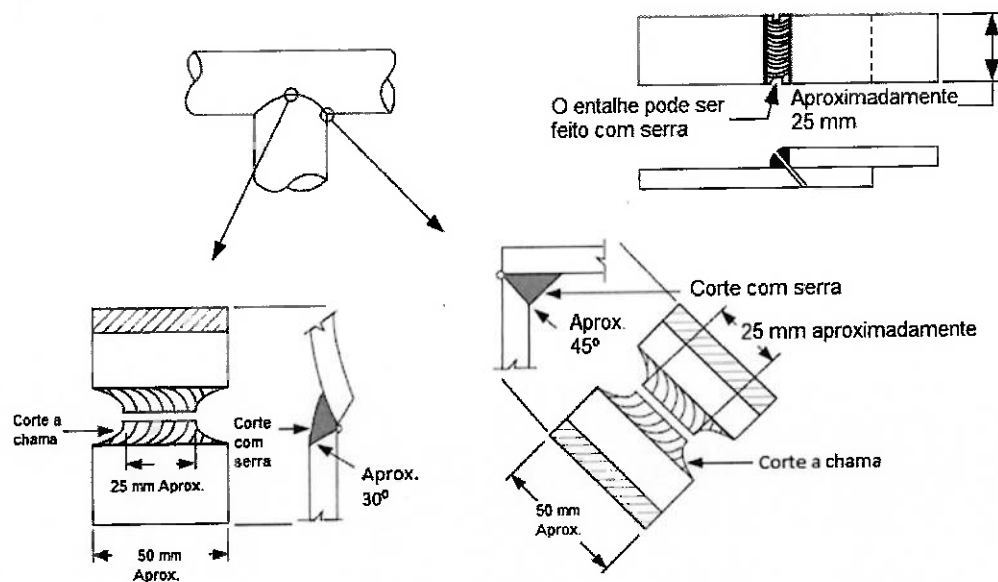


Figura 3.10 - Corpos de Prova para ensaios de Nick-break para juntas de ângulo para qualificação de procedimento e de soldador conforme API 1104 [3].

As superfícies de fratura expostas de cada corpo de prova devem apresentar fusão e penetração completas. A maior dimensão para um poro não deve exceder 1,6 mm e a soma das áreas da porosidade não deve exceder 2% da área total exposta.

Uma inclusão de escória não deve ser superior a 0,8 mm em profundidade e seu comprimento não deve ser maior que 3 mm ou maior que a metade da espessura de parede nominal, o que for menor. A distância mínima entre as inclusões de escória deve ser de 13 mm e as medições devem ser feitas como indicado na Figura 3.4 [3].

3.2.2.3 QUALIFICAÇÃO DE PROCEDIMENTOS DE SOLDAGEM CONFORME A NORMA ASME IX.

A qualificação para soldagem em chapas abrange a soldagem em tubos e vice-versa, bem como a qualificação com corpos de prova de junta de topo qualifica também a soldagem de juntas de ângulo^[11], tudo conforme a Tabela 3.10.

Tabela 3.10 - Ensaio requeridos para qualificação de procedimentos de soldagem de juntas de topo– Norma ASME IX [11].

| Espessura do Corpo de Prova t [mm] | Espessura do metal de base qualificada t [mm] | | Max. espessura do metal de solda depositado. t' [mm] | Ensaio Requeridos | | | |
|------------------------------------|-----------------------------------------------|-------|------------------------------------------------------|-------------------|-------------|------|---------|
| | Min. | Max. | | Tração | Dobramentos | | |
| | | | | | Face | Raiz | Lateral |
| $t < 1,5$ | t | 2t | 2t' | 2 | - | 2 | 2 |
| $1,5 \leq t \leq 10$ | 1,5 | 2t | 2t' | 2 | - | 2 | 2 |
| $10 < t < 19$ | 5 | 2t | 2t' | 2 | - | 2 | 2 |
| $19 \leq t < 38$ | 5 | 2t | $2t' p/t < 19$ | 2 | 4 | - | - |
| $19 \leq t < 38$ | 5 | 2t | $2t' p/t \geq 19$ | 2 | 4 | - | - |
| $38 \leq t \leq 150$ | 5 | 200 | $2t' p/t < 19$ | 2 | 4 | - | - |
| $38 \leq t \leq 150$ | 5 | 200 | $800 p/t \geq 19$ | 2 | 4 | - | - |
| $150 < t$ | 5 | 1,33t | $2t' p/t < 19$ | 2 | 4 | - | - |
| $150 < t$ | 5 | 1,33t | $1,33t' p/t \geq 19$ | 2 | 4 | - | - |

3.2.2.3.a ENSAIO DE TRAÇÃO.

Os corpos de prova devem ser tracionados até a ruptura e a resistência à tração deve ser no mínimo igual à mínima especificada para o metal de base ou igual à mínima especificada para o metal de base de menor resistência quando à junta for de dois metais de base diferentes. Deve ser no mínimo igual à resistência à tração mínima especificada do metal de solda quando o metal de solda tem menor resistência à temperatura ambiente do que o(s) metal (is) de base [11].

Os corpos de prova de tração obtidos devem ser preparados conforme indicado na Figura 3.11.

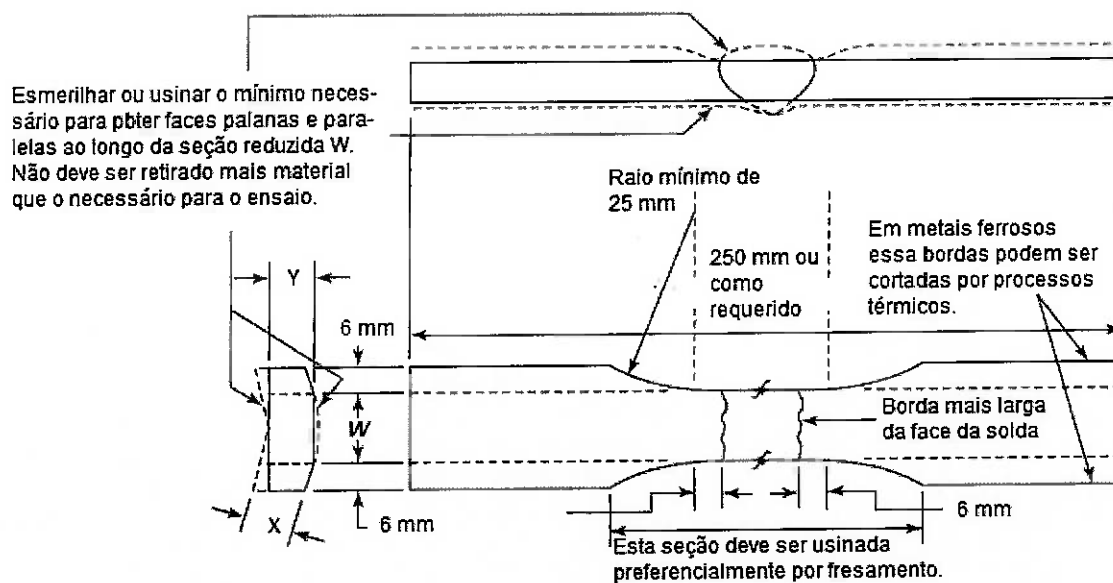


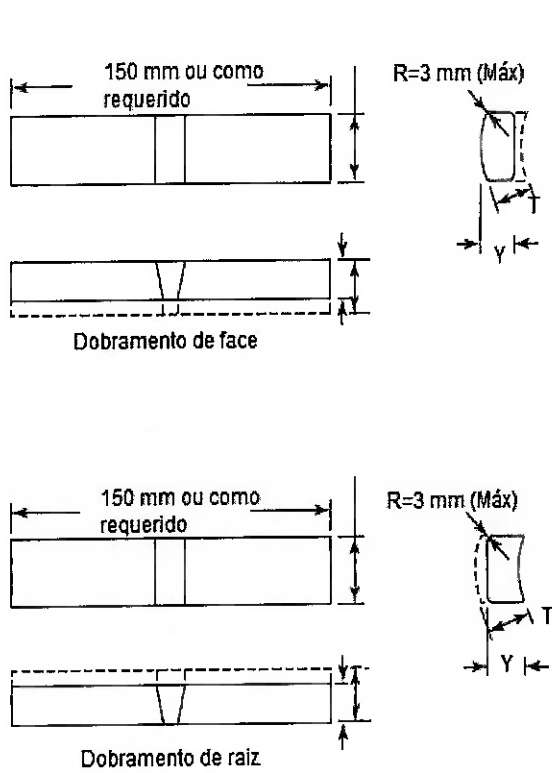
Figura 3.11 - Corpo de Prova para ensaio de Tração Seção Reduzida para qualificação de procedimento de soldagem conforme ASME IX [11].

3.2.2.3.b ENSAIOS DE DOBRAMENTO.

Nos ensaios de dobramento os corpos de prova depois de dobrados não poderão apresentar descontinuidades no metal desolda nem na zona afetada pelo calor superiores a 3 mm, medidos em qualquer direção sobre a superfície convexa do corpo de prova. Descontinuidades nas bordas do corpo de prova ocorridas durante o ensaio não devem ser consideradas a menos que haja evidência definitiva de que resultam de falta de fusão, de inclusões de escória, ou de outras descontinuidades internas [11].

3.2.2.3.c ENSAIOS DE DOBRAMENTO FACE E DE RAIZ.

Para os ensaios de dobramento de face e raiz os corpos de prova devem ter aproximadamente 150 mm de comprimento e 38 mm de largura e ser cortados conforme a Figura 3.12 [11].



| Y (mm) | T(mm) | P-No. 23,F-No23 | Todos os outros |
|------------|-------|-----------------|-----------------|
| ou P-No.35 | | Metais | |
| 1,5 a < 3 | | T | T |
| 3 - 10 | | 3 | T |
| > 10 | | 3 | 10 |

NOTAS GERAIS:

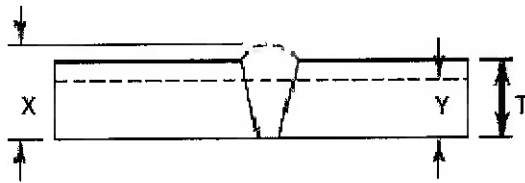
(a) Os reforços da solda e o cobre junta, se houver, devem ser removidos as superfícies do corpo de prova niveladas. Se houver um anel de rebaixamento a superfície do corpo de prova deve ser usinada a uma profundidade não superior à profundidade do rebaixo para remover o anel, exceto quando a espessura do corpo de prova acabada deve ser como especificado na figura. Não usar corte a chama em materiais não ferrosos.

(b) A Largura do corpo de prova deve ser de 19 mm para tubos com diâmetros NPS 2 (DN 50) a NPS 4 (DN 100). O corpo de prova de dobramento deve ter a largura de 10 mm para tubos com diâmetro menor que NPS 2 (DN 50) até NPS 3/8 (DN 10) e uma alternativa, se o tubo testado for igual ou menor que NPS 1 (DN 25), as larguras dos corpos de prova podem ser obtidas cortando os tubos em quartos menos a tolerância para corte com serra ou usinagem. Para os corpos de prova obtidos de quartos de tubos não se requer superfícies aplainadas por usinagem. Corpos de prova retirados de tubos de dimensões comparáveis devem ser preparados de maneira similar.

Figura 3.12 - Corpos de prova para dobramento de Face e de Raiz para a qualificação de procedimentos de soldagem conforme ASME IX [11].

3.2.2.3.d ENSAIOS DE DOBRAMENTO LATERAL.

Para o dobramento lateral os corpos de prova devem ter no mínimo 39 mm de comprimento e no mínimo 19 mm de largura e para os de dobramento ser conforme a Figura 3.13 [11].



| T (mm) | Y(mm) | W (mm) | |
|-----------|-----------------|-------------|----------|
| | | P-No. 23 | Todos os |
| | | P-No. 23 ou | outros |
| | | P-No.35 | metais |
| | T | | |
| 10 a < 38 | Notas (1) | 3 | 10 |
| 10 a ≥ 38 | Notas (1) e (2) | 3 | 10 |

NOTA GERAL: Os reforços da solda devem ser removidos e nivelados com a superfície do corpo de prova, bem como o cobre junta, se houver, deve ser removido. Cortes com chama, por usinagem ou esmerilhamento podem ser feitos. O endireitamento a frio é permitido antes da remoção dos reforços.

NOTAS:

- (1) Quando a deposição do cordão de solda t é menor que a espessura T do corpo de prova a espessura do corpo de prova deve ser de t .
- (2) Quando a espessura do corpo de prova T é igual ou maior que 38 mm, adotar uma das seguintes alternativas:
 - (a) Cortar a amostra em múltiplos corpos de prova de espessura Y de dimensões aproximadamente iguais a [19 a 38 mm]. Y = Espessura do corpo de prova testado quando múltiplos corpos de prova forem tirados de uma amostra.
 - (b) O corpo de prova pode ser dobrado com largura total.

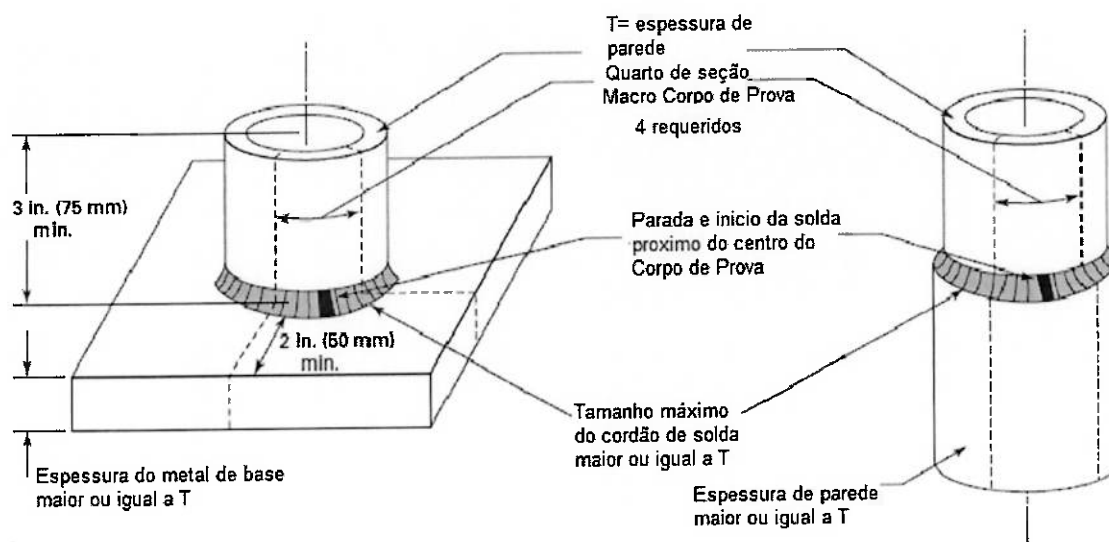
Figura 3.13 - Corpo de prova para ensaio de dobramento lateral para qualificação de procedimento conforme ASME IX [11].

3.2.2.3.e JUNTAS DE ÂNGULO.

A qualificação de procedimentos de soldagem específicos para juntas de juntas de ângulo não submetidas à pressão é conforme a Tabela 3.11 e Figura 3.14.

Tabela 3.11 - Ensaios requeridos para qualificação de procedimentos de soldagem de juntas de ângulo pela norma ASME IX [11].

| Tipo de Junta | Corpo de Prova | Faixa abrangida | Tipo / quantidade de ensaios. |
|---------------|----------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------|
| Ângulo | Figura 16 | Todas as espessuras de cordão de solda, todas as espessuras de metal de base e todos os diâmetros de tubos. | Macrografia /4 |



Notas Gerais:

- (a) União tubo-chapa ou tubo-tubo
- (b) Ensaio Macrográfico
 - (1) O cordão de solda deve apresentar fusão na raiz, mas não necessariamente além da raiz.
 - (2) O metal de solda e a zona afetada pelo calor não devem apresentar trincas.

Figura 3.14 - Juntas de ângulo conforme ASME IX [11].

3.2.2.3.f LOCAIS PARA OBTENÇÃO DOS CORPOS DE PROVA.

Os locais de obtenção dos corpos de prova de tubos devem ser conforme a espessura de parede é a indicada nas Figuras 3.15 e 3.16 [11].

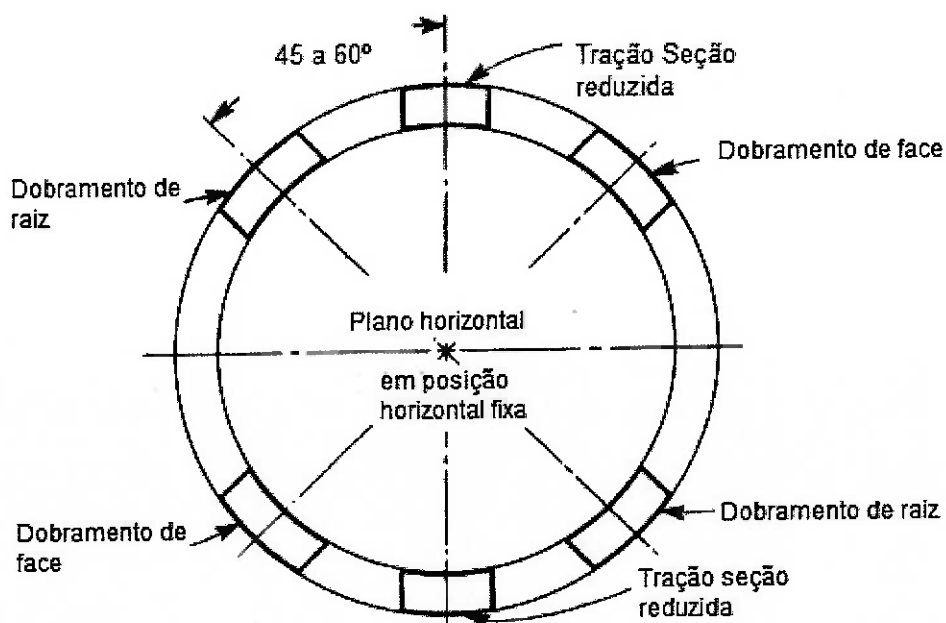


Figura 3.15 - Locais para a retirada de corpos de prova para ensaios de qualificação de procedimentos de soldagem de juntas de topo, segundo a ASME IX, para espessuras de parede a partir de 1,5 mm e menores que 19 mm [11].

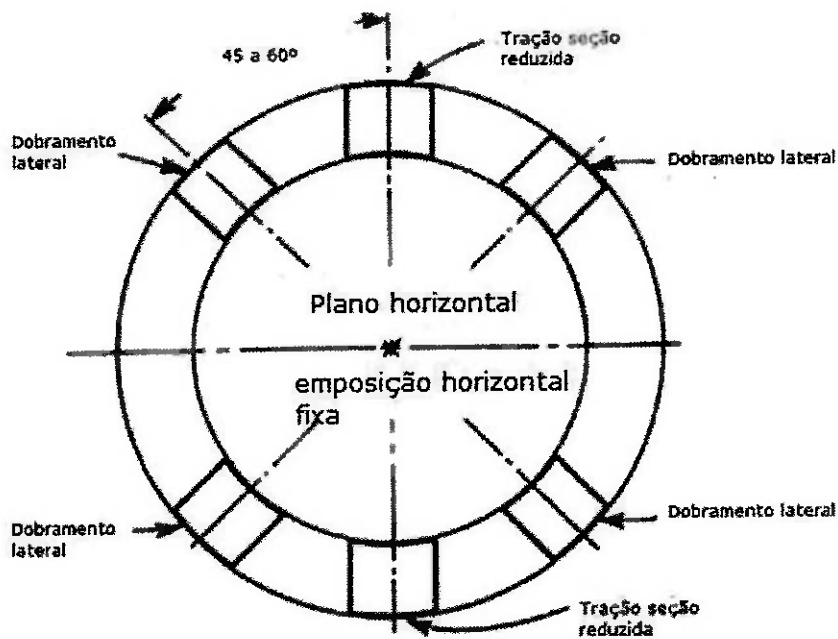


Figura 3.16 - Locais para a retirada de corpos de prova para ensaios de qualificação de procedimentos de soldagem de juntas de topo, segundo a ASME IX, para espessuras de parede iguais ou maiores que 19 mm [11].

3.2.2.4 QUALIFICAÇÃO DE PROCEDIMENTOS DE SOLDAGEM CONFORME ANORMA OFFSHORE STANDARD DNV-OS-F101, October 2010.

A norma **DNV-OS-F101** apresenta requisitos mais rigorosos e acresce mais tipos de ensaios que a API 1104 e a ASME IX para a qualificação dos procedimentos de soldagem como se pode verificar pela Tabela 3.12.

Tabela 3.12 - TIG-AS e TIG-ER Ensaios Requeridos – Off Shore Standard DNV-OS-F101, October 2010 [10].

| Diâmetro Externo ϕ [mm] | Espessura de Parede t [mm] | Tração | | | Dobramento | | | Charpy entalhe V (4,5,6,7) | Macro e Dureza (11) | Outros testes (12) | Tenacidade à fratura |
|------------------------------|----------------------------|-------------|-----------------------|-----------|------------------|------------------|--------------|----------------------------|---------------------|--------------------|----------------------|
| | | Transversal | Transversal Total (1) | Total (2) | Raiz (10) | Face (10) | Lateral (10) | | | | |
| $\phi \leq 300$ | $t \leq 25$ | 2 | 2 | 2 | 2 ₍₃₎ | 2 ₍₃₎ | 0 | 4 ₍₈₎ | 2 | (13) | (13) |
| $\phi > 300$ | $t \leq 25$ | 2 | 2 | 2 | 4 ₍₃₎ | 4 ₍₃₎ | 0 | 4 ₍₈₎ | 2 | (13) | (13) |
| $\phi \leq 300$ | $t > 25$ | 2 | 2 | 2 | 0 | 0 | 4 | 6 | 2 _(8,9) | (13) | (13,14) |
| $\phi > 300$ | $t > 25$ | 2 | 2 | 2 | 0 | 0 | 4 | 6 | 2 _(8,9) | (13) | (13,14) |

Notas:

- 1) A tração transversal total da soldagem é necessária se uma Análise Crítica de Engenharia for realizada.
- 2) Nem todos os testes de tração da soldagem são requeridos para $OD \leq 200$ mm e não se os testes transversais totais da soldagem forem realizados.
- 3) Para processos de soldagem MIG/MAG e Arame Tubular, os testes de dobramento lateral devem ser executados em vez de dos testes de dobramento de raiz e de face.
- 4) O teste de impacto não é necessário para $t < 6$ mm.
- 5) Cada conjunto Charpy entalhe V é composto por 3 exemplares.
- 6) O entalhe deve ser localizado no metal de solda, a linha de fusão (LF) deve conter uma amostragem de 50% da HAZ, LF+2 milímetros e LF+5 mm, ver Figura 22.
- 7) Para soldagens duplas frente e verso em C-Mn e aços de baixa liga, quatro conjuntos adicionais de amostras Charpy V- de teste devem ser colhidas amostras do metal de solda, LF (amostragem de 50% da HAZ), FL+ 2 milímetros e LF+5 mm na área da raiz, ver Figura 22.
- 8) Se vários processos de soldagem ou consumíveis de soldagem são utilizados, o teste de impacto deve ser efetuado nas regiões de soldagem correspondentes, se a região testada não pode ser considerada representativa para a soldagem completa.
- 9) Quando a espessura da parede excede a 25 mm para soldagens simples frente e verso, dois conjuntos adicionais de amostras Charpy entalhe V de teste devem ser colhidas a partir da raiz do metal de solda e FL na área da raiz.
- 10) Os testes de dobramento nos tubos revestidos (clad) devem ser realizados como testes de dobramento laterais.
- 11) Para as soldagens circunferenciais em tubos soldados, um ensaio de macrografia e um de dureza devem incluir um cruzamento entre uma soldagem longitudinal e uma circular.
- 12) Os requisitos para ensaios de corrosão, análise química e exame de microestrutura são especificados em F.
- 13) Os testes de tenacidade à fratura somente são necessários quando uma ECA genérica ou completa é executada para soldagens circunferenciais de topo de oleodutos. A extensão dos testes deve estar em conformidade com o apêndice A.
- 14) Para espessura de parede nominal acima de 50 mm de C-Mn e Aços baixa liga testes tenacidade à fratura são necessários a menos que Tratamentos Térmicos Pós Soldagem sejam realizados.

3.2.2.4.a ENSAIO DE TRAÇÃO TRANSVERSAL.

Neste ensaio, a norma especifica que a ruptura não deve ocorrer no metal de solda e a resistência à tração deve ser no mínimo igual à resistência à tração do metal de base ou da resistência à tração do metal de base menos resistente quando a junta for de dois metais de base diferentes. Os corpos de prova devem ser retangulares e devem representar a espessura de parede total [10].

3.2.2.4.b ENSAIO DE TRAÇÃO TOTAL.

Os corpos de prova devem ser redondos e ter o maior diâmetro que se puder obter [10].

Para um alongamento nominal maior que 0,4%, a tensão correspondente a 0,5% do alongamento deve ser no mínimo de 80 MPa acima da tensão mínima de escoamento [10].

3.2.2.4.c ENSAIO DE TRAÇÃO TRANSVERSAL TOTAL.

Os corpos de prova devem ser conforme a Figura 3.17 e é requerido que o cordão de solda tenha a largura de 6 mm, no mínimo. Devem ser redondos com o maior diâmetro que se possa obter e instrumentados com “strain gauges” na seção reduzida que representa o metal de solda [10].

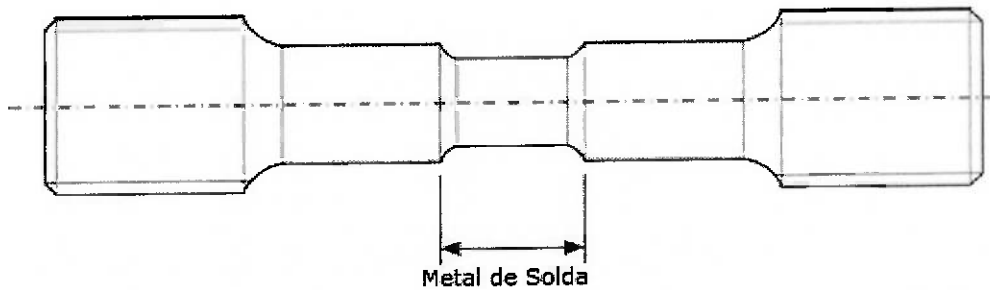


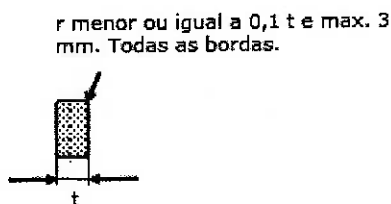
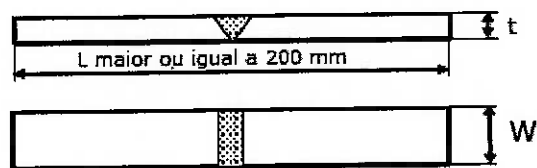
Figura 3.17 - Corpo de prova de tração para a determinação da curva tensão/deformação do metal de solda na direção transversal [10].

3.2.2.4.d ENSAIOS DE DOBRAMENTO.

Os ensaios não podem revelar nenhum defeito superior a 3 mm em qualquer direção e descontinuidades dúcteis encontradas nas bordas que não excedam 6mm não devem ser consideradas amenos que indiquem defeitos óbvios. [10]

Os corpos de prova de dobramento devem conter toda a espessura de parede do tubo. Para os dobramentos de face e de raiz a largura aproximada de 25 mm e para o dobramento lateral a largura de 10 mm. As bordas devem ser arredondadas com um raio de 1/10 da espessura. Os reforços da face e da raiz devem ser removidos e a solda posicionada no centro do corpo de prova. O dobramento deve ser de 180° e a junta soldada deve estar inteiramente dentro da região sob tensão [10].

Os corpos de prova para os ensaios de dobramento devem ser conforme as Figuras 3.18 e 3.19 [10].

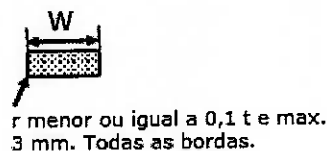
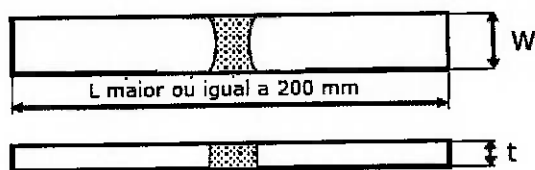


t = Espessura do corpo de prova = Espessura do metal de base.

W = Largura do corpo de prova = 1,5 t. Min. 20 mm.

Os reforços devem ser usinados e nivelados com o metal de base.

Figura 3.18 - Corpos de prova para ensaios de dobramento de face e de raiz [10].



t = Espessura do corpo de prova = Espessura do metal de base

W = Largura do corpo de prova = 10 mm

Os reforços devem ser usinados e nivelados com o metal de base.

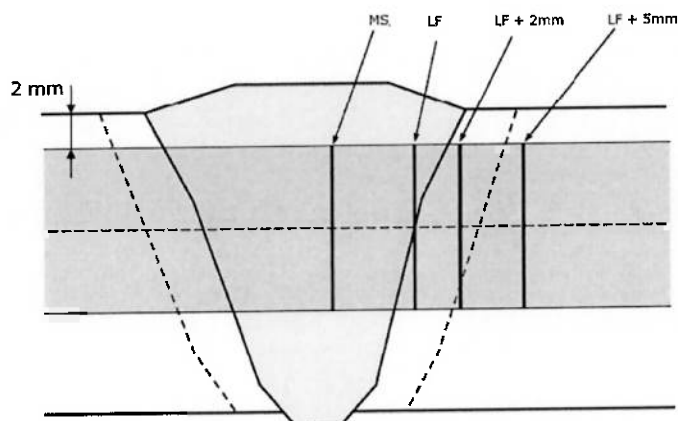
Figura 3.19- Corpo de prova para ensaio de dobramento lateral [10].

3.2.2.4.e ENSAIOS DE CHARPY – V.

A tenacidade média deduzida dos resultados dos ensaios Charpy –V em cada posição não deve ser abaixo da especificada para o metal de base na direção transversal do tubo [10].

No caso de juntas de metais de base de diferentes graus os ensaios de impacto devem ser realizados de ambos os lados do cordão de solda e o metal de solda deve satisfazer o requisito de energia mais rigoroso [10].

A Figura 3.20 ilustra o ensaio de Charpy-V



Metal de solda = MS

Linha de Fusão = LF

A Linha de fusão deve conter uma amostra de 50% da zona afetada pelo calor.

A amostra LF + 5mm aplica-se somente ao ensaio de qualificação de procedimento de soldagem.

Figura 3.20 - Ensaio de Charpy-V [10].

3.2.2.4.f ENSAIOS DE MACROGRAFIA.

Para aços C-Mn de baixa liga a macrografia, com aumento mínimo de 5X, deve apresentar sanidade e se fundir suavemente com o metal de base, apresentar nível de qualidade C, conforme a ISO 5817 e incluir a soldagem longitudinal do tubo [10].

Os corpos de prova utilizados para a macrografia devem ser usados para os ensaios de dureza [10].

3.2.2.4.g ENSAIOS DUREZA.

Para aços C-Mn de baixa liga a dureza deve ser de 325 HV10, considerando operação em ambiente não corrosivo e 250 HV10 considerando operação em ambiente corrosivo [10].

O ensaio de dureza deve ser obtido conforme a Figura 3.21 [10].

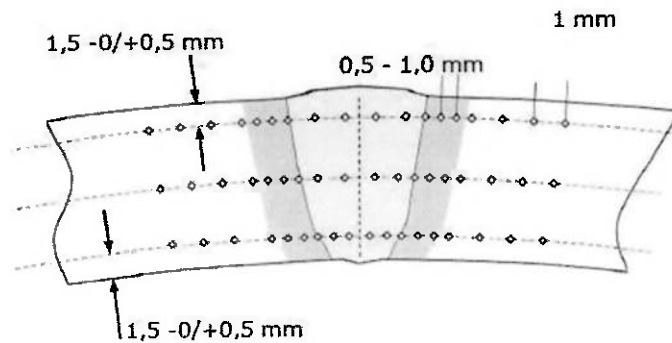


Figura 3.21 - Pontos para ensaio de dureza [10].

3.2.2.4.h LOCAIS PARA A RETIRADA DOS CORPOS DE PROVA.

As posições para a obtenção dos corpos de prova são conforme as indicações da Figura 3.22 [10].

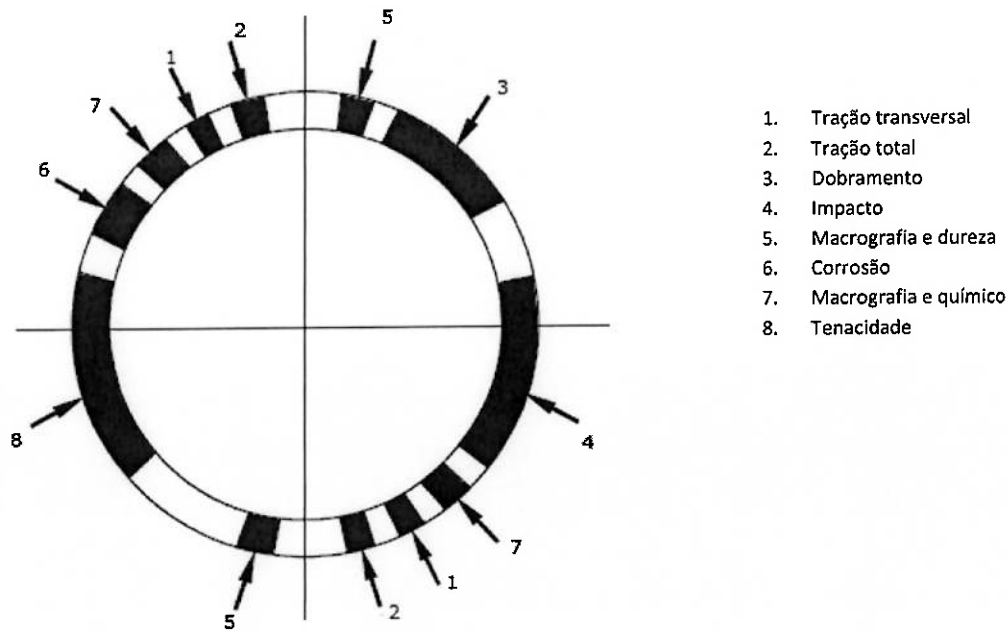


Figura 3.22 - Locais para a retirada de corpos de prova para ensaios de qualificação de soldagem, conforme a DNV-OS-F101 [10].

3.2.3 QUALIFICAÇÃO DE SOLDADORES.

O objetivo do teste de qualificação de soldador é determinar a capacidade de soldadores para fazer soldagens de topo ou de ângulo dentro dos critérios de aceitação estabelecidos usando procedimentos previamente qualificados [3].

Ao qualificar soldadores, a ênfase é colocada sobre a capacidade do soldador de empregar manualmente o eletrodo /tocha de soldagem / maçarico de soldagem e, assim, produzir uma soldagem de qualidade aceitável [3].

3.2.3.1 QUALIFICAÇÃO DE SOLDADORES CONFORME A NORMA API

1104.

Conforme a API 1104 os soldadores podem obter Qualificação Única ou Múltipla.

A Tabela 3.13 apresenta os tipos de ensaio e quantidade de corpos de prova de junta de topo para a qualificação de soldadores pela API 1104.

Tabela 3.13 - Ensaio Requeridos para a qualificação de soldadores norma API 1104, Ed.: 20 [3].

| Diâmetro Externo ϕ [mm] | Espessura t [mm] | Tração | Nick-Break | Dobramento | | | Total |
|--------------------------------------------|--------------------|--------|------------|------------|------|---------|----------------|
| | | | | Raiz | Face | Lateral | |
| $\phi < 60,3,$ | $t < 12,7$ | 0 | 2 | 2 | 0 | 0 | 4 ^a |
| $60,3 \leq \phi \leq 114,3,$ | $t < 12,7$ | 0 | 2 | 2 | 0 | 0 | 4 |
| $114,3 \leq \phi \leq 323,9,$ | $t < 12,7$ | 2 | 2 | 2 | 0 | 0 | 6 |
| $\phi \geq 323,9,$ | $t < 12,7$ | 4 | 4 | 2 | 2 | 0 | 12 |
| $\phi \leq 114,3,$ | $t > 12,7$ | 0 | 2 | 0 | 0 | 2 | 4 |
| $114,3 \leq \phi \leq 23,9,$ $t > 12,7$ | $t > 12,7$ | 2 | 2 | 0 | 0 | 2 | 6 |
| $\phi \geq 323,9, t > 12,7$ | $t > 12,7$ | 4 | 4 | 0 | 0 | 4 | 12 |

Nota:

^a Para tubo com diâmetro externo menor ou igual a 33,4 mm 2 corpos de prova de duas soldagens ou um corpo de prova de seção completa deve ser retirado para ensaio de tração.

3.2.3.1.a QUALIFICAÇÃO ÚNICADO SOLDADOR CONFORME API 1104.

Para a qualificação única o soldador deve realizar uma soldagem de teste usando um procedimento para unir segmentos de tubos. O soldador deve realizar soldagem de topo em posição fixa ou em dispositivo rotativo. No caso da posição fixa o eixo do tubo deve estar em posição horizontal plana, vertical ou inclinado com relação ao plano horizontal em ângulo não maior que 45° [3].

Para qualificação única de soldagem de conexões, juntas de ângulo ou outras configurações similares deve ser seguida a especificação de procedimento própria [3].

O soldador deve ser qualificado se a soldagem atender os requisitos de inspeção visual, ensaio de tração, dobramento e de Nick-break, conforme especificado na Tabela 13, e com corpos de prova retirados como indicado nas Figuras 3.23 e 3.24 ou, alternativamente, ensaios de inspeção por radiografia [3].

É requerida nova qualificação se houver qualquer mudança nas variáveis essenciais a baixo [3]:

- a. Uma alteração de um processo de soldagem para outro processo de soldagem ou combinação de processos, como segue:
 - a1. Uma alteração de um processo de soldagem para outro diferente processo de soldagem.
 - a2. Uma alteração na combinação dos processos de soldagem, a menos que o soldador se classificou em testes de qualificação separados, utilizando cada um dos processos de soldagem que devem ser utilizados para a combinação dos processos de soldagem.
- b. Uma alteração na direção da soldagem de vertical ascendente ou vertical descendente ou vice versa.

- c. Uma mudança de metal de adição do Grupo 1 ou 2 para o Grupo 3, ou do Grupo 3 para o Grupo 1 ou 2 (ver Tabela 3.14).
- d. Uma alteração de um grupo diâmetro exterior para o outro. Estes grupos são definidos como se segue:
 - d1. Diâmetro externo inferior a 60,3 mm.
 - d2. Diâmetro externo de 60,3 mm a 323,9 milímetros.
 - d3. Diâmetro externo maior do que 323,9 milímetros.
- e. Uma alteração de um grupo espessura da parede para o outro. Esses grupos são definidos como se segue [3]:
 - e1. Espessura nominal da parede do tubo inferior a 4,8 mm.
 - e2. Espessura nominal da parede do tubo de 4,8 mm a 19,1 mm.
 - e3. Espessura nominal da parede do tubo superior a 19,1 mm.
- f. Uma alteração na posição para o qual o soldador já está qualificado (por exemplo, uma mudança de dispositivo rotativo para posição fixa ou uma mudança da vertical para a horizontal, ou vice-versa). Um soldador que passa que obtém qualificação para soldar na posição fixa com o eixo inclinado 45 ° em relação à horizontal plano deve ser qualificado para fazer soldagens de topo e de ângulo em todas as posições.
- g. Uma alteração no desenho da junta (por exemplo, a eliminação de cobre-junta ou uma mudança de chanfro V para chanfro U) [3].

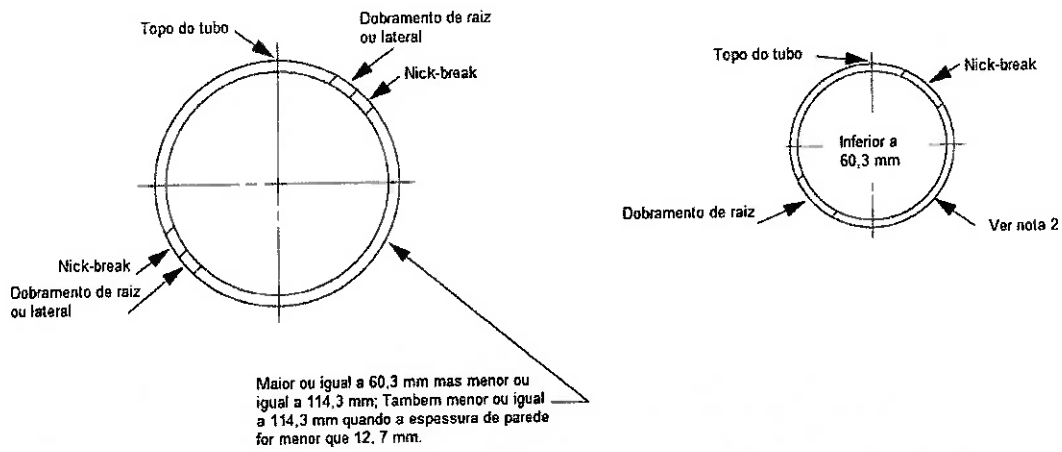
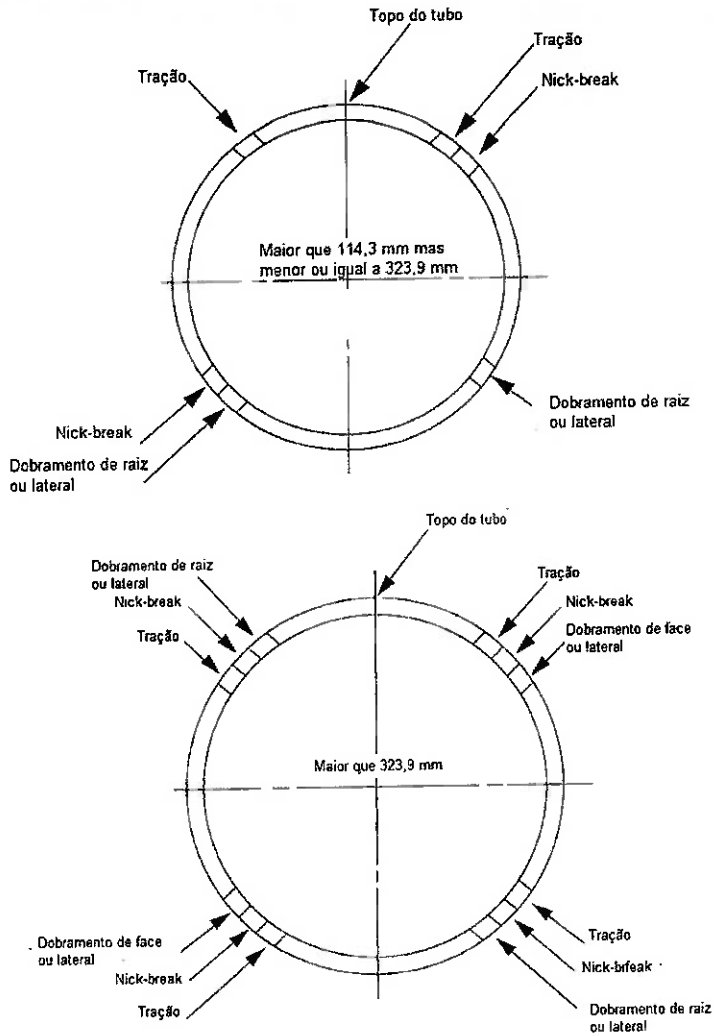


Figura 3.23 - Local para a retirada dos corpos de prova para os ensaios de qualificação de soldadores conforme API 1104, diâmetros menores [3].



Notas:

1. Por opção da empresa, os locais podem ser girados, desde que sejam igualmente espaçados em torno da tubulação, no entanto, as amostras não devem incluir a soldagem longitudinal.
2. Um corpo de prova de tração de secção completa pode ser utilizado para tubo com um diâmetro externo menor do que ou igual a 33,4 mm.

Figura 3.24 - Locais para a retirada dos corpos de prova para os ensaios de qualificação de soldadores conforme API 1104, diâmetros maiores [3].

Tabela 3.14 Metais de Adição.

| Grupo | Especificação AWS | Eletrodo | Fluxo |
|-------|-------------------|------------------------|-------|
| 1 | A5.1 | E6010, E6011 | |
| | A5.5 | E70110, E7011 | |
| 2 | A5.5 | E8010, E8011, E9010 | |
| | | E7015, E7016, E7018 | |
| 3 | A5.1 ou A5.5 | E8015, E8016, E8018 | |
| | A5.5 | E9018 | |
| 4 | A5.17 | EL8 | P6XZ |
| | | EL8K | P6X0 |
| | | EL12 | P6X2 |
| | | EM5K | P7XZ |
| | | EM12K | P7X0 |
| | | EM13K | P7X2 |
| | | EM15K | |
| 5 | A5.17 | ER70S-2 | |
| | | ER70S-6 | |
| | | ER80SD2 | |
| | | ER909S-G | |
| 6 | A5.2 | RG60, RG65 | |
| 7 | A5.20 | E61T-GS | |
| | | E71TGS | |
| 8 | A5.29 | E71T8-K6 | |
| 9 | A5.29 | E91T8-G | |

3.2.3.1.b QUALIFICAÇÃO MÚLTIPLA DO SOLDADOR CONFORME API 1104.

Para a qualificação múltipla do soldador dois testes devem ser aplicados:

O primeiro é uma soldagem em um tubo na posição fixa com uma inclinação não maior que 45° com a horizontal. O diâmetro externo mínimo do tubo deve ser de 168,3 mm e a espessura de parede mínima de 6,4 mm sem cobre-junta [3].

No segundo teste o soldador deve posicionar cortar, montar e soldar uma conexão com um tubo de 168,3 mm de diâmetro mínimo e com espessura de parede mínima de 6,4 mm. O corte deve ser feito durante a execução com o tubo na horizontal e a conexão na vertical.

A penetração da soldagem deve ser completa, não deve haver perfurações na raiz maiores que 6 mm e soma das dimensões das perfurações não deve exceder 13 mm em 300 mm de soldagem contínua.

Devem ser realizados quatro ensaios de Nick-break.

O soldador deve ser qualificado se a soldagem atender os requisitos de inspeção visual, ensaio de tração, dobramento e de Nick-break conforme especificado na Tabela 3.13 e nas Figuras 3.25 e 3.26. Pode ser utilizado, alternativamente, o ensaio de inspeção por radiografia [3]

A qualificação, conforme os requisitos descritos acima, obtida com testes em tubos de diâmetro externo maior ou igual a 323,9 mm abrange todas as posições, espessuras de parede, desenhos de junta, montagens e todos os diâmetros de tubos.

Se forem utilizados tubos de diâmetro externo menor ou igual a 323,9 mm a qualificação todas as posições, espessuras de parede, desenhos de junta, montagens diâmetros de tubos menores ou iguais aos soldados no teste.

É requerida nova qualificação se houver qualquer mudança nas variáveis essenciais apresentadas a seguir.

a. Uma alteração de um processo de soldagem para outro ou combinação de processos, como segue:

1. Uma alteração de um processo de soldagem para um diferente, ou.

2. Uma alteração na combinação dos processos de soldagem, a menos que o soldador obteve qualificação em testes separados, cada uma usando o mesmo processo de soldagem que é usado para a combinação de processos de soldagem.

b. Uma alteração na direção da soldagem de vertical ascendente para vertical descendente ou vice-versa.

c. Uma mudança no metal de adição do Grupo 1 ou 2 para o Grupo 3 ou do Grupo 3 para o Grupo 1 ou 2 (ver Tabela 3.14).

3.2.3.2 QUALIFICAÇÃO DE SOLDADORES CONFORME A NORMA ASME

IX.

Os ensaios de qualificação de soldadores têm por finalidade determinar a capacidade destes de produzir soldas que atendam critérios de aceitação. A qualificação

dos soldadores deve ser conforme a especificação de procedimento de soldagem ou norma de especificação de procedimento de soldagem [11].

Deverá ser realizada uma nova qualificação do soldador caso haja a modificação de uma das variáveis essenciais listadas na Tabela 3.15 [11].

Tabela 3.15 - Variáveis essenciais à qualificação do soldador conforme ASME IX [11].

| Variáveis essenciais | Processos | | |
|--------------------------------------------------------------|-----------|----|----|
| | TIG | AS | ER |
| Cobre junta | X | | X |
| Diâmetro | X | X | X |
| P- Number | X | X | X |
| Metal de adição | X | | |
| F-Number | X | X | X |
| Insertos | X | | |
| Metal de adição solida p/ solido revestido ou arame tubular. | X | | |
| Espessura da deposição | X | X | X |
| Posição de soldagem | X | X | X |
| Vertical Ascendente p/Vertical descendente | X | | X |
| Inserto consumível | X | | |
| Polaridade da corrente | X | | |

Os ensaios requeridos e espessuras qualificadas são conforme a Tabela 3.16 e os limites da espessura do metal de solda para o qual o soldador irá se qualificar depende da espessura aproximada do metal de solda que ele deposita em cada processo de soldagem, inclusive os reforços. Essas espessuras devem ser consideradas com base no corpo de prova ensaiado e os soldadores não podem fazer deposição de solda com espessura além da permitida indicada na Tabela 3.17 [11].

As Figuras 3.25 e 3.26 caracterizam os corpos de prova para a qualificação dos soldadores [11].

Com relação aos diâmetros a qualificação é conforme as Tabelas 3.18 e 3.19 [11].

A qualificação para as juntas de topo qualifica o soldador para qualquer junta de ângulo em qualquer diâmetro de tubo [11].

A qualificação de soldadores específica para juntas de ângulo é conforme as Tabelas 3.19 e 3.20 e Figura 3.27.

No caso de haver a combinação de vários processos para a realização de uma soldagem cada soldador deverá ser qualificado para o processo que executará. Um soldador pode ser qualificado para cada processo separadamente ou para a combinação dos processos em um único teste [11].

Os locais para a retirada dos corpos de prova estão indicados nas Figuras 3.28 e 3.29 [11].

Tabela 3.16 - Ensaio para a qualificação de soldadores segundo ASME IX [11].

| Espessura do metal de solda t' [mm] | Tipos e quantidade de ensaios | | | |
|------------------------------------------|-------------------------------|-----------------------|---------------------------|---------------------------|
| | Exame visual | Dobramento lateral(b) | Dobramento de face(b, c). | Dobramento de raiz(b, c). |
| $t' < 10$ | X | - | 1 | 1 |
| $10 = t' < 19$ | X | 2 (a) | (a) | (a) |
| $t' \geq 19$ | X | 2 | - | - |

- (a) Um ensaio de dobramento de raiz e um da face podem substituir 2 de dobramento lateral.
- (b) Para se qualificar utilizando posições 5G ou 6G, um total de quatro corpos de prova de dobramento são necessários. Para se qualificar utilizando uma combinação de 2G e 5G num único teste, um total de seis corpos de prova de dobramento são necessários.
- (c) Corpos de prova de dobramento de face e de raiz devem ser limitados a deposições de solda feita por um soldador com um ou dois processos ou dois soldadores com um processo de cada um. A deposição de solda por cada soldador e cada processo deve estar presente na superfície convexa da amostra dobrada apropriada.

Tabela 3.17 - Espessura do metal de solda para a qualificação do soldador [11].

| Espessura do metal de solda do corpo de prova, t' [mm]. | Espessura do metal de solda qualificado |
|-----------------------------------------------------------|-----------------------------------------|
| Todas | $2 t$ |
| $t' \geq 13$ com três camadas, no mínimo. | Máximo a ser soldado. |

Tabela 3.18- Diâmetros limites de juntas de topo para a qualificação do soldador [11].

| Diâmetro externo do tubo testado ϕ [mm] | Diâmetro externo qualificado [mm] | |
|-------------------------------------------------|--------------------------------------|-----------|
| | Min. | Max. |
| $\phi < 25$ | Diâmetro soldado | Ilimitado |
| $25 \leq \phi \leq 73$ | 25 | Ilimitado |
| $\phi > 73$ | 73 | Ilimitado |

Tabela 3.19- Ensaio de pequenos diâmetros e junta de ângulo para a qualificação do soldador [11].

| Diâmetro externo do tubo testado ϕ [mm] | Diâmetro mínimo qualificado [mm] | Espessura qualificada |
|-------------------------------------------------|----------------------------------|-----------------------|
| $\phi < 25$ | Diâmetro soldado | Todas |
| $25 \leq \phi \leq 73$ | 25 | Todas |
| $\phi > 73$ | 73 | Todas |

Tabela 3.20 - Ensaio de juntas de ângulo para qualificação de soldador [11].

| Espessura do corpo de prova soldado t [mm] | Intervalo de qualificação | Tipo e número de ensaios requeridos | |
|--------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------|---------|
| | | Macrografia | Fratura |
| $t \geq 5$ | Todas as espessuras de metal de base, todos os tamanhos de cordão de solda e diâmetros externos maiores ou iguais a 73 mm. | 1 | 1 |
| $t < 5$ | Metal de base de T a 2T, espessura máxima do cordão de solda igual a T e diâmetros externos maiores ou iguais a 73 mm. T = Espessura do metal de base utilizado no ensaio. | 1 | 1 |

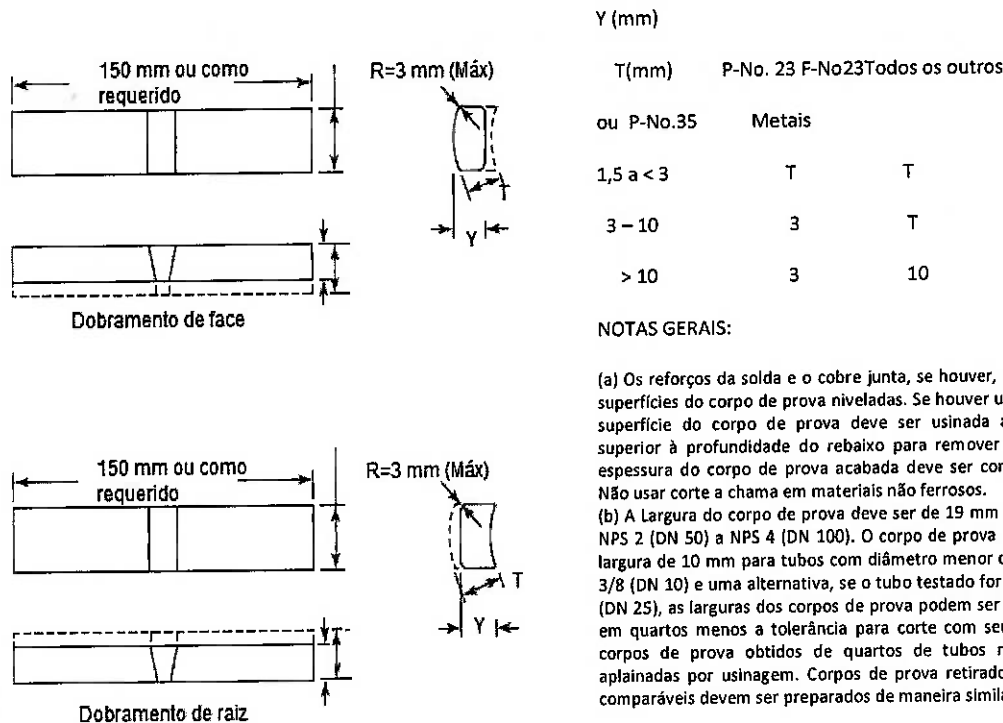
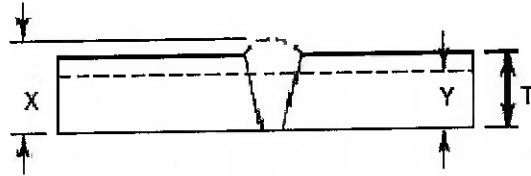


Figura 3.25 - Corpos de prova para dobramento de Face e de Raiz para a qualificação de soldador conforme ASME IX [11].

| T (mm) | Y(mm) | W (mm) | |
|-----------|-----------------|-------------------------------|---------------------------|
| | | P-No.23 P-No.23 ou P-No.35 | Todos os outros metais |
| | T | | |
| 10 a < 38 | Notas (1) | 3 | 10 |
| 10 a ≥ 38 | Notas (1) e (2) | 3 | 10 |

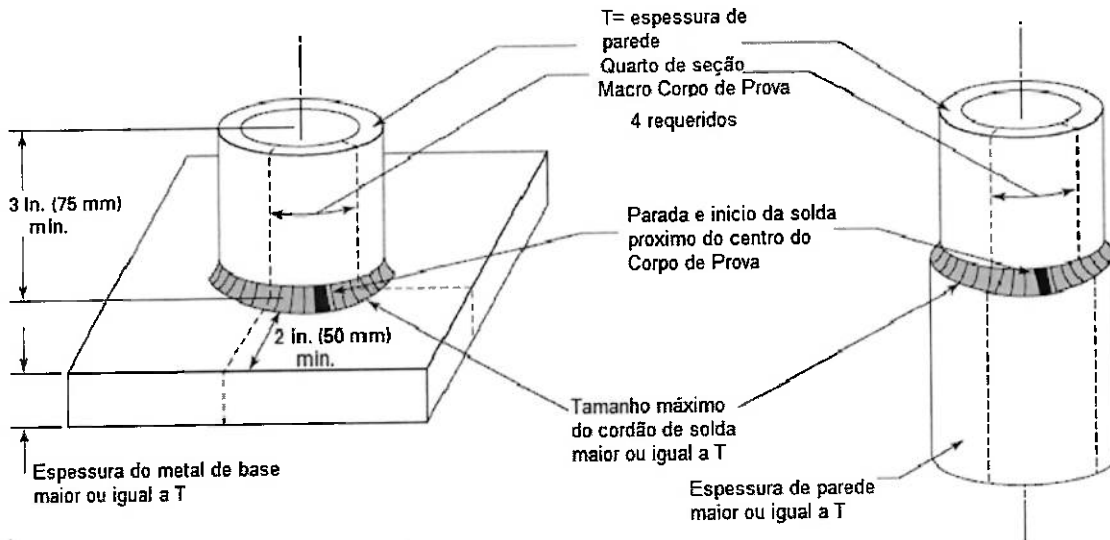


NOTA GERAL: Os reforços da solda devem ser removidos e nivelados com a superfície do corpo de prova, bem como o cobre junta, se houver, deve ser removido. Cortes com chama, por usinagem ou esmerilhamento podem ser feitos. O endireitamento a frio é permitido antes da remoção dos reforços.

NOTAS:

- (1) Quando a deposição do cordão de solda t é menor que a espessura T do corpo de prova a espessura do corpo de prova deve ser de t.
- (2) Quando a espessura do corpo de prova T é igual ou maior que 38 mm, adotar uma das seguintes alternativas:
 - (a) Cortar a amostra em múltiplos corpos de prova de espessura Y de dimensões aproximadamente iguais a [19 a 38 mm]. Y= Espessura do corpo de prova testado quando múltiplos corpos de prova forem tirados de uma amostra.
 - (b) O corpo de prova pode ser dobrado com largura total.

Figura 3.26 - Corpo de prova de ensaio de dobramento lateral para qualificação de soldador conforme ASME IX [11].



Notas Gerais:

- (1) União tubo-chapa ou tubo-tubo
- (2) Ensaio Macrográfico:
 - (a) O cordão de solda deve apresentar fusão na raiz, mas não necessariamente além da raiz.
 - (b) O metal de solda e a zona afetada pelo calor não devem apresentar trincas.

Figura 3.27 - Indicação de corpos de prova de juntas de ângulo para qualificação de soldador pela ASME IX [11].

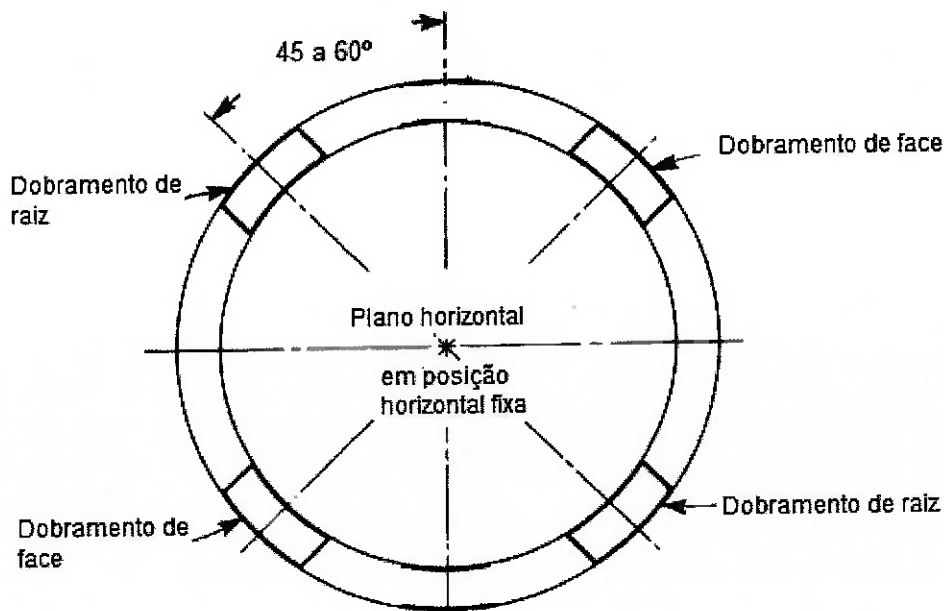


Figura 3.28 - Locais para a retirada de corpos de prova para ensaios de qualificação de soldadores para juntas de topo, segundo a ASME IX, para espessuras de parede menores que 19 mm [11].

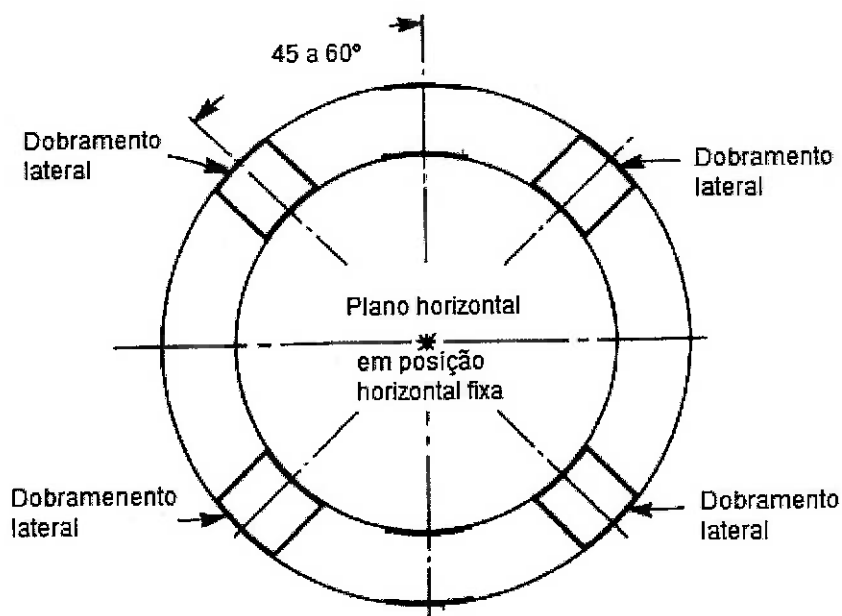


Figura 3.29- Locais para a retirada de corpos de prova para ensaios de qualificação de soldadores para juntas de topo, segundo a ASME IX, para espessuras de parede iguais ou maiores que 19 mm [11].

3.2.3.3 QUALIFICAÇÃO DE SOLDADORES CONFORME A NORMA DNV-OS-F101.

Os soldadores e operadores de soldagem devem ser qualificados para soldas de topo de tubos ou placas na posição principal necessária de acordo com a norma ISO 9606-1, EN 287-1 ou outra norma relevante e reconhecida, para as posições respectivas grau do metal de base e processos de soldagem. Estas exigências são também aplicáveis para soldadores executam soldas temporários e solda ponto [10].

3.3 IMPORTÂNCIA DAS VARIÁVEIS ESSENCIAIS NÃO COMUNS ÀS NORMAS ESTUDADAS.

As variáveis essenciais não comuns às normas comparadas que foram tidas como de maior impacto sobre os resultados da soldagem que são abordadas no item 5 deste trabalho são as seguintes: Valor do Carbono Equivalente, Energia de Soldagem e Temperatura de Interpasse.

3.3.1 VALOR DO CARBONO EQUIVALENTE.

De uma maneira geral, a suscetibilidade à trinca induzida por hidrogênio aumenta com o crescimento da resistência do aço. Em termos de microconstituente, a martensita após a têmpera é o mais sensível à fragilização pelo hidrogênio, característica que aumenta com o teor de carbono do aço e com sua dureza [9].

A martensita é uma fase saturada com carbono produzida da austenita caso seja resfriada rapidamente e não haja tempo para a sua decomposição em ferrita mais cementita [6]. O carbono se ve como que aprisionado no reticulado, logo a martensita é dura [6].

Sua ocorrência (da martensita) está ligada à temperabilidade dos aços, propriedade que é, basicamente, função da composição química e do tamanho do grão do aço [9].

O carbono equivalente (CE) é empregado para relacionar a temperabilidade do aço e sua soldabilidade e, quanto maior for seu valor, mais temperável será o aço e pior sua soldabilidade [9].

A temperatura da chapa (metal de base) tem importante papel na prevenção da trinca induzida por hidrogênio [9]. Se a chapa (metal de base) for aquecida, a velocidade de resfriamento diminui e pode-se reduzir a quantidade de martensita na ZAC [9]. Além disso, o tempo de resfriamento em temperaturas baixas (aproximadamente 150° C) aumenta, favorecendo o escape do hidrogênio do metal de base para a atmosfera [9]. Quanto maior o valor encontrado para o carbono equivalente maior a temperatura de pré-aquecimento requerida [7].

Para o cálculo do carbono equivalente determina-se o teor aproximado dos outros elementos de liga que produzem a mesma dureza que 1% de carbono [7].

Outros fatores importantes para se determinar a temperatura de pré-aquecimento são a espessura e o tamanho do componente. A temperatura de pré-aquecimento deve ser maior quanto maiores forem a espessura e o tamanho do componente [7].

Para os tubos X80 e X100, materiais que se encontram classificados como PSL2 com teor de carbono menor ou igual a 0,12% o carbono equivalente deve ser calculado conforme a Equação 1 obtida na própria especificação do API [4]:

$$CE_{Pcm} = C + \frac{Si}{30} + \frac{Mn}{20} + \frac{Cu}{20} + \frac{Ni}{60} + \frac{Cr}{20} + \frac{Mo}{15} + \frac{V}{10} + 5B \quad (1)$$

Para o tubo X65, que é classificado tanto na especificação PSL1 como na PSL2, a norma apresenta uma forma diferente de cálculo do CE uma vez que este material tem teor de carbono maior ou igual a 0,12% o carbono equivalente deve ser calculado pela Equação 2 [4].

$$CE_{IIW} = C + \frac{Mn}{6} + \frac{(Cr + Mo + V)}{5} + \frac{(Ni + Cu)}{15} \quad (2)$$

Em Modenesi [8], com a utilização da Equação 3, um metal base é considerado facilmente soldável com o processo ER quando $CE < 0,40$. Acima deste nível, cuidados especiais são necessários. Processos de soldagem de baixo hidrogênio devem ser usados e pode ser necessário pré-aquecer a junta.

Quando $CE > 0,60$ deve-se usar pré-aquecimento para juntas com espessura acima de 20 mm. Quando $CE > 0,90$, um pré-aquecimento a uma temperatura elevada é absolutamente necessário para todos os casos [8].

$$CE = C + \frac{Mn}{6} + \frac{Mo}{4} + \frac{Cr}{5} + \frac{Ni}{15} + \frac{Cu}{15} + \frac{P}{3} \quad (3)$$

Considera-se que os aços com valor de Carbono Equivalente até 0,45 % calculado pela Equação 2, tenham boa soldabilidade. O resultado do cálculo pela Equação 1 compatível com o de 0,4 da Equação 2 está entre 0,18 e 0,2 [5].

Existem outras fórmulas para o cálculo do carbono equivalente que foram desenvolvidas. Atualmente a mais recomendada para aços com teor de carbono menor ou igual a 0,12 é a Equação 1, a de Ito-Bessyo, desenvolvida no Japão, e para os teores maiores que 0,12 é a Equação 2, adotada pelo International Institute for Welding, conforme MALCOLN, Apud ROCHA [5] são indicadas pela própria Especificação API 5L [4].

Os valores de carbono equivalente acima dos indicados para a boa soldabilidade apontam a necessidade de cuidados adicionais no procedimento de soldagem. Estes cuidados visam à redução da taxa de resfriamento que tem como principais fatores propriedades físicas do metal de base, pré-aquecimento, espessura do tubo, temperatura de interpasse, energia de soldagem e geometria da junta [5].

A velocidade de resfriamento depende primordialmente do aporte de energia e, portanto, indiretamente, da velocidade de soldagem e da temperatura inicial da junta [9].

A API Specification 5 L recomenda um valor máximo de 0,25 para o Carbono Equivalente calculado pela Equação 1, para os aços com teor de $C \leq 0,12\%$.

Fazendo-se o cálculo do carbono equivalente conforme o critério estabelecido na norma API Specification 5L e considerando os valores máximos admissíveis pela mesma especificação para a composição química, verifica-se que o valor máximo admitido pela mesma norma é ultrapassado em cerca de 30%, embora o valor máximo admissível para o carbono equivalente também seja contemplado na especificação mencionada [4].

Verificou-se em informações sobre produtos fornecidos ao mercado interno por fabricante renomado [20], especificações API 5L [4] com tolerâncias para os teores de carbono e elementos de liga dentro da qual é possível atingir um valor para o carbono equivalente que possa requerer cuidados adicionais na soldagem. Se considerados casos extremos é possível que o valor tido como aceitável pela API 5L Specification seja ultrapassado.

A Tabela 3.21 ilustra algumas simulações de possibilidades de ocorrência de valores de carbono equivalente calculados pela Equação 1 que, como já mencionado, recomenda-se aplicar para o caso de aços com teor de carbono menor o igual a 0,12%, simulações estas feitas partindo de uma especificação mínima da Tenaris Confab [20].

Tabela 3.21 Valores do Carbono Equivalente de aços API 5L X80 pela Equação 1

| C | Si | Mn | Cu | Ni | Cr | Mo | V | B | CE P _{cm} |
|------|------|------|-----|-----|-----|-----|------|-------|--------------------|
| 0,12 | 0,45 | 1,85 | 0,2 | 0,3 | 0,2 | 0,1 | 0,03 | 0,004 | 0,28 |
| 0,12 | 0,45 | 1,85 | 0,2 | 0,6 | 0,3 | 0,2 | 0,05 | 0,004 | 0,30 |
| 0,12 | 0,45 | 1,85 | 0,5 | 1 | 0,5 | 0,5 | 0,09 | 0,004 | 0,36 |

Na Tabela 3.22 são apresentados teores de carbono e elementos de liga obtidos de um certificado de conformidade do fornecedor APOLO TUBULARS [21].

Tabela 3.22 - Valores do Carbono Equivalente de aços API 5L X42 pela Equação 2.

| C | Si | Mn | Cu | Ni | Cr | Mo | CE _{IIW} |
|------|------|------|------|------|------|------|-------------------|
| 0,18 | 0,69 | 0,01 | 0 | 0,01 | 0,01 | 0,01 | 0,3 |
| 0,17 | 0,7 | 0,01 | 0 | 0,01 | 0,01 | 0,01 | 0,29 |
| 0,16 | 0,73 | 0,02 | 0,01 | 0,01 | 0,01 | 0,01 | 0,29 |

Uma relação entre a temperatura de preaquecimento e o Carbono Equivalente, considerando o uso de eletrodos celulósicos, é apresentada por HILLENBRAND Apud ROCHA [5] no gráfico da Figura 3.30 Note-se o risco do aparecimento de trincas mesmo para valores do Carbono Equivalente aceitáveis pela especificação API 5L [4].

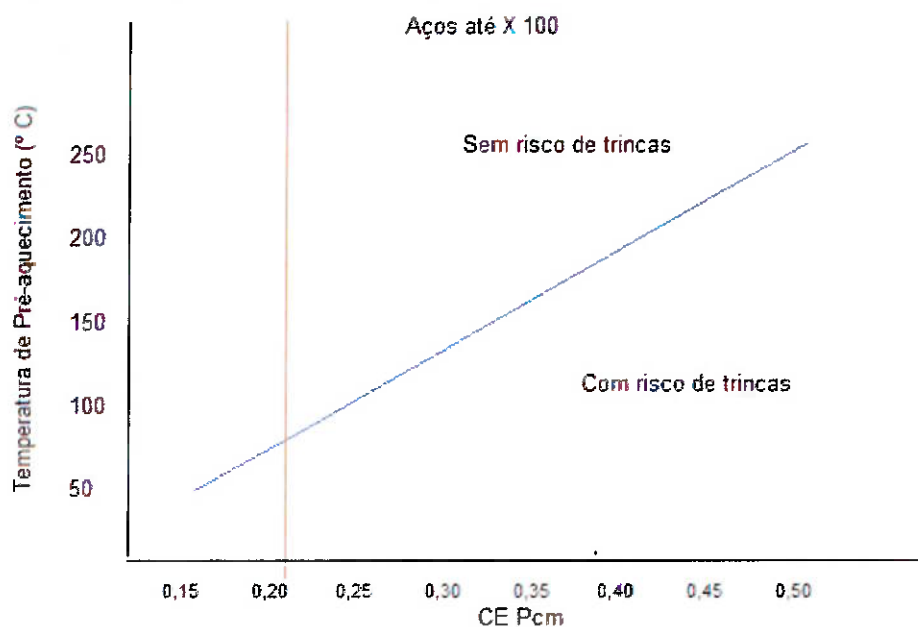


Figura 3.30 - Relação entre o valor do carbono equivalente e a temperatura de pré-aquecimento [5].

3.3.2 ENERGIA DE SOLDAGEM.

A variação da energia de soldagem implica diretamente no tempo de solidificação e no tamanho da ZAC e na velocidade ou taxa de resfriamento, cuja importância já foi abordada no item anterior. A velocidade de resfriamento é especialmente crítica em casos de aços com temperabilidade elevada, o que nos aços carbono, incluídos os ARBL, é medida pelo valor do carbono equivalente.

Quanto maior a energia de soldagem maior o tempo de solidificação e a ZAC, porém a velocidade de resfriamento tende a ser menor. A Tabela 3.23, elaborada adaptando-se uma planilha de cálculo relacionada à Nota de Aula da referência [16], simula relações entre a energia de soldagem, tempo de solidificação, ZAC e velocidade de resfriamento, considerando os processos TIG, Eletrodo Revestido e Arco Submerso, bem como a condição de “Chapa Grossa” calculada pela Equação 4 [16]. O valor do adimensional τ maior que 0,9 define a chapa como grossa o que, neste trabalho, aplicou-se a tubos.

$$\tau = h\sqrt{\frac{\rho C(T_c - T_0)}{E}} \quad (4)$$

$$E = \eta \frac{VI}{v}$$

Para o cálculo da extensão da ZAC, do tempo de solidificação e da velocidade de resfriamento foram utilizadas as Equações 5, 6 e 7, respectivamente [16].

$$\frac{1}{T_p - T_o} = \frac{\sqrt{2\pi e} \rho C h y}{E} + \frac{1}{T_m - T_o} \quad (5)$$

$$St = \frac{L \left(\eta \frac{VI}{v} \right)}{2\pi k \rho C (T_m - T_o)^2} \quad (6)$$

$$R = 2\pi k \left(\frac{T_c - T_o}{E} \right)^2 \quad (7)$$

Tabela 3.23- Relação entre a energia de soldagem, temperatura de pré-aquecimento, tempo de solidificação, tamanho da ZAC e velocidade de resfriamento, considerando o aço carbono como metal de base e os processos de soldagem TIG, Eletrodo Revestido e Arco Submerso.

| Processo | Tc [° C] | To [° C] | Tensão [V] | Corrente [A] | η | v [cm/s] | E [J/cm] | t | St [s] | R [° C/s] |
|----------|-------------|-------------|---------------|-----------------|--------|-------------|-------------|------|-----------|--------------|
| TIG | 600 | 25 | 12 | 80 | 0,50 | 0,80 | 600,00 | 0,43 | 0,04572 | 2,3647 |
| TIG | 600 | 50 | 12 | 80 | 0,50 | 0,80 | 600,00 | 0,44 | 0,04728 | 2,1635 |
| TIG | 600 | 100 | 12 | 80 | 0,50 | 0,80 | 600,00 | 0,46 | 0,05065 | 1,7881 |
| TIG | 600 | 150 | 12 | 80 | 0,50 | 0,80 | 600,00 | 0,49 | 0,05438 | 1,4483 |
| TIG | 600 | 25 | 15 | 100 | 0,50 | 0,80 | 937,50 | 0,54 | 0,07145 | 0,9686 |
| TIG | 600 | 50 | 15 | 100 | 0,50 | 0,80 | 937,50 | 0,55 | 0,07388 | 0,8862 |
| TIG | 600 | 100 | 15 | 100 | 0,50 | 0,80 | 937,50 | 0,58 | 0,07914 | 0,7324 |
| TIG | 600 | 150 | 15 | 100 | 0,50 | 0,80 | 937,50 | 0,61 | 0,08497 | 0,5932 |
| ER | 600 | 25 | 25 | 100 | 0,90 | 1,08 | 2083,33 | 0,81 | 0,15877 | 0,1961 |
| ER | 600 | 50 | 25 | 100 | 0,90 | 1,08 | 2083,33 | 0,83 | 0,16418 | 0,1795 |
| ER | 600 | 100 | 25 | 100 | 0,90 | 1,08 | 2083,33 | 0,87 | 0,17586 | 0,1483 |
| ER | 600 | 150 | 25 | 100 | 0,90 | 1,08 | 2083,33 | 0,91 | 0,18883 | 0,1201 |
| ER | 600 | 25 | 30 | 120 | 0,90 | 1,08 | 3000,00 | 0,97 | 0,22862 | 0,0946 |
| ER | 600 | 50 | 30 | 120 | 0,90 | 1,08 | 3000,00 | 0,99 | 0,23641 | 0,0865 |
| ER | 600 | 100 | 30 | 120 | 0,90 | 1,08 | 3000,00 | 1,04 | 0,25323 | 0,0715 |
| ER | 600 | 150 | 30 | 120 | 0,90 | 1,08 | 3000,00 | 1,10 | 0,27192 | 0,0579 |
| AS | 600 | 25 | 35 | 800 | 0,99 | 2,00 | 13860,00 | 2,08 | 1,05624 | 0,0044 |
| AS | 600 | 50 | 35 | 800 | 0,99 | 2,00 | 13860,00 | 2,13 | 1,09223 | 0,0041 |
| AS | 600 | 100 | 35 | 800 | 0,99 | 2,00 | 13860,00 | 2,23 | 1,16994 | 0,0034 |
| AS | 600 | 150 | 35 | 800 | 0,99 | 2,00 | 13860,00 | 2,35 | 1,25626 | 0,0027 |
| AS | 600 | 25 | 36 | 1000 | 0,99 | 2,00 | 17820,00 | 2,36 | 1,35803 | 0,0027 |
| AS | 600 | 50 | 36 | 1000 | 0,99 | 2,00 | 17820,00 | 2,41 | 1,40429 | 0,0025 |
| AS | 600 | 100 | 36 | 1000 | 0,99 | 2,00 | 17820,00 | 2,53 | 1,50421 | 0,002 |
| AS | 600 | 150 | 36 | 1000 | 0,99 | 2,00 | 17820,00 | 2,67 | 1,61519 | 0,0016 |

A temperatura de pré-aquecimento, como já abordada neste trabalho, é o recurso normalmente utilizado para fazer face ao risco de um endurecimento da junta soldada além do admissível, em decorrência do valor do carbono equivalente. Porém, há que se fazer o equilíbrio com a energia de soldagem [9].

No caso de uma junta pré-aquecida sem alterar o aporte da energia de soldagem e a velocidade de soldagem ocorre uma ligeira diminuição da velocidade de resfriamento a partir da temperatura crítica, como ilustrado na Figura 3.31 [9].

O preaquecimento da junta com a diminuição do aporte de energia e a fixação da velocidade de soldagem produz uma sensível diminuição na velocidade do resfriamento sendo este o controle mais efetivo, como mostrado na Figura 3.32 [9].

Em uma junta pré-aquecida com o aporte de energia mantido e com aumento da velocidade do eletrodo, conforme a Figura 3.33 há um ciclo térmico de menor duração com o conseqüente aumento da velocidade de resfriamento, o que pode não ser conveniente para o material que está sendo soldado [9].

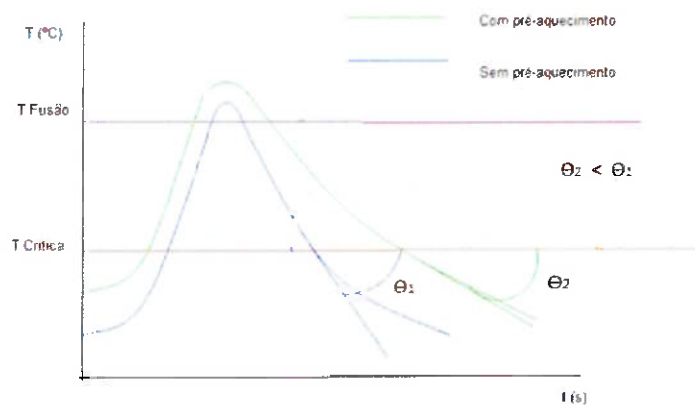


Figura 3.31 - Taxa de resfriamento. Redução da temperatura T em função do tempo t . Pré-aquecimento com os aportes de energia e com a velocidade soldagem mantidos [9].

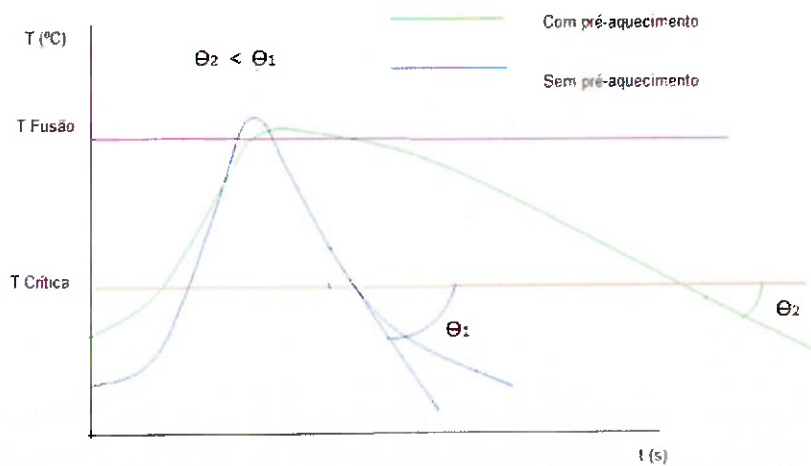


Figura 3.32- Taxa de resfriamento. Redução da temperatura T em função do tempo t . Pré-aquecimento com a diminuição do aporte de energia e com a velocidade soldagem mantida [9].

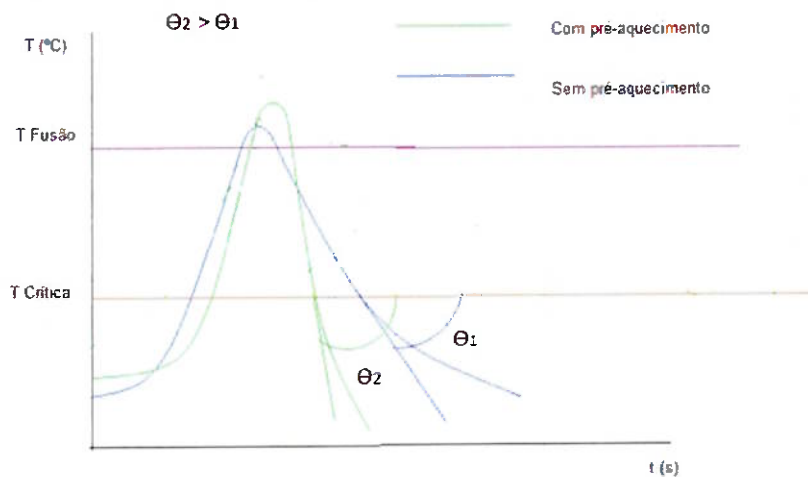


Figura 3.33 - Taxa de resfriamento. Redução da temperatura T em função do tempo t . Pré-aquecimento com o aporte de energia mantido e com aumento da velocidade de soldagem [9].

3.3.3 TEMPERATURA DE INTERPASSE.

Para controlar as propriedades mecânicas e microestrutura na soldagem a temperatura de interpasse é tão ou mais importante que a de pré-aquecimento. O escoamento e a resistência à tração final dependem grandemente da temperatura de interpasse. Uma temperatura de interpasse alta pode reduzir a resistência da junta

soldada e, ao mesmo tempo, resultar em grão mais fino que melhore o resultado do ensaio de Charpy V, na temperatura de transição. Porém, se a temperatura de interpasse exceder a 260°C essa tendência é invertida. [12]

Há ocasiões em que o projetista pode querer limitar a temperatura de interpasse máxima. Por exemplo, se esperar um limite de resistência mínimo para um componente particular que pode experimentar uma temperatura de interpasse extremamente alta devido à suas dimensões ou ao processo de soldagem, ele poderá especificar uma temperatura de interpasse máxima. Caso contrário a resistência da junta soldada pode ser inaceitavelmente baixa [12].

Uma temperatura de interpasse máxima é também necessária para aços temperados e revenidos. Devido às suas características de tratamento térmico, os engenheiros devem estabelecer o controle da temperatura de interpasse dentro de limites para proporcionar propriedades mecânicas apropriadas ao metal de solda e à Zona Afetada pelo Calor [12].

4. MATERIAIS E METODOS PARA A ANÁLISE E COMPARAÇÃO DAS NORMAS.

Este trabalho fez a comparação das normas por análise das mesmas em gráficos e tabelas comparativas especificamente desenvolvidas para esta finalidade.

As análises de dados numéricos foram feitas com o auxílio de planilhas de cálculo.

As tabelas os gráficos e os desenhos ilustrativos foram produzidos valendo-se da bibliografia citada e foram utilizados para a verificação dos principais dos aspectos relevantes das normas que serviram de base para a comparação.

Em vista da extensão de cada uma das normas abordadas, bem como da sua complexidade, houve a necessidade de se estabelecer alguns focos de atenção sobre aspectos não comuns entre as mesmas aos quais se pode atribuir importância bastante significativa e ressaltar o seu impacto sobre a capacidade de um determinado processo de soldagem para produzir uma junta soldada dentro da conformidade com os requisitos especificados em projeto, requisitos normativos entre outros.

5. RESULTADOS E DISCUSSÃO.

Comparando-se as normas API 1104, ASME IX e DNV-OS-F101 para a qualificação de procedimentos de soldagem para tubos com diâmetro externo acima de 350 mm e espessura de parede acima de 25 mm verifica-se pela Tabela 5.2.

Tabela 5.1 - Ensaio requeridos para a qualificação de procedimentos de soldagem para tubo de aço carbono API 5 L considerando diâmetros maiores que 350 mm e espessuras maiores que 25 mm.

| NORMAS | ENSAIOS REQUERIDOS | | | | | | | | Total |
|-------------|--------------------|------------|------|---------|------------|----------|-------------|--------|-------|
| | Tração | Dobramento | | | Nick-break | Charpy-V | Macrografia | Dureza | |
| | | Raiz | Face | Lateral | | | | | |
| API 1104 | 4 | | | 4 | 8 | | | | 16 |
| ASME IX | 2 | | | 4 | | | | | 6 |
| DNV-OS-F101 | 2 | | | 4 | | 6 | 2 | 2 | 16 |

Quanto aos ensaios para a qualificação de soldador também para as mesmas dimensões de tubos verifica-se pela Tabela 5.3.

Tabela 5.2 - Ensaio requeridos para a qualificação de soldadores para tubo de aço carbono API 5 L considerando diâmetros maiores que 350 mm e espessuras maiores que 25 mm.

| NORMAS | ENSAIOS REQUERIDOS | | | | | | | | Total |
|----------|--------------------|------------|------|---------|------------|----------|-------------|--------|-------|
| | Tração | Dobramento | | | Nick-break | Charpy-V | Macrografia | Dureza | |
| | | Raiz | Face | Lateral | | | | | |
| API 1104 | 4 | | | 4 | 4 | | | | 12 |
| ASME IX | | | | 4 | | | | | 4 |

A norma DNV-OS-F101 permite escolha de outras normas reconhecidas para a qualificação de soldadores.

Além das diferenças em quantidade e tipos de ensaios os critérios para estabelecer as variáveis essenciais para os processos e soldadores qualificados também são próprios de cada norma.

5.1 ENSAIOS REQUERIDOS E CRITÉRIOS DE ACEITAÇÃO.

As normas analisadas por comparação diferem na quantidade dos ensaios requeridos, bem como nas faixas de espessuras de parede e diâmetro dos tubos que uma qualificação de procedimento abrange.

Ensaio adicional são exigidos em caso de requisitos adicionais como a tenacidade, por exemplo, caso da norma DNV-OS-F101.

5.1.1 ENSAIOS DE DOBRAMENTO.

Os ensaios de dobramento requeridos para as normas consideradas são os mesmos com variações nas quantidades conforme as faixas de espessura de parede e diâmetro dos tubos.

Quanto aos critérios de aceitação, estes são praticamente os mesmos com respeito aos defeitos relativos às descontinuidades, trincas ou inclusões.

As normas API 1104 e a DNV-OS-F101 são um pouco mais restritivas às descontinuidades apresentadas nas bordas dos corpos de prova uma vez que estabelecem dimensão máxima de 6 mm para que estas sejam desconsideradas.

5.1.2 ENSAIOS DE TRAÇÃO.

Os ensaios de tração requeridos pelas normas API 1104 e pela ASME IX são os mesmos com variações na quantidade conforme as faixas de espessura do metal de base, no caso da API 1104. Os critérios de aceitação também são compatíveis, considerando a resistência à tração mínima dos metais de base e de adição, mas são expostos de forma mais explicativa e detalhada na ASME IX.

A DNV-OS-F101, impõe a condição de que a ruptura não ocorra no metal de solda e a aceitação também é com base na resistência à tração mínima dos metais de base.

Ensaio de tração adicionais, conforme a norma DNV-OS-F101 [10], devem ser aplicados em casos mais específicos em que avaliações críticas de engenharia são realizadas em estudos de integridade das soldas durante a instalação e operação de tubulações.

5.1.3 ENSAIO DE NICK-BREAK.

O ensaio de Nick-break é requerido pela norma API 1104 e tem critério de aceitação de porosidade, inclusões de escória, falta de fusão e de penetração e outros defeitos no metal de solda.

Pela norma o critério de aceitação especifica limites para a ocorrência de poros em dimensões e porcentagem da área de fratura obtida e quanto às inclusões de escória

limita a suas dimensões e distância mínima entre elas, mas não estabelece limites em relação à área de fratura obtida. Não há observações a respeito da ocorrência simultânea de poros e inclusões de escoria.

O ensaio de Nick-Break mostra-se adequado à identificação dos defeitos citados nos resultados apresentados por ROCHA [5]. O que constitui um recurso para a avaliação da sanidade da soldagem internamente por um método que não apresenta grandes dificuldades de execução nem requer especialização como no caso dos ensaios não destrutivos como o de ultrassom.

5.1.4 ENSAIO DE CHARPY – V.

O ensaio de Charpy é requerido pela DNV-OS-F101 e a indicação da tenacidade média obtida dos resultados dos ensaios Charpy–V, em cada posição, não deve ser abaixo da especificada para o metal de base na direção transversal do tubo.

O ensaio de Charpy tem sua importância em vista da possibilidade diminuição da tenacidade da ZAC e do metal de solda ter uma tenacidade menor que a do metal de base.

5.1.5 MACROGRAFIA.

A macrografia, com aumento mínimo de 5X, deve mostrar a sanidade da solda fundindo-se suavemente com o metal de base e apresentar nível de qualidade conforme critério da ISO 5817. Devem incluir a solda longitudinal [10].

5.1.6 DUREZA.

Para aços C-Mn de baixa liga a dureza na ZAC e no metal de solda deve ser de 325 HV 10, considerando-se operação em ambiente não corrosivo e de 210 HV 10 considerando-se operação em ambiente corrosivo [10].

5.1.7 ABRANGÊNCIA DOS ENSAIOS PARA QUALIFICAÇÃO DOS PROCEDIMENTOS DE SOLDAGEM.

Os ensaios expostos acima abrangem juntas de topo que, pela norma ASME IX, podem qualificar procedimentos de soldagem de juntas de ângulo. Para a qualificação de procedimentos de soldagem de juntas de ângulo a norma API 1104 tem como requisito o ensaio de Nick-break, descrito especificamente para juntas de ângulo e não menciona outros, de onde se pode concluir que os ensaios de tração das juntas de topo qualificam também os procedimentos de soldagem de juntas de ângulo, conforme a norma API 1104.

A norma DNV-OS-F101 indica ensaios de macrografia e de dureza com métodos e critérios especificados para qualificar procedimentos de soldagem de juntas de ângulo, mas não menciona outros testes.

Quanto aos diâmetros e espessuras de parede, pela ASME IX pode-se qualificar procedimentos com a maior abrangência, o que se verifica comparando-se as Tabelas 3.9, 3.10 e 3.12.

5.1.8 CUSTOS DOS ENSAIOS.

Os custos dos ensaios necessários à qualificação de procedimentos por cada uma das normas estudadas foram levantados com base em preços atuais dos quais são apresentadas os valores comparativos nas Tabelas 5.3 e 5.4 abaixo.

Tabela 5.3 - Ensaios requeridos para a qualificação de procedimentos de soldagem para tubo de aço carbono API 5 L considerando diâmetros menores ou iguais a 300 mm e espessuras menores ou iguais a 25 mm e seus valores comparativos de custos.

| NORMAS | ENSAIOS REQUERIDOS | | | | | | | Totais | |
|----------------------|--------------------|------------|----------|----------|------------|---------------|-------------|-------------|--------|
| | Tração | Dobramento | | | Nick-break | Charpy-V | Macrografia | | Dureza |
| | | Raiz | Face | Lateral | | | | | |
| API 1104 | 2 | 2 | 2 | | 2 | | | | |
| Valores comparativos | Unit. 1,77 | Unit. 1 | Unit. 1 | | Unit. 1 | | | | |
| | Total: 3,55 | Total: 2 | Total: 2 | | Total: 2 | | | 9,55 | |
| ASME IX | 2 | | | 4 | | | | | |
| Valores comparativos | Unit. 1,77 | | | Unit. 1 | | | | | |
| | Total: 3,55 | | | Total: 4 | | | | 7,55 | |
| DNV-OS-F101 | 2 | 2 | 2 | | | 4 | 2 | 2 | |
| Valores comparativos | Unit. 1,77 | Unit. 1 | Unit. 1 | | | Unit. 83,30 | Unit. 1,77 | Unit. 0,17 | |
| | Total: 3,55 | Total: 2 | Total: 2 | | | Total: 333,20 | Total: 3,55 | Total: 0,34 | 17,32 |

Tabela 5.4 - Ensaio requeridos para a qualificação de procedimentos de soldagem para tubo de aço carbono API 5 L considerando diâmetros maiores que 350 mm e espessuras maiores que 25 mm e seus valores comparativos de custos.

| NORMAS | ENSAIOS REQUERIDOS | | | | | | | | Totais |
|----------------------|--------------------|------------|------|---------|------------|------------|-------------|------------|--------|
| | Tração | Dobramento | | | Nick-break | Charpy-V | Macrografia | Dureza | |
| | | Raiz | Face | Lateral | | | | | |
| API 1104 | 4 | | | 4 | 8 | | | | |
| Valores comparativos | Unit. 1,77 | | | Unit. 1 | Unit. 1 | | | | 19,11 |
| | Total 7,11 | | | Total 4 | Unit. 8 | | | | |
| ASME IX | 2 | | | 4 | | | | | |
| Valores comparativos | Unit. 1,77 | | | Unit. 1 | | | | | 7,55 |
| | Total 3,55 | | | Total 4 | | | | | |
| DNV-OS-F101 | 2 | | | 4 | | 6 | 2 | 2 | |
| Valores comparativos | Unit. 1,77 | | | Unit. 1 | | Unit. 1,47 | Unit. 1,77 | Unit. 0,17 | 20,26 |
| | Total 3,55 | | | Total 4 | | Total 8,81 | Total 3,55 | Total 0,34 | |

Tabela 5.5 - Resumo da comparação de custos para qualificação de procedimentos.

| NORMAS | Tubos menores | | Tubos maiores | |
|--------|---------------|----------|---------------|----------|
| | Espessura | Diâmetro | Espessura | Diâmetro |
| | ≤ 25 | ≤ 300 | > 25 | > 350 |
| API | 9,55 | | 19,11 | |
| ASME | 7,55 | | 7,55 | |
| DNV | 17,32 | | 20,26 | |

Os custos dos ensaios necessários à qualificação de soldadores pelas normas API 1104 e ASME IX também levantados com base em preços atuais dos quais são apresentadas os valores comparativos nas Tabelas 5.6 e 5.7 abaixo.

Não considerados custos para a qualificação de soldadores conforme a norma DNV-OS-F101 porque esta permite opções para normas para qualificação de soldadores, como já exposto anteriormente neste trabalho.

Tabela 5.6 - Ensaio requeridos para a qualificação de soldadores para tubo de aço carbono API 5 L considerando diâmetros menores ou iguais a 300 mm e espessuras menores ou iguais a 25 mm e seus valores comparativos de custos.

| NORMAS | ENSAIOS REQUERIDOS | | | | | | | Totais | |
|----------------------|--------------------|------------|------|----------|------------|----------|-------------|--------|--------|
| | Tração | Dobramento | | | Nick-break | Charpy-V | Macrografia | | Dureza |
| | | Raiz | Face | Lateral | | | | | |
| API 1104 | 2 | 2 | | | 2 | | | | |
| Valores comparativos | Unit. 1,77 | Unit. 1 | | | Unit. 1 | | | 7,55 | |
| | Total: 3,55 | Total: 2 | | | Total: 2 | | | | |
| ASME IX | | | | 4 | | | | | |
| Valores comparativos | | | | Unit. 1 | | | | 4 | |
| | | | | Total: 4 | | | | | |

Tabela 5.7 - Ensaio requeridos para a qualificação de soldadores para tubo de aço carbono API 5 L considerando diâmetros maiores que 350 mm e espessuras maiores que 25 mm e seus valores comparativos de custos.

| NORMAS | ENSAIOS REQUERIDOS | | | | | | | | Totais |
|----------------------|--------------------|------------|------|---------|------------|----------|-------------|--------|--------|
| | Tração | Dobramento | | | Nick-break | Charpy-V | Macrografia | Dureza | |
| | | Raiz | Face | Lateral | | | | | |
| API 1104 | 4 | | | 4 | 4 | | | | |
| Valores comparativos | Unit. 1,77 | | | Unit. 1 | Unit. 1 | | | | 15,11 |
| | Total 7,11 | | | Total 4 | Unit. 4 | | | | |
| ASME IX | | | | 4 | | | | | |
| Valores comparativos | | | | Unit. 1 | | | | | 4 |
| | | | | Total 4 | | | | | |

Tabela 5.8 - Resumo da comparação dos custos para qualificação de soldadores.

| NORMAS | Tubos menores | | Tubos maiores | |
|--------|---------------|----------|---------------|----------|
| | Espessura | Diâmetro | Espessura | Diâmetro |
| | ≤ 25 | ≤ 300 | > 25 | > 350 |
| API | 7,55 | | 15,11 | |
| ASME | 4 | | 4 | |

5.2 VARIÁVEIS ESSENCIAIS.

Com base nos dados da Tabela 3.8 obtidos das normas API 1104, DNV-OS-F101 e ASME IX, destacam-se como relevantes diferenças de critério para estabelecimento de variáveis essenciais que conforme se julgou tem implicação direta nos resultados da soldagem por qualquer dos processos considerados neste trabalho.

5.2.1 CARBONO EQUIVALENTE.

Somente a norma DNV-OS-F101 considera como variável essencial a o carbono equivalente, sendo que esta variável afeta diretamente a temperabilidade do aço. Quanto maior a temperabilidade menor a soldabilidade, o que implica na necessidade de aumentar a temperatura de pré-aquecimento [7], que é também esta última uma variável essencial considerada pelas três normas citadas, o que ressalta a importância de considerar o carbono equivalente.

A norma API 1104 menciona o carbono equivalente para soldagens em tubulações em serviço. Um procedimento qualificado pode ser aplicado para um metal de base com carbono equivalente mais elevado desde que as condições térmicas sejam menos severas que as do procedimento e nenhum aumento no risco de trinca por hidrogênio seja verificado. No texto da norma que trata da construção de dutos não há menção esta variável [3].

Na norma ASME IX o carbono equivalente não é contemplado nas tabelas de variáveis específicas dos processos. Cabe salientar que itens de um mesmo P-Nº podem ter valores diversos de carbono equivalente.

5.2.2 CONTROLE DE PASSES.

A API 1104 considera o aumento do tempo máximo entre o término da raiz e o início da segunda camada e a norma DNV-OS-F101 considera a redução do número de passes antes do resfriamento à temperatura abaixo da temperatura de pré-aquecimento.

5.2.3 ENERGIA DE SOLDAGEM.

A norma API considera a energia de soldagem como variável essencial, quando há requisito mínimo de tenacidade para o qual há também outros ensaios requeridos para qualificação, como o CTOD e o ensaio de tração não rompido na solda. Para o caso de soldagem em serviço também é considerada a energia de soldagem como variável essencial, porém, no texto da norma que trata de construção de dutos não é citada.

5.2.4 TEMPERATURA DE INTERPASSE.

Somente a norma API 1104 não considera a temperatura de interpasse como variável essencial.

6. ANÁLISE DE UM CASO PRÁTICO – A APLICAÇÃO DAS NORMAS ASME IX E API 1104 PARA A QUALIFICAÇÃO DE PROCEDIMENTOS DE SOLDAGEM EM DUTO DE GAS.

Foi verificado o caso de uma aplicação em projeto de construção de gasoduto para o qual foram qualificados procedimentos qualificados por normas diferentes.

Para a soldagem da tubulação de transporte nos longos trechos, um procedimento único foi qualificado segundo a API 1104 e, para as soldagens nas Estações de Controle, foi um único procedimento qualificado segundo a ASME IX.

Segundo a informação obtida, junto à organização que qualificou os procedimentos e executou as obras nas instalações das estações de controle, a opção pela adoção da ASME IX foi pela possibilidade de qualificar um único procedimento para soldagem para todos os tubos de diferentes diâmetros e espessuras existentes nas citadas estações de controle.

A abrangência maior em espessuras e diâmetros que a qualificação pela ASME IX proporciona como comentado no item 5.1.6, permite economia de recursos e tempo na qualificação e facilidade operacional por possibilitar a adoção de uma menor quantidade de procedimentos. No caso citado dois apenas. Se fosse feita a opção pela qualificação pela API também na área da estação de controle os procedimentos seriam em maior número.

As Figuras 6.1 e 6.2 ilustram a chegada dos dutos dos trechos longos, onde as soldagens foram realizadas com procedimentos baseados na API 1104, a uma estação de

controle. O duto de diâmetro maior, vindo do trecho, se destaca das instalações da estação que estão em amarelo.

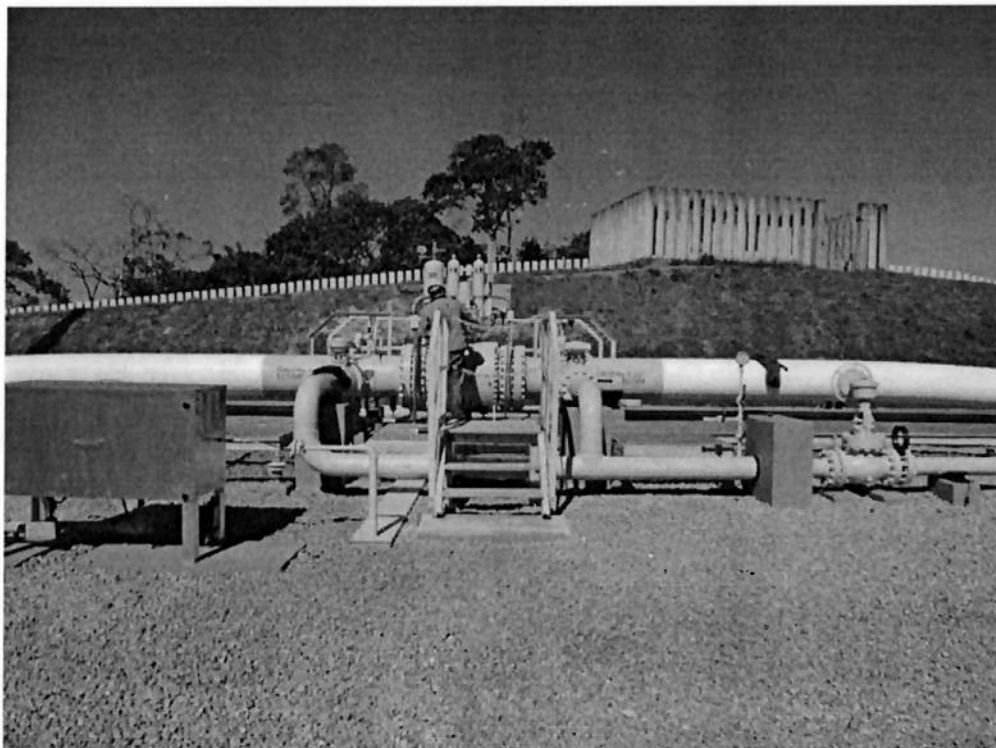


Figura 6.1 - Estação de Controle

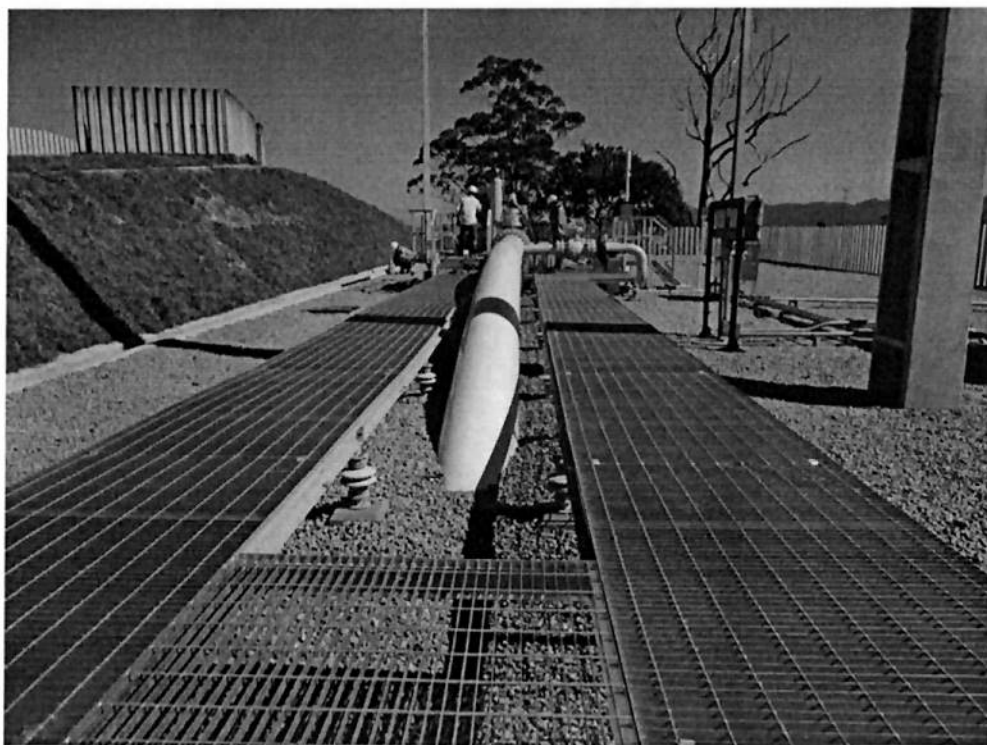


Figura 6.2 - Duto vindo do trecho longo, em branco.

7. CONCLUSÕES.

- a. Da avaliação dos custos dos ensaios requeridos e considerando os valores de ensaios mecânicos levantados a preço de mercado verifica-se que, para um tubo com as mesmas dimensões, a norma DNV-OS-F101 tem o maior custo de ensaios mecânicos para qualificação do procedimento de soldagem, seguida da norma API 1104 com o custo correspondente a 94% com relação aos custos dos ensaios conforme a DNV-OS-F101 e a norma com o menor custo de ensaios para qualificação é a norma ASME IX com o valor em torno de 37% comparativamente com a DNV-OS-F101. Com relação aos ensaios para qualificação de soldadores, também para as mesmas dimensões de tubos, verifica-se pela API 1104 um valor que corresponde a quase quatro vezes os custos com ensaios conforme a ASME. Há que se considerar que este custo deve ser dividido pela quantidade de juntas a ser soldadas conforme a extensão do duto.
- b. Aspecto importante a ser analisado na escolha de uma norma para a qualificação de procedimentos de soldagem e de soldadores é o seu escopo, no que tange à sua aplicação. Nota-se que a norma DNV-OS-F101 é apresentada para aplicação a instalações submarinas enquanto que a API 1104, bem como a ASME IX não mencionam o ambiente nem as condições operacionais dos dutos. Isso ressalta a necessidade de análise bastante criteriosa na escolha de uma norma de qualificação de procedimentos de soldagem e de soldadores para adequar o seu escopo à aplicação do projeto, e à severidade das condições de operação e do ambiente das instalações. Deve se levar em conta também o fato de que as diferenças de custos dos ensaios requeridos pelas diferentes normas estudadas podem ser insignificantes diante da magnitude da obra.

- c. No estudo de caso apresentado onde houve a qualificação de procedimentos de soldagem pela norma ASME IX e pela API 1104, para a realização de juntas soldadas de subsistemas interligados de um duto, não se verifica incompatibilidade entre o escopo do projeto e das normas aplicadas, além do que são realizados ensaios não destrutivos durante a construção conforme requisitos contratuais
- d. A norma DNV além de considerar o carbono equivalente como variável essencial requer para a qualificação dos procedimentos de soldagem a realização dos ensaios de dureza e Charpy que permitem a constatação de propriedades de dureza e tenacidade propiciando assim maior conhecimento sobre as propriedades mecânicas da junta soldada. Há que se considerar que esta norma é apresentada como aplicável a dutos submersos, motivo pelo qual estes ensaios são solicitados. Em virtude deste fato e, pelas demais normas não solicitarem estes ensaios, é recomendado observar que em tubulações que não serão submersas a fabricação dos dutos com as outras normas que não solicitam estes ensaios teriam a vantagem do menor custo de ensaios e menor tempo gasto para a qualificação do procedimento de soldagem.
- e. Para a qualificação dos procedimentos de soldagem apenas a norma API 1104 requer o ensaio de “Nick-break” para o exame do interior do metal de solda. A norma DNV-OS-F101 prevê o ensaio de macrografia e a norma ASME IX não estabelece ensaios que permitam verificar inclusões, descontinuidades e outros possíveis defeitos no interior da junta soldada na qualificação de procedimentos de soldagem. No caso da qualificação com base na norma ASME IX este fato normalmente é compensado com maior controle sobre a sanidade do cordão de solda durante a soldagem de produção com base em ensaios volumétricos como ultrassom e radiografia. Neste

caso, deve ser analisado que a qualificação com base nas normas API ou DNV acarretará um custo maior com ensaios para qualificação de procedimentos de soldagem, porém podem ser requeridos menos ensaios durante a soldagem de produção reduzindo assim o custo total da obra.

- f. Diferente da norma DNV-OS-F101, as normas API 1104 e ASME IX não consideram o carbono equivalente (CE) como variável essencial, variável esta que implica na temperabilidade e, conseqüentemente, na soldabilidade do aço. Por esta razão, quando se emprega estas normas, torna-se fundamental verificar a composição química do material para garantir que é do mesmo grupo qualificado, bem como verificar a variação da composição química dentro do mesmo grupo, para evitar futuros problemas por não se controlar o carbono equivalente e, como consequência, não se adequar o pré-aquecimento da junta soldada que a variação deste poderá requerer.
- g. A norma API Specification 5L, 44th Edition, estabelece para os tubos de especificação PSL 2 com teores de carbono abaixo de 0,12% o valor de 0,25% para o carbono equivalente, o que por si já é um controle, pois estabelece um limite. Porém verifica-se na relação entre temperatura de pré-aquecimento e valor do carbono equivalente para aços com os teores citados [20] que há uma área de risco mesmo para valores de carbono equivalente menor que 0,25. Isto faz com que, quando se aplica as normas API 1104 e ASME IX, uma boa prática seria a de adotar cuidados adicionais no controle sobre a composição química dos tubos entregues pelo fornecedor para verificar o valor do CE de cada lote recebido e avaliar a necessidade de pré-aquecimento das juntas a serem produzidas ou ajustes na temperatura de pré-aquecimento. Tais medidas visam contornar a possibilidade da ocorrência de trinca a

frio pela suscetibilidade a esse efeito aumentada pelo acréscimo da resistência do aço em decorrência da variação do valor do carbono equivalente. Como já mencionado anteriormente a norma DNV-OS-F101 considera o CE como variável essencial o que impõe o seu controle.

- h. A norma API 1104 não estabelece a energia de soldagem como variável essencial, o que tem impacto sobre o tempo de solidificação e de resfriamento que por consequência determinam as propriedades mecânicas de dureza e de tenacidade de uma junta soldada. A energia de soldagem, com consequência sobre a velocidade de resfriamento, tem implicação também com o pré-aquecimento que pode ser necessário em decorrência do valor do CE. Com isto é recomendado que nos procedimentos de soldagem qualificados com base na esta norma API 1104, seja dada especial atenção aos parâmetros de soldagem que devem ser especificados com faixas de variação tão estreitas quando possível.
- i. A temperatura de interpasse não é considerada como variável essencial somente pela norma API 1104, variável esta que tem implicações nas propriedades mecânicas finais da junta soldada como limites de resistência e tenacidade. Por esta razão é recomendado que a mesma seja adicionalmente especificada no procedimento de soldagem para o necessário controle, independente de ser considerada variável essencial ou não.

8. SUGESTÕES DE TRABALHOS FUTUROS.

1. Estudo da adequação do aporte de energia de soldagem e da temperatura de pré-aquecimento aplicado aos tubos de aço ARBL diante da sua possível variação de composição química.
2. Estudo da variação das propriedades mecânicas das juntas soldadas em decorrência da variação, dentro das especificações, do valor do carbono equivalente dos tubos de aço ARBL.

9. REFERENCIASBIBLIOGRÁFICAS.

1. NORMA ISO 9001:2008 – Sistemas de Gestão da Qualidade - Requisitos

2. Adaptação do texto “Normas e Qualificação em Soldagem” (Adaptado e atualizado de texto escrito pelo prof. Michael D. Hayes) Prof. Paulo J. Modenesi, Universidade Federal de Minas Gerais, Departamento de Engenharia Metalúrgica e de Materiais.

3. API STANDARD 1104 TWENTY EDITION, NOVEMBER 2005 – Welding of Pipelines and Related Facilities, American Petroleum Institute, Washington, 82 p., 2005.

4. SPECIFICATION for Line Pipe: API Specification 5L, 44th Edition, 169 p. Washington, 2007.

5. ROCHA, David Bellentani, ESTUDO DA SOLDABILIDADE DO TUBO API 5L X80 UTILIZANDO OS PROCESSOS DE SOLDAGEM: MAG COM TRANSFERÊNCIA CONTROLADA E ELETRODO TUBULAR, 219 p., Dissertação (Mestrado), 2010, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo em 2010.

6. VAN VLACK, Laurence H., Princípio de Ciência e Tecnologia dos Materiais, 4ª edição, tradutor Edson Monteiro. – Rio de Janeiro: Editora Campus, 1984.

7. METALURGIA DA SOLDAGEM – ESAB -Elaborado, traduzido (parte) e adaptado por Cleber Fortes – Engenheiro Metalúrgico, M.Sc. – Assistência Técnica Consumíveis – ESAB BR – Revisado por Welerson Araújo – Engenheiro Metalurgista, M.Sc. – Desenvolvimento e Pesquisa – ESAB BR – Última revisão 15 de abril de 2004.

8. UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS - Departamento de Engenharia Metalúrgica e de Materiais - Soldabilidade de Algumas Ligas Metálicas - Prof. Paulo J. Modenesi - Maio de 2008.

9. Emilio Wainer, Sérgio Duarte Brandi, Fábio Decourt Homem de Mello, SOLDAGEM – PROCESSOS E METALURGIA, São Paulo: Editora Blucher, 1992, 7ª reimpressão 2010.

10. OFFSHORE STANDARD - DNV-OS-F101 - SUBMARINE PIPELINE SYSTEMS - OCTOBER 2010 - The electronic pdf version of this document found through <http://www.dnv.com> is the officially binding version © Det Norske Veritas

11. ASME IX 2010 – Boiler & Pressure Vessel Code Copyright © 2011 by THE AMERICAN SOCIETY OF MECHANICAL ENGINEERS

12. Weldment Preheating and Interpass Temperature – A Primer on Weldment Preheating and Interpass Temperature – Welding Design & Fabrication, a Penton Media, Inc. Publication. May 1999.

13. DIETER, George E. Metalurgia Mecânica, Segunda Edição, traduzido por Antonio Sergio de Souza e Silva, M. Sc., Luiz Henrique de Almeida, M. Sc., Paulo Emilio Valadão Miranda. Editora Guanabara Koogan S. A. – Rio de Janeiro, RJ – 1981.

14. FERNANDES, Paulo Eduardo Alves, Avaliação da Tenacidade à Zona Afetada pelo Calor do Aço API 5L X80 Soldado pelos processos ER e FCAW, 109 p, tese de apresentada à Escola Politécnica da Universidade de São Paulo para a obtenção do Título de Doutor em Engenharia em 2011.

15. <http://www.asel-tech.com.br/documentos/artigo-fatos-sobre-vazamentos.pdf> - PHMSA (h12002toPresent SI20090714) - US Department of Transportation

16. Nota de Aula da Disciplina SLD 09, Metalurgia da Soldagem, do Curso de Especialização de Engenharia de Soldagem da Escola Politécnica da USP, ministrada pelo Professor Sergio Duarte Brandi.

17. Construction manuals.pub.com/14250/css/14250_172htm, 2012-09-11.

18. <http://www.etalaboratorio.com.br/laboratorio-metalurgico/ensaios-metalograficos/ensaio-de-macrografia/> - 2012-09-11
19. <http://www.twi.co.uk/technical-knowledge/job-knowledge/job-knowledge-73-bend-testing/> - 2012-09-11
20. Prospecto Tenaris Confab Versão 5 / Setembro 2010.
21. QUALITY CERTIFICATE APOLO TUBULARS, Nº 1921/12, 27/08/2012.