

### 3. Material e Procedimento Experimental

Neste capítulo detalha-se os materiais empregados, o procedimento de soldagem seguido desde a montagem da junta, execução da soldagem e metodologia de avaliação da junta soldada, onde os critérios e ensaios mecânicos de avaliação foram em acordo às exigências da norma API 1104 [66], assim como de outros ensaios mecânicos adicionais e de análise microestrutural. A soldagem foi circunferencial e realizada em posição horizontal fixa, combinando os processos MAG de curto-circuito de corrente controlada (MAG-CCC) para o passe de raiz e o processo de arame tubular com proteção gasosa (FCAW-G) para o passe a quente e passes de enchimento e acabamento.

#### 3.1. Materiais

O metal de base foi obtido a partir de uma seção de tubo de aço API 5L X80, de 508 mm (20”) de diâmetro nominal, com espessura de 19 mm e 300 de comprimento. Este tubo foi conformado usando o processo UOE a partir de uma chapa de aço produzida por laminação controlada sem resfriamento acelerado (TMCP – Thermomechanical controlled process). A composição química e propriedades mecânicas do material de base do tubo estão dadas nas Tabelas 4 e 5 respectivamente.

Tabela 4. Composição química do metal de base (% em peso)

<i>C</i>	<i>Mn</i>	<i>Si</i>	<i>Mo</i>	<i>Ni</i>	<i>Cr</i>	<i>Cu</i>
0,072	1,84	0,153	0,20	0,025	0,171	0,013
<i>Nb</i>	<i>V</i>	<i>Ti</i>	<i>Al</i>	<i>P</i>	<i>S</i>	<i>B</i>
0,061	0,02	0,014	0,003	0,018	0,007	0,0008

Tabela 5. Propriedades Mecânicas do metal de base do tubo, segundo o fabricante.

<i>Limite de Escoamento – LE (MPa)</i>	<i>Limite de Resistência – LR (MPa)</i>	<i>Relação LE/LR</i>	<i>Alongamento (%)</i>
618	703	0,88	38

Com base na composição química do material de base, Tabela 4, e o uso das fórmulas de cálculo 2-2 e 2-3 se obtiveram os valores do  $P_{CM} = 0,197$  e do  $CE_{IIV} = 0,459$ .

Os consumíveis utilizados foram os eletrodos ER 80S-G e E 101T1-GM-H8, para o processo MAG-CCC e FCAW-G, respectivamente. Em ambos os casos, o diâmetro do arame foi de 1,1 mm. A composição química e as propriedades mecânicas do consumível como soldado estão dadas nas Tabelas 6 e 7 respectivamente. Estas propriedades mecânicas foram obtidas com as condições de soldagem apresentadas na Tabela 8, segundo informação do fabricante dos consumíveis.

Tabela 6. Composição química do material de aporte como soldado, segundo fabricante.

Eletrodo	Elementos (% em peso)									
	C	Mn	Si	Mo	Ni	Cr	Cu	V	P	S
ER 80S-G	0,10	1,51	0,50	0,46	0,02	0,02	0,20	-	0,011	0,006
E 101T1-GM-H8	0,04	1,75	0,40	0,26	1,01	0,11	-	0,02	0,02	0,01

Tabela 7. Propriedades mecânicas do metal de aporte, como soldado segundo o fabricante.

Eletrodo	Limite de Escoamento LE (MPa)	Limite de Resistência LR (MPa)	Alongamento (%)	Charpy V -29°C (J)
ER 80S-G	634	710	23	148
E 101T1-GM-H8	724	765	21	46

Tabela 8. Condições de soldagem para a obtenção das propriedades mecânicas do metal de aporte, segundo fabricante.

Parâmetro de Soldagem	Eletrodo	
	ER 80S-G	E 101T1-GM-H8
Diâmetro do eletrodo (mm)	1,1	1,1
Polaridade	DC+	DC+
Tensão (V)	29	27
Corrente (A)	-	290
Gás de proteção	80% Ar / 20% CO <sub>2</sub>	75% Ar / 25% CO <sub>2</sub>
Velocidade de alimentação de arame (m/min)	11,43	10,16
Distancia bico peça de trabalho (mm)	22	19
Cordões / Camadas	13 / 5	15 / 8
Temperatura de preaquecimento (°C)	150	150
Temperatura entre passes (°C)	150	150

### 3.2. Procedimento Experimental

A especificação de procedimento de soldagem do presente estudo tratou-se da EPS X80-4 a qual forma parte de um conjunto de quatro especificações que avaliam a soldabilidade do aço API 5L X80 com diferentes processos de soldagem. Estas EPSs são listadas na Tabela 9 a modo de referência.

Tabela 9. Procedimentos de soldagem envolvidos em cada uma das EPSs.

(EPS)	Processos	Consumíveis				Material
		Raiz	Quente	Enchimento	Acabamento	
X80-1	ER	E 6010	E 8018-G	E 10018-G	E 10018-G	X80 – X80
X80-2	ER	E 6010	E 8018-G	E 10018-G	E 10018-G	X80 – X52
X80-3	ER FCAW-G	E 6010	E 8010-G	E 101 T1-GM-H8	E 101 T1-GM-H8	X80 – X80
X80-4	MAG-CCC FCAW-G	ER 80S-G	E 101 T1-GM-H8	E 101 T1-GM-H8	E 101 T1-GM-H8	X80 – X80

#### 3.2.1. Procedimento de Soldagem

Os parâmetros de soldagem foram obtidos a partir de uma etapa de treinamento do qual foi obtida a EPS X80-4, onde foram utilizados dois pares de anéis. Determinou-se que a geometria da junta mais adequada para obter um bom passe de raiz é com uma nariz de 2 mm de altura e com 1,5 a 2,0 mm de abertura. A Fig. 17a, detalha a geometria da junta utilizada e a Fig. 17b detalha o número de cordões por camada. Os parâmetros de soldagem utilizados estiveram dentro das faixas recomendadas pelo fabricante dos eletrodos consumíveis.

A Tabela 10 apresenta a EPS X80-4 na qual se observa que os parâmetros de soldagem utilizados com o processo FCAW-G mudaram para o passe a quente, passes de enchimento e passes de acabamento.

Tabela 10. Especificação do Procedimento de Soldagem X80-4

Condições de Soldagem Gerais		
Material	Espessura	19,05 mm (0.750")
	Diâmetro nominal	508 mm (20")
	Metal de base (1)	API 5L X80 PSL 2
	Metal de base (2)	API 5L X80 PSL 2
Técnica	Processo de soldagem	MAG-CCC + FCAW-G
	Tipo de acopladeira usada	Elementos de fixação
	Remoção da acopladeira	Após execução de 100% do primeiro passe.
	Posição do tubo de teste	Eixo do tubo na horizontal fixa.
	Posição de soldagem	Plana / Vertical / Sobrecabeça.
	Direção de soldagem raiz	Descendente
	Direção de soldagem dos demais passes	Ascendente
	Gás de soldagem de raiz	100 % CO <sub>2</sub>
	Gás de soldagem dos demais passes	75% Ar / 25% CO <sub>2</sub>
	Intervalo de tempo entre término do primeiro passe e início do segundo passe	15 minutos
	Intervalo de tempo entre término do segundo passe e início dos passes seguintes	48 horas
	Método de limpeza do passe de raiz	Escova rotativa e disco de desbaste se necessário.
	Método de limpeza dos demais passes	Escova rotativa e disco de desbaste se necessário.
Número de soldadores	2 (mínimo).	
Preaquecimento e Interpasse	Temperatura de preaquecimento	100 °C
	Temperatura de interpasse máxima	150 °C
	Método	Maçarico tipo chuveiro
	Controle	Termômetro infravermelho.
Tratamento Térmico após soldagem	Temperatura de patamar	Não aplicável
	Taxa de aquecimento	Não aplicável
	Taxa de esfriamento	Não aplicável
	Método	Não aplicável
	Controle	Não aplicável

Condições de soldagem por passe					
Descrição		Passo de Raiz	Passo a Quente	Passos de Enchimento	Passos de Acabamento
Consumível	Especificação AWS	A5.28	A5.29	A5.29	A5.29
	Classificação AWS	ER 80S-G	E101T1-GM-H8	E101T1-GM-H8	E101T1-GM-H8
	Marca comercial	Pipeliner 80S-G	Pipeliner G80M	Pipeliner G80M	Pipeliner G80M
	Diâmetro (mm)	1,15	1,15	1,15	1,15
Parâmetros de soldagem	Processo	MAG-CCC	FCAW-G	FCAW-G	FCAW-G
	Polaridade	CC <sup>+</sup>	CC <sup>+</sup>	CC <sup>+</sup>	CC <sup>+</sup>
	Corrente de pico (A)	415	-	-	-
	Corrente de base (A)	55	-	-	-
	Tensão (V)	-	21,5	23,4	22,0
	Gás de proteção	100 % CO <sub>2</sub>	75%Ar 25%CO <sub>2</sub>	75%Ar 25%CO <sub>2</sub>	75%Ar 25%CO <sub>2</sub>
	Vazão do gás (l/min)	15 - 16	20	20	20
	Velocidade do arame (m/min) [WFS]	4,3 [170]	6,9 [270]	7,6 [300]	6,9 [270]
	Distância tubo de contato-peça de trabalho (mm)	15 - 18	15 - 20	15 - 20	15 - 20

Os parâmetros de soldagem especificados na EPS X80-4 foram mantidos na medida do possível para todas as posições (plana, vertical e sobrecabeça). O termino de progressão descendente refere-se que o início da soldagem foi sempre desde a posição plana até a posição de sobrecabeça. Progressão ascendente refere-se que o início da soldagem foi sempre desde a posição de sobrecabeça até a posição plana.

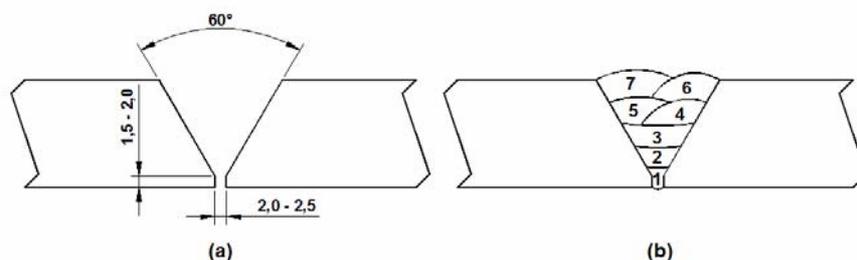


Figura 17. a) Geometria da juntas, e b) distribuição de passes por camada de soldagem, dimensões em milímetros.

### 3.2.2. Execução da Soldagem

Para a execução da soldagem foram utilizadas a máquina INVERTEC STT II para o passe de raiz, com alimentador de arame LN-742, e a máquina INVERTEC V350 Pro, com alimentador de arame LF-72 para os passes restantes, todas estas máquinas de fabricação Lincoln Electric. Foram seis pares de anéis o número de juntas soldadas seguindo a EPS X80-4, sendo três pares de juntas para ser avaliados no presente trabalho e as outras três para a avaliação de procedimentos de reparo, assunto que não é discutido no presente trabalho.

A execução da soldagem compreendeu de uma etapa inicial de verificação de equipamentos, de ajuste de parâmetros e de uniformidade geométrica das bordas dos anéis; e uma segunda etapa de acompanhamento da soldagem.

#### 3.2.2.1. Etapa de verificação e preparação da junta

Antes de iniciar a execução da soldagem foi verificado o correto funcionamento do equipamento, assim como o ajuste de parâmetros de soldagem envolvidos em cada processo de soldagem (corrente, tensão, vazão de gás e velocidade de arame). As bordas dos anéis foram verificadas fazendo uso de um calibrador, Fig. 18, e comparadas com as dimensões geométricas estabelecidas na EPS X80-4, assim como a limpeza das suas superfícies interna e externa da junta. No estagio da montagem foi verificado que o desalinhamento não fosse maior a 2 mm, tal como é especificado na norma API 1104 [66].



Figura 18. Calibre com finalidade múltipla para medições em soldagem.

Tomou-se cuidado em que os cordões longitudinais da soldagem de fabricação do tubo em cada anel estiveram posicionados a  $180^\circ$  um em referência ao outro. Para conseguir a separação entre anéis (abertura da junta) foram utilizadas umas chapinhas de 2 mm de espessura, as quais foram retiradas após soldagem de quatro elementos de fixação, localizados na metade de cada quadrante, Fig. 19a, Estes elementos de fixação têm como função manter a abertura ajustada a qual tende a se fechar por efeito da dilatação térmica. O comprimento de cada um dos elementos de fixação é de aproximadamente 500 mm com uma abertura semicircular à metade do comprimento, Fig. 19b. A soldagem destes elementos foi pelos extremos de cada um deles para evitar gerar mudanças nas regiões próximas à junta a ser soldada o que poderia dar resultados não representativos na avaliação da junta soldada. A Fig. 20 apresenta em círculos em cor vermelha o detalhe da localização dos pontos de soldagem de um dos elementos de fixação.

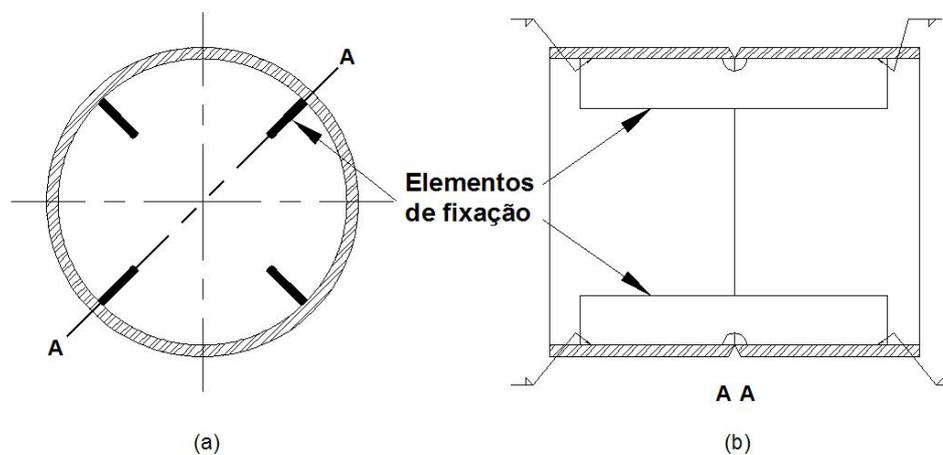


Figura 19. Localização dos elementos de fixação na preparação da junta a soldar..



Figura 20. Posicionamento e pontos de soldagem para o elemento de fixação.

### 3.2.2.2. Etapa de acompanhamento da soldagem

Preparada e verificada a junta a soldar, foi posicionada em posição horizontal fixa, a uma altura de 550 mm em referência ao nível do chão, simulando as condições do campo, Fig. 21. Em acordo com a EPS X80-4, o passe de raiz foi executado de forma descendente, seguindo uma ordem de soldagem entre os dois soldadores os quais soldaram em forma simultânea, onde um deles começa na parte superior (topo) e o segundo no início do quadrante seguinte, tal como é visto na Fig. 22a, onde as setas indicam os pontos de início. Para os passes restantes a progressão foi ascendente, e no passe a quente e passes de enchimento os pontos de início dos cordões por cada um dos soldadores foram em quadrantes opostos, tal como indicam as setas na Fig. 22b e Fig. 22c. Esta metodologia de ordem de soldagem foi com a finalidade de não quebrar o gás de proteção entre as tochas tanto ao início do cordão como no final do mesmo, reduzindo a possibilidade de geração de porosidade nos cordões de solda. Na execução do passe de acabamento o ponto de início dos cordões de cada soldador foram na posição de sobrecabeça, onde indicam as setas na Fig. 22d, iniciando primeiro um dele e após um avanço de cordão entre 150 a 200 mm iniciando o segundo soldador, este intervalo de espaçamento entre as duas tochas dos soldadores foi com a mesma finalidade de não quebrar o gás de proteção entre as tochas.



Figura 21. Tubo na posição horizontal fixo.

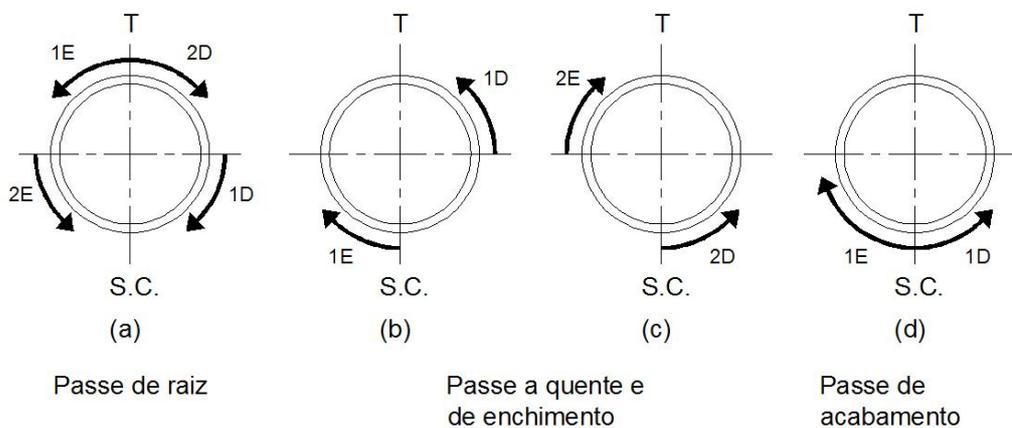


Figura 22. Seqüência de soldagem para todos os passes. Onde T: Topo, SC: Sobrecabeça. 1E: primeiro passe esquerdo, 1D: primeiro passe direito, 2E segundo passe esquerdo, e 2D: segundo passe direito.

Durante o acompanhamento da soldagem foram registradas a corrente e tensão, dependendo de cada processo, diretamente dos “displays” de cada máquina de soldagem e alimentadores de arame, Fig. 23. Os tempos de execução empregados por cada um dos soldadores também foram registrados. Adotou-se um sistema de pontos de registro, Fig. 24, onde a circunferência do anel foi dividida em quatro quadrantes e estes foram divididos em quatro regiões, sendo os pontos de divisão numerados de 1 a 7, tanto para o lado direito como para o esquerdo. O registro de parâmetros de tensões e corrente não foram considerados para as regiões pertencentes ao ponto Topo e sobrecabeça devido a duas razões: a) O arco elétrico precisa de um lapso de tempo para estabilizar, e b) Estas regiões no momento do corte para a obtenção dos corpos de prova

são descartadas. Para o caso do ponto quatro (4), em ambos lados o registro de parâmetros foi sempre considerando a finalização de um cordão de solda e não o início do cordão de emenda.



Figura 23. Painéis de controle de amperagem e voltagem marcados em retângulos amarelos, a) Máquina de soldagem Invertec STT II, amperagem de pico e de base b) Alimentador de arame LN-742, voltagem para o processo STT e c) Máquina de soldagem Invertec V350- Pro, amperagem e voltagem.

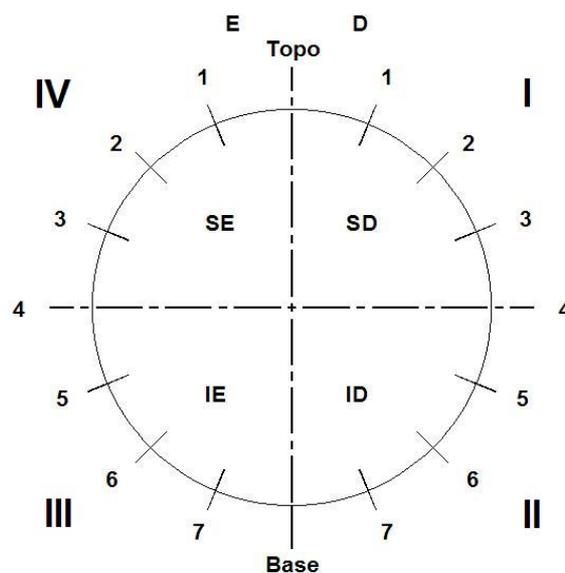


Figura 24. Distribuição de pontos de controle dos parâmetros de soldagem para cada passe.

### **3.2.2.3.**

#### **Etapa após soldagem – Mapeamentos de defeitos**

Todas as juntas soldadas foram avaliadas por ensaios não destrutivos de radiografia e de ultra-som, sendo os resultados avaliados segundo os critérios de aceitação descritos na norma API 1104 [66]. A finalidade desta avaliação preliminar foi determinar a possível existência de descontinuidades nas juntas soldadas e que juntas soldadas estão dentro das exigências para ser utilizadas nos ensaios mecânicos exigidos pela mesma norma. As juntas que apresentaram descontinuidades nas aceitáveis foram destinadas para os ensaios de impacto Charpy V. As regiões que apresentaram descontinuidades ao longo da soldagem circunferencial foram marcadas por médio das mascaras dos filmes de radiografia, sendo estas regiões descartadas na distribuição dos corpos de prova na medida do possível.

### **3.3.**

#### **Amostragem para avaliação da Junta Soldada**

A avaliação do procedimento de soldagem EPS X80-4 foi fazendo uso de três juntas soldadas, como foi mencionado antes, uma delas para os ensaios mecânicos exigidos pela norma API 1104 [66] (ensaio de tração, ensaio de dobramento lateral e ensaio de Nick-Break), e para os corpos de prova de microdureza e micrografia. E as outras duas juntas soldadas para a extração dos corpos de prova do ensaio de impacto Charpy V.

#### **3.3.1.**

##### **Codificação**

Adotou-se uma codificação alfanumérica que associa a posição de extração do corpo-de-prova como o tipo de ensaio. Esta codificação permite ter rastreabilidade e poder relacionar os parâmetros de soldagem registrados para cada corpo-de-prova. A Fig. 25 apresenta a codificação adotada para os ensaios mecânicos exigidos pela norma API 1104 [66] e ensaio de microdureza. A Fig. 26 apresenta a codificação adotada para o ensaio de impacto Charpy V. Para o presente estudo os corpos de prova apresentaram sempre no primeiro dígito o número 4 por se tratar da EPS X80-4.

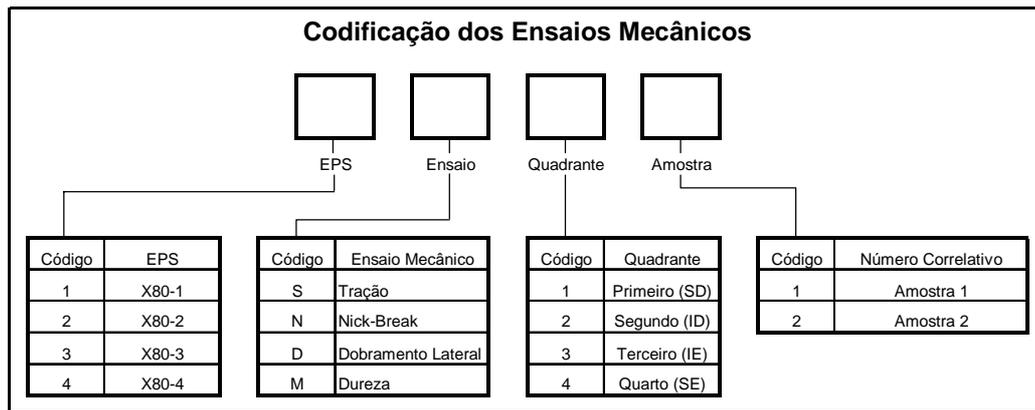


Figura 25. Codificação dos ensaios mecânicos.

Como exemplo, fazendo uso da Fig. 25, a codificação 4D32, indicaria: o primeiro número (4) corresponderia à EPS X80-4, o segundo (D), indica que se trata do ensaio de dobramento lateral, o terceiro (3) indica que se trata do terceiro quadrante e o quarto (2) indica que se trata da amostra número dois correspondente.

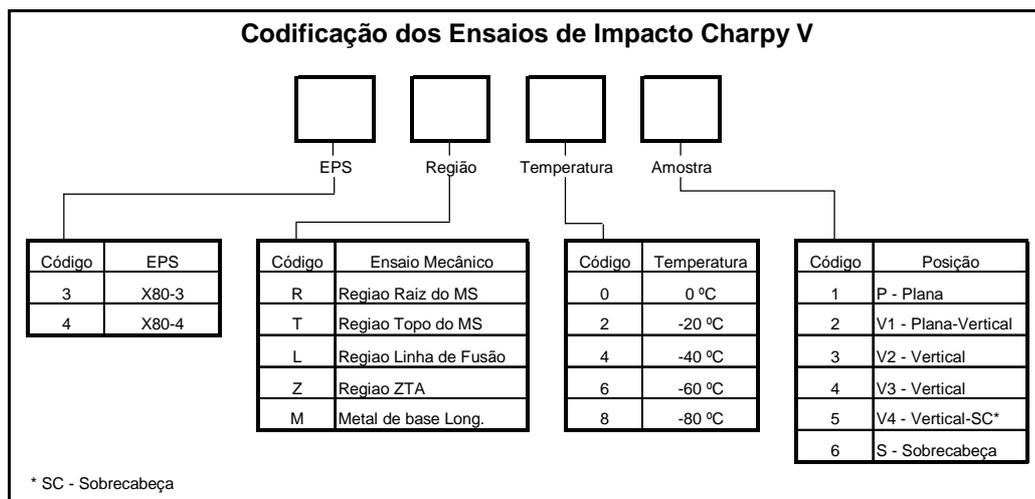


Figura 26. Codificação dos ensaios de Impacto Charpy V.

Para o ensaio de impacto Charpy V, fazendo uso da Fig. 26, a codificação 4T22, indicaria: o primeiro número (4) indica que se trata da EPS X80-4, o segundo (T) indica que se trata da região do topo do MS, o terceiro (2) indica que o ensaio foi realizado a -20 °C e o quarto (2) indica que a amostra foi extraída da posição V2 – plana-vertical.

### 3.3.2. Ensaio Mecânico

O equipamento utilizado para os ensaios segundo a norma API 1104 [66] foi uma máquina de tração universal, marca Wolpert com capacidade nominal de 399 MN (40Tf), com célula de carga e indicador de carga Kratos modelo IKCL2-USB. Para o ensaio de impacto foi utilizada a máquina de impacto marca VEB-WPM de 294 Nm (30 kpm). Para o ensaio de dureza foi utilizado o microdurômetro de marca SHIMADZU Mod. HMV-2000, com carga de 0,2 kg por um tempo de 30 segundos.

#### 3.3.2.1. Ensaio de tração, segundo Norma API 1104

Método – Os CPs foram submetidos a uma carga de tração axial ao longo do comprimento do corpo-de-prova, Fig. 27. A resistência à tração foi calculada dividindo a carga máxima pela menor seção transversal do corpo-de-prova medido antes do ensaio.

Critério de aceitabilidade – Segundo a norma API 1104 [66] o resultado do ensaio de tração será considerado aceitável se:

- a) O limite de resistência à tração registrado da junta soldada fosse maior ou igual ao limite de resistência mínimo especificado para o material do tubo.
- b) O corpo-de-prova fratura fora da solda e da zona de fusão e atinge o valor mínimo de resistência à tração requerida pela especificação.
- c) O corpo-de-prova fratura na solda ou zona de fusão e o limite de resistência registrado é maior ou igual ao valor mínimo de resistência à tração especificado para o material de base e atende aos requisitos de aprovação do ensaio de nick-break.



Figura 27. Posicionamento do corpo-de-prova no ensaio de Tração.

### 3.3.2.2.

#### Ensaio de dobramento lateral, segundo Norma API 1104

Método – Segundo a norma API 1104 [66] os corpos de prova devem ser dobrados entre dois apoios com uma separação de 120 mm e um embolo com raio de 45 mm. O corpo-de-prova deve ser posicionado no meio da junta soldada e com a seção transversal da soldagem perpendicular à abertura da matriz. O embolo deve ser forçado dentro da abertura até que o CP curve até aproximadamente uma forma de U. Fig. 28.

Critério de aceitabilidade – Segundo a norma API 1104 [66] o resultado do ensaio de dobramento será considerado aceitável se:

- a) Nenhuma trinca ou outra imperfeição exceder o menor valor entre 1/8" (3 mm) ou a metade da espessura nominal da parede do tubo, em qualquer direção que esta se apresente na solda ou entre a solda e zona de fusão após do dobramento.
- b) As trincas originadas durante o ensaio na superfície externa do dobramento ao longo da borda do CP e que sejam maiores que 1/4" (6 mm), medida em qualquer direção, não devem ser consideradas a menos que sejam observadas imperfeições relevantes.



Figura 28. Ensaio de dobramento lateral.

### 3.3.2.3.

#### Ensaio de Nick-Break, segundo Norma API 1104

Método – Os corpos de prova podem ser fraturados por tração ou mediante um golpe na zona central do corpo-de-prova estando os extremos fixos, ou um extremo fixo e golpeando o outro com uma marreta. A área exposta

da fratura deve ser pelo menos de 3/4" (19 mm ) de largura. Neste caso foi realizado por tração.

Critério de aceitabilidade – Segundo a norma API 1104 [66] o resultado do ensaio de dobramento será considerado aceitável se:

- a) As superfícies de fratura expostas apresentam penetração e fusão completa
- b) A maior dimensão de alguma porosidade não excede 1/16" (1,6 mm), e a área combinada total de todas estas porosidades não excede o 2% da superfície exposta
- c) As inclusões de escória não devem exceder de 1/32" (0,8 mm) de profundidade e seu comprimento não deve ser maior que 1/8" (3 mm) ou a metade da espessura da parede, e a separação entre inclusões de adjacentes deve ser pelo menos 1/2" (13 mm).

#### **3.3.2.4. Ensaio de Impacto Charpy V**

Método – A capacidade de absorção ao impacto da junta soldada foi avaliada pela extração de corpos de prova representativos de diferentes regiões, sobre cada um destes corpos de prova foi praticado um entalhe na direção longitudinal do cordão de solda e perpendicular à espessura do tubo e a usinagem do dimensionamento do corpo-de-prova foi segundo o indicado pela norma ASTM A370 [51], Fig. 29. Antes do ensaio, aleatoriamente foram escolhidos três corpos de prova e o perfil do entalhe foi avaliado mediante um projetor de perfis. Os corpos de prova foram mantidos dentro de um banho de álcool esfriado à temperatura de avaliação por um tempo de 10 minutos, controlando que a variação esteja dentro do intervalo de  $\pm 1$  °C da temperatura de avaliação. Os corpos de prova foram posicionados na máquina de impacto com o entalhe em posição oposta à aplicação da carga de impacto, Fig. 30.

Critério de aceitabilidade – Os resultados obtidos para a temperatura de 0 °C foram avaliados segundo a norma DNV-OS-F101 [67], na qual é especificado que os resultados são aceitos se o valor médio de três corpos de prova é maior ou igual a 56 J, sendo o valor individual de cada corpo-de-prova maior ou igual a 45 J.

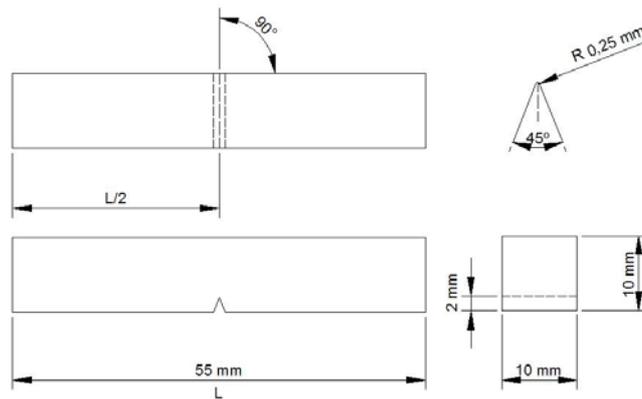


Figura 29. Dimensões do corpo-de-prova Charpy V segundo a norma ASTM A370 [51]

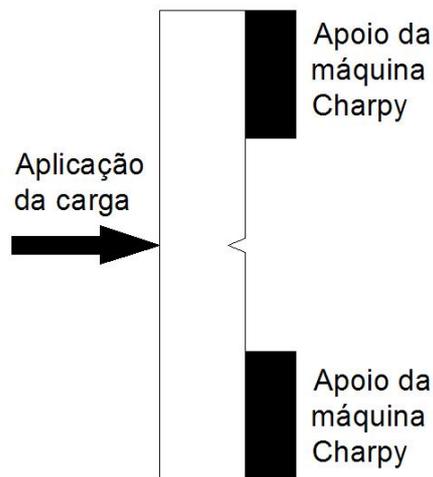


Figura 30. Posição do corpo-de-prova Charpy V nos apoios da máquina de impacto.

### 3.3.2.5. Ensaio de microdureza Vickers (HV)

Método – No ensaio de microdureza Vickers foi aplicado uma carga de 200 g. Os perfis de microdureza foram obtidas na horizontal a 0,5 mm da borda superior e a 0,5 mm da borda inferior, Fig. 31. Partindo de uma linha central (LC) imaginária na metade da junta soldada, se iniciou o levantamento do perfil de microdureza para cada lado a partir da LC. Dentro do metal de solda, os pontos encontram-se afastados em 2,5 mm. Na ZTA, o primeiro ponto foi a uma distância de 0,2 mm da LF. No MB o primeiro ponto encontra-se afastado a 1 mm do último ponto feito na ZTA, este dimensionamento é aplicado para ambos dos eixos com a exceção do eixo inferior no qual só foi possível obter um ponto

no metal de solda. Na Fig. 32 é amostrado o detalhe da numeração dos pontos do perfil de microdureza.

Critério de aceitabilidade – Os resultados obtidos na região da ZTA foram avaliados segundo as considerações expostas por Lancaster [22], onde para regiões próximas à borda superior da junta soldada o valor máximo permissível é 350 HV e para as regiões próximas à borda inferior da junta soldada o valor máximo permissível é 250 HV.

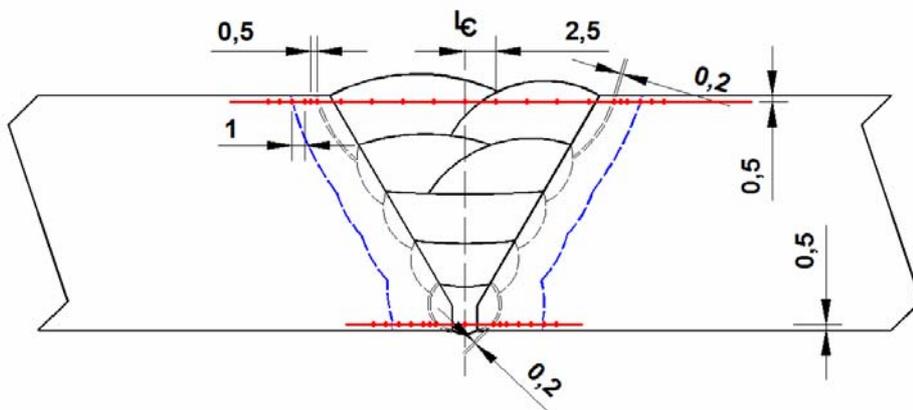


Figura 31. Distribuição do perfil de ponto de dureza na junta soldada, dimensões em milímetros.

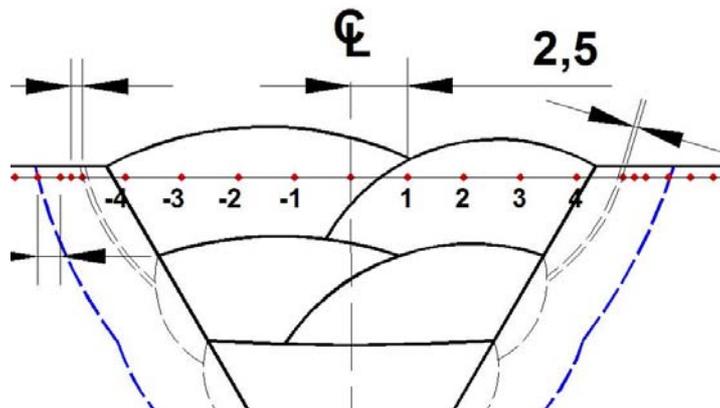


Figura 32. Ampliação da Fig. 31, detalhando a correlação numérica da localização de cada ponto de dureza.

### 3.3.3. Extração dos Corpos-de-prova

#### 3.3.3.1. Corpos-de-prova para os ensaios segundo a Norma API 1104

O número de corpos de prova para os ensaios mecânicos contemplados pela norma API 1104 [66] para um tubo com diâmetro maior que 12.75" (323,9 mm ) e dimensões, está resumido na Tabela 11, e a localização e ordem de extração está indicada na Fig. 33.

Tabela 11. Tipo, número e dimensão dos corpos de prova para os ensaios de qualificação do procedimento de soldagem.

Ensaio	No. CPs.	Dimensões (mm)			Detalhes
		Largura	Comprimento	Espessura	
Tração	4	25	230	Do anel	Fig. 34
Dobramento Lateral	8	Espessura do anel	230	13	Fig. 35
Nick-Break	4	25	230	Do anel	Fig. 36

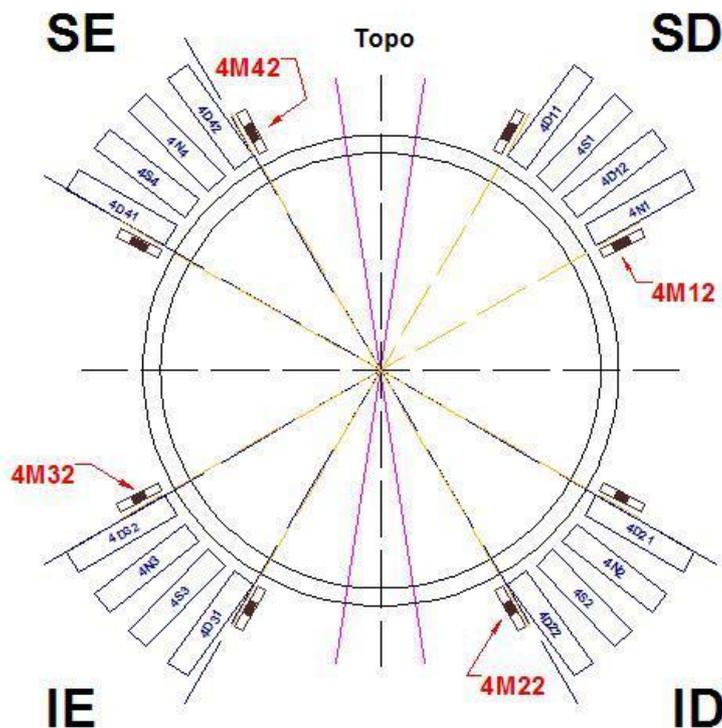


Figura 33. Localização dos corpos de prova para os ensaios de qualificação de procedimento exigidos pela norma API 1104 [66], os corpos de prova para Macrografia e dureza ao lado dos corpos de prova API 1104 [66].

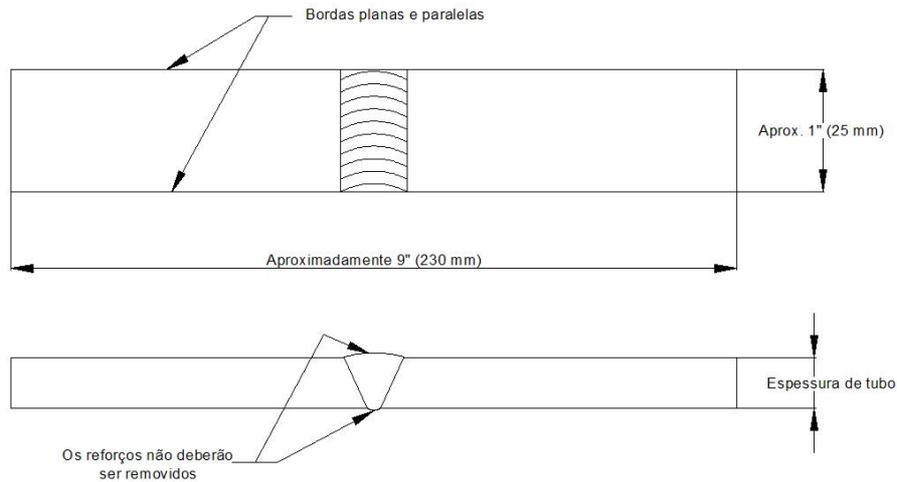


Figura 34. Dimensões do corpo-de-prova para ensaio de tração segundo a norma API 1104 [66]

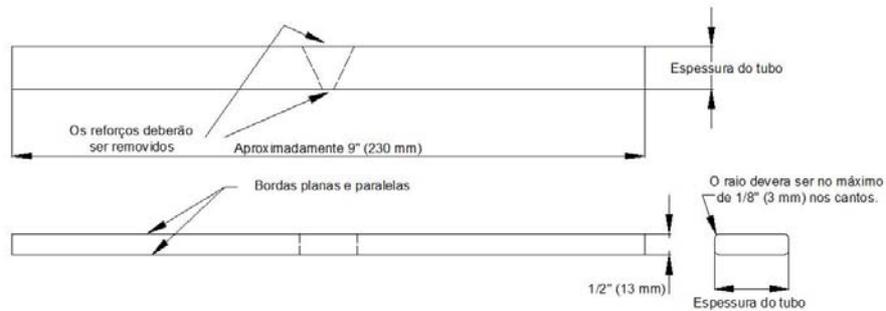


Figura 35. Dimensões do corpo-de-prova para ensaio de dobramento lateral segundo a norma API 1104 [66]

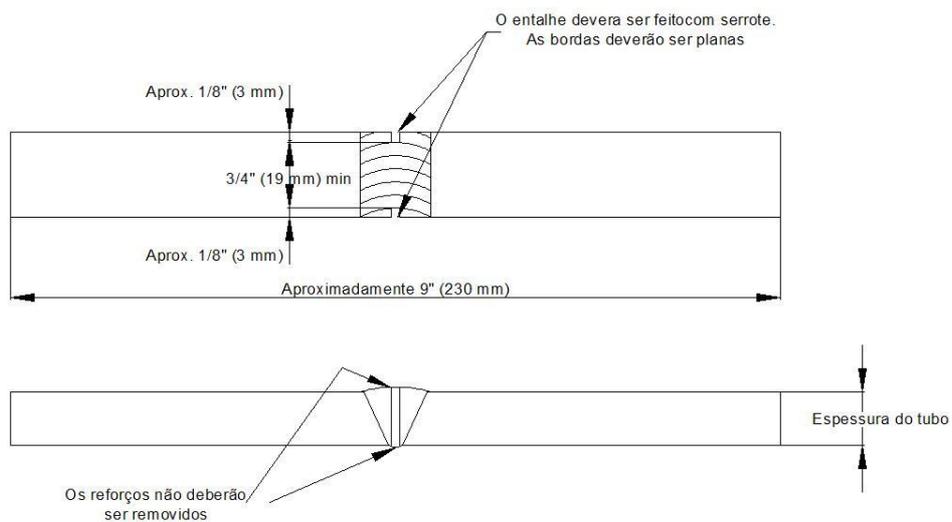


Figura 36. Dimensões do CP para ensaio de ruptura por entalhe segundo a norma API 1104 [66]

### 3.3.3.2. Corpos-de-prova para o ensaio de impacto Charpy V

Foram extraídos corpos de prova de quatro regiões diferentes, dois do material de solda correspondentes às regiões da raiz e topo, e outros da linha de fusão e ZTA, tanto do hemisfério superior como do inferior. Os ensaios de impacto foram avaliados com cinco temperaturas (0, -20, -40, -60 e -80 °C), utilizando três corpos de prova por temperatura totalizando 120 corpos de prova. O material de base foi avaliado na direção longitudinal (entalhe de propagação de trinca na posição e direção que nas outras amostras, Fig. 37), para as mesmas temperaturas utilizando três corpos de prova por temperatura e extraídas de forma aleatória na circunferência do anel, totalizando 15 corpos de prova. A Tabela 12 resume a distribuição dos corpos de prova por condição de avaliação.

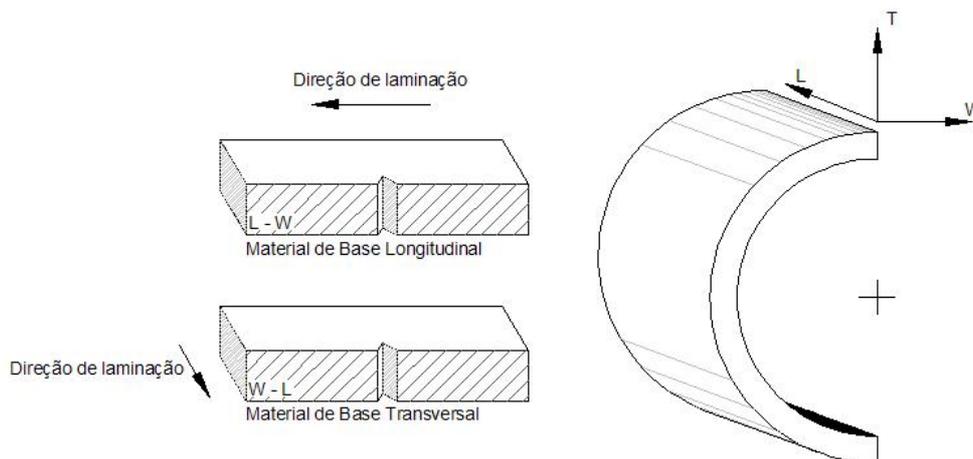


Figura 37. Posição do corpo-de-prova Charpy V para o material de base.

Tabela 12. Número de corpos de prova ensaiados por região para cada temperatura de avaliação.

Região	Temperatura (°C)					Total
	0	-20	-40	-60	-80	
Raiz	6	6	6	6	6	30
Topo	6	6	6	6	6	30
Linha de fusão	6	6	6	6	6	30
ZTA	6	6	6	6	6	30
MB Long.	3	3	3	3	3	15
Total	27	27	27	27	27	<b>135</b>

Os corpos de prova para a raiz e topo foram retirados a 1 mm e 2 mm da borda inferior e superior respectivamente, sendo o entalhe localizado no centro

do metal de solda e na direção longitudinal da junta soldada, conforme é mostrado nas Fig. 38a e Fig. 38b. Os corpos de prova obtidos para a LF e ZTA foram localizados na metade da espessura da junta soldada. Para o caso da LF, o entalhe foi localizado na intersecção de uma linha central imaginária e a LF, conforme a Fig. 38c. Para o caso da ZTA, o entalhe foi localizado no centro da distancia compreendida entre a LF e a borda da ZTA, sobre a linha central imaginária Fig. 38d.

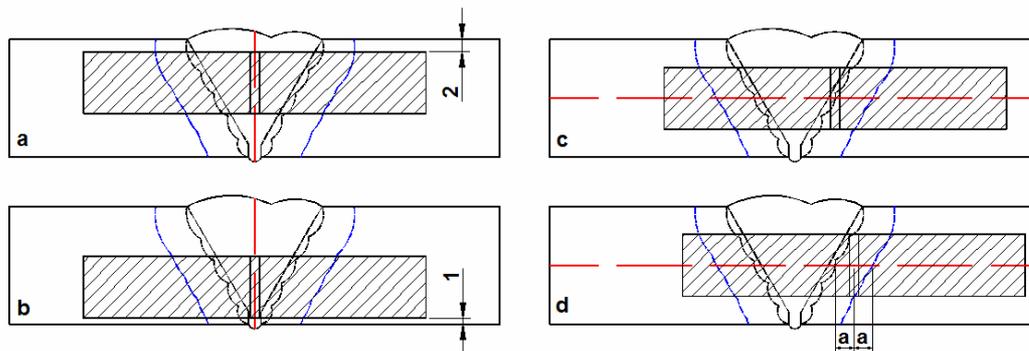


Figura 38. Localização dos corpos de prova Charpy V extraídos na junta soldada, a) Topo, b) Raiz, c) Línea de fusão e d) ZTA. Dimensões em milímetros.

A distribuição dos corpos de prova Charpy V foi realizada em duas juntas soldadas, sendo uma das juntas para as regiões de raiz e topo e a outra para as regiões da ZTA e LF. Cada quadrante é dividido em três setores, sendo cinco corpos de prova por cada setor, onde cada letra indica um tipo ou mistura de posição de soldagem, denominado P para plana, V1 para plana-vertical, V2 e V3 vertical, V4 para vertical-sobrecabeça e S para sobrecabeça, tal como foi indicado anteriormente. Na Fig. 39 pode-se observar o detalhe desta descrição antes mencionada. A distribuição dos corpos de prova por região (raiz, topo, ZTA e LF) foram obtidos de um mesmo lado da junta soldada, com a finalidade de evitar a influencia da técnica de soldagem imposta por cada soldador introduzindo uma variável não controlável, por exemplo os corpos de prova para a região da raiz foram obtidos do lado esquerdo de uma junta soldada, na sua totalidade.

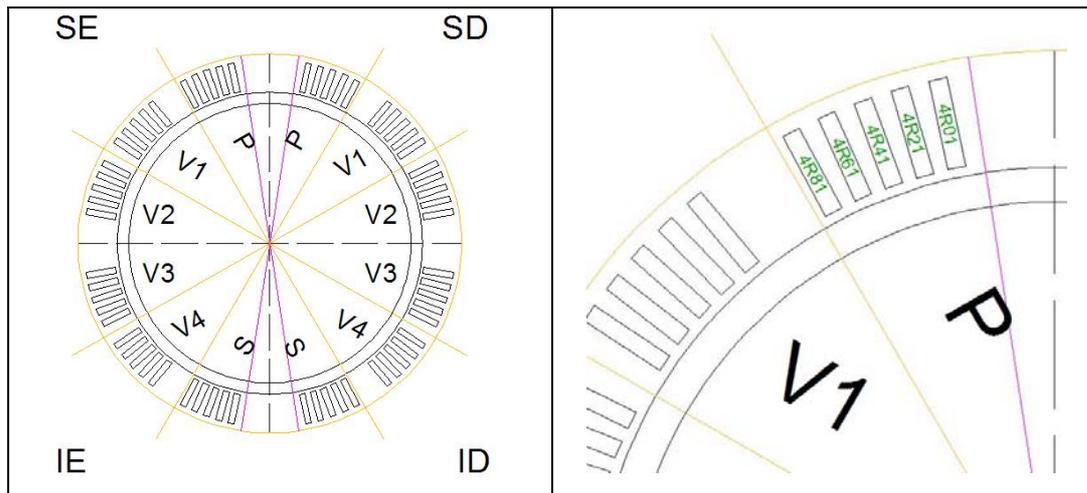


Figura 39. Distribuição de corpos de prova Charpy ao longo da Junta Soldada e imagem de detalhe da ordem e codificação dos corpos de prova em cada setor. Linhas em roxo indicam setor a ser cortado com maçarico.

### 3.3.4. Análise Fractográfica

Com a finalidade de determinar a existência de defeitos pré-existentes que possam influenciar no avanço da propagação da fratura, às superfícies de fratura dos corpos de prova Charpy V foram caracterizadas mediante o uso do microscópio eletrônico de varredura (MEV), obtendo imagens com aumento de 1000x. Foi avaliada a superfície do corpo-de-prova que obteve uma absorção de energia próxima ao valor médio para cada região a uma dada temperatura. Devido ao fato que a propagação da fratura, em geral, se dá sobre um plano de zonas compartilhadas (ZTA, metal de solda e/ou metal de base), foi adotado um esquema de captura de imagens, apresentado na Fig. 40, onde os quadros 1, 2 e 3 avaliam o tipo de propagação de trinca imediatamente a frente do entalhe para cada zona e os pontos restantes 4, 5 e 6 avaliam a característica da propagação na mistura das zonas.

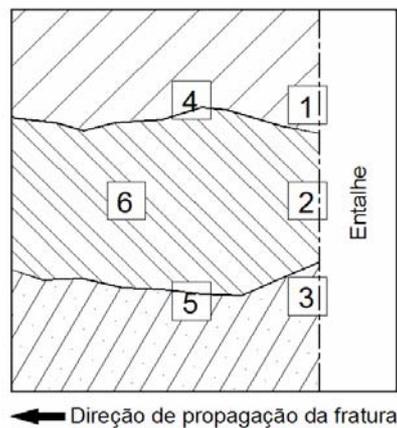


Figura 40. Distribuição de pontos para a caracterização da superfície fratura após ensaio de impacto Charpy V.

### 3.3.5. Ensaio Metalográfico

Nesta etapa da avaliação da JS, procura-se relacionar as propriedades mecânicas com a estrutura metalúrgica e a sua composição química, mediante uma análise dos aspectos macroscópico e microscópico.

Cada amostra foi lixada manualmente, utilizando lixas a água com granulometria de 220, 320, 400 e 600, fazendo uma mudança na direção de lixamento de 90° ao mudar para uma lixa de menor granulometria, exercendo uma pressão mínima necessária. Finalmente as superfícies foram polidas de maneira semi-automática utilizando pasta de diamante de 6 µm e 3 µm.

#### 3.3.5.1. Análise Macrográfica

Nesta etapa avaliam-se os possíveis defeitos existentes na junta soldada, dimensões do tamanho da ZTA e dimensões da geometria do cordão de solda, determinando as regiões críticas para uma análise de micrografia detalhada.

As amostras polidas foram atacadas com uma solução de Nital 2% por 5 segundos, secas e recobertas com um filme de verniz incolor para preservar a superfície atacada. Posteriormente se obtiveram as imagens destas superfícies mediante uma varredura de superfície (scanning) com resolução de 2400 x 2400 pontos por polegada em escala 1:1.

O critério de medida para a altura de cordão é considerando a borda inferior da junta soldada até a altura média do passe de raiz para o caso do processo MAG-CCC ou até a altura média do passe quente para o caso do

processo FCAW-G. Para as medidas da ZTA foram tomadas duas medidas em cada ZTA para o processo FCAW-G e uma medida em cada ZTA para o processo MAG-CCC. Sendo efetuadas todas as medições mediante o programa AutoCAD ® 2004, tal como se ilustra na Fig. 41. No caso dos defeitos encontrados, estes foram associados e aproximadas a geometrias básicas para determinar suas dimensões.

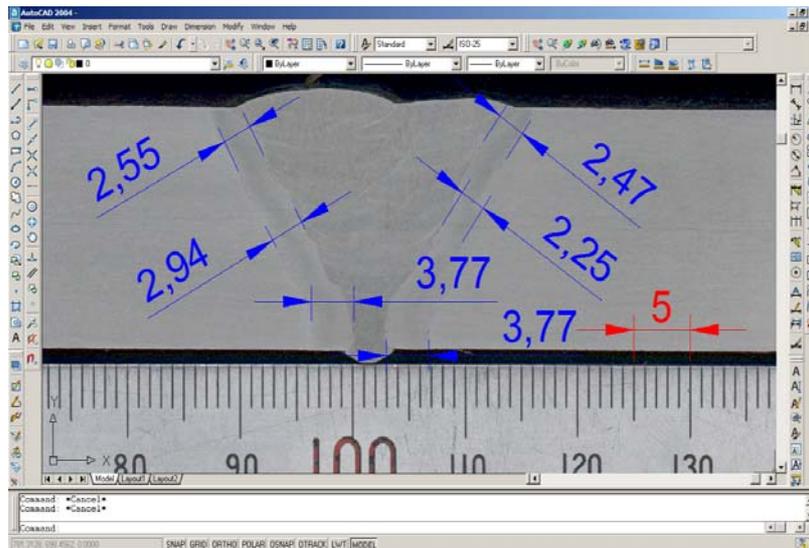


Figura 41. Medições da geometria da JS pelo programa AutoCAD ® 2004.

### 3.3.5.2. Análise Micrográfico

Nesta etapa avalia-se a microestrutura de todas as regiões da junta soldada, havendo um maior interesse na região da ZTA e metal de solda. Para a análise microestrutural por microscopia ótica (MO) foi utilizada solução Nital 2%, por 5 a 10 segundos, e para microscopia eletrônica por varredura (MEV) foi utilizado um ataque eletrolítico duplo, segundo o utilizado por Ikawa [68] (primeiro ataque: 5g de EDTA, 0,5 g de NaF e 100 ml de água destilada a 5V por 15 segundos; segundo ataque: 5g de ácido Picrico, 25 g de NaOH e 100 ml de água destilada a 5V por 100 segundos), para determinar a presença do constituinte A-M. As zonas de maior interesse foram a região de grãos grosseiros e a região intercrítica da ZTA associada ao passe de raiz e demais passes.

O procedimento seguido foi segundo o esquema na Fig. 42, onde no caso do metal de solda se obtiveram imagens de quatro regiões, denominadas como S1, S2, S3 e S4. Onde em S1 avaliam-se as mudanças ocorridas na ZTA associada ao passe de raiz, metal de solda do passe raiz e mudança no passe de raiz associado ao passe quente. Para S2, S3 e S4 se avalia a microestrutura associada aos passes e a sua influencia nos passes anteriores. Para o metal de base existe uma única região, M1, para comparar as mudanças existentes nessa amostra. Na região da ZTA se obtiveram imagens em três regiões, denominadas Z1, Z2 e Z3, avaliam-se as mudanças ocorridas associada ao aquecimento dos ciclos térmicos da soldagem multipasse. Em cada uma destas regiões, procura-se ter um mapa microestrutural da linha de fusão e das sub-regiões dentro da região da ZTA (região crítica, intercrítica e subcrítica), segundo o esquema apresentado na Fig. 43.

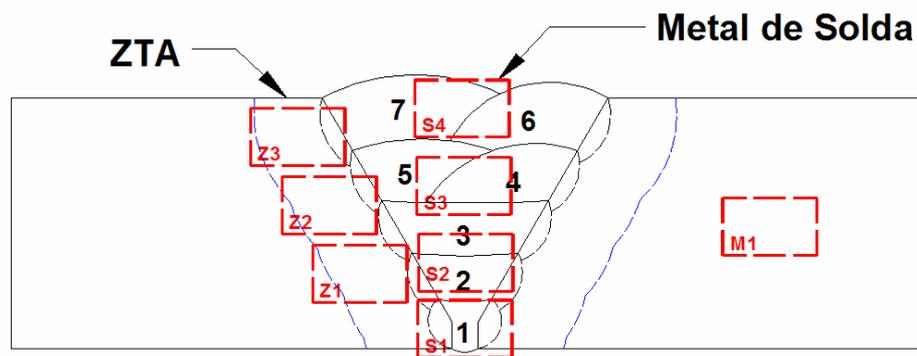


Figura 42. Distribuição de áreas para obtenção de imagens microestruturais mediante MO e MEV.

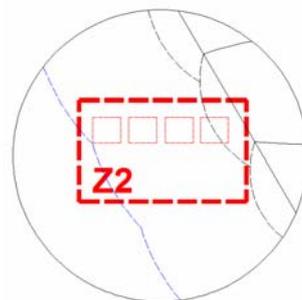


Figura 43. Distribuição das sub-regiões dentro da região ZTA. Da direita para a esquerda: Linha de fusão, Região Crítica, Região Intercrítica e Região Subcrítica.

As imagens obtidas por o MO foram realizadas com aumento de 500X e no caso do MEV com aumento de 3000X. Foram realizadas 36 imagens por

amostra, envolvendo todas as diferentes regiões da junta soldada para avaliar com maior confiabilidade a influencia do aporte de calor. Para isso foram utilizadas quatro amostras, uma por quadrante (4M12, 4M22, 4M32 e 4M42), de modo a cobrir quase todas as posições de soldagem, conforme mostrado na Fig. 33. Para a caracterização das imagens obtidas pelo MO de cada região da junta do metal de solda foi utilizado o critério de classificação de juntas soldadas para aços ferríticos adotado pela guia IIW Doc. No. IX-1533-88 [69].

Para o caso das imagens obtidas por MEV, para contabilizar a presença do microconstituente A-M que aparece em relevo na matriz ferrítica, branco brilhante comparado à cor escura da matriz. Foi usado o programa para processamento digital de imagens KS400 versão 3.0. desenvolvido pela Carl Zeiss Vision GmbH. A partir de uma imagem binária obtida da imagem original, e mediante sucessivas erosões e reconstruções, foi obtida uma imagem o mais representativa do constituinte A-M, na qual foi determinada a porcentagem de fração do constituinte A-M para a região em estudo. Esta imagem obtida apresentou áreas perdidas ou acrescentadas durante o processamento da imagem. Na Fig. 44 se observa a imagem obtida mediante o MEV e a imagem processada, sobre a qual é contabilizada as áreas representativas do constituinte A-M.

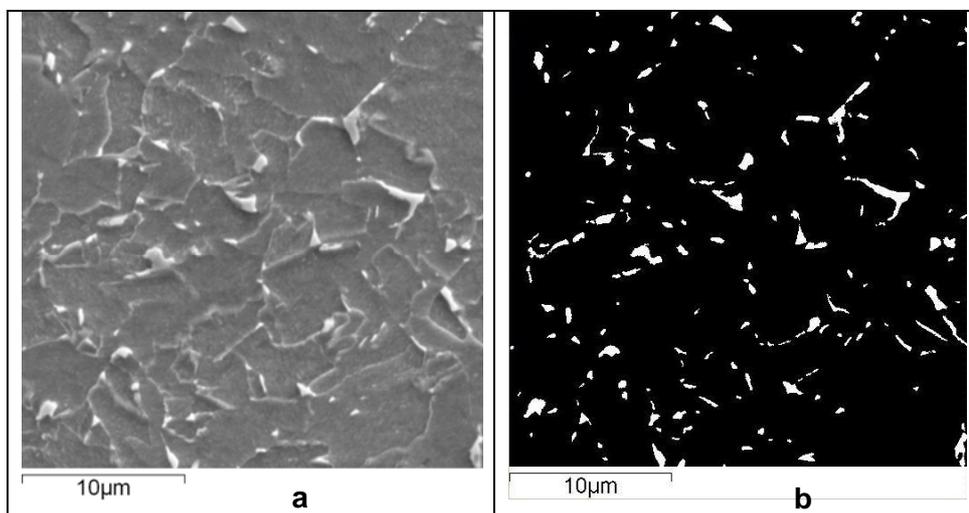


Figura 44. a) Imagem original obtida mediante o MEV, e b) Imagem binária obtida mediante o processamento digital da imagem original, sobre a qual se contabilizam as áreas do microconstituente A-M.

### 3.3.6. Análise Química

Foi realizada a análise química por espectrometria de emissão atômica de plasma de argônio induzido, em três regiões, Fig. 45, passe de raiz, passes de enchimento e de acabamento. O diâmetro de queima para cada região foi de 6 mm e a finalidade desta análise foi com a finalidade de relacionar o conteúdo de certos elementos de liga que possam ter afetado nos resultados dos ensaios mecânicos, assim como prever baseado nos fundamentos teóricos-práticos a formação de estruturas frágeis que possam levar à junta soldada a trincamento.

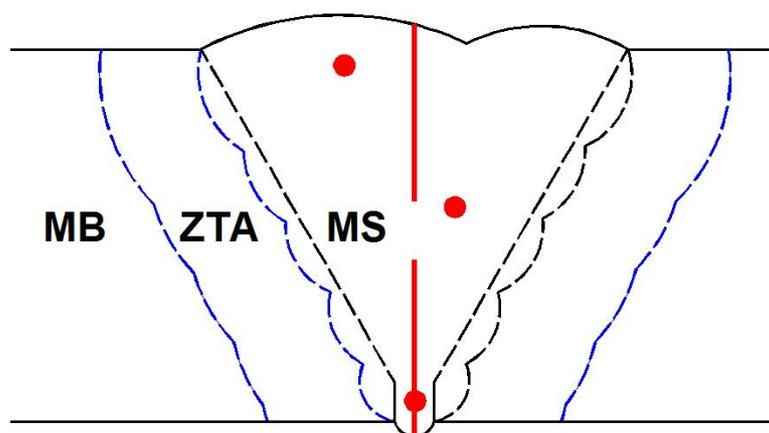


Figura 45. Regiões com pontos em cor vermelha indicam onde foi realizado as análises químicas na junta soldada.