



Análise de Reparo Metálico Colado em Dutos com Mossas

Aluno: **Rafael J. L. Albernaz**

Orientador: **José Luiz de França Freire**

Co-orientador: **Ronaldo Domingues Vieira**

Rio de Janeiro
Dezembro de 2006

Agradecimentos

Ao professor orientador José Luiz de França Freire pela sua disposição e dedicação para orientar este trabalho, e sua paciência para ensinar.

Ao professor Co-orientador Ronaldo D. Vieira pela sua disponibilidade para ensinar os procedimentos necessários e pelos conhecimentos compartilhados.

Ao professor Antonio Carlos Miranda pelo auxílio na realização das mossas.

Ao aluno de doutorado Marco Antonio P. Rosas pela ajuda nos ensaios hidrostáticos dos espécimes.

À aluna de mestrado Mayra Amanda Vargas pelo desenvolvimento computacional do projeto e consultas.

Ao técnico Antônio Garcia pela sua pronta ajuda durante a confecção dos corpos de prova.

Ao chefe da oficina do ITUC Marques pela disponibilização de máquinas operatrizes.

Ao funcionário Celso pelo processo de serragem dos dutos.

À PUC-Rio pela disponibilidade do Laboratório de Ensaios Mecânicos.

À Apolo Tubos e Equipamentos S.A. pela doação dos dutos para os ensaios.

Aos nossos familiares pelo apoio constante.

A Deus.

Resumo

Este projeto tem por objetivo estudar o comportamento de reparo em dutos com defeitos tipo mossas. O reparo é constituído de uma camada metálica colada com adesivo epóxi. Este estudo foi realizado experimentalmente, onde quatro espécimes de dutos foram testados até sua pressão de ruptura, para avaliar o comportamento do reparo.

Inicialmente os dutos foram indentados sendo um com uma moessa de profundidade de 10% do diâmetro e três com profundidade de 15 % do diâmetro, em seguida foram reparados e ensaiados. O ensaio é efetuado com a injeção de água por um compressor pneumático, sendo aqusitados os dados de volume e pressão.

Palavras Chave

Reparo, Adesivo Epóxi, Mossa, Duto e Indentação.

Sumário

1 - INTRODUÇÃO	9
1.1 - OBJETIVO.....	9
1.2 - CONSIDERAÇÕES INICIAIS	9
1.3 - MÉTODOS DE REPARO	9
1.4 - ESCOPO DO TRABALHO	11
2 - MODELO ANALÍTICO	12
2.1 - INTEGRIDADE ESTRUTURAL DE DUTOS	12
2.2 - CRITÉRIOS DE RESISTÊNCIA	13
2.3 - TENSÕES EM DUTO SEM DEFEITO	14
2.4 - TEORIA DE MOSSAS EM DUTO	15
2.4.1 - COMPORTAMENTO DE MOSSAS EM DUTOS(REROUNDING).....	16
2.5 - TENSÕES NO REPARO COLADO.....	18
2.6 - FALHA DE UMA JUNTA COLADA.....	19
3 - ENSAIO DE TRAÇÃO DO MATERIAL DO DUTO, DA CHAPA E DO ADESIVO	20
3.1 - CONFECÇÃO DOS CORPOS DE PROVA DO DUTO	21
3.2 - CLASSIFICAÇÃO DO DUTO	25
3.3 - CORPOS DE PROVA DA CHAPA DE AÇO INOX.....	27
3.4 - RESISTÊNCIA AO CISALHAMENTO DO ADESIVO	28
4 - SIMULAÇÃO DO DEFEITO DE MOSSA	29
4.1 - REALIZAÇÃO DAS MOSSAS.....	29
4.2 - CONFECÇÃO DO REPARO	31
5 – ENSAIO DE RUPTURA POR PRESSURIZAÇÃO ESTÁTICA	41
5.1 - ETAPAS DO ENSAIO DE RUPTURA DOS DUTOS.....	37
6 - RESULTADOS E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS	41
7 – CONCLUSÕES	44

8 – SUGESTÕES	45
9 – BIBLIOGRAFIA	46
9.1 – LIVROS	46
9.2 – ARTIGOS, NOTAS E PERIÓDICOS	46
9.3 – NORMAS.....	47
9.4 – PROJETO FINAL.....	47
10 - ANEXOS.....	48
ANEXO 1 – RELATÓRIO DA SOLDA	49
ANEXO 2 – GRÁFICOS DE FORÇA VS DESLOCAMENTO DO INDENTADOR	50

Índice de Figuras

FIGURA 1: PARALELEPÍPEDO ELEMENTAR REPRESENTATIVO DE UM ESTADO DE TENSÕES.....	12
FIGURA 2: ESTADO DE TENSÕES NUM DUTO SEM CARREGAMENTO DE TORÇÃO E PRESSÃO INTERNA.....	13
FIGURA 3: FIGURA DAS VARIÁVEIS DA MOSSA.....	16
FIGURA 4: TIPOS DE PROFUNDIDADES DA MOSSA.....	17
FIGURA 5: RESISTÊNCIA DA JUNTA COLADA SIMPLES.....	19
FIGURA 6: TIPOS DE FALHA NAS JUNTAS COLADAS.....	20
FIGURA 7: DESENHO DO CORPO DE PROVA DO DUTO UTILIZADO.....	21
FIGURA 8: DESENHO DO CORPO DE PROVA PROPOSTO PELANORMA API 5L.....	22
FIGURA 9: CORTE DO CORPO DE PROVA.....	22
FIGURA 10: PRESANDO O CORPO DE PROVA.....	22
FIGURA 11: CORPOS DE PROVA DO DUTO.....	23
FIGURA 12: CORPOS DE PROVA DO DUTO MARCADOS.....	23
FIGURA 13: ENSAIO DE TRAÇÃO.....	24
FIGURA 14: ESTRICÇÃO E RUPTURA DO CORPO DE PROVA.....	24
FIGURA 15: ORIENTAÇÃO DOS CORPOS DE PROVA PARA ENSAIO DE TRAÇÃO SEGUNDO A API 5L.....	25
FIGURA 16: GRÁFICO DO ENSAIO DE TRAÇÃO DOS CORPOS DE PROVA DOS DUTOS.....	26
FIGURA 17: CHAPA DE AÇO AISI 304.....	25
FIGURA 18: ESQUEMA DE COLAGEM PARA O ENSAIO DO ADESIVO.....	26
FIGURA 19: MÁQUINA INSTRON 8501.....	29
FIGURA 20: COMPUTADOR PARA AQUISIÇÃO DE DADOS.....	28
FIGURA 21: INDENTAÇÃO TRANSVERSAL.....	29
FIGURA 22: DUTO AMASSADO TRANSVERSALMENTE.....	30
FIGURA 23: GRÁFICO DE INDENTAÇÃO DA MOSSA DE 10%.....	30
FIGURA 24: GRÁFICO DE INDENTAÇÃO DA MOSSA DE 15%.....	31
FIGURA 25: CALANDRAGEM DA CHAPA.....	33
FIGURA 26: PROCESSO DE LIXAMENTO DO DUTO.....	33
FIGURA 27: ESQUEMA DE COLAGEM DO REPARO.....	35
FIGURA 28: DUTO NA BANCADA DE TESTE HIDROSTÁTICO.....	36
FIGURA 29: BOMBA PNEUMÁTICO.....	38
FIGURA 30: TRANSDUTOR DE PRESSÃO.....	38
FIGURA 31: AQUISITOR DE SINAIS.....	30
FIGURA 32: TRANSDUTOR – MEDIDOR DE NÍVEL.....	30
FIGURA 33: ESQUEMA DE LIGAÇÕES DOS EQUIPAMENTOS.....	40
FIGURA 34: VOLUME VS PRESSÃO NO DUTO, PARA MOSSA DE 10%.....	41
FIGURA 35: VOLUME VS PRESSÃO NO DUTO, PARA MOSSA DE 15%.....	42

Índice de Equações

EQUAÇÃO 1: CRITÉRIO DE TRESCA	14
EQUAÇÃO 2: CRITÉRIO DE VON MISES.....	14
EQUAÇÃO 3: CÁLCULO DA PRESSÃO DE PROJETO SEGUNDO O CRITÉRIO DE TRESCA.....	15
EQUAÇÃO 4: CÁLCULO DA PRESSÃO DE PROJETO	15
EQUAÇÃO 5: CÁLCULO DO ALONGAMENTO.....	27
EQUAÇÃO 6: TENSÃO DE RUPTURA POR CISALHAMENTO NO ADESIVO.....	29

Índice de Tabelas

TABELA 1: RESULTADOS DO ENSAIO DE TRAÇÃO DOS CORPOS DE PROVA DO DUTO COM DEFEITO DE MOSSA.....	26
TABELA 2: TABELA DE CLASSIFICAÇÃO DOS DUTOS DA NORMA API 5L.....	26
TABELA 3: RESULTADOS DO ENSAIO DE TRAÇÃO DA CHAPA DE AÇO INOX.....	27
TABELA 4: RESULTADOS DO ENSAIO DO ADESIVO.....	27
TABELA 5: RESULTADOS DO ENSAIO DO INDENTADOR.....	32
TABELA 6: RESULTADOS DOS TESTES HIDROSTÁTICO.....	43

Lista de Símbolos

σ_1, σ_2 e σ_3 → Tensões principais.

σ_L → Tensão longitudinal em um cilindro de parede fina.

σ_R → Tensão radial em um cilindro de parede fina.

σ_C → Tensão circunferencial em um cilindro de parede fina.

D → Diâmetro do tubo.

t → Espessura da parede de um tubo.

P → Pressão interna atuante em um cilindro de parede fina.

τ_{\max} → Tensão cisalhante máxima.

σ_{\max} → Tensão principal máxima.

σ_{\min} → Tensão principal mínima.

S_y → Tensão de Escoamento.

P_d → Pressão de projeto do tubo.

SMYS → Specified Minimum Yield Strength (Resistência mínima ao escoamento especificada).

F → Fator de projeto para a construção de dutos.

E → Fator de junta longitudinal.

T → Fator de temperatura de operação para construção de dutos.

MAOP → Maximum Allowable Operation Pressure (Máxima pressão de operação admissível).

L → Comprimento da corrosão no sentido longitudinal.

d → Profundidade máxima da corrosão.

P_{defeito} → Pressão de falha para dutos corroídos.

S_{flow} → Resistência ao colapso plástico.

$S_u \rightarrow$ Resistência à ruptura.

$SMUS \rightarrow$ Specified Minimum Ultimate Strength (Resistência de ruptura mínima especificada).

$e \rightarrow$ Alongamento.

$A \rightarrow$ Área da seção resistente do corpo de prova.

$U \rightarrow$ Mínima tensão de escoamento requerida para o material.

$\tau \rightarrow$ Tensão de cisalhamento no adesivo.

Fruptura \rightarrow Força requerida para ocorrer ruptura por cisalhamento no adesivo.

Acolada \rightarrow Área colada com adesivo.

$H \rightarrow$ Profundidade da endentação (mm).

$H_p \rightarrow$ Máxima profundidade durante a endentação (mm).

$H_o \rightarrow$ Profundidade da endentação medida com o duto despressurizado (mm).

$H_r \rightarrow$ Profundidade da endentação com o duto pressurizado (mm).

1 Introdução

1.1 Objetivo

Este projeto tem por objetivo avaliar a eficiência de reparos metálicos colados em dutos que apresentam defeitos do tipo mossas “circunferencial” com diferentes profundidades.

1.2 Considerações Iniciais

Dutos são utilizados em larga escala nas indústrias. Devido ao elevado custo de implementação de dutovias novas e principalmente na substituição de vias já existentes, são pesquisadas propostas de caráter reparativo. Os produtos transportados possuem grande poder de contaminação e periculosidade, por esta razão os reparos são de fundamental importância. Os dutos podem ser instalados nos mais diversos ambientes, por isto estão expostos a fatores externos, que podem ocasionalmente impor danos a sua integridade estrutural. Alguns exemplos de agressões por falhas externas aos dutos são: intempéries, danos mecânicos por retroescavadeiras, na instalação e etc.

1.3 Métodos de Reparos

Atualmente existem diferentes tipos de reparos, que podem ser classificados em três instâncias: contingência, temporários e permanentes.

Os reparos de contingência são realizados para minimizar os impactos ao meio ambiente e às pessoas. Com isto os dutos podem continuar operando até que sejam projetados e executados reparos temporários ou permanentes [3]. Os reparos temporários são realizados para reforçar as regiões com danos, procurando devolver a integridade operacional do duto, o qual posteriormente deve ser substituído por um

reparo permanente [3]. Os reparos permanentes devolvem a integridade estrutural ao duto.

Exemplos de reparos permanentes são

- Corte e Substituição: consiste na troca do trecho corroído ou com moxa por um segmento de duto novo. É indicado na recuperação de dutos que perderam sua estanqueidade.
- Dupla Calha Soldada: consiste em envolver o duto com duas meias calhas soldadas longitudinalmente e circunferencialmente no duto, sem deixar nenhum espaço anular. Estes reparos têm suas variantes que são, por exemplo: reparos feitos com dupla calha com fechamento e aperto por parafusos, entre outros.
- Dupla Calha com Enchimento: consiste em envolver o trecho corroído com uma luva de diâmetro maior que o diâmetro do duto. No espaço anular se injeta resina epóxi ou outro material similar sob pressão.
- Luva de Material Compósito: consiste em envolver o trecho corroído com mangas de materiais compostos formados por tecido de fibra de vidro e uma matriz de resina.
- Hot Tapping: consiste em envolver o duto com duas meias calhas soldadas longitudinalmente e circunferencialmente no duto, sem deixar nenhum espaço anular. Estes reparos têm suas variantes que são, por exemplo: reparos feitos com dupla calha com fechamento e aperto por parafusos, entre outros. Em uma das meias calhas possui um flange onde será acoplado uma válvula tamponada, este dispositivo se aplica sobre a moxa [11].

Os métodos mencionados apresentam desvantagens. O método de corte e substituição normalmente implica em parada operacional acarretando alto custo [2]. A técnica de dupla calha com soldagem direta apresenta grande risco no caso da linha estar em operação, dependendo do produto circulante. A técnica de dupla calha com enchimento epóxi não é suficientemente rápida, uma vez que exige a construção de um molde com dimensões precisas, o que aumenta o custo e o tempo para a realização do reparo. O reparo com material compósito, devido a seu baixo módulo de elasticidade, trabalha após grandes deformações plásticas terem ocorrido no duto. Estes compostos também podem sofrer degradação com o tempo.

1.4 Escopo do Trabalho

Este trabalho propõe reparar os dutos com defeitos do tipo moessa com uma ou mais camadas metálicas coladas com resina epóxi e envolvendo o duto circunferencialmente, a fim de restabelecer sua integridade estrutural. Com este método o custo de sua aplicação é baixo, além de poder ser implementado facilmente no lugar onde o duto estiver operando.

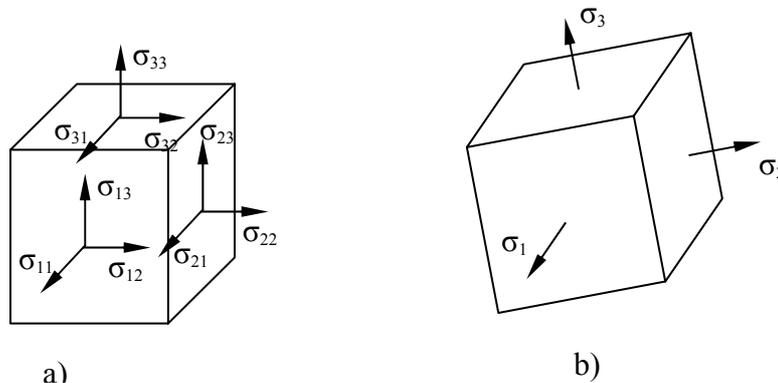
Neste trabalho foram produzidos quatro espécimes, com diferentes profundidades de moessas, para estudar a aderência da resina epóxi ao material do duto e analisar sua resistência em relação à pressão de operação e a pressão de ruptura do duto.

2 Modelo Analítico

2.1 Integridade Estrutural em Dutos

Nos dutos em operação, as tensões atuantes são originadas por distintas solicitações ou carregamentos. Geralmente, as avaliações de integridades são feitas através da aplicação de critérios de resistência, que tornam possível comparar um estado triaxial de tensões com o limite de resistência do material, obtido no ensaio de tração uniaxial.

O estado triaxial de tensões em um corpo em equilíbrio é representado pelo paralelepípedo elementar mostrado na figura 1.a. As componentes perpendiculares aos planos do paralelepípedo são as tensões normais (σ_{ii}). As componentes tangenciais, são as tensões cisalhantes (σ_{ij}). Os planos principais são definidos como aqueles onde a componente cisalhante é nula, e as tensões normais nelas atuantes são chamadas tensões principais, como mostrado na figura 1.b.



Paralelepípedo elementar representativo de um estado de tensão.

No caso de um duto (sem carregamento de torção), as direções dos planos principais são facilmente identificadas, já que coincidem com as direções circunferencial, longitudinal e radial do duto. Geralmente, já que os dutos têm paredes finas as tensões radiais se aproximam de zero quando comparadas às tensões

longitudinais e circunferenciais, o estado de tensão reduz-se então, a um estado biaxial de tensões (figura 2).

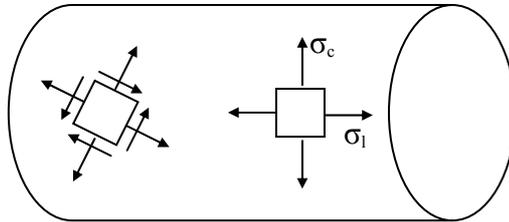


Figura 2 Estado de tensões num duto sem carregamento de torção e pressão interna

2.2 Critérios de Resistência

São dois critérios de resistência para materiais dúcteis: o de Tresca (máxima tensão cisalhante) e o de Von Mises (máxima energia de distorção), cujas eficiências são comprovadas através de testes e dos sucessos dos projetos ao longo da história. Estes critérios podem ser aplicados tanto para o escoamento como para a ruptura dúctil.

O critério de Tresca, ou da máxima tensão cisalhante, diz que acontece o escoamento quando no ponto mais solicitado do material a tensão cisalhante máxima atinge um valor crítico. Considerando um estado de tensões neste ponto representado pelas tensões principais, existem três tensões cisalhantes máximas que assumem valores iguais às metades das diferenças das tensões principais.

Convencionou-se $\sigma_1 > \sigma_2 > \sigma_3$, a maior tensão cisalhante máxima será $(\sigma_1 - \sigma_3)/2$. O valor crítico é representado pela tensão cisalhante máxima obtida do ensaio a tração uniaxial ($\sigma_{tração}/2$) onde $\sigma_1 > 0$ e σ_2 e σ_3 são nulas. No escoamento,

$\sigma_{tração} = S_y$ e o critério de Tresca pode então ser representado por:

$$\sigma_{Tresca} = \sigma_1 - \sigma_3 = S_y \quad (1)$$

Esta formulação simples facilita seu emprego em soluções analíticas de problemas elasto-plásticos; mas ignora a influência de uma das tensões principais o que, em alguns casos, tira a exatidão do método.

O critério de Von Mises ou da máxima energia de distorção apresenta valores melhores na caracterização do escoamento, sendo menos conservativo que o critério de Tresca Segundo este critério, acontece o escoamento no ponto mais solicitado em um componente qualquer no estado tri axial de tensões, quando a sua energia elástica de distorção por unidade de volume for igual à energia de distorção que atua no corpo de prova no teste uniaxial de tração no instante do escoamento, isto é, quando $\sigma_{tração} = S_y$.

$$U_d = \frac{1+\mu}{3.E} \cdot \frac{(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2}{2} = \frac{1+\mu}{3.E} \cdot \frac{\sigma_{tração}^2}{2}$$

Então:

$$\sigma_{Mises} = \frac{1}{\sqrt{2}} \cdot \sqrt{(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2} = S_y \quad (2)$$

2.3 Tensões em Dutos sem Defeito

Segundo a norma ASME B31.4, o cálculo da pressão de projeto para dutos sem defeito é realizado utilizando-se o critério de Tresca. Para um tubo de paredes finas, considera-se σ_1 como a tensão circunferencial σ_c e σ_3 como a tensão radial ou pressão interna ($\sigma_r = -P$) a qual pode ser desprezada por ser pequena em relação σ_c .

Tem-se então que:

$$\sigma_{Tresca} = \sigma_c = \frac{P.D}{2.t} = S_y \cdot fator \quad (3)$$

onde S_y é o limite de escoamento do material.

A recomendação API 5L [11] e a norma ASME B31.4 [13] usam $S_y = SMYS$ (limite de resistência mínima ao escoamento especificada para o material). O fator usado na equação (3) de compõe-se em três parcelas: (i) fator de projeto, (ii) eficiência da junção por solda e (iii) temperatura de trabalho (F, E e T respectivamente)

$$P_d = \frac{2.t.SMYS}{D} \cdot F \cdot E \cdot T \quad (4)$$

onde F é 0.72 para oleoduto e T e E são geralmente iguais a 1 [14].

A máxima pressão de operação admissível (MAOP) não poderá ser maior que P_d e só poderá ser usada quando for feito um teste hidrostático onde a pressão de teste máxima deve ser mantida igual a 1.25 x MAOP por pelo menos quatro horas.

2.4 Teoria de Mossas em Dutos

Uma mossa é definida como uma depressão que produz uma variação brusca na curvatura da parede do duto, causado pelo contato com um corpo estranho, resultando na deformação plástica da parede do duto. A mossa (figura 3) varia conforme a pressão interna e, por conseguinte, aumentando-se a pressão interna reduz-se a mossa. A recuperação elástica e o re-arredondamento descrevem o comportamento da mossa quando o indentador é removido e a pressão interna é modificada.

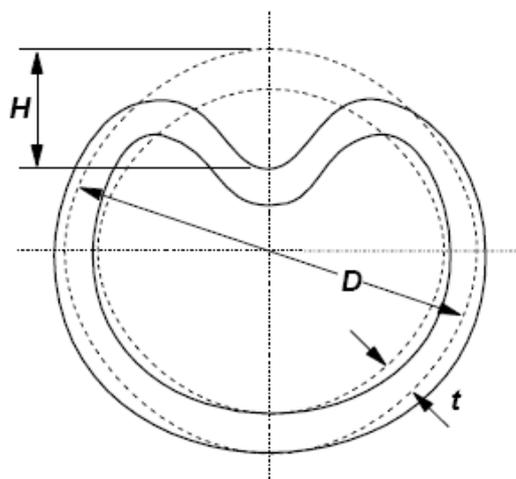


Figura 3 Figura das variáveis da moxa

A profundidade da moxa (H_p) é definida como a máxima redução de diâmetro do duto quando comparado com o diâmetro original. Assim, H_p é igual ao diâmetro nominal menos o diâmetro mínimo. Esta definição para profundidade da moxa inclui mossas locais e qualquer divergência da secção nominal circular.

A recuperação elástica é a redução da profundidade da moxa durante o descarregamento elástico que ocorre quando o indentador é removido do duto.

O re-arredondamento é definido como a mudança que ocorre na profundidade da moxa em função da variação da pressão interna.

Mossa confinada é a moxa que não é livre para re-arredondar porque o indentador não foi removido. Um exemplo seria a moxa causada por uma rocha através da movimentação do solo.

Mossa não confinada é a moxa que é livre para se recuperar elasticamente quando o indentador é removido e permanece livre para re-arredondar quando a pressão na linha variar [7].

Nomenclaturas:

H - Profundidade da mocha (mm)

H_p - Máxima profundidade durante a indentação (mm)

H_o - Profundidade da mocha medida com o duto despressurizado (mm)

H_r - Profundidade da mocha com o duto pressurizado (mm)

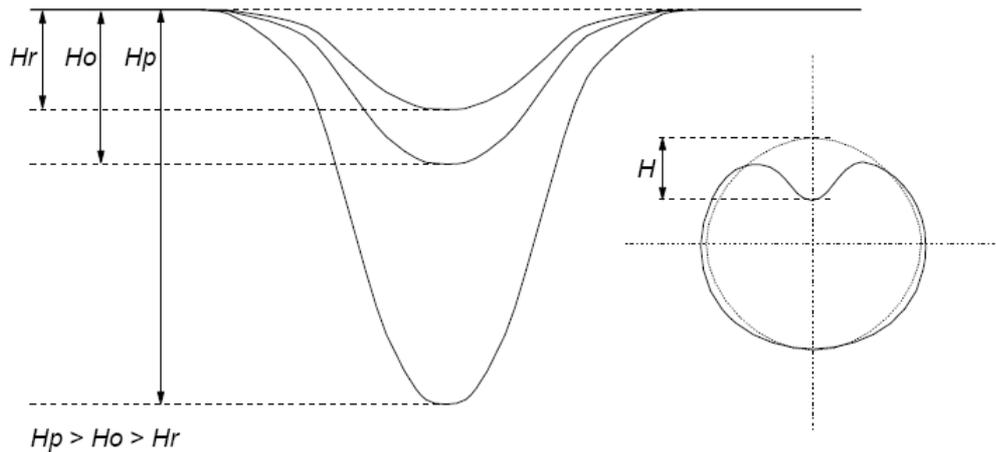


Figura 4 Tipos de profundidade da mocha

2.4.1 Comportamento de Mossas em Dutos (rerounding)

No caso de um duto submetido à pressão interna estática, a introdução de uma mocha simples não é capaz de provocar uma redução significativa da sua resistência à pressão interna, ao menos que ela seja muito profunda. O retorno da mocha causado pela pressão interna atuante permite que o duto recupere parcialmente a sua forma circular original causando re-arredondamento (“*rerounding*”) e, conseqüentemente, melhorando a sua resistência à pressão interna nominal.

A recuperação da circularidade pode ser elástica (sem redução permanente da profundidade da moessa) ou plástica (com redução permanente da profundidade da moessa).

2.5 Tensões no Reparo Colado

Nos reparos para dutos usando camada metálica colada, serão utilizados os conceitos para juntas simples onde o comprimento sobreposto é igual ao perímetro do duto. A largura da junção é o comprimento do reparo.

No projeto da junta é recomendável que a área de colagem possua uma rugosidade que permita ao adesivo uma boa aderência.

O adesivo a ser utilizado no reparo é a resina epóxi porque possuem excelente aderência aos materiais metálicos, geralmente possuem resistência maior do que os outros adesivos, suportam uma faixa mais ampla de temperaturas, e são ideais para estruturas submetidas a altas tensões ou condições de serviço adversas, tais como calor e umidade(intempérie).

A resina epóxi é indicada para reforços estruturais e revestimentos, porque depois da cura resulta em um polímero termo fixo que suporta altas temperaturas (até 120°C com aproximadamente as mesmas propriedades mecânicas para o adesivo epóxi usado neste reparo), além de ter resistência ao envelhecimento por calor e resistência química aos diversos tipos de solo e solventes. É importante na seleção do adesivo considerar o tempo de manuseio, a temperatura do duto durante a aplicação, a temperatura de operação do duto, o tempo de aplicação e as condições locais.

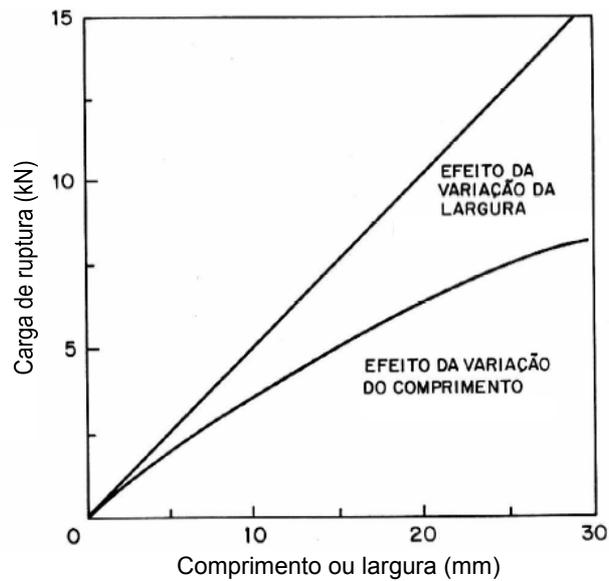


Figura 5 Resistência da junta colada simples

O gráfico da figura 5, apresenta de forma qualitativa a resistência da junta colada simples. No gráfico pode-se ver que a resistência da junção não aumenta proporcionalmente com o comprimento sobreposto, e alcança um valor limite para grandes comprimentos, mas a resistência aumenta proporcionalmente com a largura da junção. A resistência ao cisalhamento das juntas coladas também é dependente da espessura da linha de colagem, obtendo-se maior resistência à medida que a espessura diminui.

2.6 Falha de uma Junta Colada

As falhas nas juntas coladas podem ocorrer no adesivo, nos aderentes ou na interface adesivo-aderente. As falhas mais comuns são as falhas adesivas e as falhas coesivas. A falha coesiva ocorre no interior do adesivo, e a falha adesiva ocorre na interface adesivo-aderente (figura 6). A que tem mais probabilidade de acontecer é a falha coesiva, já que as forças de adesão por unidade de área são maiores que a

resistência à ruptura experimental [14]. Impurezas e gorduras contribuem para ocasionar a falha da colagem.

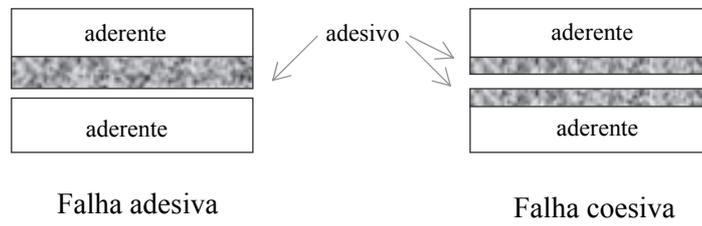


Figura 6 Tipos de falha nas juntas coladas

3 Ensaio de Tração do Material do Duto, da Chapa e do Adesivo

Para a especificação do duto utilizado nos ensaios, foi realizado o ensaio de tração nos laboratórios do ITUC, na PUC - Rio e o duto classificado segundo a norma API Specification 5L de 2004 [11]. O Ensaio determinou os limites de escoamento, ruptura e alongamento do material do duto (Aço Carbono) para o defeito de massa.

O material da chapa (Aço Inox), utilizada como reparo nos dutos, e os dados da resistência ao cisalhamento do adesivo epóxi (Araldite AV 138M com endurecedor HV998), foram utilizados os mesmos da Tese de Mestrado do Marco Antônio P. Rosas, pela PUC – Rio [2].

3.1 Confeção dos Corpos de Prova do Duto

Para o duto utilizado, que foi fabricado com costura pelo processo de soldagem por resistência elétrica (ERW), os corpos de prova foram confeccionados (figura 7).

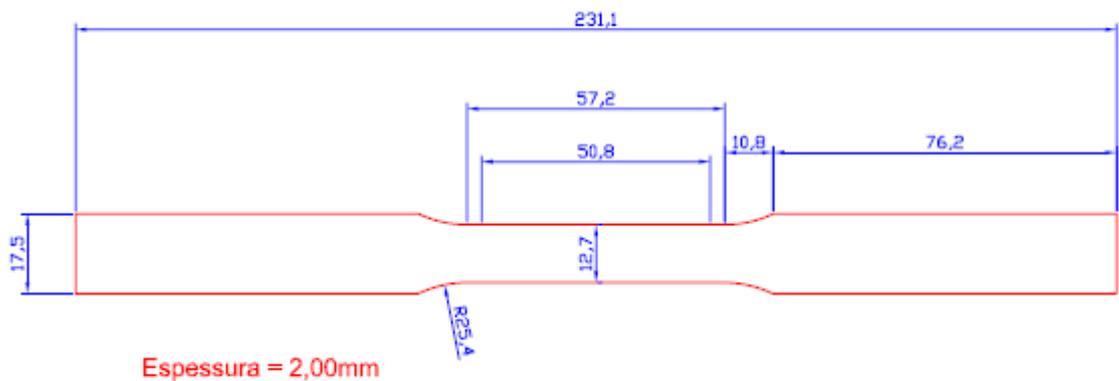


Figura 7 Desenho do corpo de prova do duto utilizado

As dimensões são similares às mencionadas pela norma API Specification 5L [11] (figura 8), porém foi reduzida a largura da secção resistente para 12,7mm (1/2”) em

vez de 38.1mm (1 1/2") para adequação as garras da máquina de ensaio de tração (ver figuras 13 e 14).

Foi suposto que tal redução de largura não influenciaria nos resultados, o que de fato se constatou com os resultados teóricos e experimentais de ruptura do duto (ver figura 9).

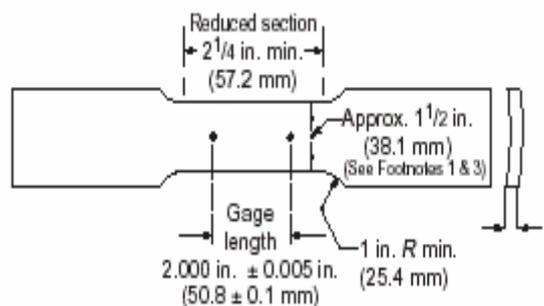


Figura 8 Desenho do corpo de prova proposto pela norma API 5L

Primeiramente, os dutos foram cortados (figura 9) nas direções transversais e longitudinais por uma máquina fresadora.



Figura 9 Corte do corpo de prova



Figura 10 Prensando o corpo de prova

Em seguida, as chapas extraídas foram prensadas a fim de obter forma plana (figura 10) e posteriormente foram usinadas até a forma final, na PUC - Rio. Ao prensar a chapa, poderia ser questionado o aumento da resistência devido ao encruamento do material, porém, este efeito já é previsto pela API 5L [11].

As chapas foram então identificadas e marcadas com riscos (figuras 11 e 12), a fim de medir o alongamento.

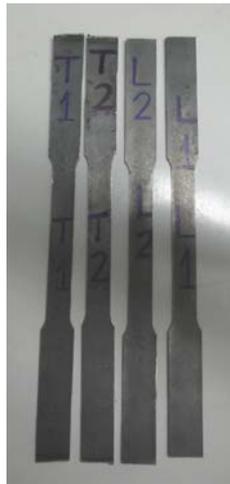


Figura 11 Corpos de prova do duto.



Figura 12 Corpos de prova do duto marcados.

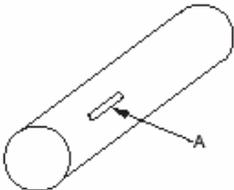
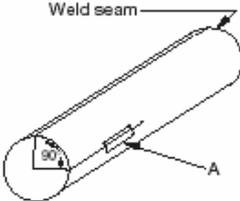
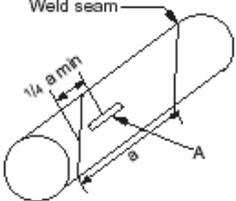
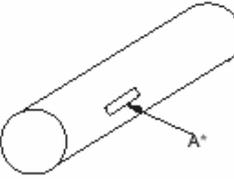
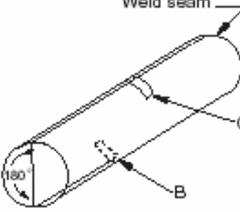
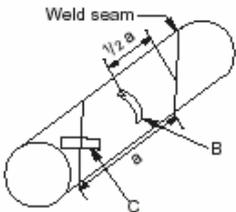
Segundo a norma API 5L [11](figura 15), não são necessários ensaios de tração na direção transversal para o diâmetro de 3. Mesmo assim foram confeccionadas e ensaiadas 2 amostras.



Figura 13 Ensaio de tração



Figura 14 Estricção e ruptura do corpo de prova

SIZE	SEAMLESS PIPE	WELDED PIPE	
		Longitudinal Seam	Helical Seam
< 8 ⁵ / ₈			
≥ 8 ⁵ / ₈			

Notes:

A = Longitudinal specimen (any circumferential location for seamless).

B = Transverse specimen. For double seam pipe, the specimen shall be taken from a location midway between the welds.

C = Transverse weld specimen.

* For cold expanded seamless pipe size 8⁵/₈ and larger, all tensile tests shall be in the transverse direction.

Figure 3—Orientation of Tensile Test Specimens

Figura 15 Orientação dos corpos de prova para ensaio de tração segundo a API 5L

Tensão X deformação dos Corpos de Prova

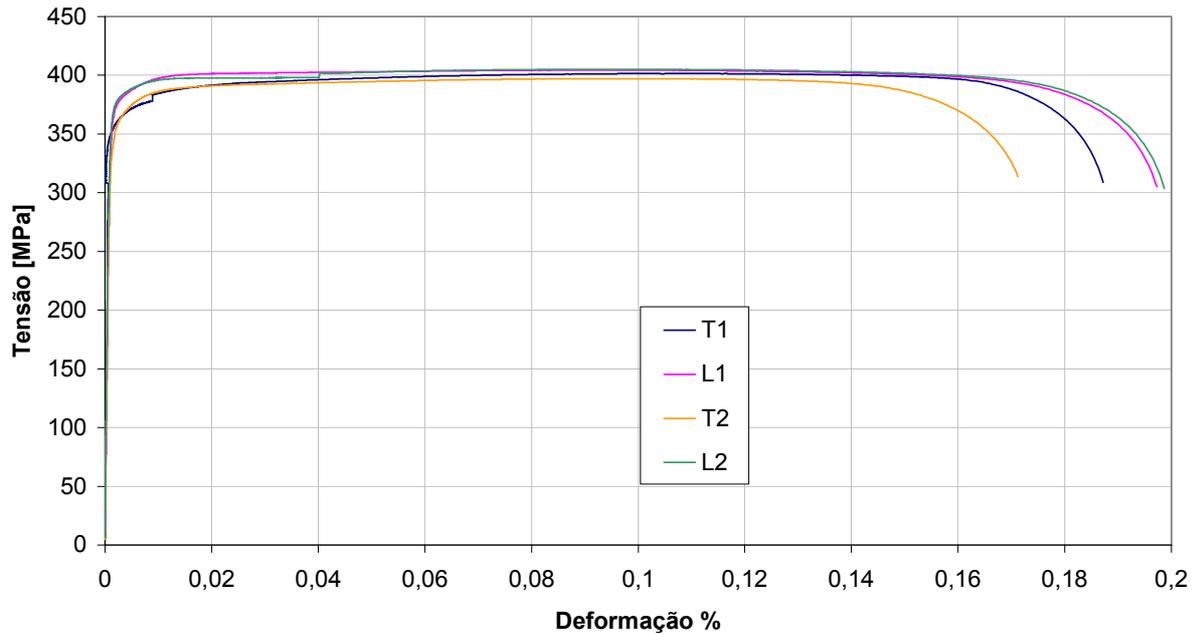


Figura 16 Gráfico do ensaio de tração dos corpos de prova dos dutos

3.2 Classificação do Duto

Os dutos utilizados para os testes não se enquadram nas dimensões previstas pelas normas API 5L [11] e ASME B36.10M – 2000 [12], porém, podem ser considerados como amostras em escala de dutos que guardem a mesma razão de diâmetro por espessura de parede. O diâmetro externo para o duto apresentado neste trabalho é de 76,0 mm (3”), com espessura de parede igual a 2,0 mm (0,079”). A razão de D/t obtida é igual a 38.

Após os resultados dos ensaios de tração na tabela 1, os dutos com o defeito de moosa foram classificados como equivalentes ao API 5L - Grau A - PSL1.

Resultados do ensaio de tração dos corpos de prova do tubo						
Corpo de Prova	Seção (mm)		Alongamento		Tensão (MPa)	
	Espessura	Largura	Percentual	Unid. SI (mm)	Escoamento (0,05 % def.)	Ruptura
Transversal 1	2	12,4	32,40%	16,20	371	401
Transversal 2	2	12,35	32,00%	16,00	375	399
Transversal 3	2	12,35	32,00%	16,00	375	399
Transversal 4	2	12,35	32,00%	16,00	375	399

Tabela 1 Resultados do ensaio de tração dos corpos de prova do duto com defeito de moosa

A Tensão de Escoamento foi determinada como a tensão necessária para efetuar uma deformação equivalente a 0,5%; enquanto o alongamento foi calculado através da fórmula abaixo (para unidades SI) [11]:

$$e = 1944 \frac{A^{0,2}}{U^{0,9}} = \frac{24,8^{0,2}}{371^{0,9}} = 17,99\% \quad (5)$$

Equação 1 Cálculo do alongamento

Sendo que “A” é a área da seção resistente e “U” é a mínima tensão de escoamento requerida para o material. Note que o alongamento percentual mínimo foi atendido com relação à tabela [2] mesmo com a diminuição da largura do corpo de prova em cerca de 60%.

Table 3A—Tensile Requirements for PSL 1

(1) Grade	(2) Yield Strength, Minimum		(3) Ultimate Tensile Strength, Minimum		(4) Elongation in 2 in. (50.8 mm), Minimum, Percent
	psi	MPa	psi	MPa	
A25	25,000	(172)	45,000	(310)	a
A	30,000	(207)	48,000	(331)	a
B	35,000	(241)	60,000	(414)	a
X42	42,000	(290)	60,000	(414)	a
X46	46,000	(317)	63,000	(434)	a
X52	52,000	(359)	66,000	(455)	a
X56	56,000	(386)	71,000	(490)	a
X60	60,000	(414)	75,000	(517)	a
X65	65,000	(448)	77,000	(531)	a
X70	70,000	(483)	82,000	(565)	a

Tabela 2 Tabela de classificação dos dutos da norma API 5L

3.3 Corpos de Prova da Chapa de Aço Inox

As chapas e os dados experimentais referentes aos corpos de prova da chapa de aço inox Aisi 304 (figura 17) utilizados para reparo nos tubos, foram aproveitados da tese de mestrado Rosas para este trabalho. As seguintes características para o material foram apontadas:

1. Espessura: 0,46 mm
2. Limite de escoamento: 318,2 MPa
3. Limite de ruptura: 814,2 MPa
4. Deformação máxima: 80%



Figura 17 Chapa de Aço Aisi 304

Resultados do ensaio de tração – chapa de aço inox.				
Corpo de Prova	Seção (mm)		Tensão (MPa)	
	Espessura	Largura	Escoamento (0,05 % def.)	Ruptura
I1	0,46	12,8	318,2	814,2

Tabela 3 Resultados do ensaio de tração da chapa de aço inox

3.4 Resistência ao Cisalhamento do Adesivo

Assim como as chapas utilizadas, o adesivo epoxi (Araldite AV 138M com endurecedor HV998) proposto para os dutos com mossas, foram aproveitados da tese de mestrado de Rosas [2] e outros conhecimentos [3] [4]. O cálculo da tensão de ruptura por cisalhamento foi feito considerando:

$$\tau = \frac{F_{ruptura}}{A_{Colada}} \quad (6)$$

Equação 2: Tensão de ruptura por cisalhamento no adesivo.

Sendo que a mínima tensão cisalhante para ruptura obtida foi a de 4,1 MPa.

Para o ensaio, duas chapas sobrepostas foram coladas em 1” quadrada e submetidas ao ensaio de tração (figura 18), foram obtidas as Resistências à ruptura por cisalhamento para os corpos de provas dispostos na tabela [4]

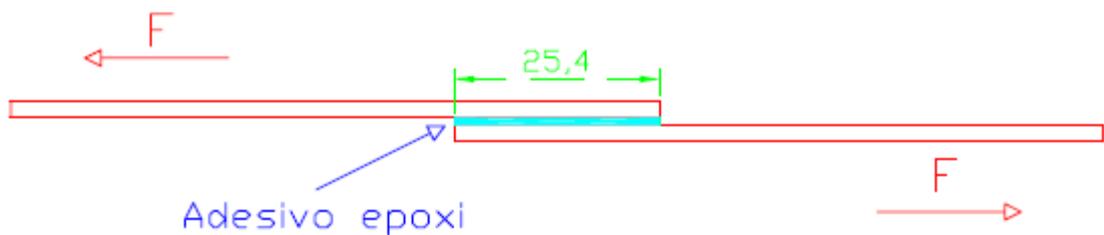


Figura 18 Esquema de colagem para o ensaio do adesivo

Resultados de τ	CP1	CP2	CP3	CP4	CP5	CP6	CP7	CP8	CP9
Resistência à ruptura por cisalhamento [MPa]	4,4	5,6	4,1	4,4	4,4	4,2	4,3	4,7	4,3

Tabela 4 Resultados do ensaio do adesivo

4 Simulações do Defeito de Mossa

4.1 Introdução das Mossas

A introdução dos defeitos de mossa nos dutos foi realizada no laboratório de Fotomecânica da PUC - Rio, utilizando uma máquina Instron 8501 (ver figura 19). Os dados foram coletados por um sistema aquisitor de dados digital para medição de forças e deslocamentos aplicados (ver figura 20). Desta forma é possível garantir a repetibilidade da mossa entre os dutos que serão testados com reparo e sem reparo.



Figura 19 Máquina Instron 8501



Figura 20 Computador para aquisição de dados

Foi escolhido como indentador uma barra cilíndrica com 25mm de diâmetro por 77mm de comprimento, sendo que suas duas extremidades possuíam chanfros de 1mm. Para realizar as mossas transversais controladas, posicionou-se na metade do comprimento do duto o indentador, a fim de minimizar o efeito dos tampões nas condições de contorno (ver figuras 21 e 22).

Com os dados adquiridos durante a geração da mossa foi comprovado que as quatro mossas transversais são semelhantes.



Figura 21 Indentação transversal



Figura 22 Duto amassado transversalmente

Este gráfico apresenta a curva da força vs o deslocamento, realizado pelo indentador.

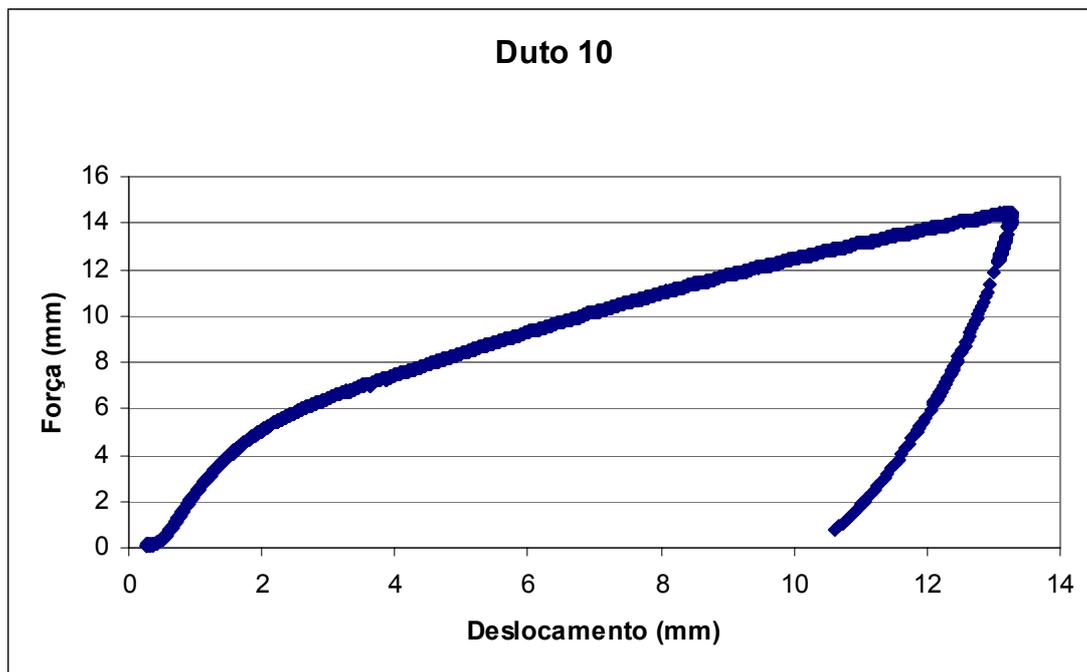


Figura 23 Gráfico de indentação da mossa de 10%

Este gráfico apresenta a curva de força vs deslocamento, realizado pelo indentador.

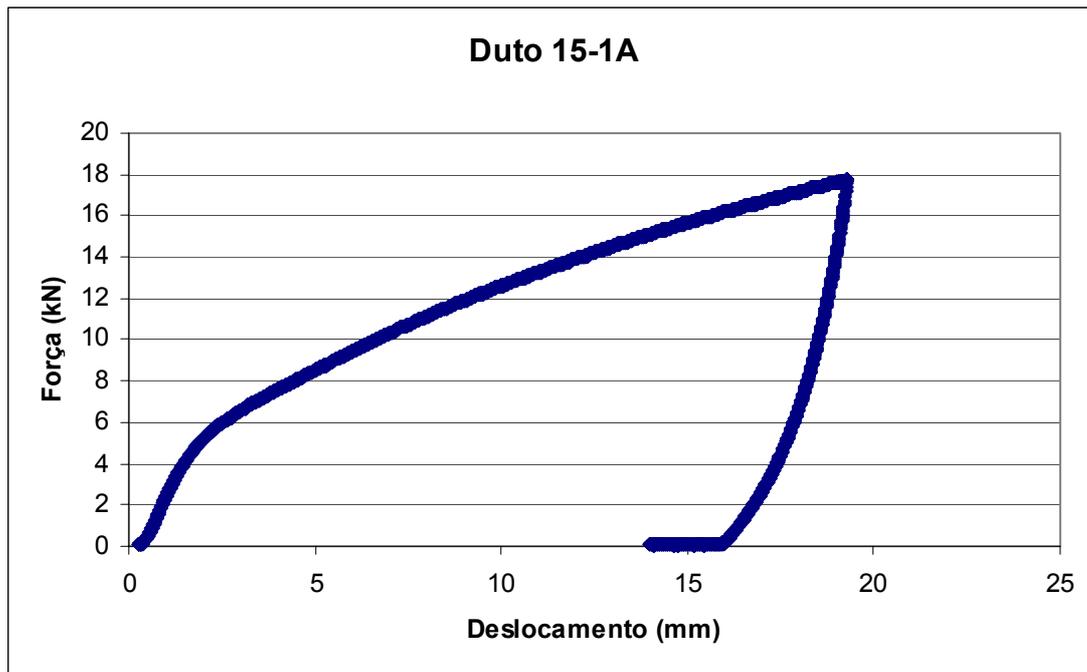


Figura 24 Gráfico de indentação da mossa de 15%

Os gráficos que representam a indentação dos outros dois dutos com mossa de 15% são apresentados no apêndice [2].

Na tabela 5, estão apresentados os dados aqusitados ao indentar as mossas. Em força máxima apresentam-se os valores máximos alcançados para obter a máxima profundidade de indentação H_p . O valor de H_r é equivalente à profundidade remanescente, ΔH após a retirada da carga equivale ao valor da recuperação elástica da profundidade e %D é a profundidade em porcentagem do diâmetro nominal do duto.

	Força máxima (kN)	H_p (mm)	H_r (mm)	Δh (mm)	%D

Duto 10	13,3	14,4	10,6	3,8	10
Duto 15-1A	17,7	19,3	14,0	5,3	15
Duto 15- 2B	17,6	19,4	14,0	5,4	15
Duto 15- 3C	17,6	19,5	14,0	5,5	15

Tabela 5 Resultados do indentador

4.2 Confeção do Reparo

Foi utilizada uma chapa de aço inox de largura igual a: 2π .(raio do duto + espessura da camada da chapa inox + espessura do adesivo) – 5% da circunferência do duto, considerando as espessuras de 0,46 mm para a camada da chapa inox e de 0,1 mm para o adesivo. Para o comprimento, consideramos três diferentes: 280mm, 300mm e 320mm.

O corte da chapa para obtenção das lâminas de reparo é feito levando-se em consideração seu sentido de laminação, para que este coincida com o sentido circunferencial do duto. As lâminas e os dutos foram lixados (figura 26) para garantir melhor aderência ao adesivo e a eliminação de óxidos ou outras impurezas (ver figura 4.5), e então calandradas (ver na figura 25).



Figura 25 Calandragem da chapa



Figura 26 Processo de Lixamento do Duto

No processo de colagem (figuras 27 e 28) utilizou-se o adesivo formado pela mistura de Araldite AV 138 com o Endurecedor HV 998, com uma relação de 100/40 partes por peso, como recomenda o fabricante. A quantidade de adesivo foi de 1280 gramas por metro quadrado. Por exemplo, a primeira camada tem uma área sobreposta de 0.0076 m², o que precisa de 98 gramas de adesivo, e segundo a relação de 100/40 pode-se escrever:

Peso de Araldite = $5/7$ peso total requerido

Peso de Endurecedor = $2/7$ peso total requerido

Então, a camada tem: 70g de Araldite AV 138 e 28g de Endurecedor HV 998.

O tempo de manuseio do adesivo é de 30 minutos a 24°C, tempo no qual foi depositado o adesivo em ambas as superfícies das partes a serem coladas. Estas foram pressionadas entre si por meio de braçadeiras, por um tempo de 24 horas a 24°C, sendo que este tempo decresce na medida em que aumenta a temperatura.



Figura 27 Fases da colagem do reparo



Figura 28 Esquema de colagem do reparo

5 Ensaio de Ruptura por Pressurização Estática

Nesta etapa, os dutos com e sem reparos foram pressurizados até a ruptura da parede.

5.1 Etapas do Ensaio de Ruptura dos Dutos

Inicialmente, todos os dutos foram completamente preenchidos com água, montados sobre uma bancada de madeira e presos por duas braçadeiras (ver figura 28).



Figura 28 Duto na bancada de teste hidrostático

O sistema de aquisição de dados foi calibrado, incluindo os transdutores de volume e de pressão. A mangueira foi então conectada ao duto e a uma bomba pneumática (Ver esquema na figura 33). Na seqüência, os dutos foram pressurizados até o rompimento.

Os equipamentos utilizados foram:

Bomba pneumática de deslocamento positivo.



Figura 29 Bomba pneumática

Transdutor de pressão marca Gefran com capacidade de medição de até 700 bar.



Figura 30 Transdutor de pressão

Um sistema de aquisição de sinais marca Lynx, modelo ADS2000



Figura 31 Aquisitor de sinais

Medidor de nível – Volume



Figura 32 Transdutor - Medidor de nível



Figura 33 Esquema de ligação dos equipamentos

6 Resultados e Discussão dos Resultados

O duto (Duto10) possui uma camada de reparo e sua mocha tem 10% de profundidade do diâmetro externo. É notado no seu gráfico um vale quando o volume tem o valor de 150 cm^3 , onde ocorre o descolamento da camada de reparo, assim ocasionando uma queda abrupta da pressão, em função da expansão que o duto realiza, sendo necessária a injeção de água para a retomada da pressão até a pressão de ruptura, ocorrida no valor de 23MPa (ver figura 34).

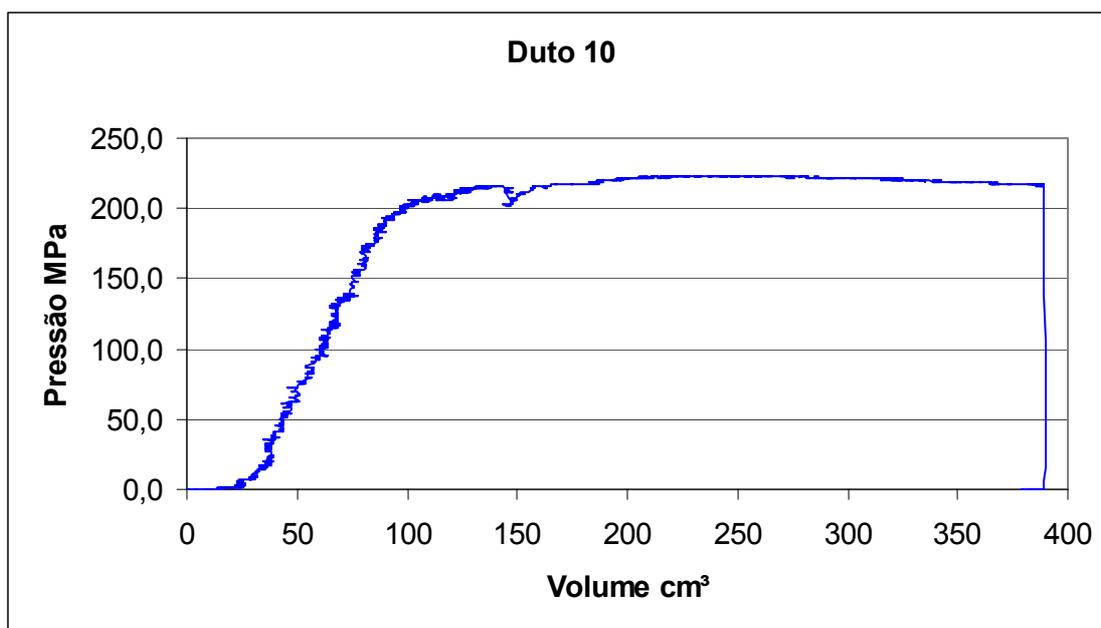


Figura 34 Volume vs Pressão no duto, para moosa de 10%

O duto (15-1A), não possui reparo e sua moosa tem 15% de profundidade do diâmetro externo. Os dutos (15-2B) e (15-3C) possuem moosas de 15% de profundidade do diâmetro externo, e reparos que variam apenas no comprimento sendo respectivamente 300 mm e 320 mm.

O duto (15-1A) foi testado com o objetivo de fornecer o resultado da pressão de ruptura para comparar com os resultados dos dutos reparados, já que a moosa possui um valor considerável, no entanto é demonstrado nos gráficos que os valores das pressões de ruptura para os dutos (15-2B) e (15-3C) não foram alterados em função da moosa, todos possuem o valor entorno de 22 MPa.

Os gráficos dos três diferentes dutos apresentam inclinações diferentes, sendo o de menor inclinação o gráfico do duto (15-1A), pois o mesmo não possui reparo, logo permite uma maior expansão. Para os dutos (15-2B) e (15-3C), as inclinações dos

gráficos são maiores que a do duto (15-1A), este fato se deve a eficiência do reparo presente, tornando o duto mais rígido.

Os gráficos dos dutos (15-2B) e (15-3C) possuem uma descontinuidade que se deve ao descolamento do reparo, onde é evidenciada a expansão, pois ocorre uma queda abrupta na pressão neste instante, que é retomada ao longo do processo com o aumento do volume.

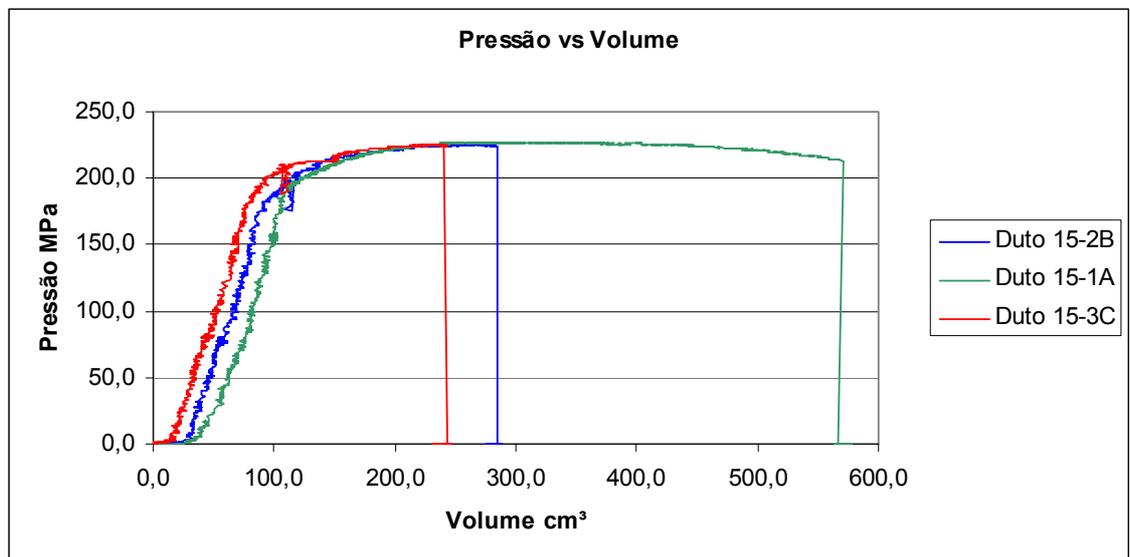


Figura 35 Volume vs Pressão nos dutos para massa de 15%

Os gráficos de pressão vs volume, dos testes hidrostático para os quatro dutos, não iniciam na origem devido à presença de ar no sistema e ao ajuste de início de leitura. São dispostos os valores de pressão de descolamento, pressão de ruptura e a localização da falha na tabela 6.

	Pressão de descolamento	Pressão de	Localização da falha

		ruptura	
Duto 10	21,2	22,3	Fora da zona afetada pela mossa
Duto 15-1A	Sem reparo	22,6	Fora da zona afetada pela mossa
Duto 15- 2B	20,1	22,4	No contorno da mossa
Duto 15- 3C	21,5	22,5	No contorno da mossa

Tabela 6 Resultados dos testes hidrostático

7 Conclusões

As mossas residuais de 10% e de 15% do diâmetro não são defeitos que comprometam a integridade do duto quanto à pressão de ruptura. Portanto, os reparos são desnecessários para a recuperação da resistência mecânica no que se refere a carregamentos estáticos.

O reparo possui eficiência até a pressão de 20 MPa, pressão em que o mesmo se desprende totalmente do duto perdendo sua funcionalidade, logo o reparo com uma camada é insuficiente para garantir um bom desempenho deste método de reparo, já que seu descolamento ocorre em pressões menores que a de ruptura.

8 Sugestões

O duto em sua vida útil sofre ciclos de pressão, o que pode gerar falhas mecânicas por fadiga na região de contorno da massa. Como estes dutos operam por cerca de 25 anos (vida útil), é recomendado um estudo quanto à fadiga e ensaiar se esta proposta de reparo será eficiente.

9 Bibliografia

9.1 Livros

[1] Lardner, T.J. / Archer R.R. – Mechanics of Solids, An Introduction.

9.2 Artigos, Notas e Periódicos

[2] Rosas, Marco Antonio P. – Tese de Mestrado - 2006 (PUC-Rio)

[3] Dias, Joanes S. / Grion Julio C. / Lima, Leandro O. / Soares, Nelson F. / Viera, Ronaldo D. - Análise do desempenho de um Reparo em duto corroído Utilizando Multi-camadas Metálicas coladas – Projeto Final de Curso - CEFET-RJ – Julho de 2004

[4] Rosas, Marco Antonio P. / Dias, Joanes S. / Grion Julio C. / Lima, Leandro O. / Soares, Nelson F. / Viera, Ronaldo D. / Freire, José Luiz de F. - Análise Do Desempenho De Um Reparo Em Duto Corroído - Utilizando Multi-Camadas Metálicas Coladas - Prêmio Petrobras de Tecnologia – 2004

[5] Rosenfeld, Michael J. – Factors To Consider When Evaluating Damage On Pipelines Artigo do Oil & Gas Journal (9 de setembro de 2002)

[6] Cosham, Andrew / Hopkins, Phil - The Pipeline Defect Assessment Manual (PDAM), A Report To The PDAM Joint Industry Project.

Relatório: NR00018/4238.1.10/R1.01

[7] API PUBLICATION 1156 (ADDENDUM) - Effects of Smooth and Rock Dents on Liquid Petroleum Pipelines (Phase II) – Outubro de 1999

[8] Filho, Byron G Souza– Notas de aula - Disciplina Projeto Mecânico de Dutos (PUC-Rio)

[9] Freire, José Luiz de F. – Notas de aula - Disciplina Projeto Mecânico de Dutos (PUC-Rio)

[10] Freire, José Luiz de F. – Notas de aula - Disciplina Projeto de Sistemas Mecânicos (PUC-Rio)

[11] Robert J. Smyth. – Internacional Pipeline Conference- 2006 (Petrosleeve Inc.)

9.3 Normas

[11] API Specification 5L – Specification for Line Pipe - Março de 2004

[12] ASME B36.10M - Welded and Seamless Wrought Steel Pipe - 2000

[13] ASME B31.4 – Pipeline Transportation Systems For Liquid Hydrocarbons and Other Liquids – 2002

[14] ASME B31.8 – Gas Transmission And Distribution Piping Systems – 1999

[15] ASME B31G – Manual For Determining The Remaining Strength Of Corroded Pipelines – 1991

[16] API Standard 1104 – Welding of Pipelines and Related Facilities – Setembro de 1999

9.4 Projeto

[17] Carneiro, Leonardo M. / Bastos, Amaury L.- Projeto final- Agosto de 2006.

10 Anexos

Anexo 1 Relatório da solda

Referência: API Standard 1104, 5.2

ESPECIFICAÇÃO DE PROCEDIMENTO NO. ____ 0001 ____

Para: vedar

Soldando o quê? 2 flanges cegos

Tubulação e processo dos encaixes: faceamento

Material: aço carbono

Diâmetro externo e espessura do tubo: 3'' e 2 mm

Tipo de junção: Plano de nível sobreposto

Metal de enchimento e número dos grânulos: M 308 L – Aço Inox

Características elétricas ou da flama: chama azul

Posição: 45°

Direção da solda: Direita para esquerda

Número de soldadores: 1

Tempo de lapso entre passagens: 2 s

Limpeza: Flange limpo (usinado) com ferramenta de desbaste no torno

Pré-aquecimento / alívio de tensões: Não realizado

Gás de proteção e fluxo: Gás Argônio

Composição do gás: Ar

Tamanho do orifício do gás do plasma: Bocal 06

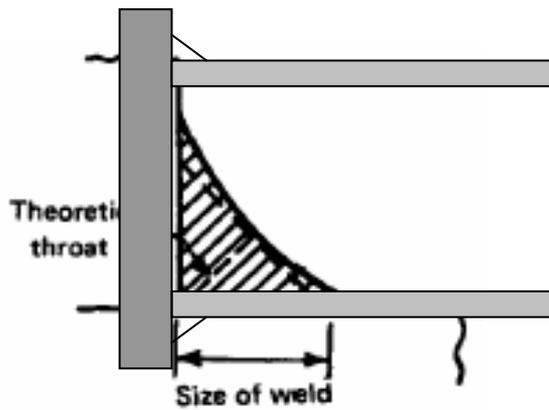
Soldador: Alberto Lima

Aprovador: Ronaldo Vieira

Supervisor de solda: Rafael Albernaz

Engenheiro chefe: Lucio Rossi

Esboços e tabelas anexadas:



TAMANHO DO ELETRODO E NÚMERO DE PASSES

Número de passes	Tamanho e tipo de eletrodo	Voltagem	Amperagem e Polaridade	Velocidade
1 passe	2,5mm M 308L	380V	110A	5° / s

Anexo 2 Gráficos de força vs deslocamento do indentedor.

