IBP1501_07

REABILITAÇÃO DE DUTO AMASSADO COM LUVA DE MATERIAL COMPÓSITO

Eduardo Cesar Vilani[1], Antonio Carlos Bifulco[2], Richard Förster Bayer[3]

Copyright 2007, Instituto Brasileiro de Petróleo e Gás - IBP
Este Trabalho Técnico foi preparado para apresentação na ***Rio Pipeline Conference & Exposition 2007***, realizada no período de 2 a 4 de outubro de 2007, no Rio de Janeiro. Este Trabalho Técnico foi selecionado para apresentação pelo Comitê Técnico do evento, seguindo as informações contidas na sinopse submetida pelo(s) autor(es). O conteúdo do Trabalho Técnico, como apresentado, não foi revisado pelo IBP. Os organizadores não irão traduzir ou corrigir os textos recebidos. O material conforme, apresentado, não necessariamente reflete as opiniões do Instituto Brasileiro de Petróleo e Gás, seus Associados e Representantes. É de conhecimento e aprovação do(s) autor(es) que este Trabalho Técnico seja publicado nos Anais da ***Rio Pipeline Conference & Exposition 2007***.

Resumo

Até recentemente, as instalações que tinham seus dutos metálicos deformados plasticamente só podiam receber reparos permanentes por troca do trecho avariado, conforme as normas ASME B 31 e API 1160.
As mossas provocam fadiga no material devido ao carregamento cíclico imposto pela operação do duto. O modo de falha se dá por aparecimento de micro trincas que se propagam, podendo chegar até ao colapso do material. Não se pode prever o tempo de vida remanescente da instalação, pois são inúmeros os fatores intervenientes.
Ocorre que a troca do tramo ou niple deformado exige uma parada da operação de transferência, seguida da preparação para corte e solda que é demorada e cara aliada ao fato de que nem sempre é possível de ser executada tão logo se tenha o conhecimento do defeito.
Desta forma, alguns dutos amassados foram reparados provisoriamente com luvas de material compósito, com o objetivo de dar uma resistência adicional à fadiga, até que se pudesse efetuar uma parada para a manutenção adequada.
O estudo posterior destes trechos reparados, que foram sujeitos a ensaios em laboratório após terem sido substituídos, apontou para um ganho efetivo no tempo de vida do tubo. A experiência suscitou a realização de um projeto de estudo do comportamento de luvas de material compósito especialmente projetadas para aumentar a resistência de tubos amassados à fadiga. Os resultados obtidos em ensaios de curta duração comprovaram a eficácia do reparo em garantir a integridade do tubo por mais de 30 anos de uso.
Este procedimento está em conformidade com a Norma ISO/PDTS 24817, de 27 de setembro de 2006, podendo ser classificado como reparo permanente.

Abstract

Up to earlier days, installation which had their steel pipelines damaged by a plastic deformation could only be permanent rehabilitated by replacing the affected section, according to ASME B 31 and API 1160 Standards.
The indentation provide fatigue on base material due to the cyclic load transmitted to the pipeline by it operation. The failure pattern is given by micro-cracks which propagate, even to material collapse. It is not possible to forecast the installation remaining life time, because there are lots of intervenient factors involved.
Therefore, the replacement of the damaged pipe segment or fitting demands a transfer operation stop, followed by cutting and welding preparation, which is time lasting and expensive, added to the fact that not always is possible to proceed the repair immediately after the damage occurrence is known.
So, some Indented Ducts sections were temporarily repaired using Composite Gloves, in order to provide additional Fatigue Resistance, until it could be possible to proceed a suitable maintenance stop.
The following study of these repaired segments, which were submitted to Laboratorial Tests, after being replaced, showed an effective life-time gain of the pipe. The experience moved for another Study Project about the behavior of a special designed Composite Gloves to increase the fatigue resistance of indented pipelines. The obtained results of the accelerated-tests corroborate the effectiveness of this type of repair to ensure pipeline integrity for more than 30 years of usage.
The actual Composite Glove procedure developed and tested comply the ISO/PDTS 24817 Standard, dated by September 27th, 2006, and can be classified as a Permanent Repair.

[1] Engenheiro Químico e Mecânico, Gerente de Negócio - RUST ENGENHARIA LTDA.
[2] Engenheiro Mecânico, Consultor Técnico - RUST ENGENHARIA LTDA.
[3] Engenheiro Civil, Diretor Industrial - RUST ENGENHARIA LTDA.

1. Introdução

As luvas de material compósito têm sido largamente utilizadas na reparação de dutos afetados por corrosão ou qualquer outra ação mecânica que resulte na perda de material. Apresentam a facilidade de instalação por utilizar ferramental convencional e equipamentos leves e de fácil transporte, aliado ao importante fato de que são instaladas à frio, o que permite a execução do serviço com o duto parado ou operando. Entretanto, os dutos também sofrem deformações plásticas (mossas) ocasionadas por esforços mecânicos oriundos da movimentação do solo, pela ação indevida de máquinas, equipamentos ou outros meios. Em 2004, um oleoduto situado no Estado do Rio Grande do Sul (OSCAN 22"), operado pela Transpetro, recebeu reparos com luvas de material compósito em dois trechos que sofreram amassamento, objetivando reforçá-lo até que a parada para reparo fosse possível. Estudo posterior efetuado pelo Centro de Pesquisas da Petrobrás/CENPES a pedido da Transpetro nos trechos reparados apontaram para um ganho efetivo na vida útil do tubo. Esta constatação provocou a execução de ensaios em tubos especialmente preparados para determinar o comportamento de reparos desta natureza. A propriedade fundamental a qual se pretende controlar é a fadiga do material, provocada pelo carregamento cíclico atuante sobre a mossa, a que está sujeita a tubulação durante sua utilização. O Centro de Pesquisas e Desenvolvimento Leopoldo Américo Miguez de Mello/CENPES coordenou estes trabalhos.

2. Obtenção dos Corpos de Provas

2.1. Produção da mossa

Oito espécimes tubulares de 3 metros de comprimento foram obtidos a partir de tubos de aço API 5L Gr X60 de Ø22" com ½" de espessura. Cada um destes espécimes recebeu uma deformação plástica correspondente à redução de 19% do diâmetro externo do tubo, provocada por um pistão hidráulico com um indentor esférico de Ø5".

As fotos n° 01, 02 e 03 apresentam a seqüência fotográfica do amassamento.

Foto n°. 01

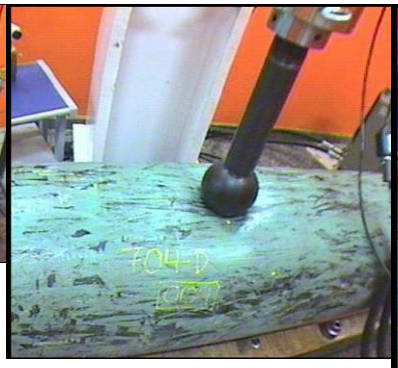


Foto n°. 02

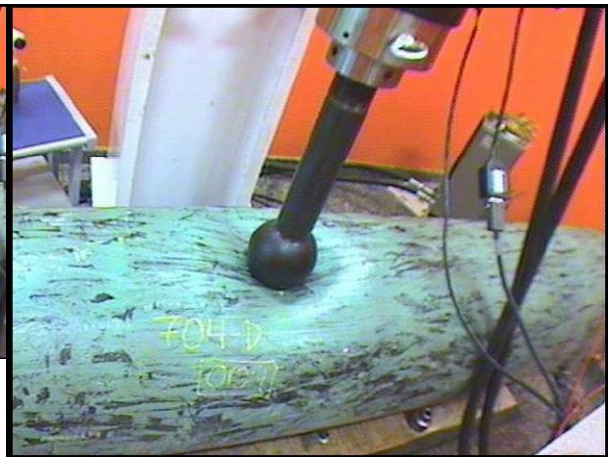


Foto n°. 03

2.2. Ensaio com Líquido penetrante

Todos os corpos de prova tiveram suas regiões deformadas analisadas por líquido penetrante para confirmar que não havia nenhuma trinca na região dos defeitos, provocadas pelo amassamento. Este ensaio foi feito pelos dois lados do tubo. A foto n°. 04 mostra o líquido penetrante executado pelo lado interno do tubo.

Foto n°. 04

2.3. Instalação da instrumentação

Extensômetros foram instalados no centro e na borda de cada defeito, tanto interna como externamente, para monitorar o comportamento do material na região da mossa durante o carregamento cíclico. Um sistema de aquisição de dados foi utilizado para registrar estes dados. A foto n° 05 mostra um par destes extensômetros, instalados pelo lado externo.

Foto n°. 05

2.4. Fechamento dos Tubos

Para promover o fechamento de cada um dos espécimes tubulares, foram produzidos três pares de "caps" reforçados externamente com um anel e internamente com uma cruzeta, como mostram as fotos n°. 06 e n°. 07. O objetivo deste reforço era impedir o colapso nesta região do corpo de provas. À medida que os testes em um determinado corpo de provas eram encerrados, os "caps" eram removidos e reaproveitados.

Foto n°. 06

Foto n°. 07

3. Projeto de reparo com luva de material compósito

3.1. Conceituação do projeto de reparo

O objetivo deste tipo de reparo é aumentar a resistência à fadiga imposta ao tubo pelo movimento provocado na mossa pela variação de pressão característica da instalação. O projeto desta luva de material compósito partiu da premissa de que uma luva suficientemente rígida pode conter a mossa com um material de enchimento que apresente elevada resistência à compressão. Esta proposta prevê que o reparo atue diminuindo a amplitude de onda do movimento

oscilatório devido à variação da pressão da instalação. Efetivamente, uma luva suficientemente rígida faz tender a zero o valor da amplitude, desde que o material de enchimento seja também bastante resistente à compressão. Deste modo, quando a pressão do sistema começa a se elevar, a mossa é comprimida contra o material de enchimento, que por sua vez é contido pela luva. O projeto prevê que se a amplitude tende a zero, a mossa não se deforma e portanto não sofre fadiga. Tais considerações obrigaram a pesquisa dos materiais de enchimento da mossa, que culminaram na escolha de um concreto polimérico desenvolvido para este fim, cujo desempenho foi comparado neste teste ao do concreto mineral.

Outro ponto importante está relacionado com o fato de que estas luvas estão desenvolvidas para instalação em operação normal, o que significa que o diâmetro externo do tubo encontra-se aumentado pela ação da pressão de operação. Quando ocorre redução de pressão da instalação, o tubo tem seu diâmetro diminuído pela deformação elástica, e há necessidade de se garantir que a luva de material compósito acompanhe este movimento. A adesão do material compósito ao substrato metálico é responsável por esta ação, e o resultado é função da qualidade da preparação de superfície. Para obtenção de altos valores de aderência foi desenvolvido um adesivo estrutural cuja matriz polimérica a base de resina Epóxi é compatível com o restante do material utilizado.

Para obtenção de luvas rígidas, altas espessuras de material compósito reforçado com fibra de vidro foram projetadas. Reparos baseados em reforço com fibra de carbono também foram previstos, com o objetivo de comparar o desempenho de diferentes materiais.

3.2. Escolha dos tipos de reparo

Considerando-se a necessidade de comparação da eficácia dos reparos, oito espécimes tubulares foram produzidos: - dois para ensaios de fadiga sem nenhum tipo de reparo;

- três reparados com luvas reforçadas com fibra de vidro, sendo uma com enchimento da mossa com concreto mineral, outra com enchimento da mossa com concreto polimérico e a última também com concreto polimérico, porém com dobro da espessura;
- três reparados com luvas reforçadas com fibra de carbono, como as de fibra de vidro.

3.3. Determinação das dimensões das luvas de reparo

Um reparo típico é projetado levando em conta as dimensões e o material de que é feito o tubo, o fluído e as condições operacionais, bem como o tipo e as dimensões do defeito. Conhecidas as características fundamentais do tipo de laminado de material compósito aplicado ao reparo é possível reabilitar o tubo danificado por adição de material compósito em espessura equivalente à perdida. No caso do tubo amassado, adotamos a área afetada pela mossa como sendo uma região de espessura nula, para conseguir alta espessura para a luva. Com relação ao comprimento da luva, consideramos o comprimento da mossa desde os pontos de inflexão da parede do tubo somado às duas áreas correspondentes à adesão da luva sobre o tubo integro (over lap). Estes cálculos indicaram a necessidade de se executar reparos de Ø22” x 1200 mm de comprimento x 30 mm de espessura. Uma luva reforçada com fibra de vidro foi executada com o dobro da espessura calculada para verificar a influência da rigidez na deformação máxima da mossa. As luvas com reforço de fibra de carbono foram dimensionadas com o mesmo comprimento, porém com a metade da espessura (15 mm), devido ao elevado módulo de elasticidade apresentado por este material. Entretanto, uma luva com 30 mm de espessura também foi produzida, pelo motivo apresentado anteriormente.

3.4. Execução dos reparos

A superfície foi preparada removendo-se a pintura epóxi na área correspondente ao reparo com escovamento eletromecânico, seguido da limpeza com solventes. Este processo foi escolhido porque preserva a rugosidade produzida pelo processo de aplicação da película anticorrosiva aliado ao fato de ser de fácil execução em campo. A foto n. 08 apresenta esta fase concluída.

Foto n°. 08

Imediatamente após a preparação de superfície, foi aplicado o adesivo à base de resina epóxi que proporciona a união entre compósito e substrato e aproxima seus coeficientes de dilatação térmica. Esta característica garante que não apareça tensão residual sobre o reparo durante os ciclos de variação térmica. Sobre o adesivo foi aplicado o concreto polimérico também à base de resina epóxi com cargas minerais, especialmente desenvolvido para este fim, preenchendo a mossa até obtenção de uma superfície cilíndrica uniforme, concordante com o formato do tubo integro, conforme mostra a foto n°. 09. Atenção particular foi dada à formulação para obter uma tixotropia que permitisse aplicação do produto mesmo na posição 6h00 (ou sobre cabeça).

Foto n°. 09

Em seguida, foi aplicado o reforço estrutural composto de manta e tecido de fibra de vidro impregnados com resina epóxi modificada, em quantidade suficiente para obter a espessura requerida. A foto n°. 10 mostra uma luva sendo aplicada.

Foto n°. 10

Numa primeira etapa foram realizados dois reparos com luvas de Ø22”x 1200 mm x 30 mm e de Ø22”x 1200 mm x 60 mm, cujas mossas foram preenchidas com um concreto polimérico. A foto n°.11 apresenta a luva de 60 mm de espessura.

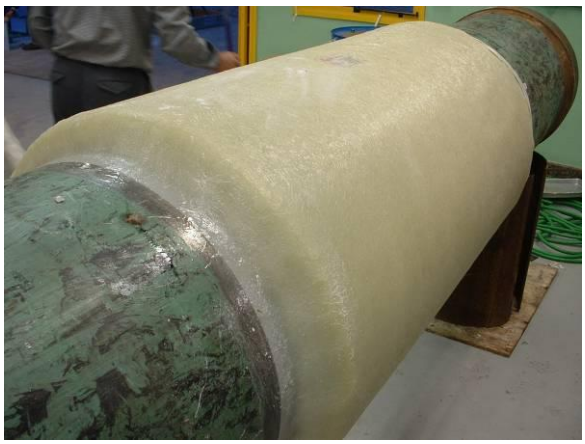


Foto n° 11

Dois tubos foram separados para receber o enchimento com concreto mineral e tiveram a superfície preparada por escovamento eletromecânico, seguida da aspersão de areia sobre um primer poliuretânico na região da mossa, objetivando melhor adesão do concreto sobre o aço. Esta preparação (vide foto n°12) foi executada antecipadamente devido à demorada cura apresentada por este material, mesmo tendo sido escolhido um concreto de cura acelerada. O concreto mineral foi escolhido por seu elevado módulo de elasticidade, e serviu de elemento de comparação.

Foto n° 12

Todos os espécimes tubulares tiveram suas luvas de reparo aplicadas com o tubo pressurizado em 65 bar simulando a condição encontrada no campo. A foto n.°. 12 mostra a tela do note book que controla o dispositivo hidráulico responsável pela manutenção da pressão no interior do espécime tubular.

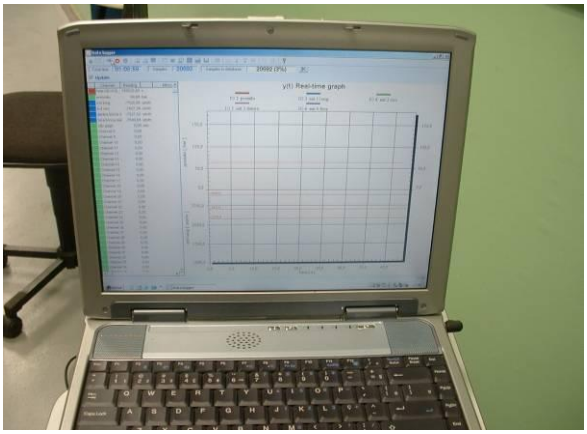
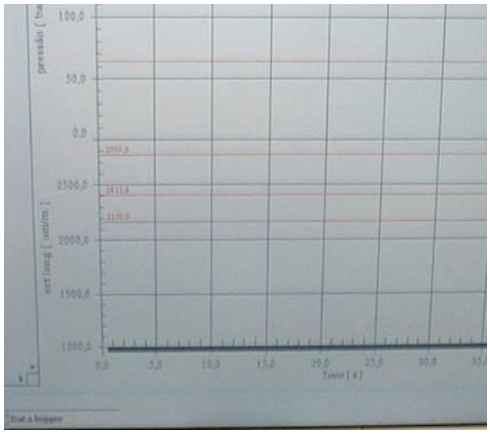


Foto n°. 12



Ampliação da foto n°. 12

Numa segunda etapa foram realizados os quatro reparos restantes, todos com Ø22" x 1200 mm de comprimento, variando o material de reforço, o enchimento da mossa e a espessura:

- 30 mm com reforço em fibra de vidro e mossa preenchida com concreto mineral;
- 15 mm com reforço em fibra de carbono e mossa preenchida com concreto mineral;
- 15 mm com reforço em fibra de carbono e mossa preenchida com concreto polimérico;
- 30 mm com reforço em fibra de carbono e mossa preenchida com concreto polimérico.

A foto n°. 13 apresenta uma luva de material compósito reforçada com fibra de carbono com 15 mm de espessura

Foto n°. 13

Como procedimento final, as luvas foram submetidas ao processo de pós cura, objetivando acelerar a cura com o ganho de dureza. A foto n°14 mostra o dispositivo de pós cura em operação.

Foto n°. 14

4. Ensaios de Fadiga em tubos

4.1 Determinação das variáveis do processo

Dois tubos amassados foram sujeitos ao ensaio de fadiga por carregamento cíclico em uma unidade hidráulica operando entre 5 e 65 bar. Esta amplitude corresponde àquela normalmente suportada por um duto construído com este material. O número de ciclos necessários para reproduzir um tempo de uso da instalação equivalente a 40 anos foi calculado em **16.110** ciclos.

4.2. Resultados dos ensaios em tubos não reparados

O teste de fadiga foi realizado por variação da pressão interna do tubo entre 5 e 65 bar durante 16.110 ciclos. O espécime n°. 1 falhou durante o teste de fadiga apresentando fraturas passantes na área amassada com 12.540 ciclos. O espécime n°. 2 falhou do mesmo modo, com 13.635 ciclos. Detalhes do modo de falha são analisados por Perrut et al. (2006). A foto n°. 15 mostra um espécime tubular não reparado sendo testado dentro de um bunker de concreto. A Figura n°. 01 mostra a análise feita com líquido penetrante na mossa após a falha.

Foto n°. 15

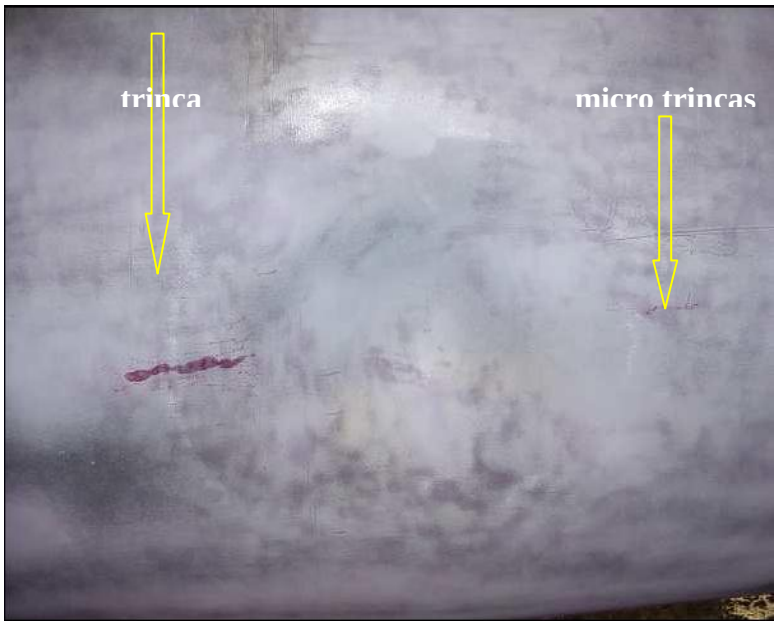
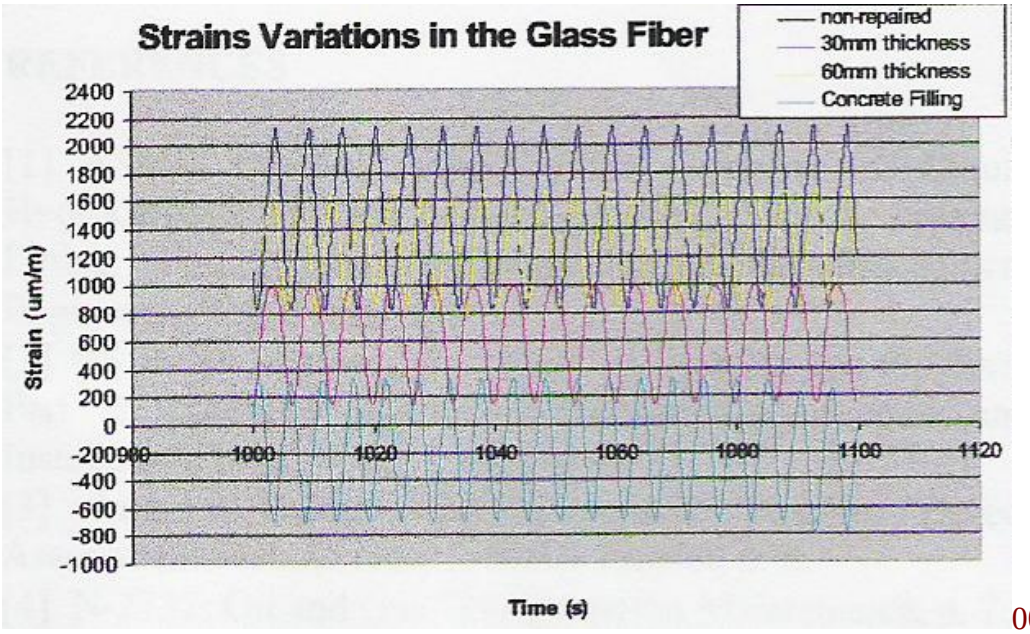


Figura n°. 01

4.2. Resultados dos ensaios em tubos reparados

Todos os espécimes tubulares reparados foram ensaiados à fadiga sob as mesmas condições dos tubos não reparados. Nenhum deles falhou. Perrut et al. reportam redução de tensão medida na região dos reparos devida à luva de material compósito e o material de enchimento. A Figura n°. 02 apresenta as medições dos extensômetros nos espécimes tubulares reforçados com fibra de vidro comparado a um espécime não reforçado.



00

Figura n°. 02

Para os espécimes com enchimento de concreto polimérico com 30 e 60 mm de espessura ocorreu redução de 33% da tensão medida pelos strain gauges, devido ao aumento da rigidez. Importante observar que não houve diferença nos resultados apresentados entre eles, o que indica que o dimensionamento da espessura de 30 mm no projeto do reparo foi adequado. No espécime com enchimento de concreto a redução foi de 17%. O melhor resultado apresentado foi de 54% de redução pelo reforço de fibra de carbono com 30 mm de espessura, preenchido com concreto polimérico.

Análises por líquido penetrante realizadas posteriormente aos testes de fadiga, hidrostático e ruptura em todas as mossas não encontraram nenhuma trinca. A foto n°.16 apresenta a mossa após os todos os testes.

Após todos os testes as luvas de material compósito apresentavam-se íntegras.

Foto n°. 16

5. Teste hidrostático e ensaio de ruptura

Após a conclusão dos ensaios de fadiga os espécimes reparados foram testados hidrostaticamente em três diferentes níveis de pressão. O primeiro nível de pressão, igual a 130,50 bar foi estabelecido em 90% da pressão de projeto da instalação, que no caso corresponde a 145 bar. A pressão de projeto está relacionada a 72% da SMYS - tensão mínima de escoamento = 201,4 bar. A pressão foi mantida neste valor por 20 minutos. Num segundo estágio, os espécimes tiveram a pressão interna elevada até 138% da pressão de projeto, o que corresponde a 200 bar, e mantida por 4 horas. Como todos os espécimes tubulares resistiram aos dois primeiros estágios, a pressão interna de cada um deles foi elevada até a ruptura. Todos os exemplares tiveram colapso por deformação plástica na região fora das luvas de reparo. As fotos n°. 17 e 18 mostram estas falhas.

Foto n°. 17 – tubo reparado com luva de 30 mm

Foto n°. 18 – tubo reparado com luva de 60 mm.

A tabela n°. 01 apresenta os resultados dos ensaios de fadiga e teste de ruptura.

Espécime Tubular	Tipo de Reparo	Material de Enchimento	Espessura da Luva	Teste de Fadiga (16.110 ciclos)	Pressão de Ruptura (bar)
N°. 01	não reparado			falhou	

N°. 02	**não reparado**			**falhou**	
N°. 03	**fibra de vidro**	**Concreto polimérico**	**30 mm**	**passou**	**300**
N°. 04	**fibra de vidro**	**Concreto polimérico**	**60 mm**	**passou**	**276**
N°. 05	**fibra de vidro**	**Concreto mineral**	**30 mm**	**passou**	**271**
N° 06	**fibra de carbono**	**Concreto polimérico**	**15 mm.**	**passou**	**Não foi testado**
N°. 07	**fibra de carbono**	**Concreto polimérico**	**30 mm.**	**passou**	**283**

Tabela n°. 01 – Resultados dos Testes de Fadiga e Ruptura.

6. Conclusões

Perrut et al. concluíram que:

"Os resultados indicam que tubos com o tipo de mossa estudado neste trabalho falham quando sujeitos à fadiga como demonstraram os testes com os espécimes não reparados. Um falhou com 12.540 ciclos e o outro com 13.635 ciclos. As primeiras trincas apareceram a partir dos 10.000 ciclos. Tubos com estes defeitos podem ser reparados.

Os resultados dos testes mostraram que o sistema de reparo com compósitos pode ser considerado um reparo efetivo para defeitos mecânicos tais como mossas suaves aumentando a resistência à fadiga e a pressão de ruptura do tubo defeituoso. Embora todos os tipos de reparo apresentassem resultados satisfatórios, aquele que usou fibra de carbono com 30 mm. de espessura foi o melhor, desde que apresentou a menor amplitude de deformação na região amassada.

As deformações medidas nos extensômetros mostram que a rigidez aumentou na região das mossas, o que reduziu significativamente a deformação naquele ponto. O uso de luvas com espessuras em dobro em dois espécimes reparados com fibra de vidro/epóxi resultou na mesma amplitude de deformação comparada com o espécime reparado com espessura normal. Inspeções com líquido penetrante não localizaram qualquer trinca na região delimitada pela mossa depois dos ensaios de fadiga, teste hidrostático e teste de ruptura.

Após os testes de fadiga e ruptura, nenhuma degradação no material da luva ou do enchimento foi observada. Com o objetivo de melhor quantificar a influência da degradação na vida e resistência, um espécime de tubulação corroída reparada por este material e enchimento foi enterrado seis anos atrás e será testado ao final do ano. Ele foi estudado em outro projeto".

7. Agradecimentos

Ao Centro de Pesquisas e Desenvolvimento Leopoldo Américo Miguez de Mello/CENPES, nas pessoas dos Engenheiros Luis Cláudio de Marco Meniconi e Valbert Perrut, pela oportunidade de realizar estes reparos e pelas preciosas informações disponibilizadas.

Ao Laboratório de Metalurgia Física da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, nas pessoas do Professor Thelmo Roberto Strohaecker e seus alunos, pelas facilidades oferecidas durante os trabalhos.

8. Referências

PERRUT, V.A., MENICONI, L.C.M., SOUZA FILHO, B.G., *Evaluation of Composite Sleeves for Reinforcement of Dented Pipelines*, 6th International Pipeline Conference, IPC 2006-10561, 2006.

ASME. Pipeline Transportation Systems for Liquid Hydrocarbons and Other Liquids, ASME Code for Pressure Piping., B31.4, The American Society of Mechanical Engineers, NY, 1998.

N – 2737 - Norma Petrobrás – Manutenção de Oleodutos e Gasodutos

ISO PDTS 24817.