

3- Materiais e Métodos

3.1. Caracterização do Material

3.1.1. Material

Os materiais utilizados neste trabalho foram retirados de dois tubos de aço produzido pela Confab que atende a especificação API 5L no grau X-80, com espessura de 16 mm (0,63 polegadas) e diâmetro de 812,80mm (32 polegadas). Os aços utilizados para confecção dos tubos pertencem à classe dos aços de alta resistência e baixa liga (ARBL), produzido industrialmente como chapa grossa pelo processo de laminação controlada. A composição química e as propriedades mecânicas dos aços utilizados estão descritas nas tabelas 2 e 3 respectivamente.

Material	Composição Química							
	C	Mn	Si	Nb	Ti	Cr	Mo	N
Aço A	0,04	1,86	0,19	0,075	0,017	0,33	0,03	0,005
Aço B	0,07	1,76	0,18	0,071	0,014	0,20	0,16	0,006
M.S(P.I)*	0,08	1,97	1,97	0,045	0,010	0,17	0,283	-
M.S(P.E)*	0,07	1,86	1,86	0,044	0,015	0,16	0,300	-
	(% em Peso)							
	P	S	Al	Cu	V	Ni	Ca	
Aço A	0,02	0,005	0,003	0,01	0,005	0,002	0,001	
Aço B	0,02	0,005	0,003	0,01	0,005	0,002	0,001	

*M.S (P.I) e M.S(P.E): São respectivamente Metal de Solda Passe Interno e Passe Externo

Tabela 2 – Composição química dos aços utilizados

Aço	LE (MPa)	LR (MPa)	Alongamento(%)	Cp's transversais (68J a 0°C, norma API Jul/00)			
				T = -20°C	T = -40°C	T = -60°C	T = -80°C
A	585	658	28	221	212	129	34
B	602	695	26,86	176	84	51	12

Tabela 3 – Propriedades mecânicas dos aços utilizados

Os corpos de prova utilizados nos ensaios foram do tipo SE[B] como será visto na seção 3.1.4.1, retirados dos tubos na região do cordão de solda longitudinal, com o entalhe localizado dentro da ZTA, seguindo a orientação na direção TS, conforme ilustrado nas Figuras 12 e 13.

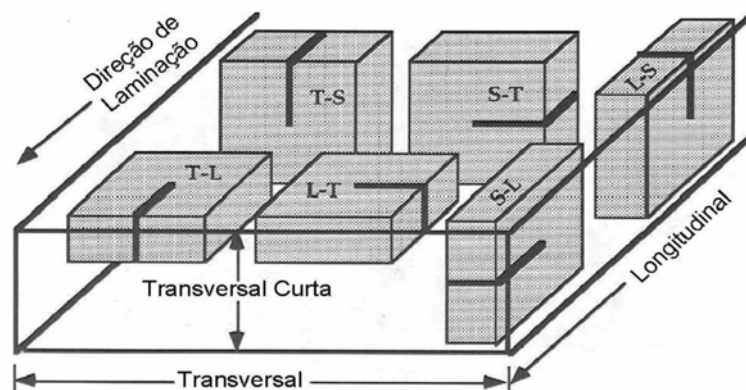


Figura 12: Notação da norma ASTM E1820 para orientação da direção de posicionamento de entalhes nos corpos de prova

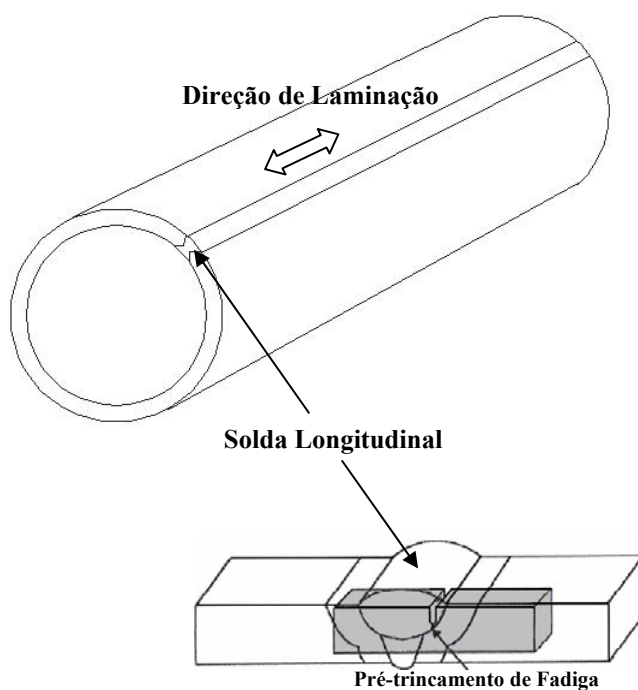


Figura 13- Desenho esquemático mostrando a posição de retirada dos corpos de prova

3.1.2. Análise Macro e Microestrutural

Para a análise macroestrutural as amostras foram lixadas em lixa d'água até grana 600, seguidas de posterior ataque com Nital 2%.

A caracterização da microestrutura na região da ponta da pré-trinca por fadiga após o ensaio de integral J, foi feita através da técnica de seccionamento do corpo de prova, conforme ilustrado na Figura 14. Todos os corpos de prova foram retificados de modo a evitar que houvesse a abertura da trinca. Após o seccionamento do corpo de prova as amostras foram lixadas em lixa d'água até grana 1200, polidas em politrizes de 6, 3 e 1 microns respectivamente e atacadas com nital 2%.

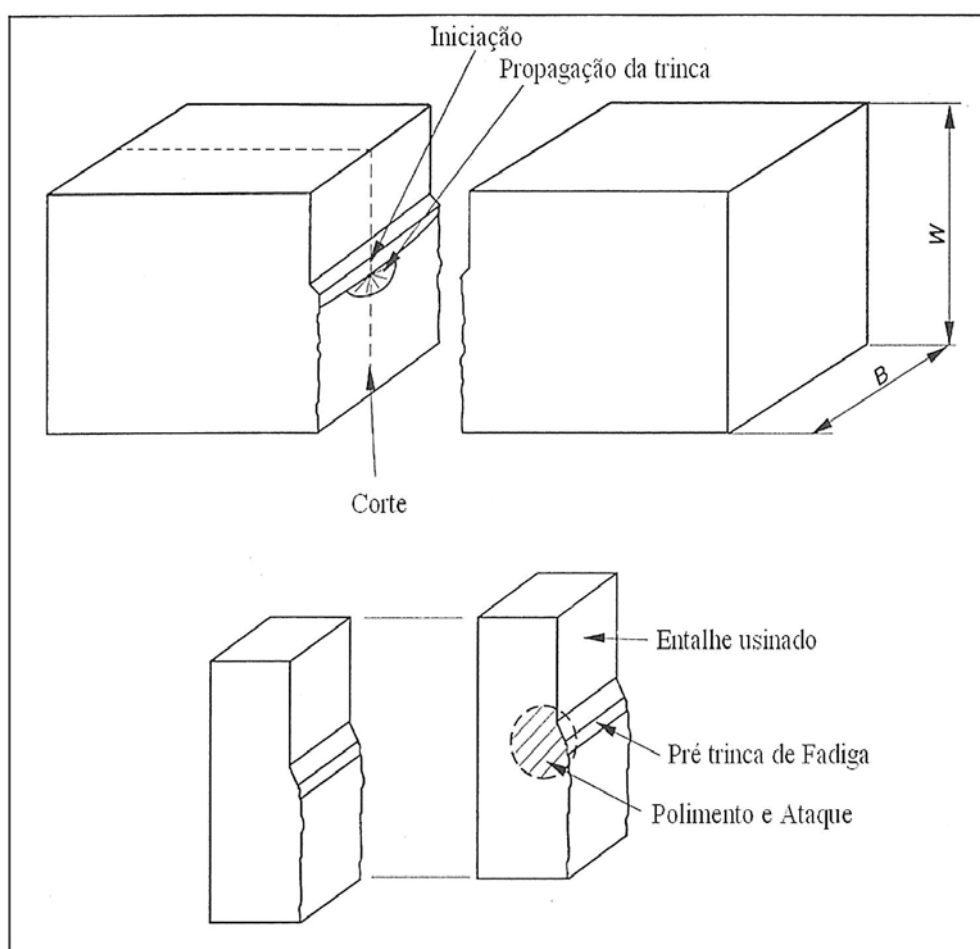


Figura 14- Seccionamento do corpo de prova após a realização do ensaio de integral J

3.1.3. Ensaio de dureza

Foram realizadas medidas de micro dureza Vickers, num equipamento digital SHIMADZU de modelo 2000 com uma carga constante de 100g. As impressões foram feitas no Metal de Base, na Zona Termicamente Afetada e no Metal de Solda. As impressões foram distanciadas uma da outra da seguinte maneira: Metal de Base 1 mm, Zona Termicamente Afetada 0,5 mm e Metal de Solda a 1 mm da linha de fusão e no centro. A Figura 15 ilustra o esquema do posicionamento para as medições da microdureza.

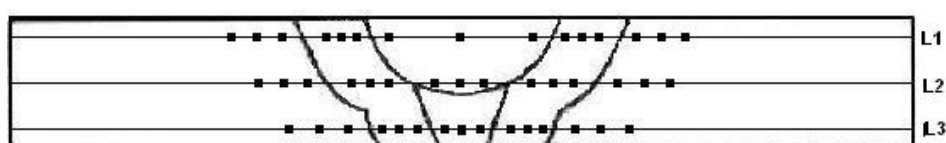


Figura 15- Esquema do posicionamento para medições de microdureza Vickers (H_v)

3.1.4. Ensaio de Tenacidade à Fratura

A determinação da tenacidade à Fratura foi realizada usando-se o conceito de integral-J, sendo os ensaios executados conforme a norma ASTM E1820.

Os corpos de prova utilizados foram do tipo SE[B]. As dimensões encontram-se na Figura 16. Os valores adotados foram os seguintes: Largura, $W=13$ mm, Espessura, $B=6,5$ mm.

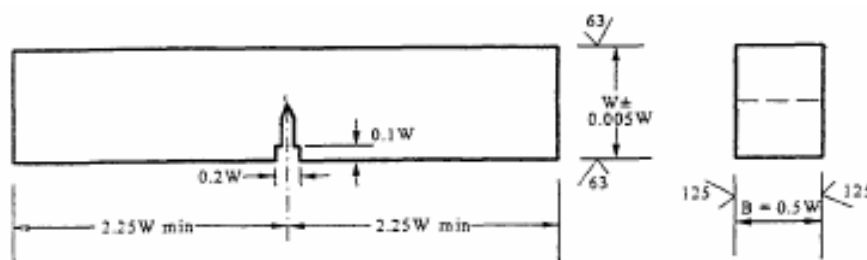


Figura 16- Dimensões do Corpo de prova tipo SE [B], segundo a norma ASTM E-1820.

Os corpos de prova foram pré-trincados em fadiga, conforme explicado no item seguinte.

3.1.4.1. Pré-trincamento por Fadiga

Os corpos de prova utilizados na realização do ensaio foram pré-trincados em fadiga de acordo com a norma ASTM E1820, a variação do comprimento inicial da trinca, a_i , deve ficar entre $0,45W \leq a_i \leq 0,70W$, onde W é a largura do corpo de prova.

O comprimento de trinca inicial adotada neste trabalho foi de 6,5 mm (razão $a_i/W = 0,5$), incluídos entalhe mecânico, 4mm, a trinca de eletro-erosão, 1,5mm, e a pré-trinca por fadiga, que ficou limitada a 1mm de modo a garantir seu correto posicionamento dentro Zona Termicamente Afetada (ZTA) do aço em estudo e em função das limitações do equipamento de eletro-erosão. O valor da carga que garante o comprimento inicial da trinca no regime elástico foi obtido através da equação descrita abaixo.

$$P_f = \frac{0,5Bb_0^2\sigma_Y}{S} \quad (22)$$

onde:

P_f – Carga máxima de pré-trinca por fadiga;

B - Espessura, 6,5 mm;

b_0 – Ligamento, $W-a_0$ (13 mm-6,5mm=6,5mm);

W – Largura, 13 mm

σ_Y – Média entre os valores do LE e LR obtidos em ensaio de tração.

S – Distância entre os roletes, 52 mm (4W).

Para validação do pré-trincamento por fadiga a relação entre o valor do K_{max} com o módulo de elasticidade deve ser atendida conforme a equação abaixo:

$$\frac{K_{max}}{E} \leq 0,0002m^{\frac{1}{2}}, \text{ onde: } E=210000\text{MPa} \quad (23)$$

A determinação do K_{max} inicial e final do pré-trincamento por fadiga foram obtidos, conforme a norma ASTM E1820 pela equação:

$$K = \left[\frac{PS}{(BB_N)^{\frac{1}{2}}W^{\frac{3}{2}}} \right] \cdot f\left(\frac{a}{W}\right), \quad (24)$$

onde:

$$f\left(\frac{a}{W}\right) = \frac{3\left(\frac{a}{W}\right)^{\frac{1}{2}}\left[1,99 - \left(\frac{a}{W}\right)\left(a - \frac{a}{W}\right)\left(2,15 - 3,93\left(\frac{a}{W}\right) + 2,7\left(\frac{a}{W}\right)^2\right)\right]}{2\left(1 + 2\frac{a}{W}\right)\left(1 - \frac{a}{W}\right)^{\frac{3}{2}}} \quad (25)$$

Sendo:

B= Espessura, 6,5mm;

W = Largura, 13 mm;

a = 5,5mm

Os fatores de forma encontrados e adotados para determinação do $K_{\max}$ para os dois materiais foram de:

$$f\left(\frac{a}{W}\right) = 25,15059603, \text{ Para o material A e,}$$

$$f\left(\frac{a}{W}\right) = 26,24322048, \text{ Para o material B}$$

Os pré-trincamentos foram realizados em uma máquina servohidráulica de ensaios mecânicos MTS com capacidade de 100kN. Foram utilizados 20 corpos de prova do tipo SE [B] confeccionados de tal maneira que o metal de solda ficou localizado no centro do corpo de prova, onde foi posicionado o entalhe para posterior realização da pré-trinca de fadiga, objetivando uma trinca inicial dentro da zona termicamente afetada. Na Figura 17 é observado um corpo de prova tipo SE [B] ainda sem o entalhe que foi polido e atacado quimicamente para visualização da posição do entalhe na zona termicamente afetada.

Os ensaios foram monitorados com o software “Gerador de Funções” que esta conectado ao controlador digital MTS, modelo “Test Star”. A finalidade deste controlador é a de acionar, interromper ou encerrar o ensaio, além de ajustar e fixar os valores do deslocamento, amplitude e da frequência, até que sejam atingidos os valores de cargas máxima e mínima desejados no ensaio. A Figura 18 mostra um corpo de prova SE [B] sendo ensaiado em um equipamento MTS.

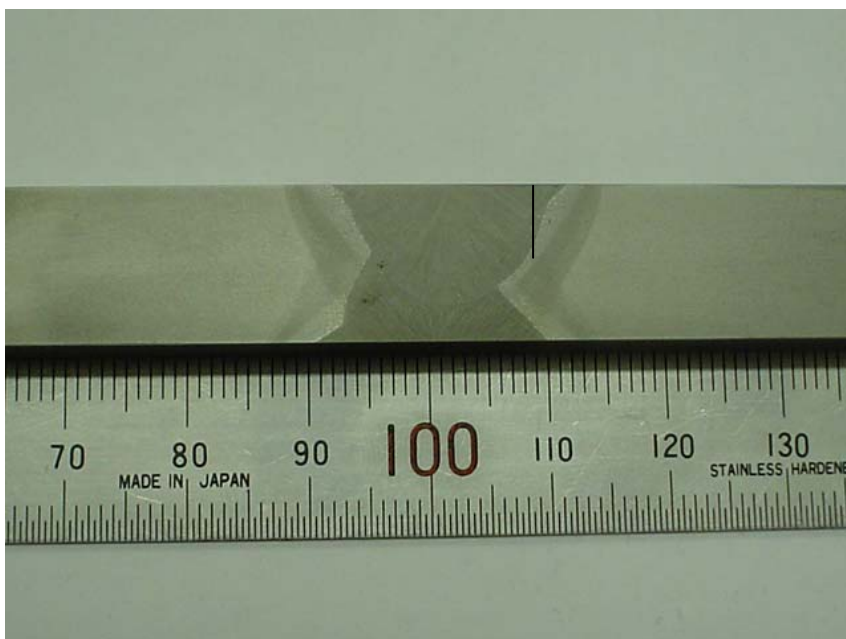


Figura 17- Foto mostrando o posicionamento para confecção do entalhe



Figura 18- Foto do ensaio de pré-trincamento por fadiga – Cenpes/Petrobras

O valor da trinca, fixado em 1 mm, ficou sendo uma função do número de ciclos durante o ensaio. Os valores de deslocamento, amplitude e frequência foram fixados e o valor da carga, à medida que a trinca propagava reduzia-se ao longo do tempo. As superfícies dos corpos de prova foram previamente polidas e

uma linha com um paquímetro riscador era traçada sobre a mesma. A propagação da trinca foi periodicamente verificada com auxílio de uma lupa com aumento de 25X e iluminação, adaptadas para esta finalidade. O ensaio era finalizado no momento em que a trinca de fadiga interceptava a linha traçada, sendo garantido desde modo um comprimento de pré-trincamento de fadiga de 1 mm. O tempo para que fosse atingido o valor da pré-trinca adotado, ficou em torno de quatro horas. A Figura 19 mostra um corpo de prova SE [B] com a linha traçada.

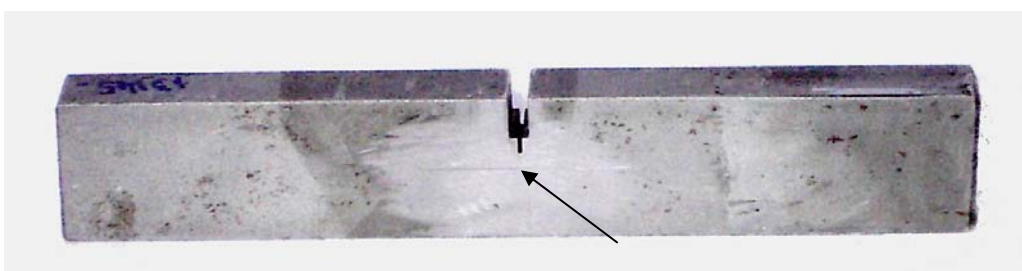


Figura 19 - Marcação do corpo de prova SE[B] para o acompanhamento do crescimento da trinca de fadiga

3.1.4.2. Realização do ensaio de integral J

A curva de resistência do material é determinada pelo método dos descarregamentos sucessivos, através de medidas da “compliance” (como pode ser visto na seção 2.4.1.1.5), estabelecendo o aumento do tamanho da trinca para cada valor de J.

Após a execução da pré-trinca de fadiga, os corpos de prova SE [B] foram ensaiados por flexão em três pontos, com descarregamentos parciais das cargas e sob controle de deslocamento pelo extensômetro (“clip gage”) com taxa de abertura de 0,01 mm/seg. A carga de teste foi aplicada em mais de dez ciclos sucessivos de carregamento. Em cada ciclo, a carga aumentava, limitando o descarregamento em até 10% da carga aplicada no ciclo correspondente.

Para a realização dos ensaios foi utilizado o programa MTS 793 - MPT (“Multi Propose Testware”), desenvolvido pela MTS System Co, no qual controlou o ensaio. Nas Figuras 20 e 21 são apresentados os detalhes da fixação de um corpo de prova, onde é observado um “clip-gage” à entrada do entalhe, o qual permite o registro da abertura.



Figura 20 – Vista geral do ensaio de Integral J no equipamento MTS, Lamef/UFRGS

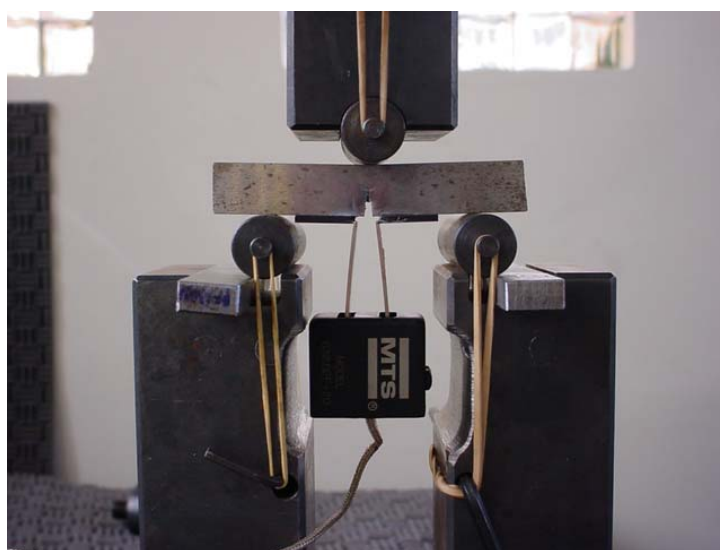


Figura 21 – Detalhe do Corpo de Prova SE [B] durante o ensaio no equipamento MTS, Lamef/UFRGS

Após os ensaios, dois corpos de prova de cada material foram imersos em nitrogênio líquido durante 12 minutos e posteriormente fraturados para a realização de medidas dos comprimentos de trinca inicial e final. Foram realizadas nove medições, seguindo os critérios estabelecidos pela norma ASTM E-1820. Para validar os dados obtidos no ensaio, foram analisados os dados característicos, assim como as tolerâncias estabelecidas pela norma.