

3

Procedimento experimental

3.1

Características dos espécimes tubulares

Para realizar os testes de ruptura, foram selecionados inicialmente 10 segmentos de tubos corroídos, retirados do oleoduto Orbel I, durante o seu processo de reabilitação, ocorrido no ano de 2001[30]. Estes segmentos tinham as seguintes características:

- Diâmetro nominal : 18” (457,2 mm)
- Espessura nominal : 0,25” (6,35 mm)
- Grau do aço : API 5L X46
- Comprimento : 3,5 a 6,0 m
- Corrosão : interna na posição 4 a 8 hrs

3.2

Mapeamento manual de espessura de parede por ultra-som

O mapeamento manual de espessura dos espécimes foi realizado pela empresa Synesis Tecnologia da Qualidade Ltda, utilizando um medidor de espessura convencional do fabricante Panametrics, modelo 26 MG. Foram criadas duas malhas para a medição de espessura dos espécimes. A primeira com pontos distantes entre si de 20 mm, cobrindo a região mais corroída e compreendida entre 4 e 8 hrs, e a segunda abrangendo a região de 8, 12 e 4 hrs, com pontos distantes entre si de 100mm. Os principais passos para a realização desta etapa estão relacionados a seguir:

- Numeração dos espécimes de T01 a T10, identificando as extremidades A e B;
- Determinação por inspeção visual da geratriz inferior do duto (posição 6 hrs);
- Colocação de uma linha de nylon demarcando a geratriz inferior, para servir de centro;
- Posicionamento da máscara de papel perfurada com malha de 20 mm cobrindo a região de 4 a 8 hrs;
- Pintura dos pontos de medição com “spray” branco ou prata;

- Posicionamento da máscara de papel perfurada com malha de 100 mm cobrindo a região de 8, 12 e 4 hrs;
- Pintura dos pontos de medição com spray branco ou prata;
- Identificação das colunas referentes às medições longitudinais por letras de A a Z, incluindo as letras K, W e Y, complementada com AA, BB até HH. A região compreendida entre 4 e 8 hrs foi identificada como começando pela letra F, passando por Z, AA até DD. A região entre 8, 12 e 4 hrs ficou identificada começando por EE, passando por HH, A até E;
- As linhas relativas às medições circunferenciais foram numeradas de 1 em diante.
- Confeção de uma planilha em papel com linhas e colunas identificadas com números e letras respectivamente, conforme definido acima.
- Medição de espessura dos pontos marcados e registro em planilha.

A pintura dos pontos que compõem a malha para medição por ultra-som deve ter uma película extremamente fina para não comprometer a medição de espessura de parede.

Devido ao grande número de medições necessárias para mapear cada segmento de tubo, foi conveniente realizar este trabalho com duas pessoas, de forma que enquanto uma media, a outra anotava os valores. A figura 7 ilustra o mapeamento por medições manuais por ultra-som, na região de malha 20 x 20 mm.



Figura 7 - Medição manual por ultra-som

O Relatório Técnico N.1 – Inspeção dos Segmentos de Dutos de novembro/2001[31], elaborado pela PUC-Rio, contém todas os registros das medições de espessura de parede realizadas nos 10 espécimes tubulares.

3.3

Mapeamento mecanizado da espessura de parede do tipo CSCAN

Dentre os 10 espécimes tubulares inspecionados com medidor de espessura convencional, foram selecionados 5 (cinco) que apresentavam as maiores perdas de espessura na região de 4 a 8 hrs. Os espécimes T02, T04, T05, T06 e T10 foram os escolhidos e tiveram os comprimentos reduzidos para 3000 mm, eliminando-se as extremidades com as menores perdas de espessura.

A medição mecanizada CSCAN foi executada nestes 5 segmentos pela empresa PASA – Physical Acoustics South América, utilizando o aparelho com as seguintes especificações:

Fabricante: Physical Acoustic Corporation – Divisão NDT

Modelo: LSI/RS-3B;

Tipo: Sistema portátil totalmente automatizado;

Largura Máxima de Varredura: 500 mm;

Tipo de Tração: Rodas magnéticas tracionadas por "drivers";

Acoplante dos Transdutores: Água

As principais etapas seguidas na medição mecanizada CSCAN foram:

- Preparo da superfície externa do duto por lixamento;
- Posicionamento dos cavaletes o mais próximo das extremidades do espécime tubular, procurando deixar o maior comprimento possível sem interferência para que o aparelho pudesse executar as medições de espessura ao redor do tubo;
- Posicionamento do aparelho numa das extremidades do espécime com o transdutor na posição zero sobre um dos pontos conhecidos da medição manual. Registro deste ponto e do sentido da medição (esquerda para direita e sentido horário);

- Marcação das extremidades, com tinta, do comprimento longitudinal a ser percorrido pelos transdutores para auxiliar no posicionamento do carrinho na próxima varredura;
- Verificação se o aparelho está percorrendo a circunferência numa forma cilíndrica e não em espiral;
- Acompanhamento da medição pelo monitor, identificando possíveis problemas na medição.
- Posicionamento do carrinho para a varredura seguinte, considerando uma pequena superposição de medição com a varredura anterior.

É importante ressaltar que para se executar a medição mecanizada CSCAN de um espécime tubular, os 150 mm de cada extremidade não podem ser inspecionados, pois as rodas magnéticas precisam desta área para tracionar o carrinho. Portanto, deve-se acrescentar sempre 150 mm em cada extremidade da área de interesse para que se possa fazer a medição de todos os pontos desejados. A figura 8 mostra a medição mecanizada por ultra-som de um tubo.



Figura 8 - Medição mecanizada por ultra-som

O Relatório Técnico N.3 – Mapeamento de Espessura dos Espécimes Tubulares de Maio/2002 [32], elaborado pela PUC-Rio, contém todas as registros das medições de espessura de parede realizadas nos 5 espécimes tubulares.

3.4

Ensaio de tração do material dos espécimes

Foram realizados 4 ensaios de tração por espécime, perfazendo um total de 20 ensaios. De cada espécime foram retirados quatro corpos de provas, dois na direção circunferencial e dois na direção longitudinal. Os ensaios foram realizados seguindo as normas API Specification 5L, ASTM E8 e ASTM A370.

Os corpos de prova circunferenciais foram retirados da posição diametralmente oposta ao cordão de solda longitudinal, enquanto que os corpos de prova longitudinais foram retirados da posição situada a 90 graus do cordão de solda longitudinal.

Para cada corpo de prova, foi instalado um extensômetro uniaxial de resistência elétrica para grandes deformações, tipo TML YFLA-5-11.

Os corpos de prova planificados tiveram a área, onde foi instalado o extensômetro, lixada superficialmente. A espessura de cada corpo de prova, na região de ruptura, foi medida com micrômetro.

Para cada ensaio, foram registrados, do seu início até o instante que a carga máxima foi atingida, a carga aplicada sobre o corpo de prova, a variação do comprimento útil (“gage length”) e a deformação medida pelo extensômetro.

A resistência ao escoamento para cada corpo de prova foi obtida pelo gráfico tensão x deformação, traçando-se uma paralela ao registro da fase elástica, a partir de 0,2% de deformação. O ponto de interseção desta reta com a curva do registro determinou a resistência ao escoamento.

A resistência à tração foi determinada pela tensão máxima registrada no ensaio de cada corpo de prova. A tabela 2 apresenta os resultados dos ensaios de tração de cada corpo de prova retirados transversalmente (T) e longitudinalmente (L) correspondente de cada espécime (“T X”) e da extremidade de onde foi retirada (A ou B).

Tabela 2 – Valores dos ensaios de tração

Corpo de Prova	Resistência ao Escoamento		Resistência à Tração	
	MPa	(kgf/cm ²)	MPa	(kgf/cm ²)
T T02 A1	360,53	3.676	574,32	5.856
T T02 A2	330,06	3.366	561,64	5.727
L T02 A1	370,35	3.853	565,69	5.750
L T02 A2	377,84	3.777	563,87	5.768
T T04 B1	360,86	3.680	542,67	5.534
T T04 B2	350,26	3.572	535,21	5.458
L T04 B1	301,68	3.076	457,57	4.666
L T04 B2	335,97	3.426	528,30	5.387
T T05 B1	279,75	2.853	429,62	4.381
T T05 B2	290,19	2.959	427,02	4.354
L T05 B1	275,68	2.811	424,87	5.332
L T05 B2	266,01	2.713	427,57	4.360
T T06 B1	364,82	3.720	455,46	4.644
T T06 B2	350,57	3.575	460,62	4.697
L T06 B1	352,35	3.593	460,63	4.697
L T06 B2	342,63	3.494	456,85	4.659
T T10A1	352,51	3.595	550,97	5.618
T T10A2	371,68	3.790	563,27	5.744
L T10B1	404,45	4.124	556,99	5.680
L T10B2	415,4	4.236	552,44	5.633

O Relatório Técnico N.2 – Ensaio de Tração dos Materiais dos Tubos de Maio/2002 [33], elaborado pela PUC-Rio, contém todos os diagramas de Tensão Nominal x Deformação, Tensão Verdadeira x Deformação e Tensão Nominal x Deformação Nominal dos 20 corpos de prova.

3.5 Confecção dos espécimes tubulares

Os espécimes tubulares tiveram as suas extremidades fechadas com tampos, confeccionados com chapa de aço ASTM A 516 Gr 60, forjado a 900° C e resfriado ao ar tranqüilo. Os tampos foram fornecidos pela empresa Coopercon, seguindo a especificação ASTM 234 WPB, e soldados pela empresa Fluke engenharia, de acordo com as normas Petrobras N-133 - Soldagem e N-253 -

Projeto de Vaso de Pressão e Norma ASME Boiler and Pressure Vessel Code section VIII Division 1.

Os espécimes tubulares, inicialmente com 3000 mm, foram cortados com comprimentos variando de 2700 mm a 2795 mm.

Como os tampos apresentavam diâmetro externo maior que o dos espécimes, procedeu-se a um ajuste da espessura dos mesmos, por usinagem da sua extremidade, para permitir a soldagem nas condições preconizadas por norma.

Para cada um dos cinco tampos, foi instalada uma luva de 50 mm de diâmetro externo e rosca interna de 3/8 NPT, para permitir o enchimento e pressurização de cada espécime com água.

Após a instalação dos tampos, as juntas soldadas foram inspecionadas visualmente e por líquido penetrante, tendo sido todas aprovadas.

O Relatório Técnico N.4 – Confeção dos Tampos Soldados, de Maio/2002 [34], elaborado pela PUC-Rio, contém o descritivo do trabalho executado, bem como os relatórios de ensaios não destrutivos e certificado de fabricação dos tampos.

3.6

Teste de pressão dos espécimes tubulares

Para realizar os testes de pressão, todos os espécimes tubulares foram monitorados com dez extensômetros de resistência elétricos biaxiais (rosetas duplas) e seis triaxiais (rosetas triplas), com exceção do espécime T02 onde foram instaladas nove rosetas duplas. A localização destes extensômetros foi definida a partir de uma análise dos pontos com menores espessuras de parede obtidos pelas medições manuais e mecanizadas CSCAN. Dois desses extensômetros denominados de testemunhos, um biaxial e outro triaxial, foram instalados numa área íntegra, fora da região de corrosão.

A tabela 3 apresenta a localização dos pontos onde foram instalados os extensômetros. As células sombreadas referem-se aos pontos onde se iniciou a ruptura de cada espécime. No espécime T05 a ruptura teve início no ponto S 132, que não tinha sido escolhido para ser monitorado. Os pontos indicados com “*” foram instrumentados com rosetas triplas, enquanto que os demais com rosetas duplas.

Todos os extensômetros foram próprios para grandes deformações, do fabricante Tokyo Sokki Kenkyujo, tipo YRFLA-5. Os extensômetros instalados nos espécimes T02, T04, T05 e T10 foram colados com adesivo cianoacrilático Loctite 496 e do T06 com adesivo CNY.

Os extensômetros receberam proteção dupla à prova d’água e o cabeamento até o sistema de leitura foi realizado utilizando a técnica de três fios e cabos blindados.

Tabela 3 – Localização dos extensômetros em cada espécime

T02	T04	T05	T06	T10
Código do Ponto	Código do Ponto	Código do Ponto	Código do Ponto	Código do Ponto
A25	A 2 ½	A2	A 20	A 25 ½
A 37 ½	A 15	A 15	A 33	A 38
P 57*	Q 7*	T 13	U 42	V 61*
S 63*	Q 11	T 16*	R 60	U 75
Q 75	Q 19	R 35*	Q 69*	V 84
R 79	Q 29	S 38	U 85	W 91
Q 93	Q 42*	T 42*	T 93*	T 111
Q 115*	P 51*	T 56*	T 109*	V 125*
Q 131	Q 52	T 73*	S 123*	T 136
Q 133	Q 54	T 76	N 140	W 144*
R 136*	Q 60	T 79	U 148	W 155*
Q 140	P 61*	T 84*	R 150*	V 164*
Q 160	R 69*	T89	K 150	V 167
Q 165*	Q 75	T 97	Q 152*	V 170
R 185*	Q 92	T 101	T 153	V 172*
-	Q 115*	T 126	R 161	U 179

O sistema de pressão foi composto por uma bomba hidráulica da marca Amsler, um pequeno vaso separador água/óleo, dois transdutores de pressão, um manômetro e mangueiras hidráulicas.

O espécime foi preenchido com água e interligado na extremidade inferior do vaso separador, que por sua vez tinha a sua outra extremidade interligada à bomba hidráulica. Todo o sistema ficou isento de ar.

A pressão interna foi incrementada gradativamente a uma taxa de 1,7 kgf/cm²/min, até que fosse atingida a ruptura do espécime. O vaso de interface foi dimensionado para não permitir o ingresso de óleo lubrificante no espécime, durante todo o processo de pressurização.

A pressão interna foi monitorada por dois transdutores de pressão extensométricos calibrados, um do tipo GEFRAN e outro da BHL GP-GC (exceção para o Espécime T06, onde foram utilizados dois da marca GEFRAN).

Para o condicionamento e aquisição das leituras de deformação correlacionadas às leituras de pressão interna, durante os testes de pressão, foi utilizado o sistema Lynx ADS 2000.

As figuras 9, 10 e 11 apresentam, respectivamente, o espécime T04 instrumentado e sendo pressurizado, o momento da ruptura e após a ruptura.



Figura 9 – Espécime T04 instrumentado e sendo pressurizado



Figura 10 – Espécime T04 no instante da ruptura



Figura 11 – Espécime T04 após a ruptura

A tabela 4 apresenta os valores da pressão de ruptura para cada espécime com o respectivo volume de água injetado.

Tabela 4 – Pressão de ruptura e volume injetado

Espécime Tubular	Pressão de Ruptura (kgf/cm ²)	Volume Injetado (dm ³)
T 02	133,0	24,97
T 04	123,0	20,19
T 05	103,3	17,84
T 06	105,4	8,85
T 10	128,8	20,13

A tabela 5 apresenta os valores de volume injetado e de pressão no momento em que se inicia a deformação plástica da região corroída.

Tabela 5 – Pressão e volume injetado no início da deformação plástica

Espécime Tubular	Pressão (kgf/cm ²)	Volume Injetado (dm ³)
T 02	97,5	4,94
T 04	97,7	5,21
T 05	82,0	4,12
T 06	92,0	4,42
T 10	97,0	4,89

A figura 12 apresenta o gráfico volume injetado pela pressão interna no espécime T02.

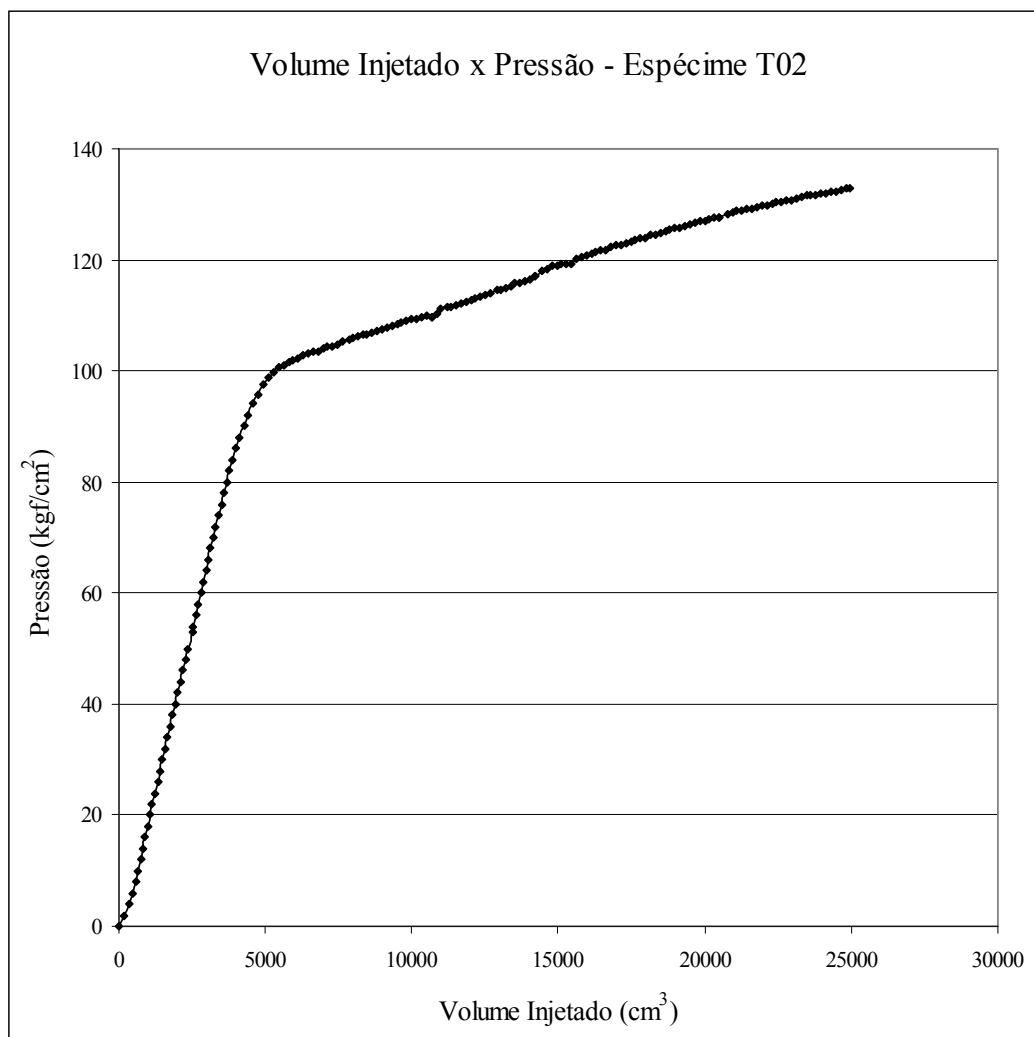


Figura 12 – Gráfico Volume Injetado x Pressão espécime T02

Os ensaios foram filmados por câmera de videocassete direcionada para a região mais sujeita à ruptura.

O Relatório Técnico N.5 – Testes de Pressão nos Espécimes Tubulares, de Junho/2002 [35], elaborado pela PUC-Rio, contém o descritivo do trabalho executado, bem como os diagramas de pressão x aumento de volume dos espécimes e pressão x deformação de todos os extensômetros instalados.