

Avaliação da Fissuração por Fadiga em Tubos durante Transporte Marítimo

(Fatigue Cracking Evaluation in Pipes during Maritime Transportation)

João Mauricio Godoy¹, Benedito Carlos Cavalheiro², Marcelo dos Santos Pereira³

¹ TenarisConfab, Diretoria da Qualidade, Pindamonhangaba, SP, Brasil, jgodoy@confab.com.br

² TenarisConfab, Laboratórios da Qualidade, Pindamonhangaba, SP, Brasil, cfbbcv@confab.com.br

³ Departamento de Materiais e Tecnologia, Faculdade de Engenharia, Campus de Guaratinguetá, Universidade Estadual Paulista - UNESP, Guaratinguetá, SP, Brasil, marcelop@feg.unesp.br

Resumo

Tubos de aço são transportados diariamente em todo o mundo, por caminhão, trem ou navio. Conseqüentemente, danos de transporte, podem ocorrer com frequência e regularidade. O tipo de dano particular selecionado para este estudo foi o de trinca por fadiga, o qual é considerado como um dos mais críticos. Neste trabalho foram estudados tubos de aço fabricados de acordo com os requisitos da norma API 5L [1]. Foram efetuadas caracterizações químicas, mecânicas e metalográficas de um tubo com diâmetro 609,6 mm e espessura 15,87 mm grau X-65. A simulação do transporte por navio de tubos de aço foi feita submetendo-se seções de tubo com comprimento igual a 0,1 metro, a ciclos de fadiga por meio de máquina servo-hidráulica. Foi possível concluir que em tubos soldados, a região adjacente ao cordão de solda é a mais crítica, e que quando o posicionamento do tubo na carga é efetuado de maneira que a solda fique apoiada sobre alguma superfície rígida, a ocorrência de trinca por fadiga torna-se possível principalmente se os procedimentos de manuseio, carregamento e transporte não forem executados da maneira como recomendada pelos fabricantes de tubos e pela norma API [2].

Palavras-chave: tubo soldado, carregamento em navio, trinca por fadiga.

Abstract: Steel pipes are daily transported all over the world by truck, train or ship. Consequently, shipping damages may occur frequent and regularly. The particular damage selected for this study was fatigue cracking, that is considered as the more critical one. In this job were studied steel pipes manufactured according to the requirements of the specification API 5L [1]. Chemical, mechanical and micrographic characterizations were made in a pipe size \varnothing 609.6 mm x 15.87 mm grade X-65. For the simulation of a ship transportation of steel pipes, pipe lengths sections of 0.1 meter were submitted to fatigue cycles from a servo-hydraulic machine. It was possible to conclude that in welded pipes, the weld region adjacent to the weld toe is the more critical and when the pipe positioning at the vessel result in to be the weld in contact with rigid surface, the occurrence of fatigue cracking is possible mainly if the handling, loading and transportation procedures were not executed as recommended by the pipe manufacturers and by the API specification.

Key-words: Welded pipe, transportation, fatigue cracking.

1. Introdução

O uso constante e crescente do gás natural [3] e do petróleo como fontes de energia [4] faz com que grandes investimentos sejam dedicados a projetos de novos gasodutos e oleodutos, aumentando, com isso, a demanda na fabricação de tubos de aço para tais aplicações. Por conseqüência, em função das longas distâncias entre as fábricas e os locais de instalação dos tubos, que podem atingir a ordem de milhares de quilômetros, surge à necessidade de um perfeito controle no deslocamento dos tubos, tanto por navios (marítimo), trens e caminhões (terrestres), buscando minimizar as possibilidades de falhas ou danos

causadas pelo transporte.

Além disso, é prática usual da engenharia de instalação de tubos de aço, visando garantir a integridade do produto final, a aplicação de teste hidrostático na tubulação já instalada, antes da liberação para operação [5]. A detecção de vazamentos durante o teste hidrostático, em conseqüência de danos nos tubos, gera a necessidade de um entendimento sobre as causas destas falhas, já que, na grande maioria dos casos, os custos para a substituição das seções que falharam na tubulação podem chegar a números da ordem de milhões de dólares, especialmente em instalações submarinas.

Um tipo particularmente sério de dano em tubos de aço são as trincas por fadiga, as quais podem ocorrer durante o transporte, quase sempre por longas distâncias e por intermédio de diferentes formas [6]. De acordo com Bruno [7], a fadiga devido ao trânsito (Transit Fatigue) é resultante de tensões cíclicas induzidas por forças gravitacionais e inerciais. O modo no qual o

(Recebido em 27/08/2009; Texto Final em 16/03/2010).

tubo de aço é submetido à fadiga por tensões induzidas durante transporte está ilustrado esquematicamente na Figura 1. A força peso de um tubo impõe um tensionamento regular de uma dada magnitude. Com a força agindo com amplitude vertical, o tubo é flexionado de maneira a ser solicitado alternadamente por tração e compressão, em ambas as superfícies interna e externa. Este tensionamento alternado geralmente é o iniciador das trincas por fadiga.

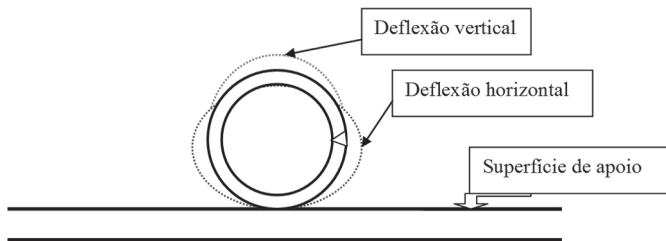


Figura 1. Região de um tubo de aço sob tensionamento durante transporte [7].

Muitas variáveis influenciam a fadiga por transporte, tais como o número e a magnitude dos esforços cíclicos, o tamanho da área de contato, o tipo da base de apoio (madeira ou aço), o tamanho da superfície danificada e as condições ambientais. O tipo das vigas de apoio de tubos em transporte também tem um efeito importante na ocorrência de trinca por fadiga. Bruno [7] reportou 21 casos de falhas em tubos de aço, ocorridos no período desde 1960 até 1987. Dos casos reportados verifica-se que a ocorrência se deu em tubos sem costura e em tubos soldados, em tubos de vários graus, conforme nomenclatura API (*American Petroleum Institute*) [2], em tubos de vários diâmetros e varias espessuras, em tubos para diferentes aplicações, tais como: tubos de condução, tubos *casing* e tubos para perfuração de poços de petróleo. Verifica-se ainda que estão relacionados os tipos de transporte por trem e navio.

Quanto aos aspectos dimensionais dos casos reportados, verifica-se que:

- A faixa de diâmetros variou de 2 3/8" (60,33 mm) até 30" (762,00 mm),
- A faixa de espessura variou de 0,156" (3,96 mm) até 0,625" (15,87 mm),
- A relação D/e (Diâmetro/ espessura) variou de 12,5 até 88.

Bruno [7] conclui que os danos prevaleceram em transporte por navio (16 casos), e que, a princípio, não houve nenhuma fratura particularmente associada a algum tipo de tubo (soldado ou sem costura) ou ao grau do tubo. Similarmente, aparenta-se que nenhuma relação há entre o número de falhas por fadiga e a dimensão dos tubos. Entretanto, as ocorrências de falhas por fadiga são em maior número nos tubos de grande diâmetro, ou seja, de maior razão Diâmetro/ espessura, onde também o peso individual de cada tubo passa a ter relevância.

Trincas como a ilustrada na Figura 2 [8] podem ser evitadas aplicando-se boas práticas de carregamento e transporte marítimo. O API [2] tem publicado boletins técnicos com práticas recomendadas para transporte de tubos de aço, de forma a evitar ou pelo menos minimizar a ocorrência de tais trincas de fadiga. A adoção destas técnicas pelos fabricantes de tubos,

transportadores e usuários tem dado resultados positivos no sentido de evitar as ocorrências.

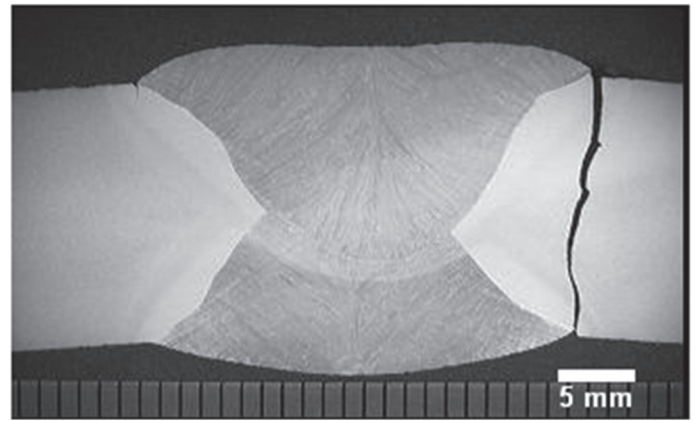


Figura 2. Trincas por fadiga adjacente a solda [8].

No caso de trincas de fadiga em tubos soldados devido a transporte, as ocorrências são geralmente em áreas localizadas, a saber:

- Longitudinalmente ao longo das margens da solda,
- No metal base do corpo dos tubos,
- Nas extremidades dos tubos, tanto na margem da solda como no metal base, e
- Estas falhas freqüentemente estão associadas a trincas múltiplas com a ocorrência de pelo menos uma iniciando pelo lado interno.

Neste trabalho, tendo como referência as ocorrências de trinca por fadiga devido ao transporte [7], foi selecionado um tubo Ø 609,6 mm x 15,87 mm x 12.290 mm, fabricado pelo processo UOE-SAW [9] e em conformidade à norma API 5L X65 [1]. Neste tubo foi realizada a caracterização química, mecânica e metalográfica, complementadas com a realização de ensaios não destrutivos e ensaio de fadiga em anéis. O objetivo foi verificar se um tubo de aço soldado, mesmo tendo sido aprovado em todas as inspeções e testes conforme a norma API 5L [1] poderia estar sujeito a apresentar trinca por fadiga, se os procedimentos de manuseio, carregamento e transporte não forem executados da maneira como recomendado.

2- Materiais e Métodos

Para atender aos objetivos deste trabalho, foi planejada a análise experimental dividida em duas etapas. A primeira consistiu na caracterização do material e foi feita por meio de ensaios químicos, metalográficos e mecânicos em corpos-de-prova retirados do tubo usado neste estudo.

Na segunda etapa foi desenvolvida uma metodologia para simulação em laboratório de carregamento cíclico por meio de máquina servo-hidráulica. Anéis de tubo Ø 609,6mm x 15,87 mm x 500 mm foram submetidos ao carregamento cíclico, os quais foram antes inspecionados detalhadamente pelos métodos de Partículas Magnéticas via úmida (Técnica do Yoke) e por Ultra-Som (técnica pulso eco usando transdutores de ondas longitudinais e ondas transversais). Os ensaios não destrutivos foram realizados para confirmar a não existência de defeitos na

solda em uma faixa de 100 mm de cada lado do cordão, uma vez que o tubo já havia sido aprovado nos testes realizados durante a fabricação. Foram também realizados os ensaios: Charpy V, com obtenção da curva de transição; dureza Vickers na junta soldada, CTOD (*Crack Tip Opening Displacement*) em corpos-de-prova SENB (*Single Edge Notched Bend*) [10,11]; determinação das

tensões residuais usando o método do anel; ensaios de tração em corpos-de-prova de seção reduzida. A Tabela 1 apresenta os ensaios realizados, as dimensões dos corpos de prova, a posição em relação ao tubo e a normas de referência. Os ensaios foram realizados na TenarisConfab, em Pindamonhangaba-SP.

Tabela 1. Detalhes dos corpos-de-prova e ensaios realizados. Mais detalhes em [8].

CÓDIGO	TIPO DE TESTE	DIMENSÕES DA AMOSTRA (mm)		POSIÇÃO	NORMA DE TESTE
		LONG.	TRANSV.		
QS	Análise química do cordão de solda	50	50	SOLDA	API 5L / ASTM E 415
TS	Tração transversal de solda	60	400	SOLDA	API 5L / ASTM A 370
I	Dobramento Interno	45	300	SOLDA	API 5L
E	Dobramento Externo	45	300	SOLDA	API 5L
DL	Dobramento Lateral	100	300	SOLDA	ASME IX
CS	Curva de transição de solda	70	90	SOLDA	ASTM A 370
CZ - LF...	Curva de transição de ZTA	70	100	SOLDA	ASTM A 370
LCS	Tração longitudinal cilíndrica de solda	250	200	SOLDA	ASTM A 370
LCZ	Tração longitudinal cilíndrica de ZTA	250	200	SOLDA	ASTM A 370
TCS	Transversal cilíndrica de solda	150	250	SOLDA	ASTM A 370
TCZ	Tração longitudinal cilíndrica de ZTA	150	250	SOLDA	ASTM A 370
CTOD-S	CTOD de solda	400	400	SOLDA	BS 7448 PARTE 2
CTOD-Z	CTOD de ZTA	400	400	SOLDA	BS 7448 PARTE 2
MA-MI-DU	Macrografia, Micrografia e Dureza	70	70	SOLDA	ASTM E407 / ASTM E92
TR	Aneis para tensão residual	400	--	--	PROCEDIMENTO INTERNO
TF	Aneis para teste de fadiga	500	--	--	PROCEDIMENTO INTERNO
QT	Análise química do metal base	50	50	90° da solda	API 5L / ASTM E 415
TT	Tração transversal de metal base	60	400	180° da solda	API 5L / ASTM A 370
TL	Tração longitudinal de metal base	400	60	90° da solda	API 5L / ASTM A 370
CT	Curva de transição de charpy - metal base	70	90	90° da solda	ASTM A 370
CTOD-T	CTOD de metal base	400	400	90° da solda	BS 7448 PARTE 1

3 Resultados e Discussões

3.1. Caracterização do Material

3.1.1. Caracterização Mecânica do Material

Os corpos-de-prova do ensaio de tração foram extraídos nas seguintes localizações e orientações: metal base/transversal, metal base/longitudinal e metal de solda/transversal. Os resultados apresentados na Tabela 2 foram analisados em comparação aos valores especificados pela API 5L [1], e estão todos em conformidade com os valores requeridos. Com relação ao limite de escoamento, a norma API 5L especifica um valor mínimo de 448 MPa a ser atingido. Os valores de 541 MPa, obtido no corpo-de-prova do metal base com orientação transversal, e de 557 MPa, obtido no corpo-de-prova do metal base com orientação longitudinal são superiores em cerca de 21% e 24%, respectivamente, em relação ao especificado pela norma. Da mesma maneira, os valores de 657 MPa, encontrado para o corpo-de-prova do metal base/transversal, 631 MPa encontrado para o corpo-de-prova do metal base/longitudinal, e 683 MPa, encontrado para o corpo-de-prova do metal de solda/transversal, são, respectivamente, superiores em 9%, 5% e 14 %, em relação ao limite de resistência à tração do material. O

alongamento mínimo de 20% foi superado em mais de 70%, quando avaliados os corpos-de-prova do metal base/transversal (36,2 %) e do metal base/longitudinal (35,4 %). Estes valores de resistência e ductilidade são justificados pela estrutura refinada de grãos ferríticos, oriundos do processo de laminação controlada termomecanicamente.

3.1.2. Análise Química: Metal base, Solda Externa e Solda Interna

A Tabela 3 apresenta os resultados da análise química realizada no metal base, no cordão de solda interno e no cordão de solda externo. Os resultados estão de acordo com a norma API 5L. Analisando os elementos que apresentaram alguma variação considerável, nota-se que o molibdênio (Mo) foi o que difere em %. Enquanto que no metal base apresenta 0,003%, na solda externa apresenta 0,204% e na solda interna 0,194 %. Esta variação é explicada em função do % de Mo presente no eletrodo usado na soldagem por arco submerso. Outra variação que pode ser observada é a % de titânio (Ti) que no metal base (0,020%) é mais alto que no cordão de solda externo (0,0008%) justificado pelo baixo teor de titânio contido no eletrodo. Alguma variação individual na porcentagem dos elementos químicos contidos é normal na análise de soldas feitas por processo de arco submerso

Tabela 2. Ensaio de Tração em corpos de prova do Tubo soldado, conforme API 5 L.

IDENTIFICAÇÃO	TIPO / ORIENTAÇÃO	LE	LR	ALONGAMENTO	RAZÃO ELÁSTICA	RESULTADO
		(MPa)	(MPa)	(%)	LE / LR	
TT - 30871	Metal Base - Transversal	541	657	36,2	0,82	Aprovado
LT - 30871	Metal Base - Transversal	557	631	35,4	0,88	Aprovado
TS - 30871	Metal Base - Transversal	---	683	---	---	Aprovado

Tabela 3. Composição Química do Metal Base e das Soldas Externas e Internas.

IDENTIFICAÇÃO	C	S	N	Al	Si	P	Ti	V	Cr	Mn	Ni	Cu	Nb	Mo
	$\times 10^2$	$\times 10^3$	$\times 10^4$	$\times 10^3$	$\times 10^2$	$\times 10^3$	$\times 10^3$	$\times 10^3$	$\times 10^3$	$\times 10^2$	$\times 10^3$	$\times 10^3$	$\times 10^3$	$\times 10^3$
METAL BASE	9	3	75	30	20	12	20	47	18	159	263	195	61	3
SOLDA EXTERNA	8	8	122	14	22	14	8	32	24	160	173	150	34	204
SOLDA INTERNA	8	5	80	14	24	13	9	31	20	160	174	146	35	194

Valores expresso em % de massa

com múltiplos arcos, porque a poça de fusão é relativamente grande ocorrendo uma considerável diluição e também por alguma perda por arraste pela escória formada.

3.1.3. Análise Micrográfica

Na Figura 3 está representada a microestrutura do aço API X65, laminado a quente por processo TMCP (*Thermomechanical Controlled Process*) [12]. Percebe-se na foto micrografia a predominância da estrutura de ferrita poligonal (PF), ferrita acicular (AF) e o bandeamento de perlita (P) na direção de laminação. A estrutura refinada dos grãos ferríticos é resultado do processo de laminação controlada, que traz como consequência a obtenção de melhores propriedades de resistência e tenacidade, devido ao mecanismo de endurecimento pela redução do tamanho de grão. A estrutura é composta de uma mistura de ferrita acicular de grãos finos, ferrita poligonal e perlita, justificada pela presença de elementos de liga (Tabela 3), pois o material estudado é um aço microaligado com níquel, vanádio, titânio, nióbio e cromo, laminado a uma temperatura de acabamento em torno de 700°C. Pode-se concluir, portanto que foi obtida uma microestrutura final adequada para atender o conjunto de propriedades mecânicas requeridas para as chapas fabricadas.

3.2. Resultados da Metodologia utilizada para provocar a ocorrência de trinca por fadiga

3.2.1. Ensaio de Charpy

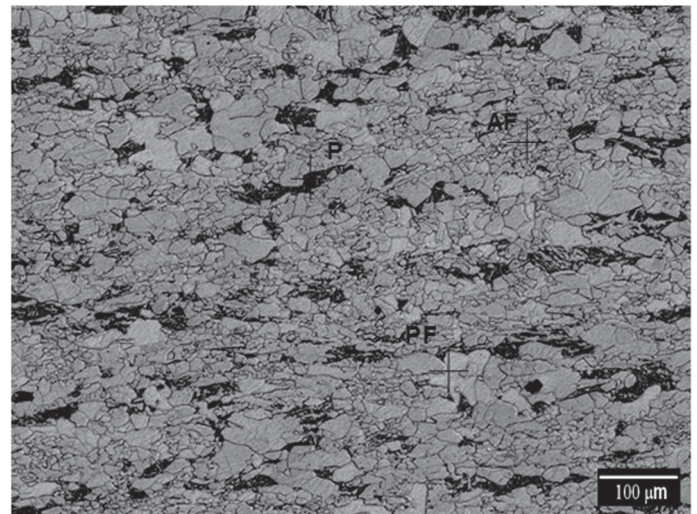


Figura 3. Fotomicrografia do aço API Grau X65 (ataque Nital 2% - aumento 500x) [8].

Os resultados do ensaio de impacto Charpy "V" foram avaliados individualmente nas temperaturas de teste de 20°C, 0°C, -20°C, -40°C, -60°C e -80°C, que compuseram a curva de transição 50% dúctil-frágil. Pode ser observado, por meio da Tabela 4, um comportamento diferente dos resultados do metal base, solda e linha de fusão +5 mm. Na solda, a transição dúctil-frágil ocorre na temperatura de -40°C, enquanto que na linha de fusão +5 mm ocorre à -80°C. A transição não é observada para o metal base até a temperatura de -80°C, usando como critério, a fratura dúctil de 50%. Este comportamento é explicado

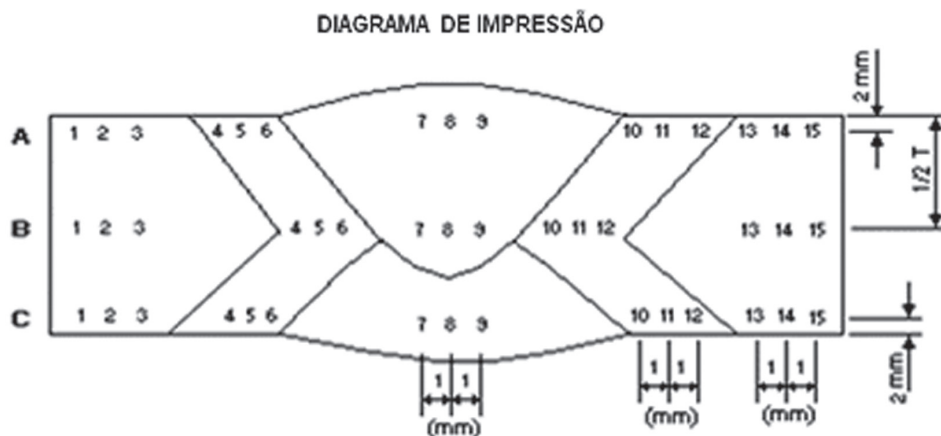
Tabela 4. Teste de Charpy "V"- Curva de Transição: Metal Base, Solda e Zona Termicamente Afetada [8].

TEMPERATURA	METAL BASE		SOLDA		LINHA DE FUSÃO + 5 mm	
	● ENERGIA - J	▲ FRATURA DUCTIL - %	● ENERGIA - J	▲ FRATURA DUCTIL - %	● ENERGIA - J	▲ FRATURA DUCTIL - %
20°C	207	100	146	97	225	100
0°C	175	100	137	93	170	100
-20°C	181	100	93	72	181	100
-40°C	178	100	51	49	174	100
-60°C	101	89	30	30	132	89
-80°C	65	75	12	14	77	50

CURVA DE TRANSIÇÃO	METAL BASE		SOLDA		LINHA DE FUSÃO + 5 mm	
	● ENERGIA - J / % ÁREA DUCTIL	▲ FRATURA DUCTIL - %	● ENERGIA - J / % ÁREA DUCTIL	▲ FRATURA DUCTIL - %	● ENERGIA - J / % ÁREA DUCTIL	▲ FRATURA DUCTIL - %

Tabela 5. Medidas de Dureza-HV10.

LINHA	PONTOS DE IMPRESSÃO - HV10														
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
A	220	221	221	196	203	207	227	225	223	207	200	196	219	227	229
B	218	220	222	196	208	209	222	220	223	208	203	192	225	226	226
C	225	228	232	195	203	220	243	250	250	219	212	200	220	223	220



porque o metal base, sendo um aço microligado laminado termomecanicamente foi projetado para que a fratura frágil de 50% ou menos, só ocorresse em temperaturas abaixo de -80°C . O objetivo principal do projeto deste aço API 5L X65 com teores baixos de carbono (0,09%) e elementos de ligas (níquel, cromo, vanádio e nióbio) é ter uma temperatura final de laminação próxima a 700°C , e com isto apresentar uma microestrutura ferrítica de grãos finos e com tamanho ASTM 11/12, para que as propriedades mecânicas e notadamente a tenacidade sejam asseguradas.

3.2.2. Ensaio de Dureza Vickers

Os resultados de dureza, como mostrado na Tabela 5, foram analisados e todos os pontos apresentaram valores aprovados de acordo com a norma API, inclusive os pontos 7, 8 e 9 da linha C os quais representam os resultados de dureza da solda interna. Estes pontos apresentaram valores de dureza sensivelmente maiores do que os obtidos no metal base e na ZTA, porque devido ao ciclo térmico de reaquecimento que sofre o cordão de solda interno pela realização da solda externa, ocorre um endurecimento por precipitação principalmente de carbono e manganês assim como elementos de liga como o molibdênio. Nestes pontos, embora dois valores tenham alcançado 250 HV10, ainda estão distantes do valor 300 HV10, o qual pode ser considerado como limite máximo e a partir do qual os valores de tenacidade a fratura poderiam estar comprometidos.

3.2.3. Ensaio de CTOD

Os valores obtidos para CTOD () do metal base de 0,25 mm, 0,77 mm e 0,40 mm nos corpos-de-prova numerados como CP1, CP2 e CP3 respectivamente, estão de acordo com a norma DNV-OS-F101 [13], que estabelece o valor mínimo de 0,20 mm para qualquer um de 3 corpos-de-prova válidos (Tabela 6). Os

corpos-de-prova CP1 e CP3 apresentaram modo de fratura c, o que remarca a ocorrência de “pop-in”, provavelmente devido à presença de bandas de perlita na direção de laminação do aço, o que provoca uma queda seguida de retomada na curva tensão versus deslocamento. O corpo-de-prova CP2 foi analisado em carga máxima (m).

Os valores obtidos para CTOD () para os corpos-de-prova de solda e ZTA, todos apresentaram modo de fratura em carga máxima (m), conforme a Tabela 6. No entanto, o corpo-de-prova CP2 de solda, apresentou o valor de 0,11 mm, o que seria um valor reprovado pela norma DNV-OS-F101 [13]. Este valor foi, muito provavelmente, devido a alguma descontinuidade pontual na solda não detectada na inspeção por ultra-som, pois o tamanho mínimo para detecção no caso da espessura do tubo em estudo é de no mínimo 0,8 mm, ou seja, tamanho de descontinuidade detectável a partir de 5% da espessura do material ensaiado.

A curva da/dN construída corresponde ao modelo teórico, quanto às distintas regiões I, II e III, onde, na região I o fator de intensidade de tensão abaixo do qual não ocorre o crescimento da trinca é chamado de fator intensidade da tensão limite, K_{th} [14]. Na região II, onde o comportamento é linear, ocorre o crescimento estável da trinca, e na região III, ocorre um crescimento mais rápido da taxa da/dN, à medida que o fator de intensidade de tensão se aproxima do valor da intensidade de tensão crítica. Na Figura 4 é apresentado graficamente o aumento do comprimento da trinca em milímetros em função do número de ciclos. Pode ser observado que o comprimento da trinca por fadiga começou a ser registrado a partir de 11,8 mm (eixo y do gráfico) e finalizou em 20,8 mm após 51.000 ciclos.

3.2.4. Ensaio de Tensões Residuais

Conforme observou Maddox [14] sobre fadiga em soldas, a influência das tensões residuais é sempre considerada como uma variável importante e tem participação relevante nos cálculos.

Tabela 6. Resultados do ensaio CTOD

TIPO / ORIENTAÇÃO	IDENTIFICAÇÃO	RESULTADO (mm)	MODO DE FRATURA
Metal Base - Transversal	CP 1	0,25	δ_c
	CP 2	0,77	δ_m
	CP 3	0,40	δ_c
Solda - Transversal	CP 1	0,34	δ_m
	CP 2	0,11	δ_m
	CP 3	0,34	δ_m
Zona afetada - Transversal	CP 1	0,45	δ_m
	CP 2	0,53	δ_m
	CP 3	0,53	δ_m

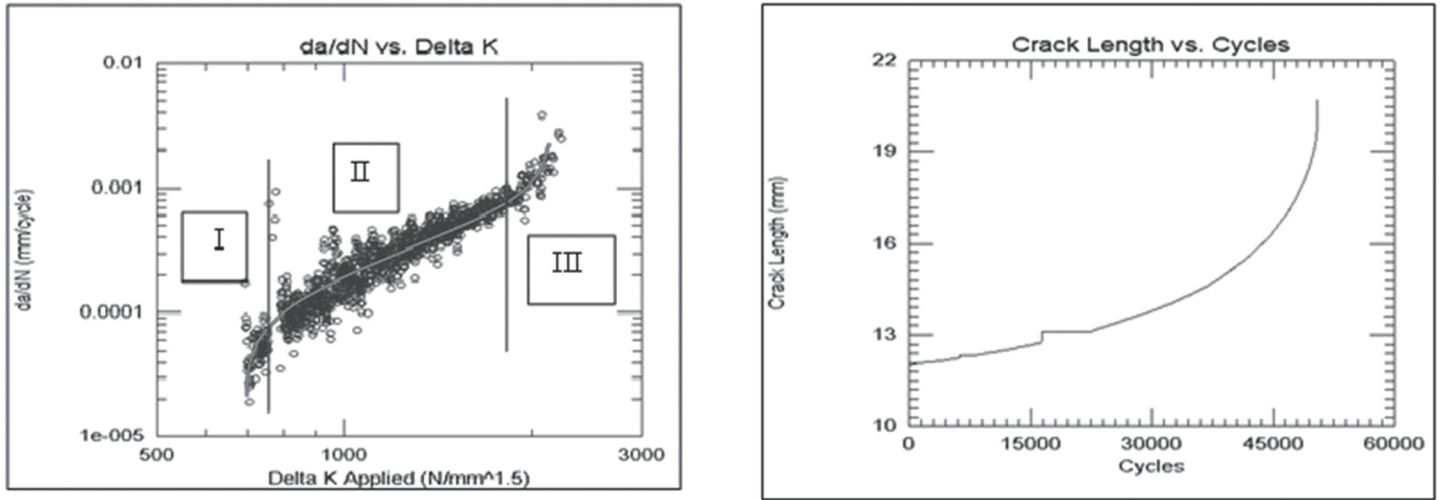


Figura 4. Curvas de crescimento da trinca.

Nas amostras retiradas do tubo selecionado, a quantificação dos valores das tensões residuais, foram tomadas de três amostras e os resultados podem ser observados na Tabela 7. O ensaio de tensões residuais pelo método do anel apresentou, para o tubo em estudo, um valor médio de 14,8 MPa (2.148 PSI). Este valor pode ser considerado bastante baixo, tomando se como referência um máximo de 89,6 MPa que corresponde a 20% do limite de escoamento do aço X65 (448 MPa), o qual é admitido pelas especificações de tubos para instalação submarina, e que foi utilizado como referência para analisar a influência da tensão residual na vida em fadiga do tubo em análise.

3.2.5. Ensaio de Tração de Seção Reduzida

Estudos realizados em tubos com costura, obtidos de chapas fabricadas pelo processo de laminação controlada (TMCP), tem mostrado em geral, que as propriedades mecânicas apresentam valores mais críticos quando os testes são feitos em amostras retiradas nas regiões transformadas pelos ciclos de repartição térmica, oriundas da soldagem. Para avaliar, comprovar e comparar estas propriedades de tração foram testados corpos-de-prova de seção reduzida ao longo destas regiões.

Os valores e a representação gráfica estão ilustrados na

Tabela 7. Tensão Residual Circunferencial[8].

TENSÃO RESIDUAL CIRCUNFERENCIAL

RESULTADOS

LAB	DATA	CORRIDA	TUBO	t (inch)	D(inch)	M1(inch)	M2(inch)	s (psi)	%	
1	06/06/2007	421461	30871 (1)	0,625	24,0	11,8976	12,1181	2.505	3,9	
2	06/06/2007	421461	30871 (2)	0,625	24,0	11,8819	12,0512	1.926	3,0	
3	06/06/2007	421461	30871 (3)	0,625	24,0	11,8622	12,0394	2.012	3,1	
								MÉDIA	2.148 psi	3,3 %

$$s = E \cdot t (M2 - M1) / \pi (1 - \nu^2) D^2$$

1) Onde :

s = Tensão residual circunferencial

E= Modulo de Young (assumido 30.000 ksi)

t = Espessura média

D = Diâmetro externo médio

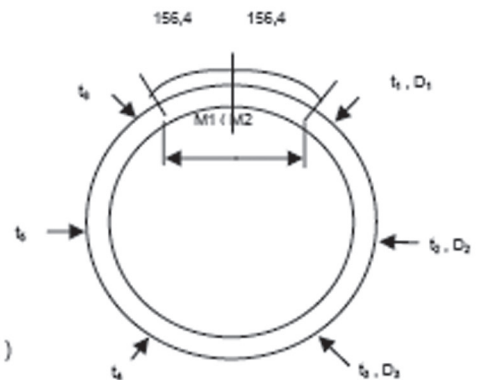
M1 = Distância entre as marcas (antes do teste)

M2 = Distância entre as marcas (depois do teste)

ν = Razão de Poisson's (assumido = 0,3)

% = Porcentagem sobre o limite de escoamento mínimo especificado (SMYS = 65000 psi)

2) Solda posicionada às 6 h.



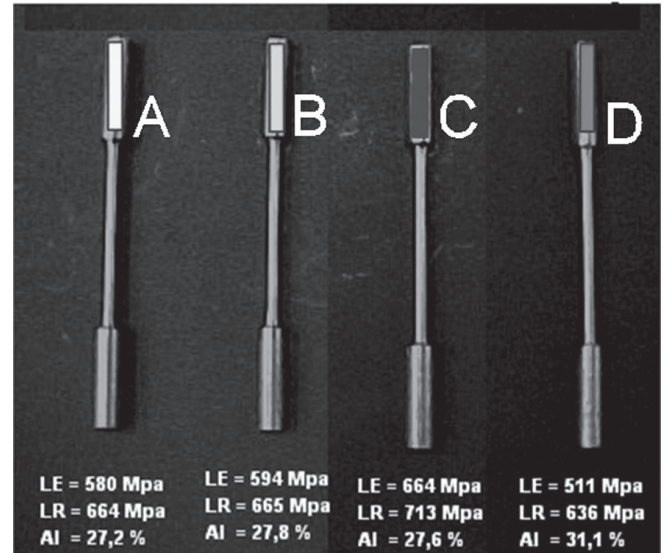
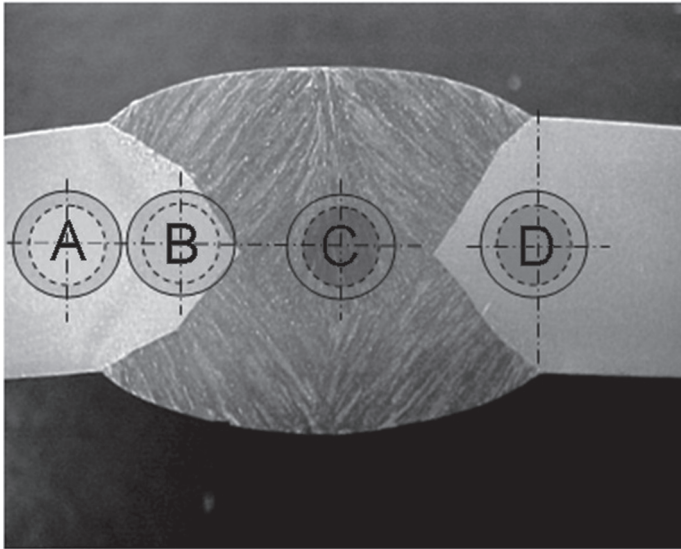


Figura 5. Ensaio de Tração em Corpos-de-Prova de Seção Reduzida [8].

Figura 5. Pode-se verificar que os valores do limite de resistência à tração dos corpos-de-prova extraídos da solda com orientação longitudinal, apresentaram média de 713 MPa. Estes valores mais altos se devem ao fato que os corpos-de-prova foram constituídos integralmente de metal depositado. Sendo assim, além da composição química mais refinada, estes possuem a estrutura micrográfica de zona fundida. Pode-se ainda verificar que os valores da razão elástica (LE/LR), pela API 5L, são limitados a um máximo de 0,93. Neste caso, este valor de 0,95 não representa um motivo de reprovação porque o valor limitado a 0,93 como máximo é considerado para corpos-de-prova com orientação transversal.

3.2.6. Ensaio de Fadiga em Anel de Tubo - Modelo Simplificado para Laboratório

Tomando-se como referência um carregamento de tubos em viagem do porto do Rio de Janeiro - Brasil até o porto de Kuantan-Malásia, com duração de 33 dias e também com os dados quantitativos de ciclos, impostos aos tubos e registrados nos relatórios de bordo, foi possível fazer uma simulação deste transporte em laboratório. Foram simuladas duas condições de estivagem, ambas com o tubo localizado junto ao fundo do porão e uma carga de 25 camadas, calculado tomando como base a equação que limita o número máximo de camadas, dado pela API 5LW[8]. As condições de teste e resultados (Figura 6) são reportadas a seguir:

- 1ª condição: Tubo com o cordão de solda na posição 6 h e apoiado sobre viga de madeira.

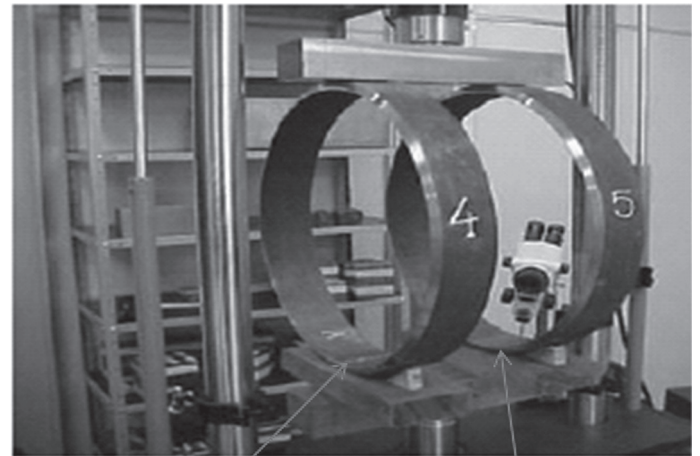
Resultado: Início de trinca com 109.795 ciclos e término com 139.345 ciclos (~39h).

- 2ª condição: Tubo com o cordão de solda na posição 4,5 h e apoiado sobre viga de madeira.

Resultado: Não apresentou indícios de trinca, após 500.000 ciclos (~139 h).

O modelo simplificado de ensaio de fadiga em anel comprou que os tubos estivados com a solda na posição correta

(4,5 h) e com quantidade de camadas máxima conforme a norma API 5LW[8], não apresenta riscos para ocorrência de nucleação de trincas. Mas, se o tubo for estivado com a solda em posição incorreta (6 h) a possibilidade de ocorrência da nucleação de trinca, já deve ser considerada.



Posição da Solda

Figura 6. Modelo simplificado para teste de fadiga em anel de tubo [8].

4. Conclusões

A avaliação da simulação da fissuração por fadiga em tubos durante transporte marítimo permitiu concluir que:

- O fato dos tubos, principalmente os soldados, terem sido aprovados em todas as inspeções e testes indicados pelas especificações de fabricação, não garante que estarão isentos de apresentarem trincas por fadiga, geradas pelo carregamento cíclico durante o manuseio e transporte, principalmente o marítimo.

- Os resultados deste trabalho mostraram que o tubo motivo desta pesquisa, mesmo tendo sido fabricado com materiais e consumíveis de soldagem de última geração, apresenta probabilidade de trincamento por fadiga. Diante disto, cuidados especiais devem ser tomados durante as operações de transporte e manuseio.
- O transporte de tubos por navio, em viagens de 30 dias ou mais é seguro desde que o carregamento e a estiva sejam executados em conformidade a procedimentos e a norma API 5LW [15].
- Os cordões de soldas dos tubos não deverão estar na posição 6 h, nem em contato com outros tubos ou partes metálicas do navio.
- A trinca de fadiga ocorrida no anel testado na condição 1 confirma a possibilidade de ocorrência e a predominância da localização da trinca adjacente ao cordão de solda e no sentido longitudinal.
- A trinca realizada em laboratório teve início na transição solda / metal base (ponto de concentração de tensão), tanto pelo lado interno quanto lado externo, com completa semelhança como os casos reais relatados nas literaturas pesquisadas.

5. Agradecimentos

Os autores desejam agradecer a TenarisConfab pela oportunidade oferecida para poderem desenvolver este estudo, através da disponibilização dos Laboratórios e materiais para os testes.

6. Referências Bibliográficas

- [1] American Petroleum Institute-Specification 5L for line pipes, 43th edition, 155 p, 2004.
- [2] American Petroleum Institute- Catalog of API Standards, 2005.
- [3] Dermirbas, A.-The importance of natural gas as a world fuel. energy sources part 3- Economics planning and policy, vol 1, issue 4, pag 413-420, Oct-Dec, 2006.
- [4] Balat, M.-Status of fossil energy resources: A global perspective-Energy sources part B.-Economics planning and policy, vol 2, issue 1, pag 31-47, 2007.
- [5] Brongers, MPH; Beavers, JA; Jask, CE; Delanty, CS;-Effect of hydrostatic testing on ductile tearing of X-65 linepipe steel with stress corrosion cracking- Corrosion, vol 56, issue 10, pag 1050-1058, Oct 2000.
- [6] Otegui, J.L. Kunert, H.G. Factors influencing transit fatigue of seamless pipes. Universidade de Mar del Plata. 2004.
- [7] Bruno, T.V. How to prevent transit fatigue to tubular goods. The Oil and Gas Journal. 1998.
- [8] Godoy, JM.- Estudo da ocorrência de trinca por fadiga em tubos de aço soldados, devido ao transporte- Dissertação de Mestrado. Universidade Estadual Paulista- Faculdade de Engenharia de Guaratinguetá, 2008.
- [9] Liesse, A; Grimpe, F; Oesterlein, L-State of art quality control during production of saw pipelines.-4th International Pipeline Conference ,6 p, 2002.
- [10] BS 7448: Part 1: 1991 – British Standard. Method for determination of K_{ic}, critical CTOD and critical J values of

metallic materials.

[11] BS 7448: Part 1: 1997 – British Standard. Method for determination of K_{ic}, critical CTOD and critical J values of welds in metallic materials.

[12] Mesplont, C.- Grain refinement and high precipitation hardening by combining microalloying and accelerated cooling.- Tevue de Metallurgie, vol. 103 , issue 5, pag 238-246, May 2006.

[13] DNV-OS-F101 – Offshore Standard – Submarine Pipeline Systems – January 2000.

[14] Madox S.. Structural Fatigue Assessment Course. The Welding Institute. 2007.

[15] American Petroleum Institute – Recommended Practice for Transportation of Line Pipe on Barges and Marine Vessels. API 5 LW. 1997.