

3 - Metodologia Experimental

Neste capítulo serão apresentados a metodologia experimental, os materiais utilizados e os métodos de análise empregados.

3.1. Descrição do método experimental

A norma API 1104 aceita que todos os passes necessários para a soldagem de tubulações (passes de raiz, quente, enchimento e acabamento) sejam executados por um único processo ou por uma combinação de processos podendo o método de aplicação ser manual, semi-automático ou automático. É comum ver procedimentos manuais em que o passe de raiz é executado com o processo GTAW e os demais passes com o processo SMAW. Segundo Bracarense et al ^[52], atualmente vem crescendo a utilização dos processos GMAW e FCAW, em substituição ao processo SMAW, visando o aumento da produtividade.

As características do material e as amostras empregadas na realização da soldagem manual são descritas a seguir:

3.2. Características das amostras empregadas na soldagem manual

Para a execução da soldagem manual dos anéis, foram utilizados três tipos de eletrodos, cuja composição química e propriedades mecânicas típicas fornecidas pelo fabricante, estão apresentadas nas tabelas 3 e 4 respectivamente.

Na seqüência de passes, foi utilizado o eletrodo E-6010 no passe de raiz e o eletrodo E-9010 para fazer o passe quente. Para os passes de enchimento e acabamento foi utilizado o arame tubular autoprottegido E91T8-G.

Tabela 3 – Composição química típica do metal de solda (all weld metal).

Eletrodo	Elementos (% em peso)									
	C	Mn	Si	P	S	Ni	Mo	Al	Cr	V
E-6010	0,08	0,3	0,12	0,01	0,01	--	--	--	--	--
E-9010	0,1	0,76	0,17	0,014	0,009	0,8	0,42	--	0,015	0,008
E91T8-G	0,06	1,92	0,17	0,02	0,01	0,83	0,01	0,9	--	--

Tabela 4 – Propriedades mecânicas do metal de solda (all weld metal) fornecido pelo fabricante.

Eletrodo	Charpy-V (J) -29° C	Limite de Escoamento LE (MPa)	Limite de Resistência LR (MPa)	Alongamento ϵ %
E-6010	27	331	414	22
E-9010	--	530	620	17
E91T8-G	62	560	650	26

Os tubos utilizados para fazer as soldas têm 20 polegadas de diâmetro (508 mm) e 19,1 mm de espessura de parede. O tubo foi cortado em anéis com comprimento de 300 mm.

O tubo cujas propriedades mecânicas e composição química são fornecidas pelo fabricante e estão mostradas nas tabelas 5 e 6.

Tabela 5 – Propriedades mecânicas do tubo.

Limite de Escoamento	Limite de Resistência	Razão	Alongamento
LE (MPa)	LR (MPa)	LE/LR	ϵ %
594	754	0,82	37,6

Tabela 6 – Composição química do aço API 5L X80 utilizado.

Elementos (% em peso)												
C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni	Mo	Al	Cu	Co	Ti	Nb
0,065	0,165	1,87	0,018	0,0041	0,181	0,018	0,200	0,040	0,012	0,0034	0,012	0,07
V	W	Pb	B	Sn	Zn	As	Bi	Ca	Ce	Zr	La	Fe
0,022	0,034	0,015	0,0009	<0,001	<0,002	0,0014	0,0088	0,0034	<0,003	0,0035	<0,0010	97,3

3.3. Parâmetros experimentais

O critério para a escolha de um procedimento de soldagem deve incluir a necessidade de estabelecer o balanço ótimo entre o custo de realização, a qualidade do metal de solda produzido e a segurança dos operadores e do equipamento ^[52]. Nos procedimentos de soldagem detalham-se todos os parâmetros e as condições da operação de soldagem para uma aplicação específica com a finalidade de garantir a repetibilidade e a qualidade das soldas executadas posteriormente.

As variáveis empregadas neste estudo foram resumidas numa Especificação de Procedimento de Soldagem (EPS). Na tabela 7 apresentam-se as principais características dos parâmetros de soldagem na Especificação de Procedimento de Soldagem (EPS) utilizada neste trabalho.

Tabela 7 – Especificação do Procedimento de Soldagem.

EPS (ESPECIFICAÇÃO DE PROCEDIMENTO DE SOLDAGEM)
1 - MATERIAL
1.1 - ESPESSURA: 19,1 mm (0.750")
1.2 - DIÂMETRO EXTERNO: 508,0 mm (20")
1.3 - ESPECIFICAÇÃO DO MATERIAL: API 5L X80 PSL2
1.4 - ESPECIFICAÇÃO DO MATERIAL: API 5L X80 PSL2
1.5 - FAIXA DE ESPESSURA QUALIFICADA: 4,8 mm (0.188") A 19,1 mm (0.750")
1.6 - FAIXA DE DIÂMETRO QUALIFICADO: > 323,9 mm (> 12.750")
2 - TÉCNICA
2.1 - PROCESSO DE SOLDAGEM: SMAW + FCAW-SS
2.2 - NÚMERO DE VARETAS POR CADA PASSE: NÃO APLICÁVEL
2.3 - TIPO DE ACOPLADERA USADA: CACHORROS
2.4 - REMOÇÃO DA ACOPLADERA: APÓS EXECUÇÃO DE 100% DO PRIMEIRO PASSE
2.5 - POSIÇÃO DO TUBO DE TESTE: 5G (EIXO DO TUBO NA HORIZONTAL FIXA)
2.6 - POSIÇÃO DE SOLDAGEM: PLANA / VERTICAL / SOBRE-CABEÇA
2.7 - ÂNGULO DO EIXO DO TUBO COM A HORIZONTAL: NÃO APLICÁVEL
2.8 - DIREÇÃO DE SOLDAGEM: DESCENDENTE

2.9 - GÁS DE SOLDAGEM: NÃO APLICÁVEL				
2.10 - GÁS DE PURGA: NÃO APLICÁVEL				
2.11 - INTERVALO DE TEMPO ENTRE O TÉRMINO DO PRIMEIRO PASSE E INÍCIO DO SEGUNDO PASSE: 15 MINUTOS				
2.12 - INTERVALO DE TEMPO ENTRE O TÉRMINO DO SEGUNDO PASSE E INÍCIO DOS SEGUNDOS PASSES SEGUINTE: 48 HORAS				
2.13 - MÉTODO DE LIMPIEZA DO PASSE DE RAIZ: ESCOVA ROTATIVA E DISCO DE DESBASTE SE NECESSÁRIO				
2.14 - MÉTODO DE LIMPIEZA DOS DEMAIS PASSES: ESCOVA ROTATIVA E DISCO DE DESBASTE SE NECESSÁRIO				
2.15 - NÚMERO DE SOLDADORES: 2				
3. PREAQUECIMENTO E INTERPASSE				
3.1 - TEMPERATURA DE PREAQUECIMENTO: 100 °C				
3.2 - MÉTODO: MAÇARICO TIPO CHUVEIRO				
3.3 - CONTROLE: PIRÔMETRO ÓPTICO				
3.4 - TEMPERATURA DE INTERPASSE: 175 °C				
3.5 - TRATAMENTO TÉRMICO APÓS SOLDAGEM: NÃO APLICÁVEL				
4. METAL DE ADIÇÃO				
PASSE	1. RAIZ	2. QUENTE	3. ENCHIMENTO	4. ACABAMENTO
ESPECIFICAÇÃO AWS	A5.1	A5.4	A5.29	A5.29
CLASIFICAÇÃO AWS	E6010	E9010-G	E-91T8-G	E-91T8-G
MARCA COMERCIAL	OK 22.45P	OK 22.48P	OK Tubrod 98 OA	OK Tubrod 98 OA
DIÂMETRO (mm)	3,25	4,0	2,0	2,0
4. CARACTERÍSTICAS ELÉTRICAS				
PASSE	1. RAIZ	2. QUENTE	3. ENCHIMENTO	4. ACABAMENTO
PROCESSO	SMAW	SMAW	FCAW-S	FCAW-S
POLARIDADE	CC-	CC+	CC-	CC-
CORRENTE (A)	140 - 150	190 - 210	230 - 240	230 - 240
VOLTAGEM (V)	-	-	18 - 20	18 - 20
VELOC. DO ARAME (m/min)	N/A	N/A	-	-
STICK OUT (mm)	N/A	N/A	15 - 20	15 - 20

3.3.1. Execução das soldagens

3.3.1.1. Preparação e montagem das juntas

Os tubos foram cortados na forma de anéis com 300 mm de largura e biselados conforme a geometria mostrada na figura 16.

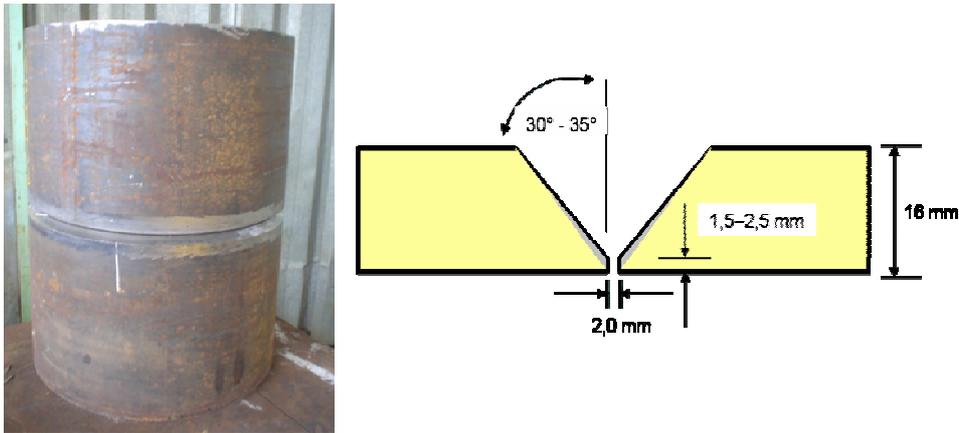


Figura 16 – Geometria do chanfro de solda.

Durante a parte de preparação da junta os resíduos foram eliminados por meio de lixamento. A seguir um dos anéis é colocado com a face biselada virada para cima. O arame espaçador com diâmetro de 2 mm é posicionado sobre a face biselada e o segundo anel é colocado sobre o arame com a face biselada virada para baixo. Deste modo, os dois anéis são alinhados, em conformidade com a norma API 1104 observa-se que o desalinhamento não deve exceder 1,6mm.



Figura 17– Fixação do anel na posição horizontal fixa.

Foram empregadas barras retangulares de aço (conhecidas como “cachorros”), para fixar o chanfro de modo que a separação na raiz seja de até 2 mm. Após alinhamento e ponteamto dos anéis conforme descrito anteriormente, estes são fixados na posição horizontal, recomendando colocar sempre a região com a menor abertura de raiz na posição 12 horas, como mostrado na figura 17.

Para fazer o passe de raiz os anéis foram pré-aquecidos aproximadamente a 150 °C com uma tocha de gás propano para remover a umidade utilizou-se também um pirômetro laser com a finalidade de controlar a temperatura de preaquecimento.

A soldagem foi executada na posição vertical descendente, com dois soldadores atuando de forma simultânea, a partir da posição superior do tubo em condições similares as condições de montagem em campo, tubo fixo na posição horizontal ^[53].

3.3.1.2. Soldagem do passe de raiz

Para fazer o passe de raiz foi utilizado o eletrodo celulósico E-6010 de 4 mm de diâmetro para promover a união entre os anéis e garantir uma boa penetração. Este material é bastante tenaz e possui limite de escoamento de 60 ksi, consideravelmente inferior ao do aço X80. A vantagem deste primeiro passe com este metal de aporte, é que este permite se deformar com mais facilidade, absorvendo grande parte das tensões residuais resultantes do passe de raiz, o qual é o mais crítico com relação à absorção das tensões residuais. É importante observar que o passe de raiz com material de limite de escoamento mais baixo não compromete as propriedades mecânicas da tubulação, por que este aumenta a resistência por efeito de diluição com o metal de base, também após o trabalho de esmerilhamento do cordão para remoção da camada de escoria, o volumen restante deste passe é muito pequeno. Observa-se que os passes seguintes são executados com materiais de resistência equivalente a do aço do tubo.

3.3.1.3. Soldagem do passe quente

Para executar o passe quente, utilizou-se eletrodo revestido E9010-G com 4mm de diâmetro, o tempo máximo entre o passe de raiz e o passe quente não deve ser maior de 60 minutos. Este passe, auxilia no aquecimento da junta, o que

funciona como preaquecimento para os demais passes, diminuindo os efeitos de contração e dilatação térmica, responsáveis pelo aparecimento de tensões residuais e de trincas no metal de solda e nas regiões próximas (ZTA), auxiliando na remoção de hidrogênio do passe anterior, o qual é o principal agente formador de trincas a frio.

3.3.1.4. Soldagem de enchimento e acabamento

Para os passes de enchimento e acabamento se utilizou arame tubular autoprotégido (FCAW-S), o eletrodo utilizado para fazer os passes foi o E91T8-G com 1,2 mm de diâmetro, com limite de resistência de 90 ksi, e a temperatura entre passes foi de 175°C como máximo.

A figura 18 mostra de um modo esquemático o aspecto final e a seqüência de passes de solda que foram executados.

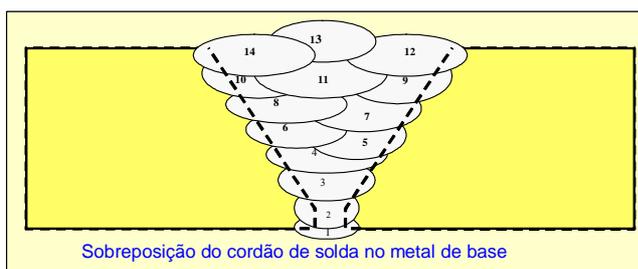


Figura 18 – Aspecto final e passes de Solda. Processos SMAW-FCAW.

3.3.1.5. Ensaios radiográficos e mapeamento de defeitos

Após 48 horas da realização das soldagens, foram executados os ensaios radiográficos para determinar a ocorrência de discontinuidades ao longo do perímetro da junta. Utilizou-se uma fonte de Iridio para a emissão de raios γ , como técnica empregada para efetuar os ensaios radiográficos.

Logo foi realizado um mapeamento dos defeitos que foram revelados nos ensaios radiográficos com a finalidade de determinar as áreas úteis para a retirada dos corpos de prova em acordo com a norma API 1104, e também ensaios de dureza, metalografia e ensaios Charpy V. O perímetro da junta foi dividido em quadrantes como mostrado na figura 19.

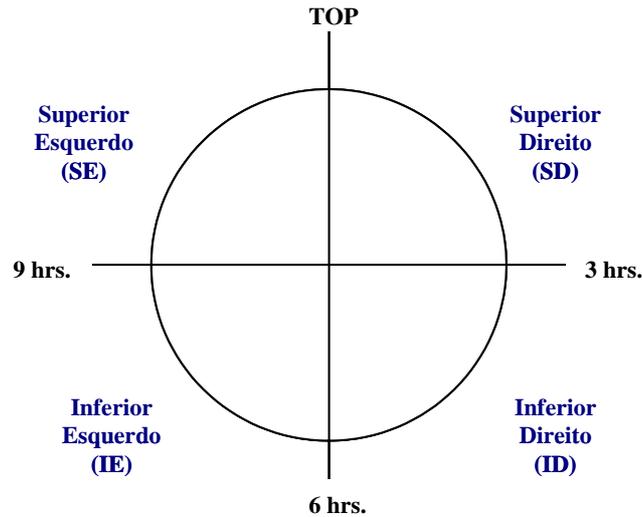


Figura 19 – Posicionamento dos quadrantes ao longo do perímetro da junta.

A figura 20 mostra de forma esquemática os diferentes tipos de defeitos encontrados nos ensaios radiográficos, onde se pode observar principalmente a presença de grande quantidade de porosidade, inclusões de escória, e algumas mordeduras. A ocorrência destes defeitos irão ser analisadas com mais detalhe no capítulo seguinte.

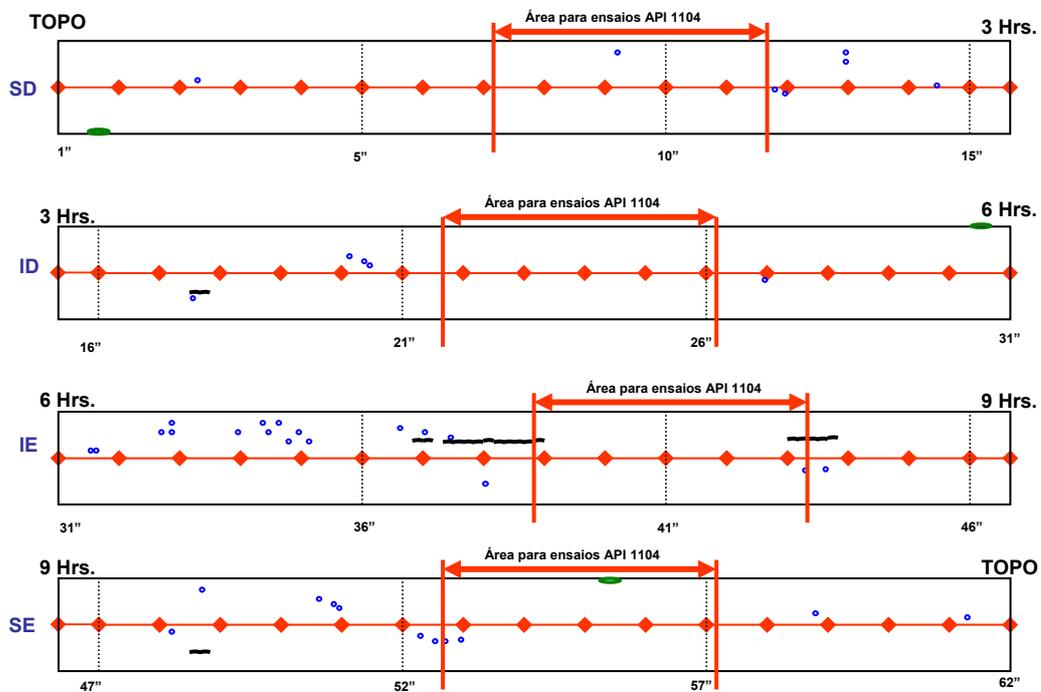


Figura 20 – Mapeamento de defeitos: porosidade (○), inclusão de escória (~), e mordeduras (θ).

3.4. Amostragem

A solda circunferencial foi testada em acordo com os critérios da norma API 1104 – Welding Pipelines and Related Facilities ^[54]. Por se tratar de tubos com o diâmetro maior do que 13 polegadas foram preparados corpos-de-prova de tração, nick break e dobramento conforme mostrado na figura 21.

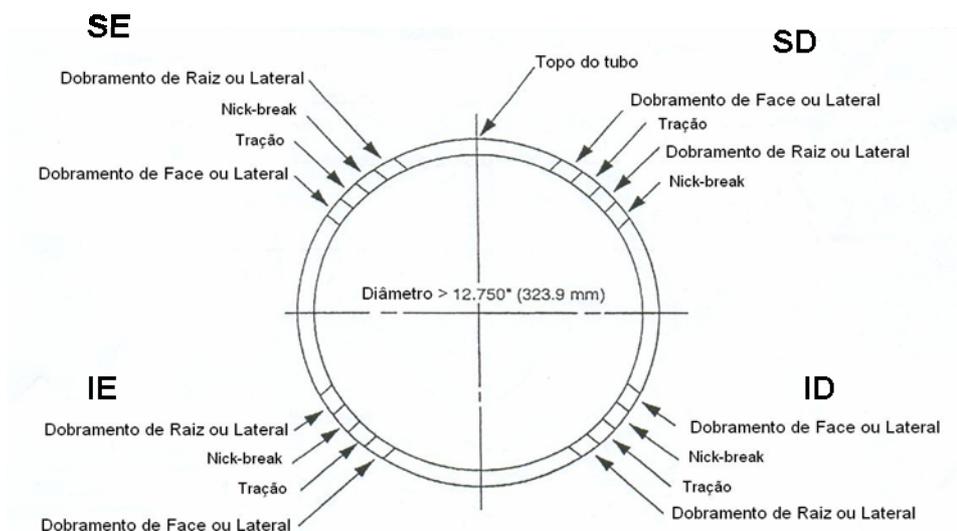


Figura 21 – Localização dos corpos de prova segundo a norma API 1104 ^[55].

Determinou-se a retirada e caracterização dos seguintes corpos-de-prova segundo a norma API 1104, e também quatro corpos-de-prova para ensaios de metalografia e dureza pertencentes aos quatro quadrantes como mostrado na tabela 8.

Tabela 8 – Quantidade de corpos-de-prova para testes.

ENSAIO	Nº DE CORPOS DE PROVA POR REGIÃO				DIMENSÃO
	SD	ID	IE	SE	
TRAÇÃO	1	1	1	1	(230 mm x 25 mm)
NICK-BREAK	1	1	1	1	(230 mm x 25 mm)
DOBRAMENTO	2	2	2	2	(230 mm x 25 mm)
METALOGRAFIA E DUREZA	1 (M1)	1 (M2)	1 (M3)	1 (M4)	(70 mm x 15 mm)

3.4.1. Ensaio de tração

As dimensões do corpo-de-prova de tração estão mostradas na figura 22. De modo a aprovar uma junta soldada, esta deve atender aos seguintes requisitos:

- O limite de resistência da junta soldada incluindo a zona de fusão deverá ser maior ou igual ao limite de resistência mínimo especificado do material do tubo.
- Se o corpo-de-prova rompe fora da solda e da linha de fusão, e atinge a resistência requerida pelas especificações, a junta poderá ser aceita.
- Se o corpo-de-prova rompe na solda ou na linha de fusão, porém com um limite de resistência maior ou igual ao limite de resistência mínimo especificado pelo material de base, e deve também satisfazer as exigências do ensaio nick-break ^[54].

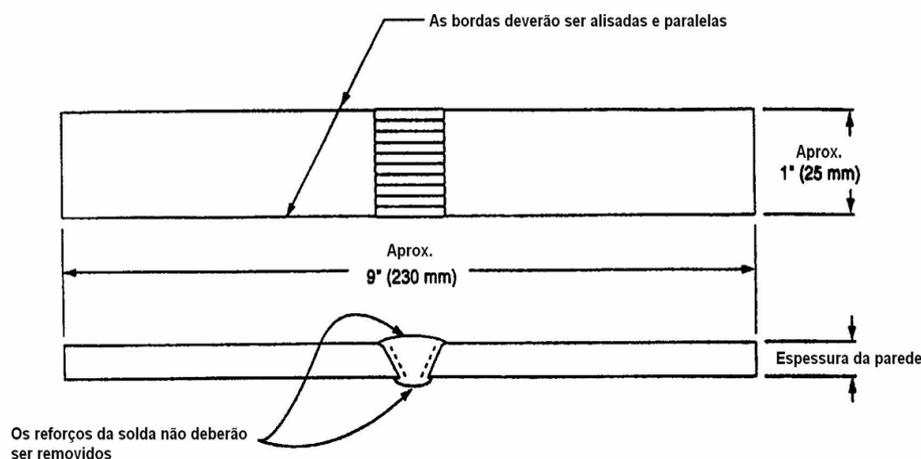


Figura 22 – Dimensão do corpo de prova para o ensaio de tração, norma API 1104 ^[55].

3.4.2. Ensaio nick-break

No ensaio de nick-break, as amostras recebem um entalhe na região da solda, de modo que, quando for aplicado esforço de tração sobre este corpo-de-prova, o rompimento ocorrerá no cordão de solda. A geometria da amostra está mostrada na figura 23. Os requisitos necessários para aprovação estão listados a seguir:

- a) As bolsas de gás não podem ser maiores que $1/16''$ (1,6 mm) e a área combinada destas bolsas de gás não deve exceder 2% do total da área exposta.
- b) Inclusões de escória não podem medir mais de $1/32$ (0,8 mm) em profundidade e $1/8$ (3 mm) em comprimento.
- c) Deve haver uma distância mínima de $1/2''$ (13 mm) entre inclusões de escória adjacentes.
- d) As superfícies expostas das amostras devem apresentar penetração e fusão completas ^[54].

Os ensaios foram executados numa máquina de tração marca WPM – série 282/31 com certificado INT 321.

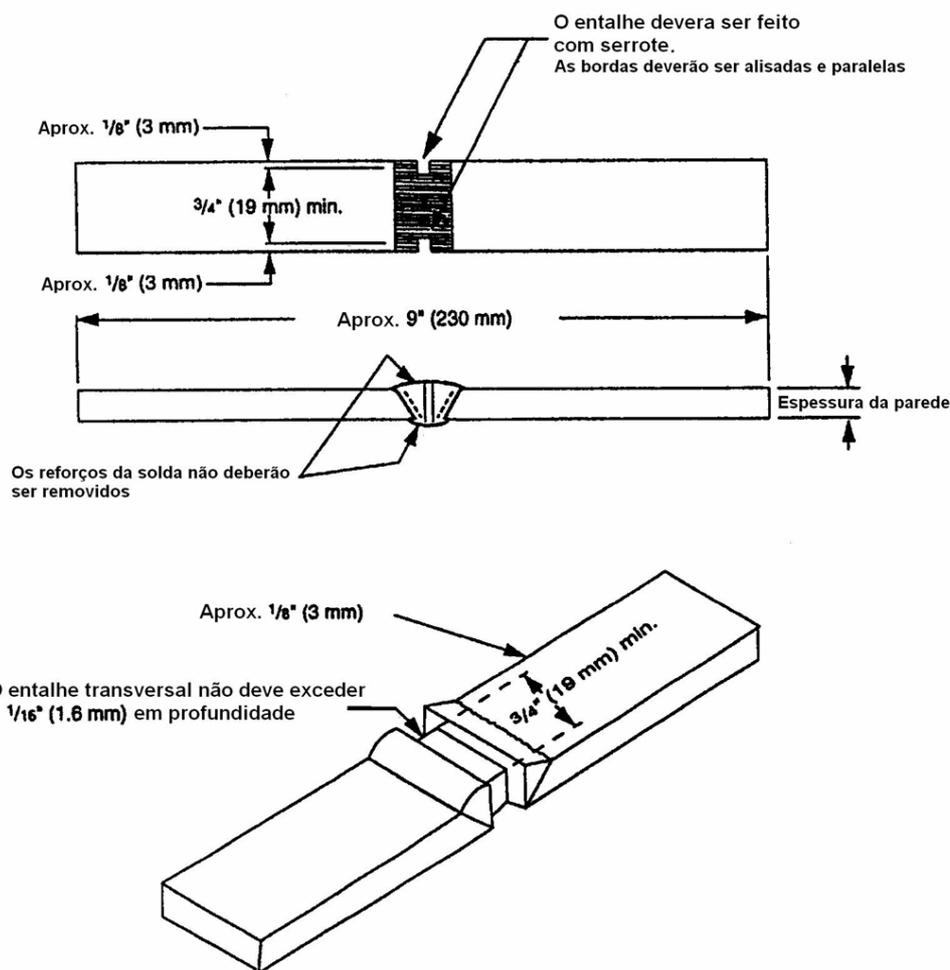


Figura 23 – Dimensões do corpo-de-prova para o ensaio nick-break norma API 1104 ^[54].

3.4.3. Ensaio de dobramento lateral

Neste ensaio, o esforço é aplicado sobre flexão em uma prensa que dobra o corpo-de-prova, até atingir uma configuração em U, com a região de solda no centro do dobramento. Os critérios de aceitação destes testes são:

- Não deve existir nenhuma trinca ou outra imperfeição lateral excedendo 1/8" (3 mm) em qualquer direção.
- Trincas originadas na superfície externa de dobramento, originadas durante o teste devem ser desconsideradas a não ser que tenham mais de 1/4" (6 mm) [54].

A figura 24 mostra o dimensional dos corpos-de-prova de dobramento. Os ensaios foram executados numa máquina de tração marca WPM – série 282/31 com certificado INT 321.

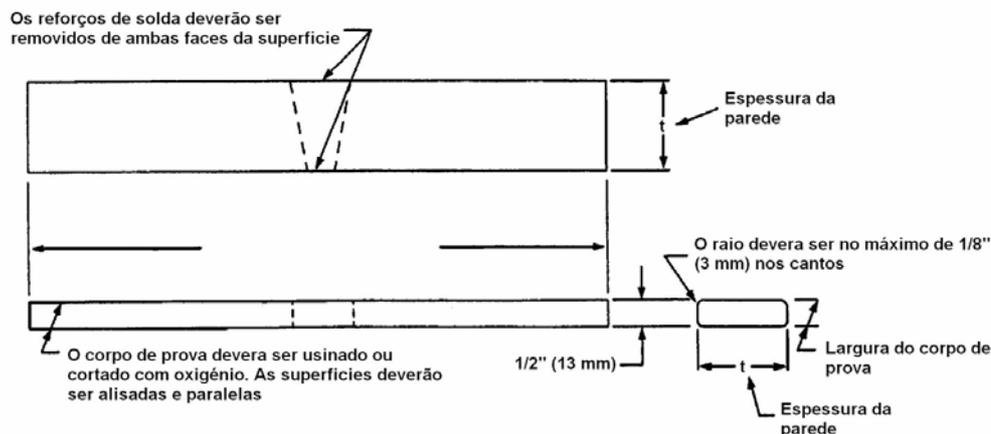


Figura 24 – Dimensões do corpo de prova para o ensaio de dobramento lateral, norma API 1104 [54].

3.4.4. Ensaio de dureza

O método de medição de dureza na qualificação do procedimento de soldagem deve ser “vickers”, para avaliar as possíveis mudanças microestruturais ao longo da junta.

As impressões foram feitas em dois eixos paralelos que cortam o cordão de solda. O primeiro eixo próximo à região dos passes de acabamento, e um outro

eixo próximo ao passe de raiz, segundo o indicado pela norma PETROBRAS N-133 ^[55].

O equipamento utilizado para realizar as medidas de durezas foi um durômetro calibrado marca WPM empregando uma carga de 5 Kgf. A figura 25 ilustra o perfil de dureza para um chanfro V.

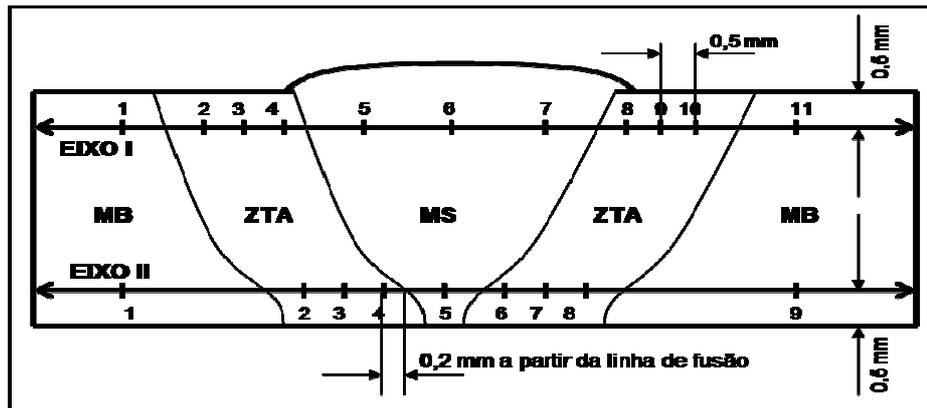


Figura 25 – Desenho esquemático dos pontos de medidas de dureza ^[55].

3.4.5. Ensaios de impacto

Os testes foram realizados nas temperaturas de 0°C, -20°C e -40°C, para cada uma das regiões, totalizando 54 ensaios.

- Metal de solda na raiz (R): **9 cp's.**
- Metal de solda no top-bead (T): **9 cp's.**
- Linha de fusão (L): **9 cp's.**
- Linha de fusão + 2 mm (X): **9 cp's.**
- Linha de fusão + 5 mm (Z): **9 cp's.**
- Metal de Base (B): **9 cp's.**
- **TOTAL : 54 cp's** para Charpy (55mm x 10mm. x 10mm.).

Deve ser observado que foram retiradas amostras dos quatro quadrantes e o posicionamento do entalhe segue as especificações da norma PETROBRAS N-1852 ^[56] conforme a figura 26.

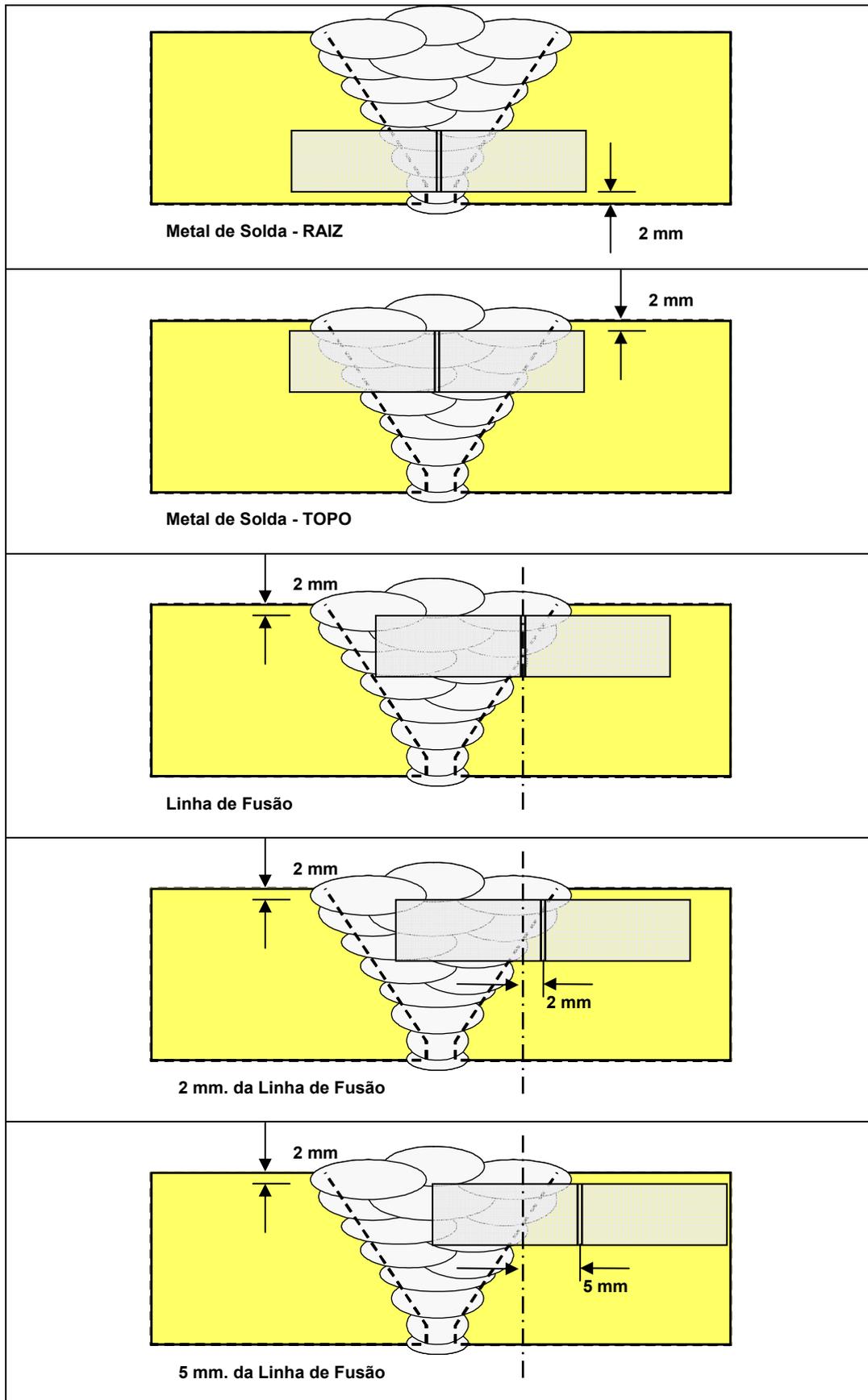


Figura 26 – Posições para o ensaio de impacto em juntas tubulares ^[56].

A geometria do corpo de prova padrão para ensaio Charpy-V segue a especificação ASTM A370 [57]. O equipamento usado para realizar este ensaio foi uma máquina de impacto WPM tendo uma escala de 300J, e certificada pelo Chavez Calibrations International Inc.

A tabela 9 mostra a seqüência para identificação dos corpos-de-prova Charpy-V:

Tabela 9 – Identificação dos corpos-de-prova Charpy-V.

Pos. do entalhe	Temperatura dos Ensaiois		
	0	-20°C	-40°C
Raiz	R01, R02, R03	R21, R22, R23	R41, R42, R43
Topo	T01, T02, T03	T21, T22, T23	T41, T42, T43
Linha de Fusão	L01, L02, L03	L21, L22, L23	L41, L42, L43
L. de Fusão + 2 mm	X01, X02, X03	X21, X22, X23	X41, X42, X43
L. de Fusão + 5 mm	Z01, Z02, Z03	Z21, Z22, Z23	Z41, Z42, Z43
Metal de Base	B01, B02, B03	B21, B22, B23	B41, B42, B43

3.4.6. Observação fratográfica

Foram realizadas macrografias identificando as principais regiões da solda e as superfícies de fratura dos corpos-de-prova Charpy-V e nick break foram observadas no microscópio eletrônico de varredura.

3.4.7. Observação microestrutural

A caracterização microestrutural foi realizada utilizando microscopia ótica e microscopia eletrônica de varredura (MEV).

As amostras pertencentes aos quadrantes do perímetro da junta foram atacadas com Nital 2% para ver o tipo de matriz e microestrutura que apresentavam. Foram tiradas imagens para as distintas regiões da junta soldada e do metal de base. Para a caracterização das regiões do metal de solda utilizou-se o método de classificação dos constituintes microestruturais para aços ferríticos, segundo o IIW Doc. IX-1377-85; como o relatado por Trotti [58].

Para revelar a presença de microconstituente AM, foi necessário fazer um ataque eletrolítico duplo, conforme empregado por Ikawa et al [30]. No primeiro

estágio o eletrólito é composto por 5,0g de EDTA, 0,5g de NaF e 100 ml de água destilada, sendo que as condições de ataque foram 5,0 volts por 15 segundos, nesta etapa obtém-se somente o ataque da ferrita. No segundo estágio o eletrólito é composto por 5,0g de ácido pícrico, 25,0g de NaOH e 100 ml de água destilada, sendo que as condições de ataque foram 5,0 volts por 100 segundos, nesta segunda etapa os carbeto são preferencialmente atacados, de modo que apareçam como depressões na matriz ferrítica sendo observados como partículas escuras, em quanto que os microconstituintes AM ficam em relevo na matriz ferrítica e se apresentam como constituintes claros. Foram tiradas duas imagens por regiões da junta soldada e do metal de base em cada amostra para aumentar a confiabilidade da quantificação do A-M. Estas imagens foram obtidas no MEV com um aumento de 3000x. As imagens foram digitalizadas onde se sobrepôs uma grade reticulada com 100 pontos sobre as imagens. A fração de área de AM total, alongado e massivo foi contada manualmente.