

3 - Metodologia Experimental

Neste capítulo serão apresentados os materiais e métodos que foram utilizados durante o desenvolvimento deste trabalho.

3.1. Descrição do método experimental

Para a realização deste trabalho foram reproduzidos ciclos térmicos de soldagem com vários aportes de calor para fazer um estudo das regiões da zona termicamente afetada (ZTA) equivalente ao de uma solda de vários passes. Empregando como ferramenta principal o simulador termomecânico Gleeble 3800®, a qual pertence ao Laboratório Nacional de Nanotecnologia de Brasil (LNNano) como se mostra na **Figura 3-1**, foram reproduzidas todas as regiões da ZTA.



Figura 3-1 Equipamento Gleeble ®3800.

De modo a se obter uma comparação com a ZTA de soldas reais, foram utilizados os mesmos parâmetros utilizados nas soldas circunferências realizadas por Branco [87], em aços API 5L X80 dos sistemas Nb-Cr-Mo e Nb-Cr.

3.2. Características das amostras empregadas na simulação

Para a execução das simulações de soldagem foram utilizados aços de alta resistência API 5L X-80 pertencentes aos sistemas Nb-Cr-Mo e Nb-Cr com uma espessura de 16 mm (0,63 polegadas). Estes aços foram fabricados utilizando o processo de laminação controlada sem resfriamento acelerado (TMCP–Thermomechanical Controlled Process).

Corpos de prova retangulares foram usinados das chapas de aço para as dimensões de (10x10x71) mm, como mostrado na **Figura 3-2**, para realizar o processo de simulação. As propriedades mecânicas dos aços usados API 5L X 80 pertencentes a os sistemas Nb-Cr-Mo e Nb-Cr estão na Tabela 3-1, já a composição química e carbonos equivalente na **Tabela 3-2**.

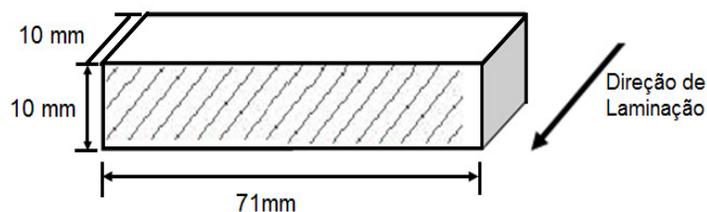


Figura 3-2 Dimensões de corpos de prova para a simulação de soldagem.

Tabela 3-1 Propriedades mecânicas dos aços API 5L X80 Nb-Cr-Mo e Nb-Cr.

Sistema	LE (MPa)	LR (MPa)	LE/LR
Nb-Cr-Mo.	545	671	0,81
Nb-Cr	496	631	0,79

Tabela 3-2 Composição química do aço API 5L X80 do sistema Nb-Cr-Mo e Nb-Cr.

Composição Química		
Elementos (% em peso)	Sistemas	
	Nb-Cr-Mo	Nb-Cr
C	0,042	0,041
Mn	1,680	1,89
Si	0,164	0,19
P	0,022	0,028
S	0,0026	0,0024
Cr	0,231	0,359
Ni	0,026	0,03
Mo	0,135	0,02
Al	0,033	0,033
Cu	0,011	0,011
Co	0,002	0,0015
Nb	0,057	0,067
V	0,001	0,001
Ca	0,003	0,0019
Ti	0,012	0,016
Bi	0,002	0,002
N	0,006	0,006
O	0,002	0,0018
B	0,0005	0,0005
IIW (%)	0,40	0,43
Pcm(%)	0,16	0,17

3.3. Características das amostras empregadas na soldagem real

Para a execução da soldagem circunferencial realizada por Branco [87], foram utilizados eletrodos revestidos e tubos com 762 mm (“30”) de diâmetro, e 16 mm de espessura, conformados pelo processo U-O-E. O material utilizado foi um aço API 5L X80 pertencente ao sistema Nb-Cr-Mo, cuja composição química é apresentada na **Tabela 3-3**.

Tabela 3-3 Composição química da chapa utilizada para a fabricação do tubo.

Elementos (% em peso)									
C	Mn	Si	Nb	Ti	Cr	Mo	Ni	P	S
0,07	1,76	0,18	0,071	0,014	0,20	0,16	0,02	0,02	0,005

3.4. Parâmetros de simulação de soldagem

A etapa mais crítica em um processo de simulação de soldagem é a escolha dos parâmetros de trabalho. Estes parâmetros de simulação devem ser compatíveis com parâmetros das soldas reais e devem garantir repetibilidade e qualidade em um processo de simulação [59]. Como já foi apresentado na revisão bibliográfica, existe uma diversidade de modelos para o estudo da ZTA na máquina Gleeble 3800®. A complexidade destes modelos aumenta à medida que aumentam as variáveis de um determinado processo representando melhor a realidade.

O modelo de simulação empregado para a obtenção das regiões da ZTA e as curvas dos ciclos térmicos de soldagem foi dado pela curva Rykalin 3-D, este modelo foi escolhido por ter uma maior quantidade de variáveis que controlam o processo de soldagem e por ser mais compatível com parâmetros mais específicos do modelo como a espessura da chapa. As equações que regem este modelo foram apresentadas no item (2.5.2).

Para o estudo da ZTA foram empregados 180 corpos de prova para os dois sistemas, sendo que os parâmetros embasados na execução de soldas reais (Tabela 3-4 Parâmetros empregados na simulação de soldagem.Tabela 3-4).

Tabela 3-4 Parâmetros empregados na simulação de soldagem.

Parâmetros dos ciclos térmicos da ZTA				
Regiões da ZTA	(RGGI)	(RGRRS)	(RGGRI)	(RGGRS)
Velocidade de aquecimento (1 e 2 passe)	200°C/s	200°C/s	200°C/s	200°C/s
Primeira temperatura de pico (1 passe)	1350°C	1350°C	1350°C	1350°C
Segunda temperatura de pico (2 passe)	1200°C	1000°C	800°C	600°C
Tempo de espera em ambos passes	1s	1s	1s	1s
Temperatura de preaquecimento	150°C	150°C	150°C	150°C
Aporte de calor	1,2 kJ/mm	1,2 kJ/mm	1,2 kJ/mm	1,2 kJ/mm
	2,5 kJ/mm	2,5 kJ/mm	2,5 kJ/mm	2,5 kJ/mm
	-	-	3,0 kJ/mm	-
	-	-	4,0 kJ/mm	-
Resfriamento livre após 2 passe	200°C	200°C	200°C	200°C
Modelo utilizado	Rykalin 3D	Rykalin 3D	Rykalin 3D	Rykalin 3D

Foram utilizados na simulação de soldagem os valores das propriedades físicas do aço API 5L X 80, (Tabela 3-5). Estas variáveis foram utilizadas para determinar o ciclo térmico de soldagem. Materiais de menor condutividade térmica dissipam o calor por condução mais lentamente, tendendo a apresentar gradientes térmicos mais abruptos no aquecimento e menores velocidades de resfriamento. Por outro lado materiais de elevada condutividade térmica, dissipam rapidamente o calor, exigindo fontes de calor mais intensas.

Tabela 3-5 Propriedades físicas do aço API 5L X80.

Densidade (g/cm ³)	Calor Específico (J/g.°C)	Condutividade Térmica (J/cm.s°C)
7,8	0,576	0,41

3.5. Parâmetros da soldagem real

O processo de soldagem utilizado por Branco [87] foi de eletrodo revestido (SMAW) com uma soldagem multipasse. Foram utilizados diferentes aportes de calor, para diferentes passes conforme mostrado na Tabela 3-6.

Para fazer a comparação das diferentes regiões entre a ZTA real e simulada, foi utilizado um aporte de calor de 1,2 kJ/mm correspondente aos passes de enchimento e de acabamento.

Tabela 3-6 Parâmetros do processo de soldagem real.

Passo	Eletrodo	Tensão (v)	Corrente (A)	Aporte de calor (KJ/mm)
Raiz	E-6010 ϕ 4 mm	27	130	0,9
Quente	E-9010G ϕ 4 mm	27	135	0,9
Enchimento	E-10018 ϕ 4,5 mm	25	200	1,2
Acabamento	E-10018 ϕ 4,5 mm	25	195	1,2

3.6. Execução da simulação

Corpos-de-prova conforme Figura 3-2 foram submetidos a ciclos térmicos de soldagem para reproduzir as regiões da ZTA, empregando aportes de calor de (1,2- 2,5- 3,0- 4,0) kJ/mm. A simulação da ZTA foi realizada na máquina Gleeble® 3800 empregando o modelo da curva Rykalin 3D para o processo de soldagem por eletrodo revestido SMAW.

A primeira etapa para iniciar a simulação é a preparação do corpo de prova. Um termopar tipo “S” constituído de dois fios, Platina (-) e Platina 10% - Ródio (+), são soldados na parte central do corpo de prova com o soldador de termopar de modelo (3S50) Figura 3-3. O objetivo do termopar é o controle das mudanças de temperatura geradas pelo transformador no meio do corpo de prova. Deste modo, será determinada a curva de ciclos térmicos em acordo com os parâmetros de soldagem previamente estabelecidos.

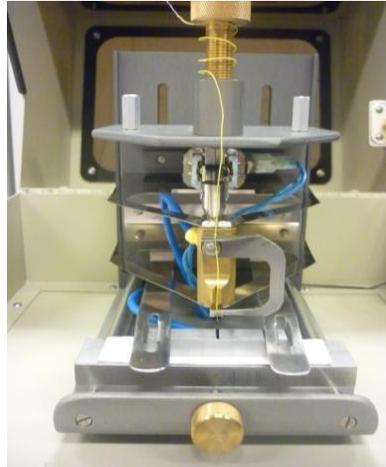


Figura 3-3 Soldador de termopar, modelo 3S50.

O corpo-de-prova com o termopar soldado é introduzido na câmara da máquina e fixado por duas garras de cobre (**Figura 3-4**). As duas garras de cobre são utilizadas como condutor da corrente através do corpo-de-prova, além de extrair rapidamente o calor na etapa de resfriamento, quando a corrente é interrompida.

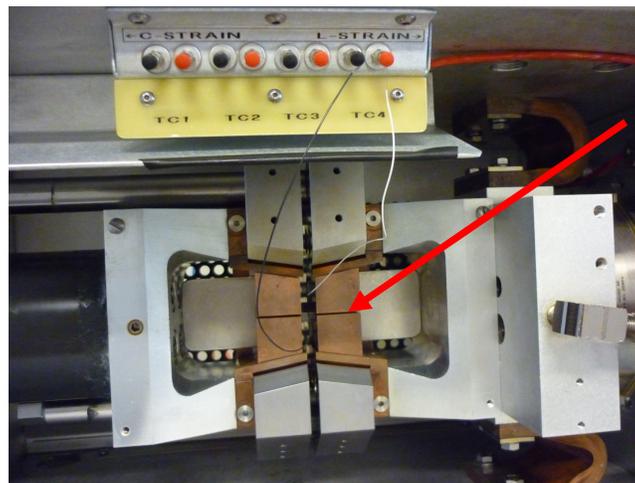


Figura 3-4 Câmara interna do simulador termomecânico Gleeble 3800®, mostrando as garras de cobre (indicadas pela seta).

Para simular o primeiro passe, um aquecimento foi realizado a uma velocidade de 200 °C/s até atingir a temperatura de pico $T_{P1} = 1350$ °C, levando o material até a temperatura de austenização. Este aquecimento é dado pela própria resistência do corpo de prova à passagem de uma corrente elétrica gerada por um transformador. Esta temperatura de pico foi mantida durante o tempo (t) de 1s para homogeneizar toda a região aquecida. Em seguida o resfriamento da amostra é realizado por meio das garras de cobre refrigeradas por água, até atingir uma temperatura de 200°C, sendo depois do resfriada a livremente até 150°C.

Para o segundo passe, o ciclo térmico se inicia a partir da temperatura final do primeiro passe (150°C), sendo mantidos quase os mesmos parâmetros de soldagem, variando somente a temperatura de pico final T_{P2} .

Para a segunda temperatura de pico, T_{P2} , foram avaliadas as temperaturas de 600, 800, 1000, 1200 °C. Estas temperaturas representam as diferentes regiões da ZTA de uma solda multipasse, conforme mostrado na Tabela 3-7. As temperaturas de pico, (T_{P2}) se encontram em função das temperaturas críticas de transformação, as quais foram calculadas a partir das equações 2-1 e 2-2. Assim, as temperaturas críticas do sistema Nb-Cr-Mo são $A_{C1}=713$ °C e $A_{C3}=874$ °C, e do sistema Nb-Cr são $A_{C1}=715$ °C e $A_{C3}=872$ °C.

Tabela 3-7 Relação da segunda temperatura de pico TP_2 com as regiões da ZTA.

Denominação das regiões reaquecidas	(Tp2) (°C)	Relação de TP_2
Região de grãos grosseiros reauecidos subcriticamente (RGGRS)	600	$TP2 < A_{C1}$
Região de grãos grosseiros reauecidos intercriticamente (RGGRI)	800	$A_{C1} < TP2 < A_{C3}$
Região de grãos refinados reauecidos supercriticamente (RGRRS)	1000	$TP2 > A_{C3}$
Região de grãos grosseiros Inalterados (RGGI)	1200	$TP2 \gg A_{C3}$

3.7. Execução da solda real

Muito embora, neste trabalho não tenha sido realizada a soldagem circunferencial, a descrição desta será realizada apenas para fornecer informações á respeito da soldagem real com a qual será comparada as simulações realizadas.

O processo mais empregado para soldagem circunferencial de tubos em campo no Brasil é o processo com eletrodo revestido SMAW, tanto para o passe de raiz como para os passes de enchimento e acabamento [87].

A soldagem circunferencial foi executada na posição vertical descendente com dois soldadores atuando de forma simultânea, a partir da posição superior do tubo em condições similares às condições de montagem em campo, tubo fixo na posição horizontal. A geometria da junta utilizada e a sequência de passes é apresentada na **Figura 3-5**

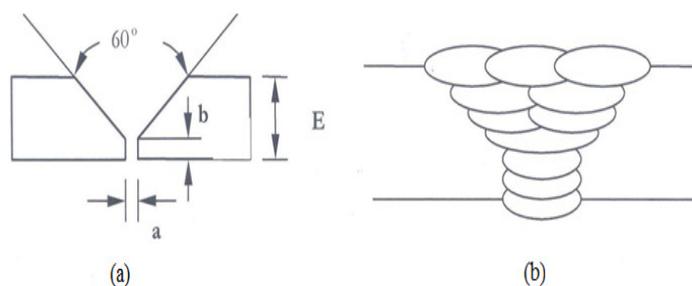


Figura 3-5. (a) Geometria da junta circunferencial, onde $a= 3\text{mm}$, $b= 2.5\text{mm}$, $E= 16\text{mm}$; (b) sequência de passes.

3.8. Codificação para a avaliação da ZTA

A codificação dos corpos de prova utilizado no processo de simulação é mostrado na Tabela 3-8. Esta codificação considera os principais parâmetros utilizados na execução da simulação de soldagem.

Tabela 3-8 Codificação dos corpos de prova empregados no processo de simulação e no ensaio de impacto Charpy V.

Aço	Código	H (KJ/mm)	Código	Tp2 (°C)	Código	N° Correlativo	Codigo	Temperatura Charpy (°C)	Código
Nb-Cr-Mo	A	1,2	1	1200	W	Amostra 1	1	-40	0
Nb-Cr	B	2,5	2	1000	X	Amostra 2	2	-60	2
		3,0	3	800	Y	Amostra 3	3		
		4,0	4	600	Z	Amostra 4	4		
						Amostra 5	5		
						Amostra 6	6		
						Amostra 7	7		
						Amostra 8	8		
						Amostra 9	9		

Como exemplo da codificação, o corpo de prova A1X6, indica o seguinte: A letra (A) indica que foi utilizado o aço Nb-Cr-Mo, o código (1) o aporte de calor

de 1,2 KJ/mm, a letra (X) indica a segunda temperatura de pico de 1000°C e finalmente o ultimo digito (6) indica o numero da amostra.

A seleção dos corpos de prova da ZTA da solda real para a comparação, com a ZTA simulada foram extraídos de quatro regiões diferentes, como mostrado na Figura 3-6, superior direito (SD), inferior direito (ID), inferior esquerdo (IE) e superior esquerdo (SE), segundo a norma API- 1104 [88]. A Tabela 3-9 mostra a codificação destes corpos de prova.

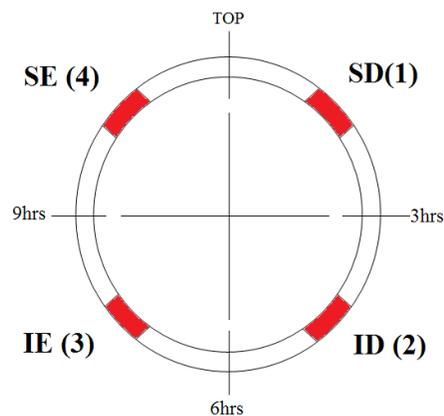


Figura 3-6 Localização da extração dos corpos de prova segundo a norma API-1104

Tabela 3-9 Codificação dos corpos de prova da soldagem real

Aço	Código	Quadrante	Código
Nb-Cr-Mo	C	Primeiro (SD)	1
		Segundo (ID)	2
		Terceiro (IE)	3
		Quarto (SE)	4

3.9. Análise Metalográfica

A microestrutura dos corpos de prova simulados e reais foram caracterizados por microscopia ótica (MO), e microscopia eletrônica de varredura (MEV). A **Figura 3-7** mostra a area analisada para os corpos de prova simulados (a) e a solda real (b).

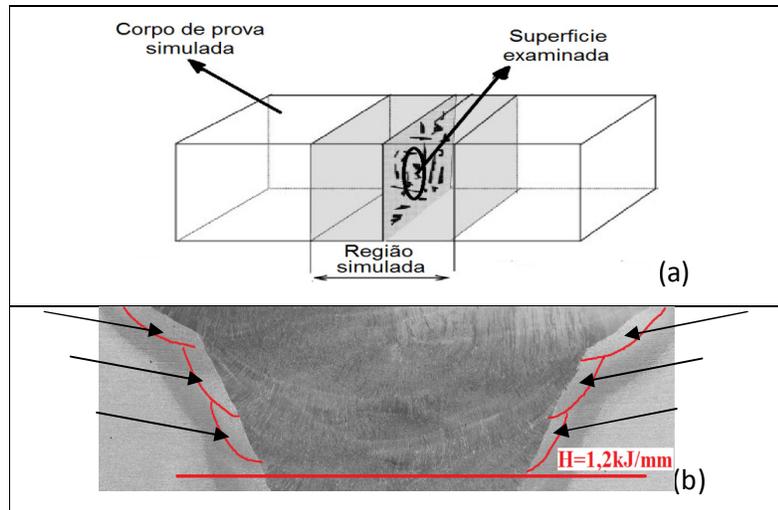


Figura 3-7 Superfície examinada nos corpos de prova simulados (a) e real (b) por MO e MEV.

3.9.1. Microscopia Ótica (MO)

Com o objetivo de determinar a diferença entre os comprimentos de uma ZTA real e simulada, foram realizados mosaicos em corpos de prova simulados e reais, cujas imagens foram processadas pelo software Axio Vision. O aumento utilizado para a captura das imagens foi de 20X e o método utilizado para a captação das imagens foi baseada na elaboração de mosaicos. As amostras foram preparadas pelo método de lixamento convencional, e o reagente utilizado foi nital 2%.

Para avaliar microestruturalmente as diferentes regiões da ZTA da solda real e simulada, as amostras foram preparadas pelo método convencional de lixamento e polidas com pasta de diamante até $1\mu\text{m}$ seguido de ataque químico com reagente nital 2%. O microscópio utilizado para a caracterização microestrutural foi da marca Zeiss, modelo Axioskop, e as imagens foram processadas pelo software Axio Vision.

3.9.2. Microscopia Eletrônica de varredura (MEV)

Para revelar a presença do microconstituente AM, foi utilizado o microscópio eletrônico de varredura (MEV), onde as imagens foram obtidas com um aumento de 3000X. Na preparação dos ataques foi utilizado um ataque denominado Lepera modificado, a qual consiste de uma combinação do segundo ataque eletrolítico de IKAWA e o ataque denominado Lepera descritos na Tabela

3-10. No primeiro estagio, a amostra e atacada com nital 2% para revelar o contorno de grão. No segundo estagio e utilizado o segundo ataque eletrolítico de IKAWA, onde os carbonetos são preferencialmente atacados, de modo que apareçam como depressões na matriz ferrítica, colocando o AM em relevo. Na ultima etapa o ataque LePera tem a função de fazer uma diferenciação entre as fases por coloração, deixando o AM de cor branco.

Tabela 3-10 Ataques químicos utilizados no MEV.

Ataque Químico	Descrição	Indicações
LePera	Solução 1: 1g de metabissulfito de sódio 100 ml de água destilada Solução 2: 4g de ácido pícrico 100 ml de álcool etílico Mistura 1:1 Pré-ataque: <i>Nital</i> 2%	Diferencia as microestruturas em função da diferença de coloração
Ataque eletrolítico duplo IKAWA	Ataque 1: (6V; 10s) Solução 1: 5 g EDTA 0,5 fluoreto de sódio 100 mL água destilada Ataque 2: (7V; 135s) Solução 2: 5g ácido pícrico 25g hidróxido de sódio 100 ml água destilada	A solução 1 revela os contornos de grão de ferrita e a solução 2 ataca preferencialmente carbonetos deixando o constituinte AM em alto relevo, observação no MEV.

3.10. Ensaios de Impacto Charpy-V

Os ensaios Charpy foram realizados a temperaturas de -40 e -60 °C. 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 $\pm 1^\circ\text{C}$ da temperatura de avaliação. O equipamento usado para realizar este ensaio foi uma máquina de impacto WPM com escala de 300 J.

Os corpos de prova para o estudo das quatro regiões da ZTA seguem a distribuição mostrada na **Tabela 3-11**, totalizando 136 CP's.

Tabela 3-11 Distribuição dos corpos de prova Charpy para cada região da ZTA

Região da ZTA	N° CP's
RGGI	28
RGRRS	28
RGGRI	52
RGGRS	28

Os corpos de prova simulados inicialmente com dimensões de (10x10x71) mm foram usinados para dimensões de (10x10x55) mm seguindo a norma para o ensaio de impacto ASTM E-23 [89]. As dimensões do corpo de prova e do entalhe utilizado são mostradas na Figura 3-8

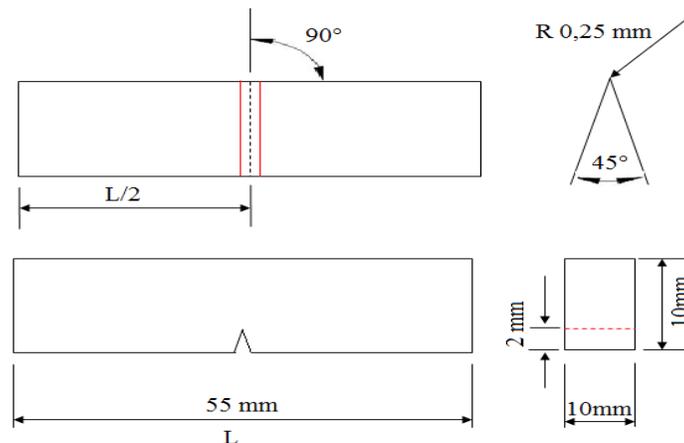


Figura 3-8 Dimensões do corpo de prova Charpy V segundo a norma ASTM E23.

3.11. Caracterização Metalográfica e Fractográfica dos corpos de prova Charpy

As superfícies de fratura dos corpos de prova Charpy foram caracterizadas por macrografia (fotografia) e fractografia (MEV). Foram avaliadas as superfícies de fratura dos corpos de prova Charpy que atingiram a maior e menor energia absorvida para uma determinada condição de simulação.

3.11.1. Análises de fratura interna dos corpos de prova Charpy

Depois de submetidos os corpos de prova simulados a ensaios de impacto Charpy, os corpos de prova foram submetidos a um corte transversal (**Figura 3-9**)

para de verificar as possíveis formações de trincas secundárias nas diferentes regiões da ZTA para uma dada condição de simulação. O corte foi realizado tendo como base a norma API RP 2Z (1998) [90].

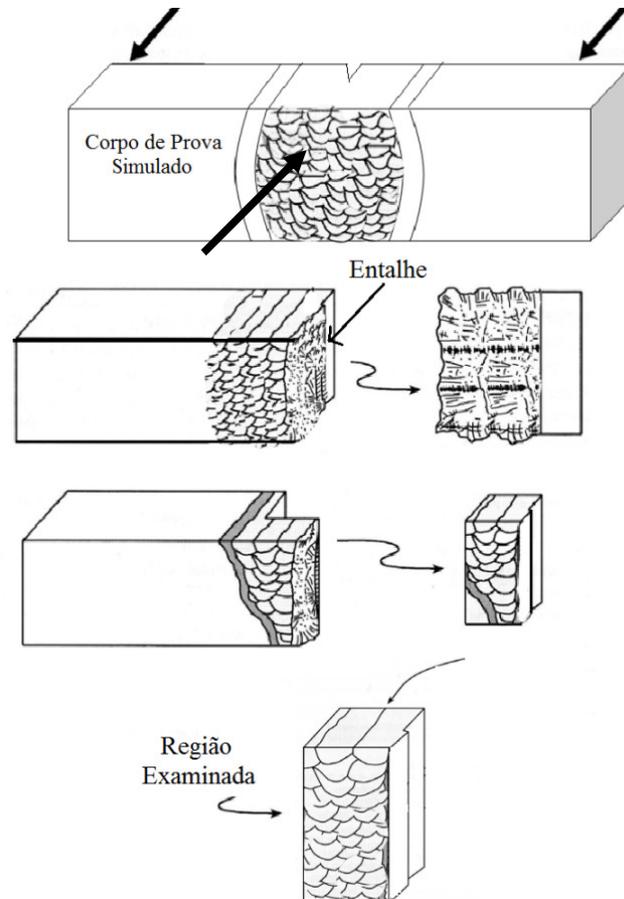


Figura 3-9 Desenho do corte realizado nos corpos de prova segundo a norma API RP2Z.

3.12. Ensaio de microdureza Vickers (HV)

O perfil de microdureza da ZTA real e simulada foi realizado a fim de verificar a variação de dureza entre as diferentes regiões da ZTA.

Na ZTA real a região considerada foi a parte central e superior, por ser esta região soldada com um aporte de calor de 1,2kJ/mm. A **Figura 3-10** mostra de forma esquemática a região da ZTA, onde foram medidos seis pontos em cada linha horizontal, denominada eixo 1, 2, 3 respectivamente. O primeiro ponto de microdureza da ZTA é medido a uma distância de 0,2 mm da linha de fusão, e os

subsequentes pontos de medida encontram-se afastados a 0,5 mm. O perfil de microdureza foi desenhado com base na norma Petrobras N-133 [69].

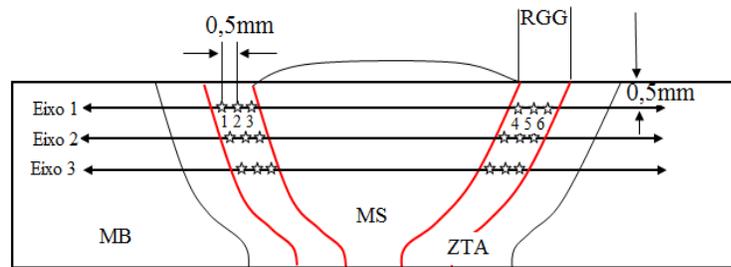


Figura 3-10 Desenho esquemático dos pontos de medidas de dureza da solda real.

Para obter o perfil de microdureza nos corpos de prova simulados foi considerada a parte central do corpo por ser esta a região de interesse. A ZTA simulada possui uma ZTA mais extensa que a ZTA real, sendo assim, considerados sete pontos a uma distancia de 1 mm, entre cada ponto como mostrado na **Figura 3-11**

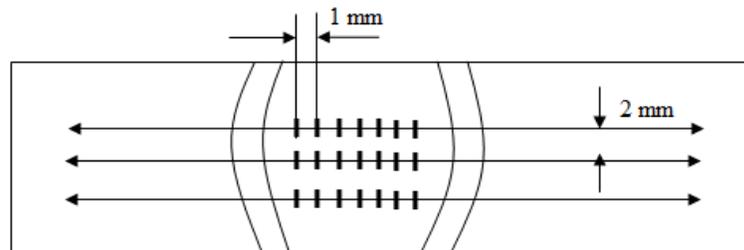


Figura 3-11 Desenho esquemático dos pontos de medidas de dureza da solda simulada.