

# PGMEC

UNIVERSIDADE FEDERAL FLUMINENSE  
ESCOLA DE ENGENHARIA  
PROGRAMA FRANCISCO EDUARDO MOURÃO SABOYA DE  
PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA

**Tese de Doutorado**

DESENVOLVIMENTO DE UMA METODOLOGIA DE  
REPARO DE DEFEITOS TRANSPASSANTES EM DUTOS  
METÁLICOS COM ADESIVOS EPOXI

RAFAEL FIGUEIREDO SAMPAIO

AGOSTO DE 2009

**RAFAEL FIGUEIREDO SAMPAIO**

DESENVOLVIMENTO DE UMA METODOLOGIA DE REPARO DE  
DEFEITOS TRANSPASSANTES EM DUTOS METÁLICOS COM ADESIVOS  
EPÓXI

Tese apresentada ao Programa de Pós-graduação em Engenharia Mecânica da UFF como parte dos requisitos para a obtenção do título de Doutor em Engenharia Mecânica.

Orientadores:

Prof. Dr. Heraldo Silva da Costa Mattos ( PGMEC/UFF )

Prof. Dr. João Marciano Laredo dos Reis ( PGMEC/UFF )

UNIVERSIDADE FEDERAL FLUMINENSE  
NITERÓI, 31 DE AGOSTO DE 2009

DESENVOLVIMENTO DE UMA METODOLOGIA DE REPARO DE  
DEFEITOS TRANSPASSANTES EM DUTOS METÁLICOS COM ADESIVOS  
EPÓXI

Esta tese foi julgada adequada para a obtenção do título de

**DOCTOR EM ENGENHARIA MECÂNICA**

Área de concentração Análise Estrutural e aprovada em sua forma final pela Banca  
Examinadora formada pelos professores:

---

Prof. Heraldo Silva da Costa Mattos (D.Sc.)  
Universidade Federal Fluminense (Orientador)

---

Prof. João Marciano Laredo dos Reis (D.Sc.)  
Universidade Federal Fluminense (Orientador)

---

Prof. Luiz Carlos da Silva Nunes (D.Sc.)  
Universidade Federal Fluminense

---

Prof. Maria Laura Martins Costa (D.Sc.)  
Universidade Federal Fluminense

---

Prof. Eduardo Martins Sampaio (D.Sc.)  
Universidade Estadual do Rio de Janeiro

---

Prof. Pedro Manuel Calas Lopes Pacheco (D.Sc.)  
Centro Federal de Educação Tecnológica Celso Suckow da Fonseca

# Sumário

**LISTA DE FIGURAS / iv**

**LISTA DE TABELAS / v**

**RESUMO / viii**

**ABSTRACT / ix**

## **1 INTRODUÇÃO / 1**

1.1 CARACTERIZAÇÃO DO PROBLEMA / 1

1.2 OBJETIVOS DO PRESENTE TRABALHO / 3

## **2 POLÍMEROS / 9**

2.1 DEGRADAÇÃO DE POLÍMEROS / 12

2.2 ADESIVOS / 13

2.3 CLASSIFICAÇÃO DO ADESIVO / 14

2.4 RESINA EPÓXI / 16

2.4.1 SELEÇÃO DE AGENTES DE CURA (ENDURECEDORES) / 19

## **3 REPARO EM TUBULAÇÕES / 22**

3.1 TIPOS DE SISTEMAS DE REPAROS EXISTENTES / 22

3.1.1 TIPOS DE SISTEMAS DE REPAROS EXISTENTES / 24

3.1.2 ABRAÇADEIRA MECÂNICA COM PARAFUSOS (BOLT-ON CLAMPS) / 26

3.1.3 ABRAÇADEIRA COM PINO CENTRALIZADOR (LEAK CLAMPS) / 27

3.1.4 HOT TAPPING / 28

## **4 UMA METODOLOGIA ALTERNATIVA PARA REPARO DE DEFEITOS LOCALIZADOS EM DUTOS COM RESINAS EPÓXI / 31**

4.1 TUBOS CILÍNDRICOS SOB PRESSÃO – SOLUÇÕES ANALÍTICAS PARA TENSÃO, DEFORMAÇÃO E DESLOCAMENTOS / 31

|          |   |           |
|----------|---|-----------|
| 4.1.1    | CILINDRO ELÁSTICO ORTOTRÓPICO COM PAREDE GROSSA SOB PRESSÃO /                 | 31        |
| 4.1.2    | CILINDRO ELASTO-PLÁSTICO COM PAREDE FINA SOB PRESSÃO /                        | 37        |
| 4.2      | ANÁLISE MECÂNICA DE UM SISTEMA DE REFORÇO COM LUYA DE MATERIAL<br>COMPÓSITO / | 40        |
| 4.2.1    | MODELO BÁSICO – TUBO SEM DEFEITO LOCALIZADO /                                 | 40        |
| 4.3      | SISTEMAS DE REPARO À BASE DE EPÓXI PARA DEFEITOS TRANSPASSANTES /             | 51        |
| 4.3.1    | DEFINIÇÃO DO TAMANHO DO DEFEITO /   | 51        |
| 4.3.2    | PROCEDIMENTO DE REPARO PROPOSTO /   | 52        |
| 4.4      | MATERIAIS E MÉTODOS /   | 60        |
| 4.5      | RESULTADOS E DISCUSSÃO /  | 64        |
| <b>5</b> | <b>CONCLUSÃO /</b>  | <b>69</b> |
|          | <b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS /</b>   | <b>71</b> |
|          | <b>APÊNDICES /</b>  | <b>76</b> |
|          | APÊNDICE A /  | 76        |
|          | APÊNDICE B /  | 95        |

# Lista de Figuras

- FIGURA 1.1 SISTEMA BÁSICO DE REPARO, PG. 3
- FIGURA 1.2 DANO POR CORROSÃO EM TUBULAÇÕES PARA ÁGUA PRODUZIDA, PG. 5
- FIGURA 2.1 COMPARAÇÃO DO DESEMPENHO DE DIFERENTES ADESIVOS QUANTO À TEMPERATURA, PG. 15
- FIGURA 2.2 FÓRMULA GERAL DO ANEL DE EPÓXI, PG.17
- FIGURA 2.3 REAÇÃO QUÍMICA GENÉRICA PARA EPÓXI, PG.17
- FIGURA 3.1 INSTALAÇÃO DE LUVA TIPO B, PG. 24
- FIGURA 3.2 ILUSTRAÇÃO DE UMA LUVA TIPO B, PG. 25
- FIGURA 3.3 ABRAÇADEIRA MECÂNICA COM PARAFUSOS, PG.26
- FIGURA 3.4 ABRAÇADEIRA COM PINO CENTRALIZADOR, PG. 27
- FIGURA 4.1 TUBO SOB PRESSÃO INTERNA E EXTERNA, PG. 32
- FIGURA 4.2 TUBO REFORÇADO COM LUVA DE MATERIAL COMPÓSITO SUJEITO A PRESSÃO INTERNA, PG. 38
- FIGURA 4.3 INFLUENCIA DA PRESSÃO INTERNA  $P_{apl}$  NA ESPESSURA DA LUVA PARA ASSEGURAR UMA TENSÃO TANGENCIAL MÁXIMA  $\sigma_{max} = 146.3 \text{ MPa}$  NO TUBO.  $P_i = 5 \text{ MPa}$ , PG. 45
- FIGURA 4.4 INFLUÊNCIA MÁXIMA TENSÃO TANGENCIAL ADMISSÍVEL  $\sigma_{max}$  NA ESPESSURA LIMITE A LUVA PARA  $P_{apl} = 5 \text{ MPa}$  E  $P_o = 7.2 \text{ MPa}$ , PG. 46
- FIGURA 4.5 PERDA DE METAL NO DUTO, PG. 48
- FIGURA 4.6 DIMENSIONAMENTO DO DEFEITO, PG. 52
- FIGURA 4.7 PREPARAÇÃO DA SUPERFÍCIE, PG. 54
- FIGURA 4.8 TAMPA PLÁSTICA PARA EVITAR DERRAMAMENTO DE ADESIVO, PG. 55
- FIGURA 4.9 CAMADA EXTERNA DE ADESIVO, PG. 56
- FIGURA 4.10 TAMPÃO METÁLICO PARA DEFEITOS PEQUENOS, PG. 57
- FIGURA 4.11 SISTEMA EQUIVALENTE, PG. 58
- FIGURA 4.12 SISTEMA DE REPARO COMPLETO, PG. 59
- FIGURA 4.13 TIPOS DE FALHA BRUTAL DA CAMADA ADESIVA, PG. 59
- FIGURA 4.14 APARATO DE TESTE E DETALHE DO SISTEMA DE CONTROLE DA TEMPERATURA, PG. 63

- FIGURA 4.15 TAMPAS SOLDADAS DEFORMADAS APÓS ENSAIO A 60 KG/CM<sup>2</sup> E 80°C, PG. 65
- FIGURA 4.16 TUBO COM DIÂMETRO DE 3,5" SCH 20 COM DEFEITO CAUSADO POR CORROSÃO ANTES E DEPOIS DO REPARO, PG. 66
- FIGURA A.1 FALHA DO ADESIVO ARC 5ES, PG. 79
- FIGURA A.2 FALHA DO ADESIVO BELZONA 1221, PG. 79
- FIGURA A.3 PADRONIZAÇÃO DA ÁREA COLADA, PG. 81
- FIGURA A.4 FALHA DO SISTEMA DE REPARO COM O ADESIVO ARC 5ES, PG. 83
- FIGURA A.5 FALHA DOS SISTEMA DE REPARO COM O ADESIVO BELZONA 1221, PG. 83
- FIGURA A.6 ÁREA DE COLAGEM DO ADESIVO BEZONA 1221 NA PRIMEIRA BATELADA DE ENSAIOS, PG. 84
- FIGURA A.7 DETALHE DO REPARO, PG. 87
- FIGURA A.8 POSSÍVEIS ACABAMENTOS DAS BORDAS DOS REPAROS, PG. 87
- FIGURA A.9 DETALHE DO REPARO. BELZONA 1111, PG. 89
- FIGURA A.10 FALHA DO REPARO (PEQUENO VAZAMENTO). BELZONA 1111, PG. 89
- FIGURA A.11 FALHA TOTAL DO REPARO. BELZONA 1111, PG. 90
- FIGURA A.12 FALHA TOTAL DO REPARO. BELZONA 1111, PG. 90
- FIGURA A.13 DETALHE DO REPARO. MM-METAL SS AÇO CERÂMICA, PG. 92
- FIGURA A.14 FALHA DO REPARO (PEQUENO VAZAMENTO). MM-METAL SS AÇO CERÂMICA, PG. 93
- FIGURA A.15 FALHA TOTAL DO REPARO. MM-METAL SS AÇO CERÂMICA, PG. 93
- FIGURA A.16 FALHA TOTAL DO REPARO. MM-METAL SS AÇO CERÂMICA, PG. 94

# Lista de Tabelas

|            |   |
|------------|---|
| TABELA 3.1 | SUMÁRIO DOS DIFERENTES TIPOS DE REPAROS PARA OS DIFERENTES TIPOS DE DEFEITOS, PG. 23        |
| TABELA 3.2 | SUMÁRIO DOS TIPOS DE REPAROS, PG. 30  |
| TABELA 4.1 | PROPRIEDADES MECÂNICAS DO SISTEMA 1, PG. 61   |
| TABELA 4.2 | PROPRIEDADES MECÂNICAS DO SISTEMA 2, PG. 62   |
| TABELA 4.3 | PRESSÕES DE RUPTURA PARA OS TUBOS TIPO (2) SEM TAMPA INTERIOR PLÁSTICA, PG. 67              |
| TABELA A.1 | RESULTADOS – ADESIVO ARC 5ES, PG. 77  |
| TABELA A.2 | RESULTADOS – ADESIVO BELZONA 1221, PG. 78   |
| TABELA A.3 | RESULTADOS – ADESIVO ARC 5ES, PG. 82  |
| TABELA A.4 | RESULTADOS – ADESIVO BELZONA 1221, PG. 82   |
| TABELA A.5 | RESULTADOS – ADESIVO ARC 858, PG. 86  |
| TABELA A.6 | RESULTADOS – ADESIVO BELZONA 1111. 1 PRESSÃO REFERENTE A PRIMEIRA FALHA DO REPARO, PG. 88   |
| TABELA A.7 | RESULTADOS – ADESIVO MM-METAL SS AÇO CERÂMICA. 1 PRESSÃO REFERENTE A PRIMEIRA FALHA, PG. 91 |

# Resumo

O presente trabalho tem como objetivo a análise de sistemas de reparo à base de resinas epóxi para dutos metálicos com danos por corrosão localizados. Devido à perda de material por corrosão, esses dutos podem estar submetidos a deformações elásticas ou inelásticas que impedem sua operação. Para o caso de danos transpassantes, o foco principal é assegurar, além da integridade estrutural, uma aplicação adequada do adesivo epóxi em tal maneira que a tubulação não apresente vazamentos após o reparo. Tal procedimento pode ser usado ou não associado com uma luva de material compósito de forma a assegurar um nível satisfatório de integridade estrutural. Exemplos de uso desses sistemas de reparo em situações com diferentes tipos de dano são apresentados e analisados, com o objetivo de mostrar as possibilidades de uso prático da metodologia proposta.

# Abstract

The present work is concerned with the analysis of epoxy repair systems for metallic pipelines undergoing elastic or inelastic deformations with localized corrosion damage that impair the serviceability. In the case of trough-thickness damage, the main focus is to assure an adequate application of the epoxy filler in such a way the pipe wont leak after repair. Such a procedure can be used or not associated with a composite sleeve that assures a satisfactory level of structural integrity. Examples concerning the use of repair systems in different damage situations are presented and analyzed showing the possibilities of practical use of the proposed methodology.

# Capítulo 1

## Introdução

### 1.1 Caracterização do Problema

A extensão da vida útil de equipamentos usados é importante em diversos segmentos industriais e, em particular, na indústria petroquímica nacional. Desde a década de 50, linhas de tubulações (dutos) são utilizadas como a maneira mais econômica e segura para transportar óleo e gás. Inúmeras redes de tubulação continuam sendo construídas nos dias de hoje. Porém, com o crescente número de dutos também cresce o número de falhas operacionais e de acidentes. Corrosão interna e externa tornou-se uma das principais causas de falha em dutos. Atualmente, a contaminação do solo e da água devido à falha dessas tubulações é levantada como uma das principais causas que afetam a preservação do meio ambiente. Por estas razões, intensos esforços têm sido realizados na avaliação da integridade estrutural de dutos

conduzindo petróleo e seus derivados. No Brasil, alguns dutos que conduzem derivados de petróleo estão próximos do limite de vida útil previsto no projeto original. Devido a razões econômicas, tem-se optado por tentar continuar a operar com estes dutos o máximo de tempo possível, procurando-se estender a sua vida útil para além da vida originalmente prevista. No entanto, não existem normas que permitam essa extensão sem o risco de falhas inesperadas e acidentes. Portanto, o interesse na área de sistemas de reparos em dutos se deve a necessidade de se reduzir as paradas para manutenção, a necessidade de evitar paradas imprevistas, a considerações de segurança e a necessidade de se estender a operação de componentes mecânicos além da vida original de projeto.

Dutos com redução de espessura das paredes devido ao processo de corrosão podem ser reparadas ou reforçadas através de uma luva de material compósito, após o preenchimento do defeito com algum tipo de resina epóxi. No entanto, até o presente momento, sistema de reparos com compósitos poliméricos são pouco eficazes para defeitos transpassantes em tubulações, pois, geralmente, não são capazes de evitar vazamentos. Informações sobre requisitos e recomendações para a qualificação, projeto, instalação teste e inspeção para reparos desse tipo na indústria petroquímica pode ser encontrada em [1,2].

Sistemas de reparo à base de materiais poliméricos também são usados na indústria aeronáutica para estender a vida útil de componentes metálicos [3, 4]. Nesse caso, o tamanho da área colada e as propriedades do adesivo são muito importantes. No caso de tubulações com defeitos de corrosão conduzindo líquidos, a geometria do reparo é mais simples (uma luva), mas as

maiores dificuldades são a definição da espessura adequada da luva para assegurar um grau satisfatório de integridade estrutural e evitar vazamentos nos casos de defeitos transpassantes.

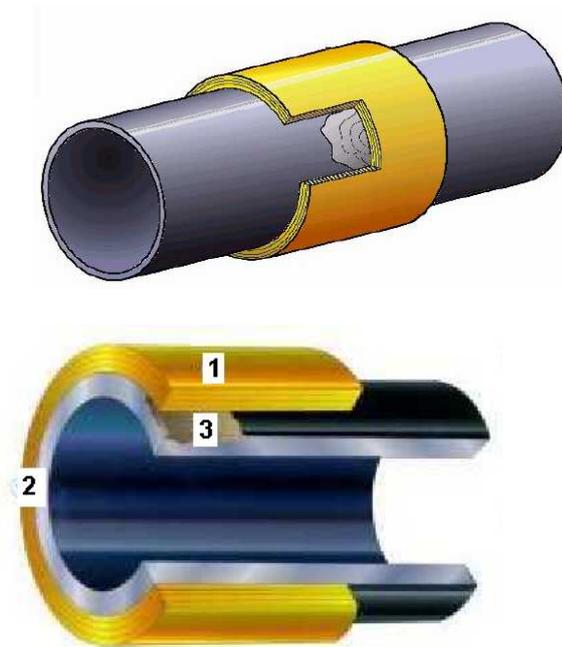


Figura 1.1: Sistema básico de reparo (1 – Material Compósito, 2 – Duto Metálico, 3 – Adesivo).

## 1.2. Objetivos do presente trabalho

O presente trabalho tem como objetivo o desenvolvimento de uma metodologia alternativa para reparo de tubulações com resinas epóxi. Esta metodologia foi concebida para tubulações metálicas submetidas a deformações elásticas ou inelásticas com defeitos localizados de corrosão. No caso de defeitos transpassantes, o foco é assegurar que a tubulação não

apresente vazamento após o reparo. A principal motivação para esse estudo é a reabilitação de tubulações para água produzida em plataformas offshore. Como essas plataformas têm atmosfera rica em hidrocarbonetos, qualquer método de reparo que use equipamentos que possam produzir calor e/ou faíscas é proibido.

Assim como em outras partes do mundo, a descoberta de hidrocarbonetos na costa brasileira feita pela companhia PETROBRAS, fez com que fosse investido mais e mais na instalação de plataformas de extração do petróleo. A exploração desses poços de petróleo constitui um negócio altamente lucrativo e por isso se investe na pesquisa sabendo-se que o retorno é garantido. O petróleo encontrado na natureza é constituído basicamente por uma mistura de óleo, gás e água. Reservas de óleo contêm normalmente grande quantidade de água enquanto as reservas de gás têm pouca quantidade. Para atingir a máxima extração de óleo, água salgada é injetada nos poços para forçar o óleo atingir a superfície. A água injetada é produzida eventualmente junto com os hidrocarbonetos e, enquanto um campo de óleo se torna esgotado, a quantidade de água produzida aumenta enquanto o reservatório se enche com a água do mar injetada. Na superfície a água produzida é separada dos hidrocarbonetos, tratada para ser separada ao máximo do óleo para posteriormente ser despejada no mar ou ser reinjetada.

Essa água produzida ao passar pelas tubulações das plataformas offshore promove um elevado grau de corrosão causando danos importantes. O dano resultante do processo de corrosão em tubulações para água produzida causa perdas econômicas significativas porque a operação tem que ser suspensa enquanto o reparo está sendo feito. A reabilitação desse tipo de

tubulação corroída pode eventualmente exigir um alpinista industrial e, portanto, a aplicação do sistema de reparo deve ser o mais simples possível (Fig. 1). Embora a pressão de operação nessas tubulações não seja muito alta, a temperatura da água fica entre 60°C to 90°C, o que pode ser uma dificuldade para o uso de materiais poliméricos como sistemas de reparo.



Figura 1.2 – Dano por corrosão em tubulações para água produzida.

Os principais resultados dessa tese foram publicados em [5-8]. No Capítulo 2 é feita uma breve revisão sobre sólidos poliméricos e, em particular sobre adesivos poliméricos.

O Capítulo 3 comenta os tipos de procedimentos de reparo mais usuais existentes.

No capítulo 4 estão os principais resultados dessa tese. Inicialmente é feita uma análise da tensão, deformação e deslocamentos em cilindros elásticos ortotrópicos com paredes grossas e em cilindros elasto-plásticos com paredes finas. Posteriormente é apresentada uma metodologia simples para definir a espessura mínima necessária para assegurar uma operação segura de uma tubulação com perda de espessura da parede causada por corrosão localizada. A maioria dos estudos sobre esses sistemas é focada nos materiais (matriz, fibra, adesivos) e procedimentos de aplicação. Poucos estudos são focados na análise mecânica desses sistemas de reparo (ver [9]-[12], por exemplo). É apresentada, de forma resumida, uma metodologia proposta para definir a espessura da luva de material compósito de forma a assegurar a extensão de vida em condições de operação. Esta metodologia, apesar de ser simples, é capaz de levar em conta diferentes mecanismos de falha (plasticidade, corrosão, etc.).

Também é apresentado nesse capítulo um procedimento complementar para reparo de defeitos transpassantes em tubulações com resinas epóxi. O objetivo é assegurar que a tubulação reparada não vaze na pressão e temperaturas de operação. Luvas de material compósito podem assegurar um nível satisfatório de integridade estrutural no caso de redução de área localizada por corrosão, mas não são necessariamente eficazes para impedir vazamento no caso de defeitos transpassantes. O procedimento proposto pode ser usado ou não associado com uma luva de forma a aumentar a eficiência do

reparo. Testes hidrostáticos em tubulações reparadas com água na temperatura ambiente e à 80°C foram realizados para validar o procedimento.

Finalmente, no Capítulo V, são apresentadas as principais conclusões e observações finais do trabalho.

# Capítulo 2

## Polímeros

Polímeros são definidos como macromoléculas formadas pela união de moléculas mais simples chamadas monômeros [13]. Monômero é uma pequena molécula contendo uma unidade de repetição denominada "mero". Dependendo da estrutura química do mero, do número médio de meros por cadeia e do tipo de ligação entre as cadeias, pode-se dividir os polímeros em 2 grandes grupos:

-Termoplásticos: plásticos com capacidade de amolecer e fluir quando sujeitos a um aumento de temperatura e/ou pressão. Quando é retirado desse processo, o polímero se consolida em um produto com forma definida. Novas aplicações de temperatura e pressão produzem o mesmo efeito de amolecimento e fluxo. Essa alteração é uma transformação física reversível  
Ex: Polietileno (PE), Poliestireno (PS) e Poliamida (Nylon) [14].

-Termofixos ou Termorrígidos: plásticos que durante o processamento amolecem uma vez, sofrendo o processo de cura (transformação química irreversível) e tornando-se rígidos. Aquecimentos posteriores não alteram mais seu estado físico (não se observa amolecimento posterior) e após a cura o polímero é "infusível" e insolúvel. Ex: baquelite, resina epóxi [14].

"Ligações cruzadas" é um termo que se refere a pequenos trechos de cadeias poliméricas que conectam duas cadeias principais. Por sua própria natureza as ligações secundárias termoleculares são substituídas pelas ligações primárias características das ligações cruzadas, aumentando a rigidez e ponto de fusão dos polímeros. Em ordem crescente de densidade de ligações cruzadas por unidade de volume tem-se para um mesmo polímero, que ele poderá se comportar como um termoplástico (pouca a nenhuma ligação cruzada) [15-18], ou como um termorrígido (alta densidade de ligações cruzadas). Os elastômeros correspondem a uma classe intermediária na qual a densidade de ligações cruzadas não é tão alta a ponto de tomar o polímero completamente rígido. Convém ressaltar ainda que nem todo o polímero pode se comportar como um elastômero, para isso, além da média densidade de ligações cruzadas é necessário que a cadeia principal seja flexível, permitindo sua rotação em torno de um eixo [18].

O comportamento elastomérico (isto é, a observação de altas deformações reversíveis no material) é um estado dos elastômeros que ocorre a temperaturas bem definidas (por volta e pouco acima da temperatura de transição vítrea,  $T_g$ ), assim o mesmo polímero pode se comportar como um termorrígido ou como um elastômero dependendo da temperatura de trabalho [16,18].

As distinções entre termoplásticos e termorrígidos não são importantes apenas do ponto de vista fundamental: elas condicionam também o processamento do polímero, que segue rotas diferentes para cada caso [17].

As ligações cruzadas amarram uma cadeia às outras impedindo seu livre deslizamento. Nos polímeros com alta densidade de ligações cruzadas, as cadeias lineares adjacentes estão unidas umas as outras em várias posições através de ligações covalentes. Diz-se que o polímero tem uma estrutura reticulada, o processo de formação das ligações cruzadas é atingido ou durante a síntese do polímero ou através de reação química irreversível que é realizada geralmente a uma temperatura elevada. Essas formações de ligações cruzadas são obtidas através de átomos ou de moléculas de aditivos que são inseridas nas cadeias [18].

Termorrígidos são inicialmente líquidos que durante a formação das ligações cruzadas passam pelo "ponto gel", caracterizado pela região onde o líquido se torna extremamente viscoso e gradativamente endurece até tornar-se um sólido rígido [14].

A ruptura das ligações cruzadas, assim como das ligações covalentes da cadeia principal somente pode ser obtida aquecendo-se o polímero a temperaturas excessivas o que caracteriza a sua degradação. Os polímeros termorrígidos são geralmente mais duros e mais resistentes do que os polímeros termoplásticos [18].

Dá-se o nome de cura ao processo de formação de ligações cruzadas em um polímero termorrígido. Ele corresponde a uma mudança das propriedades físicas de uma resina polimérica por reação química pela ação de um catalisador e ou calor e de um agente de cura.

Do ponto de vista tecnológico os polímeros podem ainda ser agrupados em: borrachas, plásticos, fibras e adesivos;

Borrachas: Polímeros que, à temperatura ambiente, podem ser deformados elasticamente para um comprimento muito maior que o original. Retira-se o esforço do polímero, este deve voltar rapidamente ao comprimento original, ou seja, a deformação é elástica [14].

Plásticos: materiais poliméricos de alta massa molecular, de aspecto sólido como produto acabado [14].

Fibras: termoplástico orientado com a direção principal das cadeias poliméricas posicionadas paralelas ao sentido longitudinal (eixo maior). Deve satisfazer a condição geométrica do comprimento ser no mínimo, cem vezes maior que o diâmetro [14].

Adesivos: são substâncias capazes de unir a superfície de dois materiais (metal-metal, metal-plástico, metal-cerâmica), a fim de produza uma junta forte e resistente. Os polímeros podem, a princípio, ter estrutura amorfa ou semicristalina Quando a estrutura é amorfa as cadeias moleculares são arranjadas desorganizadamente, sem nenhuma regularidade aparente [18]. Polímeros termorrígidos como epóxi, resinas fenólicas e poliésteres insaturados, têm estrutura amorfa [14].

Inúmeros fatores influenciam as características mecânicas dos materiais poliméricos, sendo o mais importante a temperatura. Levando-se em consideração que as propriedades mecânicas dos polímeros são altamente sensíveis á mudança de temperatura, podemos definir duas temperaturas características: temperatura de transição vítrea e temperatura de fusão.

A temperatura de fusão ocorre apenas em polímeros semicristalinos (ou seja, apenas em alguns termoplásticos) e corresponde á transição entre um estado sólido, contendo uma estrutura ordenada de cadeias moleculares alinhadas, a um estado líquido viscoso, onde a estrutura é completamente aleatória.

A transição vítrea ocorre tanto em polímeros amorfos quanto em semicristalinos [18]. Na temperatura de transição vítrea, observa-se o "congelamento" dos graus de liberdade rotacionais e vibrações de cadeias poliméricas, isto é, a cadeia passa de flexível a rígida com o abaixamento da temperatura. A natureza da transição vítrea, não somente em polímeros, ainda não é completamente conhecida e corresponde a uma importante bilha de pesquisa contemporânea da física [19-21].

A temperatura de Transição vítrea define o limite de temperatura superior para uso de materiais plásticos termorrígidos [22].

Nos polímeros amorfos que possuem ligações cruzadas, estas restringem o movimento molecular, a ponto destes polímeros não experimentarem uma transição vítrea com o conseqüente amolecimento, mesmo em temperaturas elevadas [18].

## **2.1. Degradação de Polímeros**

Quando o polímero fica exposto a líquidos as formas principais de degradação são o inchamento e a dissolução. Com o inchamento, o líquido se difunde para o interior e é absorvido pelo polímero, as pequenas moléculas do líquido se alojam entre as macro moléculas, provocando um aumento de

volume, assim o material se torna menos rígido. O líquido diminui a temperatura de transição vítrea, tornando-a, em alguns casos, menor que a temperatura ambiente, um material que antes era forte e resistente irá tornar-se fraco e com as características de uma borracha. A dissolução ocorre quando o polímero é completamente solúvel e pode ser considerada uma continuação do processo de inchamento. Os polímeros podem também degradar por cisão, que consiste no rompimento das ligações principais da cadeia molecular. Este processo ocorre por meio de ligações químicas ou pela exposição ao calor. Isso causa uma diminuição no peso molecular.

As propriedades físicas e químicas dos polímeros em geral podem ser afetadas adversamente por essa forma de degradação [18].

## **2.2 Adesivos**

Adesivo é definido pela norma ANSI. ASTM D907 como "uma substância capaz de unir materiais através da fixação de suas superfícies" [23]. Deste modo, a junção de materiais com adesivo é um processo de união em que materiais adesivos são colocados entre duas superfícies sobrepostas, que são aderidas pela ação do mesmo. Durante algum tempo o adesivo permanece fluído, para "molhar" as superfícies sobrepostas, e posteriormente, devido a mudanças químicas e físicas, o adesivo se solidifica [23,24]. O adesivo deve molhar a superfície do material a ser unido e aderir a ele de forma a permitir transferência de cargas, apresentando adesão e coesão adequadas [14,15]. A adesão é a força por unidade de área com a qual o adesivo se liga à superfície. Coesão é a força interna do adesivo, comparável

á resistência interna dos plásticos não reforçados. Boa adesão e coesão são provenientes de processos físicos e reações químicas durante a cura do adesivo [24].

## **2.3 Classificação do Adesivo**

Os adesivos são classificados em adesivos termofixos ou termorrígidos e adesivos termoplásticos.

Os adesivos termorrígidos são ativados pela aplicação de calor, catalisadores, substância que modifica a velocidade de uma reação química sem afetar o equilíbrio e sem ser consumida pelo mesmo, ou combinação de ambos, ocorrendo a formação de ligações cruzadas por meio de calor, pressão, radiação ou outro tipo de energia. Estes adesivos termorrígidos apresentam um alto módulo de rigidez em relação aos adesivos termoplásticos e possuem um bom grau de resistência ao aquecimento e ao ataque químico [25,26].

Os polímeros mais usados em adesivos são baseados em resmas fenólicas e epóxi, que são polímeros termorrígidos.

A resina fenolformaldeído foi o primeiro adesivo sintético produzido e é obtido pela reação de condensação entre fenol e formaldeído. Eles são resistentes e frágeis e possuem alta resistência ao calor. Deve-se aplicar pressão para minimizar formações de bolhas na área a ser unida.

Em comparação, no caso dos adesivos epóxi, basta aplicar uma pressão moderada, para uma junção perfeita, melhorando assim o molhamento e a aderência. Assim como a resma fenolformaldeído, o epóxi, apesar de

resistente e frágil, possui uma resistência ao calor, e quando combinados com elastômeros possui boa resistência á descolagem e tenacidade [23-27].

A combinação de epóxi com o fenol resulta em um adesivo com boa resistência ao cisalhamento, fluência e boa resistência ao aquecimento [28]. Os adesivos baseados em resinas epóxi e resinas fenólicas têm bom rendimento até 140°C, mas acima de 200°C há uma degradação severa da resina fenólica presente no adesivo. A figura 1 mostra o comportamento de 5 adesivos usados industrialmente [23,25 e26].

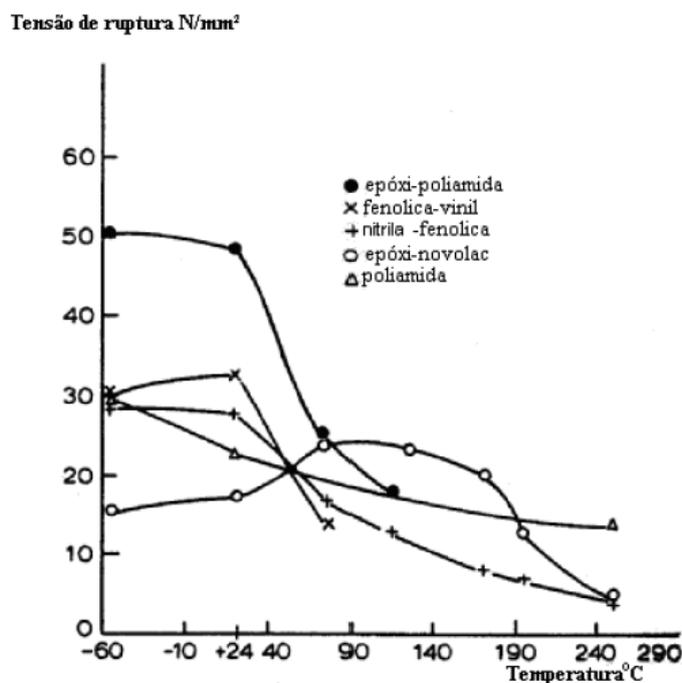


Figura 2.1 – Comparação do desempenho de diferentes adesivos quanto à temperatura [26]

Adesivos podem ser classificados quanto às suas características de aplicação. Os adesivos do tipo "solvente" são termoplásticos, mas para que

ocorra a boa resistência de junta o solvente deve ser removido por evaporação.

Os "hot melts" são termoplásticos, não tem aplicação estrutural mecânica e são aplicados na forma líquida sendo usados principalmente para vedação [23,26].

As resinas fenólicas têm aplicação estrutural quando misturadas a adesivos termorrígidos e elastômeros, como por exemplo, o adesivo epóxi [23, 25 e 26].

Os adesivos anaeróbicos polimerizam na ausência de oxigênio e a cura ocorre à temperatura ambiente.

Os adesivos cianoacrilatos têm uma rápida cura a temperatura ambiente quando colocado em contato com a superfície, mas não resistem ao calor e nem a umidade. Os adesivos acrílicos são curados por cadeias de radicais livres e o tempo de cura varia de minutos a algumas horas [23].

Os poliuretanos necessitam de aplicação de uma substância nas superfícies para melhorar a adesão ("primer"). São adesivos muito flexíveis e muito eficazes em colagem de plásticos, poliésteres, poliamidas [24,25].

Nos adesivos sujeitos a pressão ou “fita adesiva”, a adesão é alcançada através da difusão das moléculas através da superfície [23,25 e 26].

## **2.4 Resina Epóxi**

As resinas epóxi são termorrígidos em forma de líquido viscoso ou sólidos quebradiços. A exploração comercial começou na década de 30 pela I.G Farbenindustrie [30]. O termo epóxi refere-se a um grupo constituído por

um átomo de oxigênio ligado a dois átomos de carbono vide figura 2.2) [30-32].



Figura 2.2 Formula geral do anel de epóxi.

Na cura do epóxi primeiramente ocorre um processo inicial termicamente ativado em que para iniciar a reação química de cura um catalisador reage com a resina a uma certa temperatura. A seguir, a resina reage com um endurecedor [33], substância que promove ou favorece a adesão, para formar uma união química (vide figura 2.3) [34].

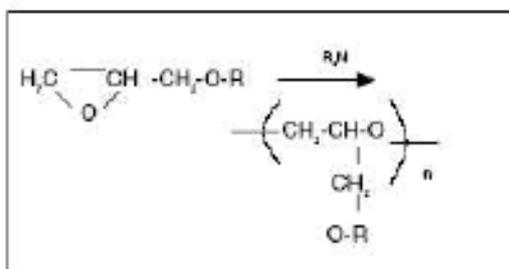


Figura 2.3 – Reação Química genérica para epóxi

As resinas epóxi são apresentadas na forma líquida contendo anéis epóxi para o endurecimento da resina é necessário a adição de agentes de cura e para reduzir o tempo de gel é necessário adicionar aceleradores à resina [35,36].

Existem temperaturas e tempos envolvidos com o processo de cura das resinas epóxi e, subseqüentemente, importantes para o adesivo.

Tempo de uso é também conhecido como “potlife”. Este é o tempo decorrido desde o início da mistura até atingir um aumento de viscosidade considerável, a ponto de impossibilitar a aplicação no dispositivo. Quanto menor a reatividade do sistema, tanto maior será o tempo de uso.

Tempo de gelatinação: tempo gel ou "gel time" é o tempo decorrido a partir da mistura até que o sistema adquira consistência entre líquido altamente viscoso e um sólido. O “gel time” sempre será maior do que o “pot life” Quanto maior a reatividade do sistema, mais cinto será a faixa do “gel time”.

O ciclo completo de cura é o tempo total necessário para um sistema atingir as resistências mecânicas e térmicas exigidas, que pode ser dividido em dois tempos: endurecimento e cura total.

O endurecimento é o período necessário, a partir da aplicação, para que os sistemas envolvidos adquiram estabilidade, ou seja, propriedades mecânicas mínimas para suportar os esforços que sofrerão posteriormente durante as etapas de fabricação de estrutura.

O tempo de cura é o tempo decorrido a partir da aplicação, até que sejam atingidas as máximas resistências mecânicas e térmicas. E o tempo ideal que se deve aguardar antes de submeter á junta adesiva da às exigências de trabalho [36].

### **2.4.1 Seleção de Agentes de Cura (Endurecedores)**

Para que ocorra a cura do epóxi (polimerização), é necessário adicionar agentes de cura. Para a seleção apropriada do agente de cura é necessário levar em consideração fatores importantes como o "pot life" requerido, técnicas de aplicação, condições de cura e propriedades físicas esperadas [36].

O agente de cura deve ser bem selecionado porque ele afeta a resistência química, as propriedades elétricas, propriedades físicas e a resistência térmica da formulação curada, e principalmente afeta a viscosidade e a reatividade da formulação. O Agente de cura determina o tipo de ligação química formada e o grau de ligações cruzadas, o calor necessário requerido durante o ciclo de cura e o tempo gel. A cura do epóxi sempre ocorre por uma reação exotérmica (o calor é produzido na reação) e dependendo do agente de cura, a cura pode ocorrer mesmo a temperatura ambiente [37].

Existe uma variedade de agentes de cura sendo necessário selecionar o mais adequado de acordo com a aplicação do adesivo.

Os agentes de cura mais utilizados são:

- Polissulfetos: São produtos pouco usado, pois possuem alta toxicidade, difícil aquisição e alto custo. Suas principais características são flexibilidade, impermeabilidade e excelente adesão à fibra de vidro, todavia podem ser substituídas por outros endurecedores que conferem característica semelhante com menos toxicidade [36,37].

•Aminas: a funcionalidade de uma amina é determinada pelo número de hidrogênio: amínicos (ativos) presentes na molécula. Um grupo de amina primária (nitrogênio com dois hidrogênios unidos entre si) reagirá com dois grupos epóxi. Uma amina secundária, com apenas um hidrogênio, reagirá um grupo de epóxi. Uma amina terciária sem hidrogênio ligado a ela não reagirá rapidamente com um grupo de epóxi, mas água como catalisador para acelerar as reações da resina epóxi [38]. Amina primária pode ser usada efetivamente como agente de cura para o epóxi [35].

•Amina Alifática: proporcionam boas propriedades físicas a resina curada, incluindo excelente resistência química e a solventes, também apresenta rápida cura a temperatura ambiente. Uma boa retenção de propriedades só é possível a temperatura em torno de 100°C. Mas é tolerado pequenas exposições a temperaturas mais elevadas [36].

•Amina Cicloalifáticas: as aminas cicloalifáticas em comparação com as poliamidas alifáticas apresentam melhor resistência térmica e dureza quando usadas na cura resinas epóxi. Em relação às poliamidas alifáticas, as aminas cicloalifáticas são menos reativas, resultando num maior tempo de manuseio (pot-life), além da possibilidade de se fundir massas maiores. Quanto à temperatura, as temperaturas de transição vítreas se aproximam às das aminas aromáticas [36].

•Aminas aromáticas: apresentam pouca utilização devido ao elevado grau toxicidade e, possivelmente, por apresentar cor escura. Geralmente são aminas sólidas que necessitam ser fundidas e misturadas a quente com a resina e posteriormente curada a altas temperaturas. Neste processo ocorre a emissão de vapores amínicos corrosivos e tóxicos [31]. Para se obter ótimas

propriedades é necessário que a cura seja realizada a temperaturas elevadas, que são mantidas até 150°C [36].

- Anidridos: O uso do anidrido vem geralmente acompanhado de um acelerador (0,5 % a 3%), quase sempre uma amina terciária, isto porque a reação de alguns anidridos com a resma epóxi é lenta e esta adição acelera o tempo de gel e a cura. A quantidade deve ser exata, pois quantidades acima ou abaixo da indicada pelo fabricante, reduz o desempenho a alta temperatura [36]. O grupo de anidridos não reagem diretamente com o grupo de epóxi, sendo que para a reação ocorrer é necessário que o anel de anidrido esteja aberto [37].

- Poliamidas: as reações das poliamidas com o grupo de epóxi ocorrem através dos grupos funcionais de amina não reagidos na cadeia da poliamida. Apesar das poliamidas apresentarem melhor adesão, elas são mais escuras do que as poliaminas. As resinas epóxi curadas com poliamidas perdem a resistência estrutural rapidamente com o aumento de temperatura, isso limita o seu uso a temperaturas acima de 65°C [36].

- Co-agentes de cura: Polissulfetos são usados também como co-agentes de cura com aminas alifáticas. O sistema de co-agente de cura (polissulfeto / amina alifática) proporcionam melhor desempenho inicial e isto ocorre a temperaturas elevadas. Quando o sistema epóxi-polissulfeto é acelerado com amina terciária, apresenta boa flexibilidade e resistência a tração a temperatura ambiente [36].

# Capítulo 3

## Reparo em Tubulações

### 3.1 Tipos de Sistemas de Reparos Existentes

De acordo com o manual de reparo de tubulação PRM [37] podemos indicar os seguintes procedimentos como reparo de tubulação:

- Troca de trechos (soldados)
- Esmerilhamento;
- Enchimento com solda;
- Dupla calha;
- Luva
- Bandagem de Material Composto;

- Braçadeiras mecânicas;
- Bacalhau;
- Remoção por hot tapping;
- Conectores

Existem diferentes tipos de defeitos, reparos e uma variedade enorme de métodos de aplicação de reparos. A tabela 3.1 mostra os diferentes tipos de defeitos.

Tabela 3.1 – Sumário dos diferentes tipos de reparos para os diferentes tipos de defeitos.

| Type of Defect (a)  | Grinding      | Type A Sleeve         | Compression Sleeve    | Type B Sleeve | Composite Sleeve      | Weld Deposition | Bolt-On Clamp With Seals | Force Screw Leak Clamp | Welded Patch or Half Sole | Hot Tapping (b) |
|---|---------------|-----------------------|-----------------------|---------------|-----------------------|-----------------|--------------------------|------------------------|---------------------------|-----------------|
| 1. Leak (from any cause) or defect > 0.8t                   | No            | No                    | No                    | Permanent     | No                    | No              | Permanent                | Temporary (c)          | No                        | Permanent       |
| 2. External Corrosion                                       |               |                       |                       |               |                       |                 |                          |                        |                           |                 |
| 2a. Shallow to Moderate Pitting < 0.8t                      | No            | Permanent             | Permanent             | Permanent     | Permanent             | Permanent       | Permanent                | No                     | Temporary                 | Permanent       |
| 2b. Deep Pitting ≥ 0.8t                                     | No            | No                    | No                    | Permanent     | No                    | No              | Permanent                | No                     | No                        | Permanent       |
| 2c. Selective Seam Attack                                   | No            | No                    | Permanent             | Permanent (d) | No                    | No              | Permanent (d)            | No                     | Temporary                 | No              |
| 3. Internal Defect or Corrosion                             | No            | Permanent (e)         | Permanent (e)         | Permanent     | Permanent (e)         | No              | Permanent (e)            | No                     | No                        | No              |
| 4. Gouge or Other Metal Loss on Pipe Body                   | Permanent (f) | Permanent (g)         | Permanent (g)         | Permanent (h) | Permanent (g)         | Permanent (g)   | Permanent (h)            | No                     | No                        | Permanent       |
| 5. Arc Burn, Inclusion, or Lamination                       | Permanent (f) | Permanent             | Permanent             | Permanent     | Permanent (g)         | Permanent (g)   | Permanent                | No                     | No                        | Permanent       |
| 6. Hard Spot  | No            | Permanent             | Permanent             | Permanent     | No                    | No              | Permanent                | No                     | No                        | Permanent       |
| 7. Dent   |               |                       |                       |               |                       |                 |                          |                        |                           |                 |
| 7a. Smooth Dent   | No            | Permanent (i)         | Permanent (i)         | Permanent     | Permanent (j)         | No              | Permanent                | No                     | No                        | No              |
| 7b. Dent With Stress Concentrator on Seam Weld or Pipe Body | Permanent (k) | Permanent (g) (l) (j) | Permanent (g) (l) (j) | Permanent     | Permanent (g) (l) (j) | No              | Permanent                | No                     | No                        | Permanent       |
| 7c. Dent With Stress Concentrator on Girth Weld             | Permanent (k) | No                    | Permanent (g) (l) (j) | Permanent     | No                    | No              | Permanent (i)            | No                     | No                        | No              |
| 8. Crack or Cracking  |               |                       |                       |               |                       |                 |                          |                        |                           |                 |
| 8a. Shallow Crack < 0.4t                                    | Permanent (f) | Permanent (g)         | Permanent             | Permanent (d) | Permanent (g)         | Permanent (g)   | Permanent (d)            | No                     | Temporary                 | Permanent       |
| 8b. Deep Crack ≥ 0.4t and not more than 0.8t                | No            | Permanent (g)         | Permanent             | Permanent (d) | Permanent (g)         | Permanent (g)   | Permanent (d)            | No                     | No                        | Permanent       |
| 9. Seam Weld Defect   |               |                       |                       |               |                       |                 |                          |                        |                           |                 |
| 9a. Volumetric Defect                                       | Permanent (f) | Permanent (g)         | Permanent             | Permanent     | Permanent (g)         | No              | Permanent                | No                     | No                        | Permanent       |
| 9b. Linear Defect   | Permanent (f) | Permanent (g)         | Permanent             | Permanent (d) | Permanent (g)         | No              | Permanent (d)            | No                     | No                        | Permanent       |
| 9c. Defect in or Near an ERW Seam                           | No            | No                    | Permanent             | Permanent (d) | No                    | No              | Permanent (d)            | No                     | No                        | No              |
| 10. Girth Weld Defect                                       | Permanent (f) | No                    | No                    | Permanent     | No                    | Permanent (m)   | Permanent (i)            | No                     | No                        | No              |
| 11. Wrinkle Bend, Buckle, or Coupling                       | No            | No                    | No                    | Permanent (n) | No                    | No              | No                       | No                     | No                        | No              |
| 12. Blisters, HIC   | No            | Permanent             | Permanent             | Permanent     | No                    | No              | Permanent                | No                     | No                        | No              |

Como estamos trabalhando somente com tubulação com vazamento, o tipo de defeito 1, nos restam os seguintes métodos de reparo:

- Luva tipo B ou Dupla Calha
- Abraçadeira Mecânica com Parafusos (Bolt-On Clamps)
- Abraçadeiras com pino centralizador (Leak Clamps)
- Remoção por hot tapping;

### 3.1.1 Luva Tipo B ou Dupla Calha

Tipo de reparo que restaura a tensão do duto em pelo menos 100% SMYS, na área reparada. Esse tipo de luva é adequado para conter pressão.



Figura 3.1 - Instalação de Luva tipo B

Na aplicação da luva tipo B a espessura e grau do aço os têm que ser os mesmos do duto ou com capacidade de resistir à mesma pressão original. É aceitável usar uma luva com maior ou menor espessura que o tubo com vazamento ou com maior ou menor tensão de escoamento do aço se a capacidade de pressão da luva for pelo menos igual ao do tubo a ser reparado.

A área a ser soldada deve ser inspecionada para determinar a espessura remanescente de parede do duto e utilizar consumíveis de baixo hidrogênio. O êxito depende do procedimento de soldagem e qualificação do soldador. O reparo deve se estender 50 mm além da extremidade do defeito. A fabricação e teste de acordo com a norma API-RP 1107.

A configuração típica do reparo com luva tipo B é apresentado na figura 3.1. Esse reparo consiste em duas metades de um cilindro ou de um tubo ou de duas placas com curvaturas apropriadas e fabricadas de acordo com a figura 3.2.

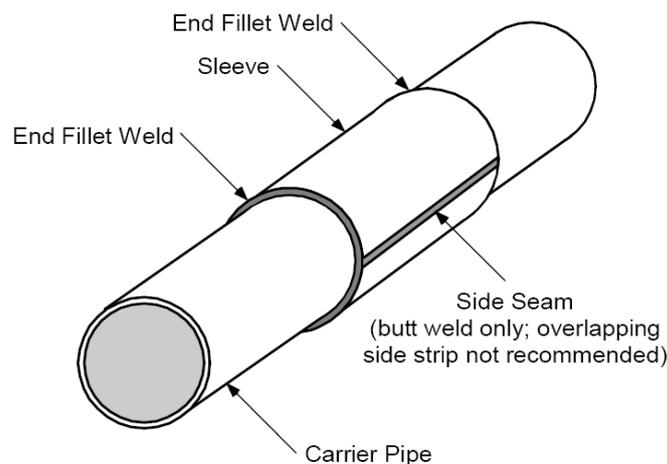


Figure 3.2 – Ilustração de uma luva tipo B

Como o reparo com luva tipo B é designado para conter a fuga total de pressão de operação os topos da luva são soldados ao tubo com vazamento e soldagem de topo sem costura é recomendado.

A luva tipo B é instalada sobre o vazamento com uma grande variedade de formas. Um dos métodos mais comuns é colocar uma das metades da luva

com uma válvula sobre o furo. Depois correntes e válvulas hidráulicas são utilizadas para a luva a ficar no local junto ao tubo com furo. Em alguns casos um tampão em neoprene é colocado sobre o furo para ser comprimido pela luva tipo B como forma de selar o vazamento e forçar o fluído a escoar somente pelo tubo. Assim o fluxo de fluido pode ser liberado e a soldagem da luva poder ser realizada. Para completar o processo de fabricação do reparo a válvula é fechada e tamponada permanentemente. Uma variação dessa técnica usa uma válvula com um plug para vedar que posteriormente pode ser reutilizada.

### **3.1.2 Abraçadeira Mecânica com Parafusos (Bolt-On Clamps)**

Existem diferentes tipos de abraçadeiras mecânicas de diferentes tipos de fabricantes. A figura 3.3 ilustra uma abraçadeira mecânica com parafusos típica.



Figure 3.3. Abraçadeira Mecânica com Parafusos

Esse tipo de abraçadeira foram desenvolvidos para conter a total pressão das linhas de dutos e, por isso, são de maior espessura e mais pesadas. São mais pesadas também devido aos grandes parafusos usados para fazer o aperto necessário. Essas abraçadeiras normalmente possuem um o-ring elastomérico para conter a pressão quando a tubulação contém um furo com vazamento. As abraçadeiras podem ser instaladas como uma luva tipo A ou como uma luva tipo B. Os reparadores que utilizarem as solda e o procedimento da luva tipo B devem utilizar todas as normas referentes a solda de tubulação.

### 3.1.3 Abraçadeiras com Pino Centralizador (Leak Clamps)

A abraçadeira com pino centralizador é usada em vazamentos ocorridos através de pit de corrosão. Esse dispositivo consiste em uma bandagem de metal leve com um único parafuso para promover a aderência ao tubo. A figura 4.4 mostra uma abraçadeira com pino centralizador típica.

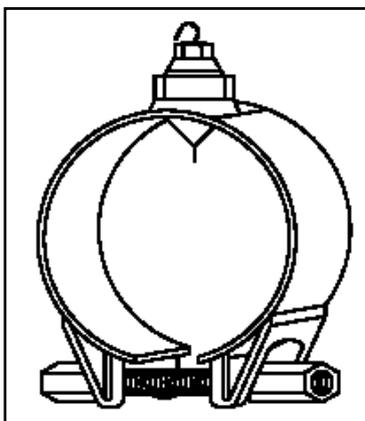


Figura 3.4 - Abraçadeira com pino centralizador

A abraçadeira tem o parafuso fixador localizado exatamente a 180 graus do pino centralizador. O pino é utilizado para forçar um cone de neoprene no furo para evitar o vazamento. Esse tipo de abraçadeira é utilizado em casos isolados e normalmente considerado como um reparo temporário, onde terá que evitar o vazamento até o reparo permanente poder ser feito. A abraçadeira com pino centralizador pode ser usada somente se:

- Os resultados de uma análise do pessoal de engenharia mostrem que o vazamento não ocorrerá através de uma corrosão geral do tubo, ou
- O nível de pressão seja reduzido para um nível de segurança baixo até o reparo permanente ser executado.

A abraçadeira com pino centralizador não deverá ser usada para reparar uma corrosão seletiva ERW ou uma falha na costura no cordão de solda longitudinal. Essa abraçadeira só poderá ser utilizada como reparo permanente se estiver encapsulada num compartimento estanque.

### **3.1.4 Hot Tapping**

O “Hot tapping” pode ser utilizado para remover um defeito de uma tubulação em serviço. Normalmente, os seguintes parâmetros têm que ser cumpridos para que se possa utilizar esse procedimento.

Se não se souber o extensão do defeito a pressão poderá ter que ser reduzida antes da inspeção e do reparo ser realizado. Esse processo poderá ser

requerido mesmo se o processo de “hot tapping” utilizado não necessite de redução de pressão na linha.

O tamanho do trecho a ser reparado deverá ser baseado na necessidade de ter que se conter na totalidade o defeito dentro da dimensão da parede do tubo que será removido. Em outras palavras a seção de material a ser removido terá que conter o defeito na totalidade.

O “hot tap” deverá ser propriamente desenvolvido para resistir a todas as tensões aplicadas como qualquer “hot tap” suportaria.

Abraçadeiras “hot tap” foram desenvolvidas para aplicações em tubulações submersa. Elas são divididas, aparafusadas e com um bocal em uma das metades da abraçadeira. Elas possuem um mecanismo de aperto circunferencial em cada parte que veda o tubo com vazamento e promove a restituição total e integral da integridade através de uma solda final. Esse reparo pode ser utilizado em aplicações “onshore”.

Como as plataformas offshore são zonas de chamada atmosfera de hidrocarbonetos (Zona 0) prevenção contra trabalho a quente e equipamento de segurança são essenciais. Sendo assim qualquer procedimento que produza calor ou faísca é proibido. Luvas tipo B e Hot tapping são procedimentos que serão excluídos dos tipos de procedimentos que poderão ser utilizados em plataformas offshore. De acordo com a tabela 2 do PRM [37] somente as abraçadeiras mecânicas com parafusos poderão ser utilizadas em plataformas offshore como reparo permanente e as abraçadeiras com pino centralizador poderão ser utilizadas como reparo temporário.

Tabela 3.2 – Sumário dos tipos de reparos

| Qualifying Factor (a)                | Grinding  | Type A Sleeve | Compression Sleeve | Type B Sleeve | Composite Sleeve | Weld Deposition | Split-Sleeve Bolt-On Clamp With Seals | Force Screw Leak Clamp | Welded Patch or Half Sole | Hot Tapping (b) |
|--------------------------------------|-----------|---------------|--------------------|---------------|------------------|-----------------|---------------------------------------|------------------------|---------------------------|-----------------|
| 1. Onshore                           | Permanent | Permanent     | Permanent          | Permanent     | Permanent        | Permanent       | Permanent                             | Temporary (b)          | Temporary                 | Permanent       |
| 2. Offshore                          | Permanent | No            | No                 | No            | Permanent (c)    | No              | Permanent                             | No                     | No                        | No              |
| 3. Straight Pipe                     | Permanent | Permanent     | Permanent          | Permanent     | Permanent        | Permanent       | Permanent                             | Temporary (b)          | Temporary                 | Permanent       |
| 4. Gradual Bend                      | Permanent | Permanent (d) | No                 | Permanent (d) | Permanent        | Permanent       | Permanent                             | Temporary (b)          | Temporary                 | Permanent       |
| 5. Sharp Bend                        | Permanent | Permanent (d) | No                 | Permanent (d) | Permanent (d)    | Permanent       | No                                    | No                     | No                        | No              |
| 6. Fitting                           | Permanent | No            | No                 | No            | No               | Permanent       | No                                    | Temporary (b)          | No                        | No              |
| 7. Heat Sink                         | Permanent | Permanent     | Permanent          | Permanent (e) | Permanent        | Permanent (e)   | Permanent                             | Temporary (b)          | No                        | Permanent (e)   |
| 8. High Carbon Equivalent (CE) Steel | Permanent | Permanent     | Permanent          | Permanent (e) | Permanent        | Permanent (e)   | Permanent                             | Temporary (b)          | No                        | Permanent (e)   |

Essas premissas permitem uma grande abertura para os sistemas de reparo para adesivos epóxi serem utilizados.

# Capítulo 4

## Uma Metodologia Alternativa para Reparo de Defeitos Localizados em Dutos com Resinas Epóxi

### 4.1 Tubos Cilíndricos sob Pressão – Soluções Analíticas para Tensão, Deformação e Deslocamentos.

#### 4.1.1 Cilindro Elástico Ortotrópico com Parede Grossa sob Pressão

No presente estudo, considera-se inicialmente um cilindro elástico de raio interno  $r_i$  e raio externo  $r_e$  sujeito, respectivamente a pressão interna  $P_o$  e a pressão externa  $P_1$  como mostra a figura 4.1.

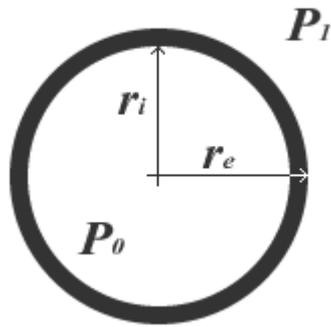


Fig. 4.1 – Tubo sob pressão interna e externa.

As equações que modelam este problema, expressas em coordenadas cilíndricas, são:

Balanço de momento linear – Sob a hipótese de estado plano de tensão e desprezando as forças de corpo, o balanço do momento linear para um tubo em equilíbrio estático pode ser expresso da seguinte forma

$$\frac{\partial \sigma_r}{\partial r} + \frac{1}{r} \frac{\partial \sigma_{r\theta}}{\partial \theta} + \frac{\sigma_r - \sigma_\theta}{r} = 0 ; \quad \frac{1}{r} \frac{\partial \sigma_\theta}{\partial \theta} + \frac{\partial \sigma_{r\theta}}{\partial r} + \frac{2\sigma_{r\theta}}{r} = 0 \quad (1)$$

onde  $\sigma_r$  e  $\sigma_\theta$  são, respectivamente, a componente radial e tangencial do tensor das tensões.

Equações Constitutivas: Supondo um comportamento elástico, linear e ortotrópico, as equações constitutivas podem ser representadas da seguinte maneira

$$\varepsilon_r = \frac{1}{E_r} \sigma_r - \frac{\nu_{r\theta}}{E_r} \sigma_\theta \quad ; \quad \varepsilon_\theta = -\frac{\nu_{r\theta}}{E_r} \sigma_r + \frac{1}{E_\theta} \sigma_\theta \quad ; \quad \varepsilon_{r\theta} = \frac{1}{2G_{r\theta}} \sigma_{r\theta} \quad (2)$$

onde  $\varepsilon_r$  é a deformação na direção radial e  $\varepsilon_\theta$  a deformação na direção tangencial.  $E_\theta$  é o módulo de elasticidade na direção tangencial,  $E_r$  o módulo de elasticidade na direção radial e  $\nu_{r\theta}$  é o coeficiente que relaciona a contração na direção tangencial com a extensão na direção radial.  $G_{r\theta}$  é o módulo de cisalhamento.

#### Relações Geométricas:

$$\varepsilon_\theta = \frac{u_r}{r} + \frac{1}{r} \frac{\partial u_\theta}{\partial \theta} \quad ; \quad \varepsilon_r = \frac{\partial u_r}{\partial r} \quad ; \quad \varepsilon_{r\theta} = \frac{1}{2} \left( \frac{1}{r} \frac{\partial u_r}{\partial \theta} + \frac{\partial u_\theta}{\partial r} - \frac{u_\theta}{r} \right) \quad (3)$$

onde  $u_r$  é o deslocamento radial e  $u_\theta$  é o deslocamento tangencial.

Para modelar o problema adequadamente, além das eqs. (1) - (3), é necessário aplicar as condições de contorno adequadas:

$$\sigma_r |_{r=r_i} = -P_0 \quad ; \quad \sigma_r |_{r=r_e} = -P_1 \quad (4)$$

As equações (1) - (4) modelam o comportamento de um tubo elástico ortotrópico. Esse problema pode ser resolvido usando o método da função de tensão de Airy. Nesse método, supõe-se a existência de uma função diferenciável  $\phi(r, \theta)$ , chamada de função Airy, tal que

$$\sigma_r = \frac{1}{r} \frac{\partial \phi}{\partial r} + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2 \phi}{\partial \theta^2} ; \sigma_\theta = \frac{\partial^2 \phi}{\partial r^2} ; \sigma_{r\theta} = -\frac{\partial}{\partial r} \left( \frac{1}{r} \frac{\partial \phi}{\partial \theta} \right) \quad (5)$$

É fácil verificar que, se todas as relações em (5) são válidas, então as eqs. (1)-(4) são automaticamente válidas. Supondo que haja uma simetria radial ( $\phi(r, \theta) = \varphi(r)$ ), as eqs. (5) podem ser simplificadas:

$$\sigma_r = \frac{1}{r} \frac{d\varphi}{dr} ; \sigma_\theta = \frac{d^2\varphi}{dr^2} ; \sigma_{r\theta} = 0 \quad (6)$$

Introduzindo a eq. (6) nas equações constitutivas (2), é possível obter:

$$\varepsilon_r = \frac{1}{E_r} \frac{1}{r} \frac{d\varphi}{dr} - \frac{\nu_{r\theta}}{E_r} \frac{d^2\varphi}{dr^2} ; \varepsilon_\theta = -\frac{\nu_{r\theta}}{E_r} \frac{1}{r} \frac{d\varphi}{dr} + \frac{1}{E_\theta} \frac{d^2\varphi}{dr^2} ; \varepsilon_{r\theta} = 0 \quad (7)$$

A escolha de uma função  $\varphi(r)$  que satisfaça as condições de contorno em (4) não é suficiente para assegurar a existência de campos de deformação ( $u_r, u_\theta$ ) que satisfaçam as relações geométricas em (3). Considerando-se que devido à simetria do problema o deslocamento tangencial é nulo ( $u_\theta = 0$ ), as relações geométricas podem ser simplificadas para a seguinte forma

$$\varepsilon_\theta = \frac{u_r}{r} ; \varepsilon_r = \frac{\partial u_r}{\partial r} \quad (8)$$

Uma vez obtido  $\varepsilon_\theta$  através da segunda equação em (7), é possível determinar  $u_r$  através da primeira relação geométrica em (8). Usando as relações geométricas em (8) é simples verificar que as componentes  $\varepsilon_r$  e  $\varepsilon_\theta$  da deformação deverão satisfazer a seguinte relação, chamada de equação de compatibilidade do problema

$$\frac{\partial \varepsilon_\theta}{\partial r} = \frac{1}{r}(\varepsilon_r - \varepsilon_\theta) \quad (9)$$

Portanto, para se fazer uma escolha adequada de  $\varphi$  e para se satisfazer as relações geométricas, é necessário verificar a compatibilidade da equação (9). Introduzindo (7) em (9), é possível obter

$$\frac{1}{E_\theta} \left[ \frac{d^3 \varphi}{dr^3} + \frac{1}{r} \frac{d^2 \varphi}{dr^2} \right] - \frac{1}{E_r} \frac{1}{r^2} \frac{d\varphi}{dr} = 0 \quad (10)$$

A função  $\varphi$  que corresponde à solução do problema (1)-(4) deverá ser a solução da equação diferencial ordinária (10). Para solucionar essa equação, será feita a seguinte troca de variáveis:  $r = e^t$ . Nesse caso, é possível obter

$$\frac{d\varphi}{dr} = \frac{d\varphi}{dt} \frac{dt}{dr} = \frac{d\varphi}{dt} e^{-t} \quad (11)$$

$$\frac{d^2 \varphi}{dr^2} = \frac{d}{dr} \left( \frac{d\varphi}{dr} \right) = \frac{d}{dt} \left( \frac{d\varphi}{dt} e^{-t} \right) = e^{-t} \left( \frac{d^2 \varphi}{dt^2} - \frac{d\varphi}{dt} \right) \quad (12)$$

$$\frac{d^3 \varphi}{dr^3} = \frac{d}{dr} \left( \frac{d^2 \varphi}{dr^2} \right) = \frac{d}{dt} \left[ \left( \frac{d^2 \varphi}{dt^2} - \frac{d\varphi}{dt} \right) e^{-t} \right] = e^{-3t} \left( \frac{d^3 \varphi}{dt^3} - 3 \frac{d^2 \varphi}{dt^2} + 2 \frac{d\varphi}{dt} \right) \quad (13)$$

Usando (11) – (13) e (10) podemos obter a seguinte equação diferencial ordinária linear

$$\frac{1}{E_\theta} \left[ \frac{d^3\varphi}{dt^3} - 2 \frac{d^2\varphi}{dt^2} + \frac{d\varphi}{dt} \right] - \frac{1}{E_r} \frac{d\varphi}{dt} = 0 \quad (14)$$

A solução geral para a Eq. (14) é

$$\varphi = \hat{A} + \hat{B} r^{\left(1 - \sqrt{\frac{E_\theta}{E_r}}\right)} + \hat{C} r^{\left(1 + \sqrt{\frac{E_\theta}{E_r}}\right)} \quad (15)$$

onde  $\hat{A}$ ,  $\hat{B}$  e  $\hat{C}$  são constantes que serão obtidas através das condições fronteira.

Finalmente, usando (6) e (15), podemos verificar que as componentes da tensão usando a função de Airy são

$$\sigma_r(r) = \frac{1}{r} \frac{d\varphi}{dr} = \hat{B} \left( 1 - \sqrt{\frac{E_\theta}{E_r}} \right) r^{-\left(\sqrt{\frac{E_\theta}{E_r}} + 1\right)} + \hat{C} \left( 1 + \sqrt{\frac{E_\theta}{E_r}} \right) r^{\left(\sqrt{\frac{E_\theta}{E_r}} - 1\right)} \quad (16)$$

$$\sigma_\theta(r) = \frac{d^2\varphi}{dr^2} = -\hat{B} \left( 1 - \sqrt{\frac{E_\theta}{E_r}} \right) \sqrt{\frac{E_\theta}{E_r}} r^{-\left(\sqrt{\frac{E_\theta}{E_r}} + 1\right)} + \hat{C} \left( 1 + \sqrt{\frac{E_\theta}{E_r}} \right) \sqrt{\frac{E_\theta}{E_r}} r^{\left(\sqrt{\frac{E_\theta}{E_r}} - 1\right)} \quad (17)$$

E, a partir das condições de contorno tem-se

$$\hat{B} = \frac{P_1 r_i \left( \sqrt{\frac{E_\theta}{E_r}} - 1 \right) - P_0 r_e \left( \sqrt{\frac{E_\theta}{E_r}} - 1 \right)}{\left( 1 - \sqrt{\frac{E_\theta}{E_r}} \right) \left[ r_i \left( -\left( \sqrt{\frac{E_\theta}{E_r}} + 1 \right) \right) r_e \left( \sqrt{\frac{E_\theta}{E_r}} - 1 \right) - r_i \left( \sqrt{\frac{E_\theta}{E_r}} - 1 \right) r_e \left( -\left( \sqrt{\frac{E_\theta}{E_r}} + 1 \right) \right) \right]} \quad (18)$$

$$\hat{C} = \frac{P_1 r_i \left( -\left( \sqrt{\frac{E_\theta}{E_r}} + 1 \right) \right) - P_0 r_e \left( -\left( \sqrt{\frac{E_\theta}{E_r}} + 1 \right) \right)}{\left( 1 - \sqrt{\frac{E_\theta}{E_r}} \right) \left[ r_i \left( \sqrt{\frac{E_\theta}{E_r}} - 1 \right) r_e \left( -\left( \sqrt{\frac{E_\theta}{E_r}} + 1 \right) \right) - r_i \left( -\left( \sqrt{\frac{E_\theta}{E_r}} + 1 \right) \right) r_e \left( \sqrt{\frac{E_\theta}{E_r}} - 1 \right) \right]} \quad (19)$$

O deslocamento radial  $u_r$  é obtido através da segunda relação constitutiva em (2)

$$u_r(r) = \left( 1 - \sqrt{\frac{E_\theta}{E_r}} \right) \left[ -\hat{B} \sqrt{\frac{E_\theta}{E_r}} r^{-\sqrt{\frac{E_\theta}{E_r}}} \left( \frac{1}{E_\theta} + \frac{\nu_{r\theta}}{E_r} \right) + \hat{C} \sqrt{\frac{E_\theta}{E_r}} r^{\sqrt{\frac{E_\theta}{E_r}}} \left( \frac{1}{E_\theta} - \frac{\nu_{r\theta}}{E_r} \right) \right] \quad (20)$$

#### 4.1.2. Cilindro Elasto-Plástico com Parede Fina sob Pressão

O estudo de uma luva de material compósito – tubo metálico sob pressão interna  $P_i$ , como mostra a figura 4.2 pode ser realizado utilizando as equações descritas anteriormente, considerando o tubo como um material isotrópico, a luva um material anisotrópico e usando a seguinte relação de compatibilidade para determinar a pressão de contato

$$[u_r(r = r_o)]_{pipe} - \hat{u} = [u_r(r = r_o)]_{sleeve} \quad (21)$$

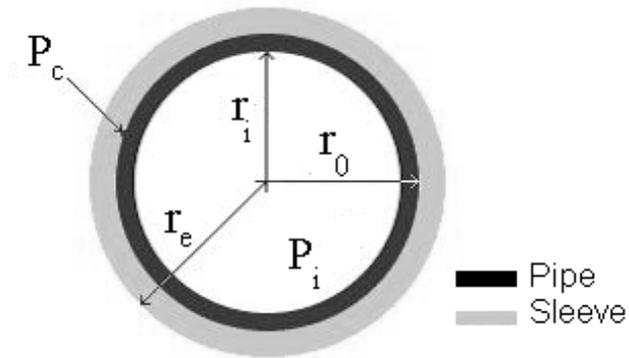


Fig. 4.2 – Tubo reforçado com luva de material compósito sujeito a pressão interna

Entretanto, é possível mostrar que, se a espessura da parede do tubo  $t$  é menor que  $1/10$  do raio interno ( $t < r_i/10$ ), a hipótese simplificada de estruturas de parede fina pode ser utilizadas, desde que a pressão de contato entre o tubo metálico e a luva de material compósito seja a mesma. Nesse caso, é considerada somente a componente da tensão tangencial  $\sigma_\theta$ , que possui uma expressão simples

$$\sigma_\theta = \frac{P_0 r_i - P_1 r_e}{r_e - r_i} \quad (22)$$

A vantagem de se utilizar a teoria para tubos com paredes finas é que um comportamento inelástico do tubo pode ser facilmente incluído na análise. Para um tubo metálico de parede fina sujeito a deformações inelásticas a temperatura ambiente, a relação tensão deformação no domínio elástico é

$$\sigma_\theta = E(\varepsilon_\theta - \varepsilon_\theta^p) \quad (23)$$

Sendo  $\varepsilon_{\theta}^p$  a componente tangencial da deformação plástica e  $E$  é o módulo de Young do material do tubo.

Além dessa clássica relação é necessário mostrar a relação entre tensão e deformação plástica. A relação apresentada a seguir é adequada para carregamentos monótonos em materiais metálicos

$$\sigma_{\theta} = \sigma_y + K(\varepsilon_{\theta}^p)^N, \text{ se } \sigma_{\theta} > \sigma_y \Rightarrow \varepsilon_{\theta}^p = \left\langle \frac{\sigma_{\theta} - \sigma_y}{K} \right\rangle^{\frac{1}{N}} \quad (24)$$

com  $\langle x \rangle = \text{Max}\{0, x\}$ .  $\sigma_y$  é a tensão de escoamento.  $K$  e  $n$  são constantes positivas que caracterizam o comportamento plástico do material.  $K$  é o coeficiente de resistência plástica e  $N$  é o expoente de endurecimento. A partir de (24) podemos verificar que  $\varepsilon_{\theta}^p = 0$  se  $\sigma_{\theta} < \sigma_y$ . E também podemos verificar que  $\varepsilon_{\theta} = \frac{\sigma_{\theta}}{E} + \varepsilon_{\theta}^p$ . Supondo-se que  $\varepsilon_{\theta} \approx \frac{u_r}{r_i}$ , é possível obter a seguinte expressão para o deslocamento radial

$$u_r = r_i \left[ \frac{\sigma_{\theta}}{E} + \left\langle \frac{\sigma_{\theta} - \sigma_y}{K} \right\rangle^{\frac{1}{N}} \right], \quad \forall r \quad (25)$$

O termo  $\frac{\sigma_{\theta}}{E}$  corresponde a deformação elástica e o termo  $\left\langle \frac{\sigma_{\theta} - \sigma_y}{K} \right\rangle^{1/N}$  corresponde a deformação plástica do tubo.

## **4.2. Análise Mecânica de um Sistema de Reforço com Luva de Material Compósito**

A presente seção apresenta uma análise dos sistemas de reforço com luva de material compósito para tubulações metálicas com perda localizada de material que impossibilita a continuidade da sua utilização. O comportamento pode ser elástico ou inelástico. Diferentes sistemas de reparo comerciais baseados em materiais compósitos reforçados com fibra podem ser encontrados no mercado:

- (a) Manta ou tecido de Fibra de Vidro impregnado com resina polimérica líquida,
- (b) Tecidos pré-impregnados com resina polimérica
- (c) Bandagem pré-impregnada com resina que é ativada com água

Independente do sistema adotado, a idéia fundamental da técnica de reforço é transferir parte da tensão tangencial na parede do tubo para a luva de material compósito.

### **4.2.1. Modelo Básico – Tubo sem Defeito Localizado**

O primeiro passo para uma análise mecânica simplificada do sistema de reforço com luva em material compósito é desconsiderar imperfeições localizadas os defeitos de fabricação. O sistema tubo-luva de material compósito é modelado como dois cilindros concêntricos, abertos nas extremidades, sob pressão interna – um cilindro interno de parede fina com

comportamento elasto-plástico e uma luva de material compósito com comportamento elástico ortotrópico. O cilindro interno possui um raio interno  $r_i$  e raio externo  $r_o$ . O cilindro pode ser considerado de parede fina se a espessura da parede do tubo  $t$  for menor que 1/10 do raio interno ( $t < r_i/10$ ). A luva de material compósito possui raio interno  $r_o$  e raio externo  $r_e$ . O sistema é submetido à pressão interna  $P_i$  como mostra a figura 3.

A pressão de contato entre o tubo e a luva será chamada de  $P_c$ . Supondo-se que o deslocamento radial na superfície de contato é o mesmo para ambos os cilindros, é possível obter uma expressão analítica para os campos de tensão, deformação e deslocamento. Com essas expressões é possível obter uma espessura mínima da luva de material compósito dentro de um fator de segurança prescrito.

Normalmente resina epóxi reforçada com fibra de vidro unidirecional é utilizada para a fabricação da luva. Desprezando a perda de resistência da luva de material compósito devido à fluência ou a efeitos ambientais, o deslocamento radial  $u_r$  na luva de material compósito pode ser obtida através da eq. 20

$$u_r(r) = \left(1 - \sqrt{\frac{E_\theta}{E_r}}\right) \left[ -\hat{B} \sqrt{\frac{E_\theta}{E_r}} r - \sqrt{\frac{E_\theta}{E_r}} \left( \frac{1}{E_\theta} + \frac{\nu_{r\theta}}{E_r} \right) + \hat{C} \sqrt{\frac{E_\theta}{E_r}} r \sqrt{\frac{E_\theta}{E_r}} \left( \frac{1}{E_\theta} - \frac{\nu_{r\theta}}{E_r} \right) \right] \quad (20)$$

e considerando as seguintes expressões para  $\hat{B}$  e  $\hat{C}$ .

$$\hat{B} = \frac{-P_c r_e \left( \sqrt{\frac{E_\theta}{E_r}} - 1 \right)}{\left( 1 - \sqrt{\frac{E_\theta}{E_r}} \right) \left[ r_o \left( \sqrt{\frac{E_\theta}{E_r}} + 1 \right) r_e \left( \sqrt{\frac{E_\theta}{E_r}} - 1 \right) - r_o \left( \sqrt{\frac{E_\theta}{E_r}} - 1 \right) r_e \left( \sqrt{\frac{E_\theta}{E_r}} + 1 \right) \right]} \quad (26)$$

$$\hat{C} = \frac{-P_c r_e \left( \sqrt{\frac{E_\theta}{E_r}} + 1 \right)}{\left( 1 - \sqrt{\frac{E_\theta}{E_r}} \right) \left[ r_o \left( \sqrt{\frac{E_\theta}{E_r}} - 1 \right) r_e \left( \sqrt{\frac{E_\theta}{E_r}} + 1 \right) - r_o \left( \sqrt{\frac{E_\theta}{E_r}} + 1 \right) r_e \left( \sqrt{\frac{E_\theta}{E_r}} - 1 \right) \right]} \quad (27)$$

É importante observar que o deslocamento radial na luva de material compósito é função da pressão de contato  $P_c$  que não é conhecida “a priori”.

Pelo lado prático, é importante definir a espessura da luva de material compósito de forma a assegurar um critério de tensão tangencial máxima no tubo.

$$\sigma_\theta < \sigma_{\max} \text{ no tubo} \quad (28)$$

Nesse caso, é possível obter analiticamente a pressão mínima de contato  $(P_c)_{\min}$  atuando na superfície externa do tubo metálico necessária para assegurar que a condição (28) seja satisfeita

$$\sigma_\theta = \frac{P_i r_i - (P_c)_{\min} r_o}{r_o - r_i} = \sigma_{\max} \Rightarrow (P_c)_{\min} = \frac{P_i r_i - \sigma_{\max} (r_o - r_i)}{r_o} \quad (29)$$

A espessura mínima da luva de material compósito para assegurar que a condição expressa em (28) seja satisfeita pode ser obtida através da seguinte condição de compatibilidade

$$[u_r(r = r_o)]_{tubo} - \hat{u} = [u_r(r = r_o)]_{luva} \quad (30)$$

onde  $\hat{u}$  é o deslocamento radial da superfície externa do tubo devido a pressão interna  $P_{apl}$  a que o tubo foi submetido quando a luva de material compósito foi aplicada.

$$\hat{u} = r_o \left[ \frac{\hat{\sigma}_\theta}{E} + \left\langle \frac{\hat{\sigma}_\theta - \sigma_y}{K} \right\rangle^{\frac{1}{N}} \right] \text{ with } \hat{\sigma}_\theta = \frac{P_{apl} r_i}{r_o - r_i} \quad (31)$$

A condição de compatibilidade expressa em (30) assegura que o deslocamento radial da superfície externa do tubo e da superfície interna da luva de material compósito seja a mesma (superfície de contato). Usando essa condição e considerando as eqs. (20), (25), (26), (27) e (31) é possível obter a espessura mínima da luva de material compósito de forma a satisfazer a condição expressa em (28).  $(r_e)_{\min}$  é raiz da função, mostrada a seguir

$$\Phi(r_e) = r_o \left[ \frac{\sigma_{\max}}{E} + \left\langle \frac{\sigma_{\max} - \sigma_y}{K} \right\rangle^{\frac{1}{N}} \right] - \hat{u} - \left[ B(r_e) \sqrt{\frac{E_\theta}{E_r}} r_o^{-\sqrt{\frac{E_\theta}{E_r}}} \left( \frac{1}{E_\theta} + \frac{\nu_{r\theta}}{E_r} \right) + C(r_e) \sqrt{\frac{E_\theta}{E_r}} r_o^{\sqrt{\frac{E_\theta}{E_r}}} \left( \frac{1}{E_\theta} - \frac{\nu_{r\theta}}{E_r} \right) \right] \quad (32)$$

Onde

$$B(r_e) = \frac{-(P_c)_{\min} r_e \left( \sqrt{\frac{E_\theta}{E_r}} - 1 \right)}{r_o \left( \sqrt{\frac{E_\theta}{E_r}} + 1 \right) r_e \left( \sqrt{\frac{E_\theta}{E_r}} - 1 \right) - r_o \left( \sqrt{\frac{E_\theta}{E_r}} - 1 \right) r_e \left( \sqrt{\frac{E_\theta}{E_r}} + 1 \right)} \quad (33)$$

$$C(r_e) = \frac{-(P_c)_{\min} r_e \left( \sqrt{\frac{E_\theta}{E_r}} + 1 \right)}{r_o \left( \sqrt{\frac{E_\theta}{E_r}} - 1 \right) r_e \left( \sqrt{\frac{E_\theta}{E_r}} + 1 \right) - r_o \left( \sqrt{\frac{E_\theta}{E_r}} + 1 \right) r_e \left( \sqrt{\frac{E_\theta}{E_r}} - 1 \right)} \quad (34)$$

$$(P_c)_{\min} = \frac{P_i r_i - \sigma_{\max} (r_o - r_i)}{r_o} \quad (35)$$

A pressão interna  $P_{apl}$  a qual o tubo está submetido quando a luva de material compósito é aplicada é uma das mais importantes variáveis no dimensionamento de sistemas de reforço. A escolha errada dessa pressão pode resultar num reforço ineficaz como pode ser visto na Fig. 4.3 ( $P_i = 5$  MPa,  $r_i = 240$  mm,  $r_e = 250$  mm,  $\sigma_y = 133$  MPa,  $E = 200000$  MPa,  $K = 435$  MPa,  $N = 0.22$ ,  $E_\theta = 34400$  MPa,  $E_r = 9600$  MPa,  $\nu_{r\theta} = 0.3$  e  $\sigma_{\max} = 146.3$  MPa). Se o valor de  $P_{apl}$  é próximo de  $P_i$ , então o reforço deverá ter uma espessura muito grande e somente absorverá a tensão tangencial quando a pressão for superior a  $P_i$ . A maioria das empresas que aplicam os sistemas de reparo com luva de material compósito reconhecem que durante a aplicação a pressão de trabalho deve ser reduzida, porém essa redução da pressão não é quantificada nem é obrigatória.

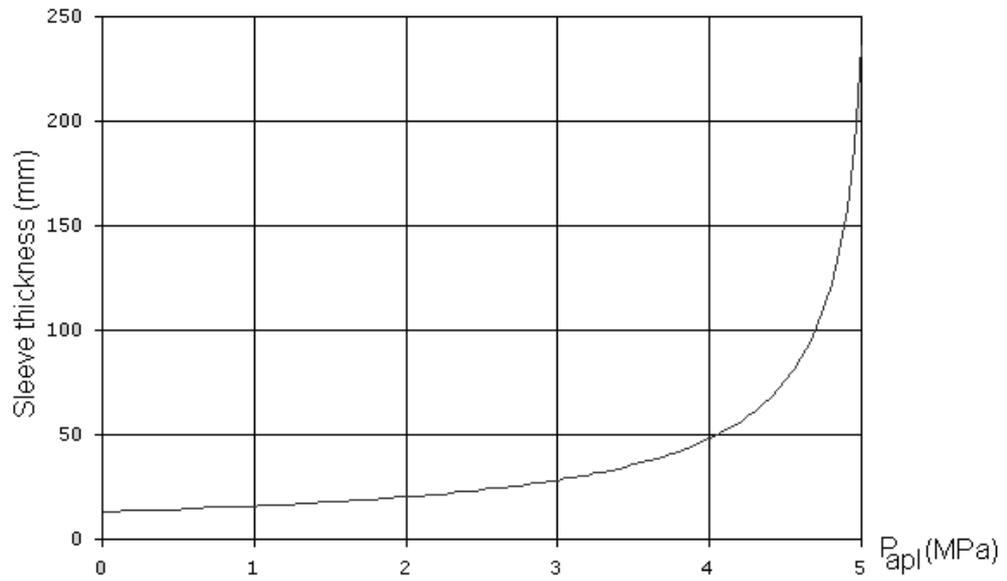


Fig. 4.3 – Influencia da pressão interna  $P_{apl}$  na espessura da luva para assegurar uma tensão tangencial máxima  $\sigma_{max} = 146.3$  MPa no tubo.  $P_i = 5$  MPa.

A Fig. 4.4 mostra a influência da máxima tensão tangencial admissível  $\sigma_{max}$  na espessura mínima da luva, considerando um material com as mesmas propriedades apresentado na Fig. 4.3 , para  $P_{apl} = 5$  MPa e  $P_o = 7.2$  MPa.

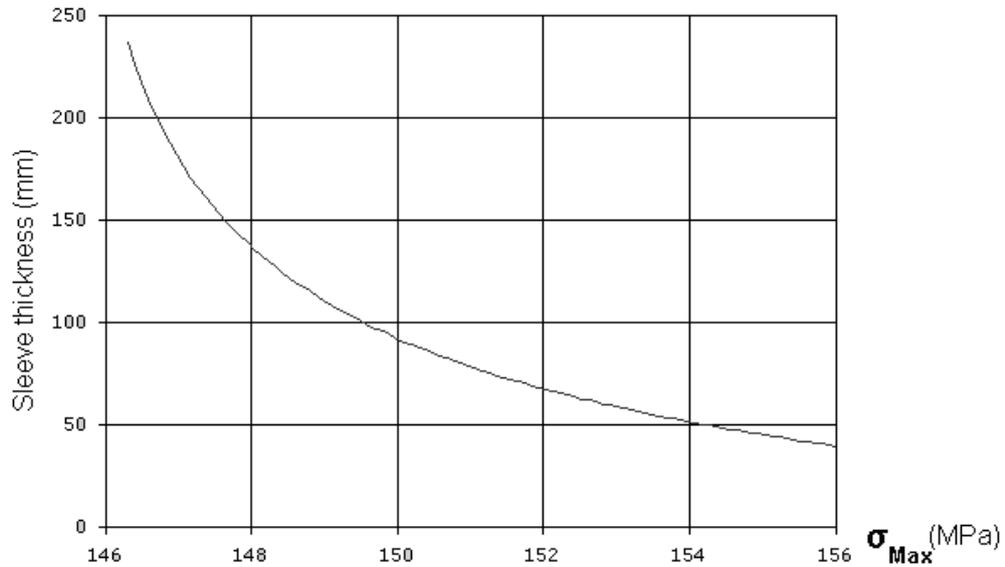


Fig. 4.4: Influência máxima tensão tangencial admissível  $\sigma_{\max}$  na espessura limite a luva para  $P_{apl} = 5$  MPa e  $P_o = 7.2$  MPa.

A escolha de  $\sigma_{\max}$  é muito importante para determinar que tipo de luva iremos aplicar. A escolha mais simples é pelo critério de von Mises. O tubo metálico não estará sujeito a deformações permanentes e a tensão tangencial fornecida será menor que a tensão de escoamento do material do tubo. Assim,

$$\sigma_{\theta} < \sigma_y \Rightarrow \sigma_{\max} = \sigma_y \quad (36)$$

#### 4.2.2. Levando em Conta um Dano Localizado Causado por Corrosão

As equações apresentadas até agora são válidas somente se não existirem imperfeições localizadas ou dano na seção do tubo metálico. Nesse capítulo será apresentado um procedimento simples para se incluir no dimensionamento da luva o dano por corrosão localizada. A idéia básica é supor que a máxima tensão tangencial nas proximidades de uma imperfeição

pode ser aproximada considerando-se a tensão tangencial para um cilindro sem dano corrigida por um fator  $\eta$  o qual é função da geometria

$$\sigma_{\theta} = \eta (\sigma_{\theta})_{\text{sem dano}} = \eta \frac{P_i r_i - P_c r_o}{r_o - r_i} \quad (37)$$

A maioria dos critérios de segurança utilizados na Engenharia para tubulações de parede fina utilizam uma equação similar a (37) e a diferença básica é a definição de como o “fator de correção”  $\eta$  depende da geometria. Normalmente esse critério aparece da seguinte forma

$$\sigma_{\theta} = \eta \frac{P_i r_i - P_c r_o}{r_o - r_i} < \hat{\sigma}_{\text{max}} \quad (38)$$

onde  $\hat{\sigma}_{\text{max}}$  é uma constante do material. Se o critério apresentado em (38) for utilizado, as mesmas equações propostas no capítulo anterior podem ser utilizadas, bastando-se adotar  $\sigma_{\text{max}} = \frac{\hat{\sigma}_{\text{max}}}{\eta}$

$$\sigma_{\theta} = \frac{P_i r_i - P_c r_o}{r_o - r_i} < \frac{\hat{\sigma}_{\text{max}}}{\eta} = \sigma_{\text{max}} \quad (39)$$

Uma escolha adequada da espessura da luva de material compósito assegura que a máxima tensão tangencial está dentro do critério de segurança proposta em (38). O critério mais utilizado para tratar defeitos causados por corrosão sob carregamento de pressão interna é o critério descrito em [38]

como métodos de área efetiva. Esses incluem os critérios na ASME B31G [39], no RSTENG 0.85 (também conhecido como B31G modificado [40]). Esses critérios foram desenvolvidos no final dos anos 60 e início dos anos 70 para caracterizar a viabilidade de uso de linhas de transmissão de gás com corrosão. A hipótese empírica básica desses critérios é que a perda na tensão devido à corrosão é proporcional a quantidade de material perdido, medido na direção axial.

Outras abordagens podem ser encontradas na literatura, porém todas avaliam a perda de material como uma perda de espessura no tubo [41]. Os métodos de área efetiva propõem que o perfil máximo do defeito está num plano que contém o eixo do tubo. Para introduzir no critério a forma irregular da maioria dos defeitos por corrosão, o perfil do defeito é medido e os pontos mais profundos são transladados para um plano axial que será utilizado na análise, como demonstrado na Fig. 4.5.

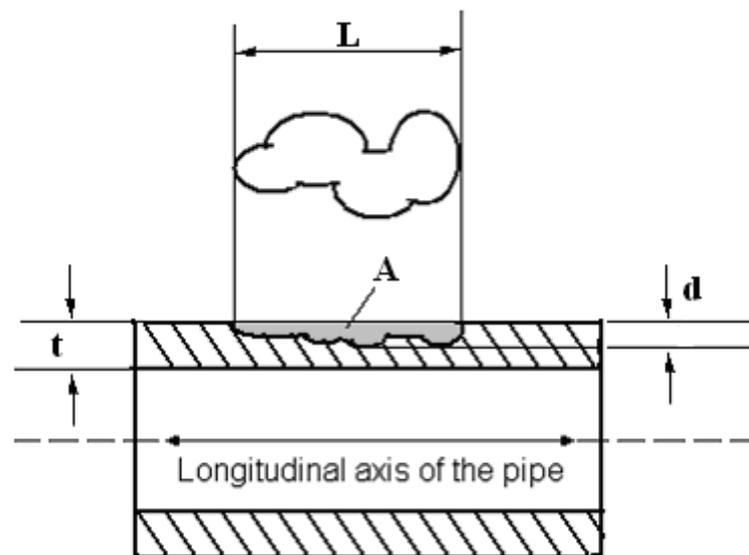


Fig. 4.5 – Perda de metal no duto

Esses critérios podem ser representados da seguinte forma

$$\sigma_{\theta} < \bar{\sigma} \left[ \frac{1 - (A/A_o)}{1 - (A/A_o)(M^T)^{-1}} \right] \Rightarrow \sigma_{\max} = \bar{\sigma} \left[ \frac{1 - (A/A_o)}{1 - (A/A_o)(M^T)^{-1}} \right] \quad (40)$$

$A$  é a área do defeito no plano longitudinal a parede do tubo,  $A_o = Lt$  é a área original da seção transversal,  $M^T$  é o fator de Folias para defeitos transpassantes,  $\hat{\sigma}_{\max} = \bar{\sigma}$  que é uma tensão obtida entre a tensão de escoamento do material e a tensão de ruptura. O critério apresentado na ASME B31G propõe conservadoramente  $\bar{\sigma} = 1.1 \sigma_y$  e que o defeito devido à corrosão possui uma forma parabólica (essa aproximação resulta na expressão  $A = (2/3)Ld$ ). Finalmente, o critério apresentado na B31G usa uma simplificação dupla do fator de Folias  $(L/\sqrt{2r_i t})^2 \leq 20.0$  e  $(d/t) < 0.175$ . Assim, da equação (40), temos

$$\begin{aligned} \sigma_{\theta} < 1.1\sigma_y \left[ \frac{1 - (2/3)(d/t)}{1 - (2/3)(d/t)(M_1^T)^{-1}} \right]; \quad M_1^T = \sqrt{1 + 0.8 \left( \frac{L}{2r_i t} \right)^2} \\ \Rightarrow \sigma_{\max} = 1.1\sigma_y \left[ \frac{1 - (2/3)(d/t)}{1 - (2/3)(d/t)(M_1^T)^{-1}} \right] \end{aligned} \quad (41)$$

O critério B31G modificado pode ser exemplificado da seguinte forma

$$\sigma_{\theta} < \bar{\sigma} \left[ \frac{1 - 0.85(d/t)}{1 - 0.85(d/t)(M_2^T)^{-1}} \right] \Rightarrow \sigma_{\max} = \bar{\sigma} \left[ \frac{1 - 0.85(d/t)}{1 - 0.85(d/t)(M_2^T)^{-1}} \right] \quad (42)$$

onde

$$\bar{\sigma} = \sigma_y + 68.94 \text{ MPa} \quad (43)$$

$$M_2^T = \begin{cases} \sqrt{1 + 0.06275 \left( \frac{L}{\sqrt{2r_i t}} \right)^2 - 0.003375 \left( \frac{L}{\sqrt{2r_i t}} \right)^4} & \text{for } \left( \frac{L}{\sqrt{2r_i t}} \right)^2 \leq 50 \\ 0.032 \left( \frac{L}{\sqrt{2r_i t}} \right)^2 + 3.3 & \text{for } \left( \frac{L}{\sqrt{2r_i t}} \right)^2 > 50 \end{cases}, \quad (44)$$

Nesse critério a tensão de escoamento  $\bar{\sigma}$  é dada pela expressão menos conservadora (43). Além disso, ao invés de utilizarmos uma forma parabólica, que resulta numa redução de 2/3 de área, esse critério utiliza uma expressão com três termos mais precisa (44) para o fator de Folias. Essas mudanças resultam em estimativas menos conservadoras e mais precisas para estimar a falha por pressão do que as feitas usando-se o critério B31G.

Como exemplo, considera-se um defeito por corrosão com uma profundidade máxima de  $d = 2.24$  mm e comprimento  $L = 374.77$  mm em um tubo metálico com raio interno  $r_i = 685.8$  mm e espessura de parede  $t = 6,4$  mm sujeito a pressão interna  $P_i = 3$  MPa. Considerando o material do tubo com as seguintes propriedades

Tubo:  $\sigma_y = 300$  MPa ,  $E = 200$  GPa.

Luva:  $E_\theta = 34400$  Mpa,  $E_r = 9600$  Mpa,  $\nu_{r\theta} = 0.3$ .

e utilizando a metodologia proposta, a espessura mínima necessária de reforço  $t_r$  que garanta que o critério B31G modificado seja satisfeito é (nesse caso,  $d/t = 0.35$ ,  $(L/\sqrt{2r_i t})^2 = 16$  e  $\sigma_{\max} = 270.6$  MPa)

$t_r > 20$  mm se  $P_{apl} = P_i/2$ ;  $t_r > 11.5$  mm se  $P_{apl} = P_i/4$ ;  $t_r > 8.0$  mm se  $P_{apl} = 0$ .

### **4.3 Sistemas de Reparo à Base de Epóxi para Defeitos Transpassantes**

O aparato experimental desenvolvido para ensaio de tubulações com defeitos transpassantes reparadas com sistemas epóxi foi concebido de forma a ser o mais próximo possível de uma operação real na qual o adesivo terá que ser aplicado em condições de campo, o que afeta a qualidade do reparo.

#### **4.3.1. Definição do Tamanho do Defeito**

É importante definir os limites do tamanho defeito para efetuar-se um reparo eficaz. A dimensão do defeito deve ser determinada pela menor elipse com eixo paralelo ao eixo da tubulação que contenha completamente a área do defeito (Fig. 4.6).

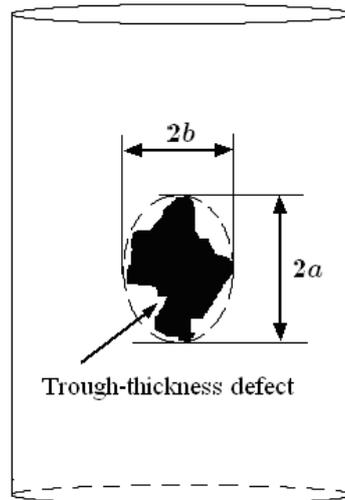


Fig. 4.6: Dimensionamento do defeito

A dimensão máxima permitida para o uso do procedimento proposto é definida pelo maior semi-eixo  $a$  da elipse que é dada por:

$$a_{\max} \leq \max \left\{ \frac{R}{10}, t \right\} \quad (45)$$

onde  $R$  é o raio interno do tubo e  $t$  a espessura da parede. Isso significa a máxima dimensão permitida para o maior semi-eixo  $a$  é o maior valor entre a espessura da parede  $t$  e 1/10 do raio interno do tubo  $R$ .

#### 4.3.2. Procedimento de Reparo Proposto

A metodologia de reparo pode ser descrita em 3etapas definidas a seguir:

## Etapa 1: Preparação da Superfície

Tratamento superficial normalmente envolve reações químicas, produzindo modificações no substrato do corpo de prova, ou procedimentos mecânicos, que melhoram a adesão aumentando resistência na interface adesivo/substrato. Sendo assim, o objetivo principal da preparação da superfície do substrato é aumentar ao máximo a energia superficial do substrato e/ou melhorar a adesão interfacial entre adesivo/substrato aumentando a área de contato. Rugosidade ou um aumento da superfície colada tem mostrado bons resultados na melhora da adesão entre os materiais.

Para obtermos as propriedades desejadas, foram utilizadas lixas d'água 120 ou 150 para lixar a superfície do tubo até obter um metal branco e assim remover qualquer resíduo de oxidação. Uma limpeza final com solvente foi realizada para obter uma superfície sem qualquer resíduo de óleo, graxa ou poeira. Após essa preparação da superfície do tubo, o adesivo foi misturado de acordo com o procedimento fornecido pelo fabricante e o reparo foi executado.

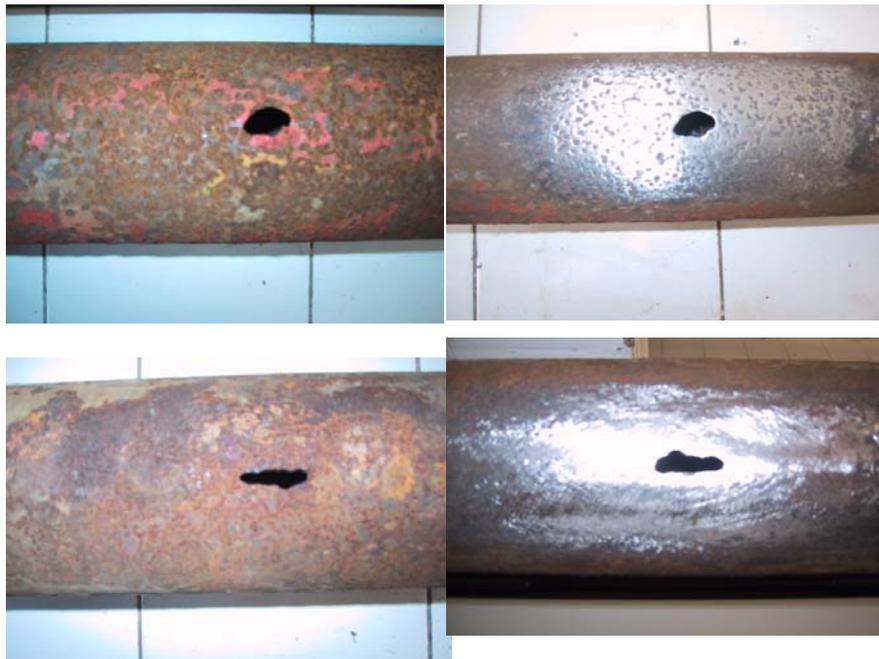


Fig. 4.7: Preparação da Superfície.

É importante ressaltar que em uma situação real a parede do tubo está muito comprometida pela ação da corrosão e assim sendo é necessário utilizar a lixa com extremo cuidado para não aumentar o dano. (Fig. 4.7).

Além disso, como as plataformas são atmosferas ricas em hidrocarbonetos, qualquer outro método mecânico de preparação de superfície (jateamento, corte, esmerilhamento) que possa produzir faísca é proibido.

Etapa 2: Introdução de uma tampa plástica no interior do tubo para evitar perda de adesivo e aplicação o adesivo epóxi

Uma tampa plástica de forma elíptica deve ser utilizada para evitar o derramamento de adesivo para o interior do tubo. Como os materiais plásticos são muito deformáveis, é simples introduzir a tampa no interior do tubo. A

tampa é mantida na posição desejada usando um simples sistema composto por fios de nylon (Fig. 4.8).

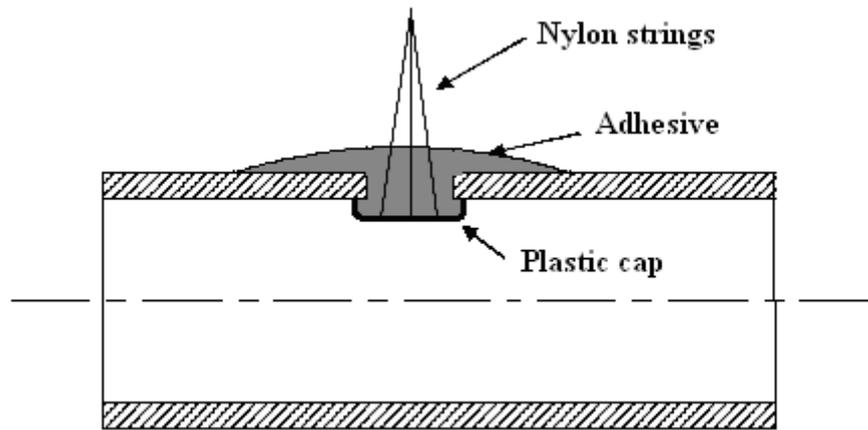


Fig. 4.8 - Tampa Plástica para evitar derramamento de adesivo.

A tampa deve proporcionar uma camada interna de adesivo com aproximadamente a espessura da parede do tubo e com uma dimensão duas vezes superior a dimensão do defeito. A camada de adesivo epóxi aplicada externamente deve ser aproximadamente cinco vezes a dimensão da elipse. A camada de adesivo epóxi deve ter um acabamento suave nas extremidades, para obter um melhor desempenho do reparo e espessura superior a da espessura do tubo (Fig. 4.9).

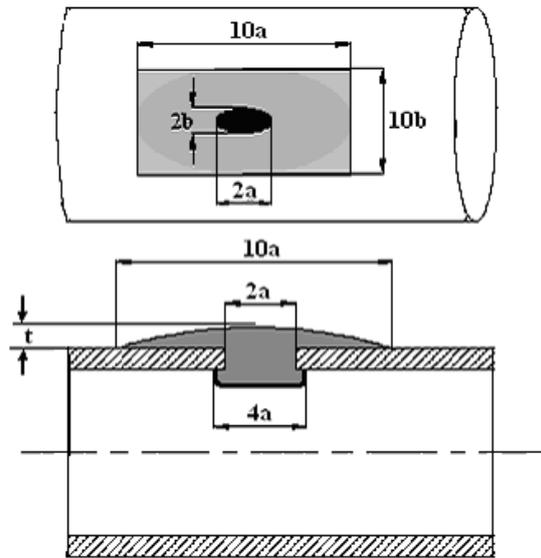


Fig. 4.9: Camada externa de adesivo.

Após a aplicação da primeira camada de adesivo, deve-se esperar que ocorra a polimerização do adesivo, máximo desejável 20 min, cortar os fios de nylon que estão na superfície e aplicar uma segunda camada de adesivo, sem lixar a primeira camada.

Para defeitos transpassantes com  $a \leq 5mm$  é difícil a introdução de uma tampa plástica. Nesse scasos um tampão metálico deve ser introduzido com interferência (Fig. 4.10). O procedimento de reparo com o tampão metálico é o mesmo que com a tampa plástica.

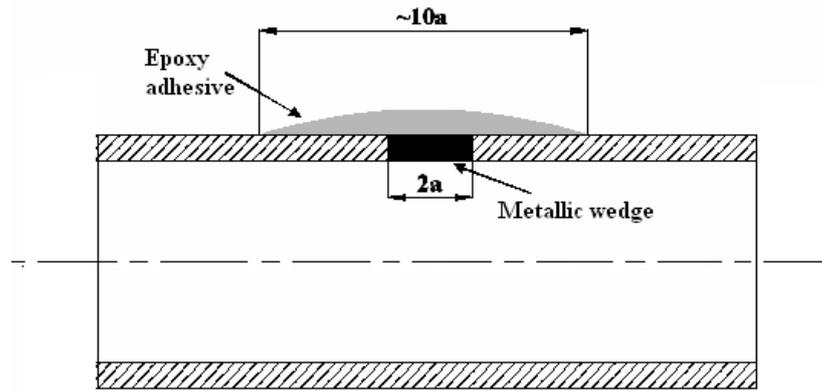


Fig 4.10: Tampão metálico para defeitos pequenos.

### Etapa 3: Aplicação da luva de material compósito

O procedimento de reparo é considerado seguro mesmo sem a aplicação de uma luva de material compósito quando

$$\left(1 + 2\frac{a}{b}\right)\left(\frac{P_i r_i}{t}\right) \geq \sigma_y \quad (46)$$

onde  $a$  e  $b$  são, respectivamente, o maior e o menor semi-eixo de uma elipse (veja seção 4.3.1).  $r_i$  é o raio interno do tubo,  $t$  é a espessura da parede e  $\sigma_y$  é a tensão de escoamento do material do tubo.

Se a condição (46) não for satisfeita, a sugestão é a aplicação de adesivo epóxi seguindo o procedimento proposto e depois aplicar uma luva de material compósito para impedir a deformação plástica e assegurar um nível satisfatório de integridade estrutural. A espessura adequada da luva de material compósito é a principal questão, entre a espessura recomendada pela

ISO/TS 24817 e a espessura obtida através do procedimento apresentado anteriormente.

$$\sigma_{\max} = \frac{\sigma_y}{\left(1 + 2\frac{a}{b}\right)} \quad (47)$$

A distribuição de tensão na vizinhança de um defeito transpassante causado por corrosão é bastante complexa, mas, se a dimensão do defeito é limitada, uma estimativa aproximada da magnitude da máxima deformação permanente próxima ao defeito pode ser determinada. O termo a esquerda na equação (46) é a máxima tensão numa placa infinita com parede fina e um defeito elíptico com semi-eixos  $a$  e  $b$  sujeita a tração através de uma força uniforme por unidade de área  $S = \left(\frac{P_i r_i}{t}\right)$  (Fig. 4.11). O fator de concentração de tensão nesse caso é  $K_t = \left(1 + 2\frac{a}{b}\right)$ . O Critério (46) estabelece que as deformações permanentes próximas ao defeito do tubo podem ser desprezadas quando  $K_t S$  é menor que a tensão de escoamento  $\sigma_y$ .

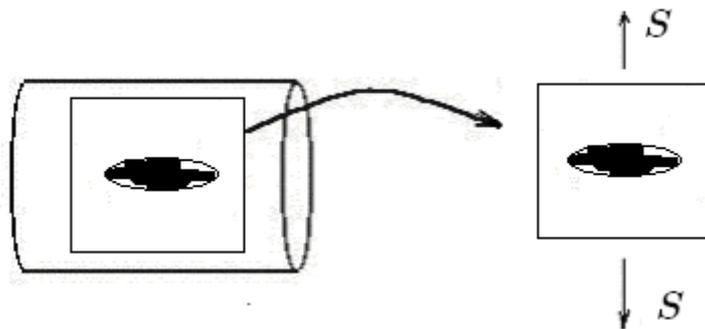


Fig. 4.11: Sistema Equivalente.

Se (46) for satisfeita, imediatamente após a segunda camada uma bandagem de borracha deve ser aplicada sobre o reparo em torno do seu

perímetro e uma simples abraçadeira, similar às utilizadas em mangueiras de jardim, deve ser colocada (Fig.4.12).

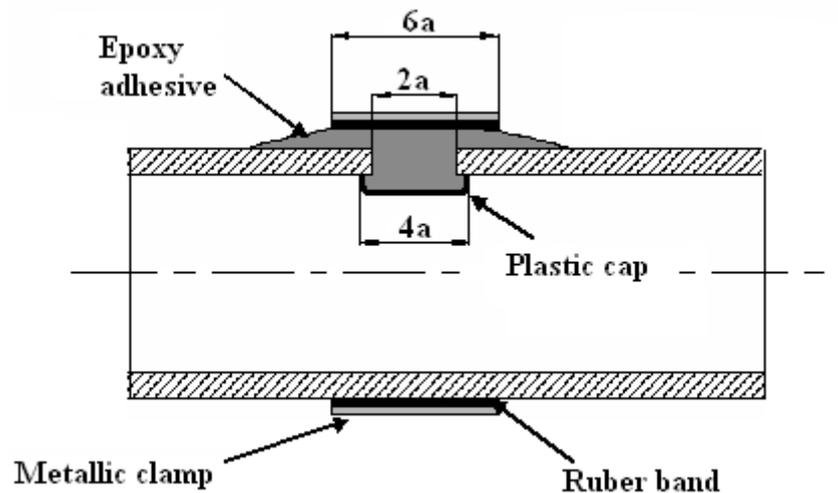


Fig. 4.12. Sistema de Reparo Completo.

A abraçadeira não é aplicada para aumentar o nível de integridade estrutural do tubo e sim para evitar que um dos dois principais mecanismos de falha de reparo com adesivo aconteça Fig. 4.13, normalmente no início da operação quando o adesivo não está totalmente polimerizado.

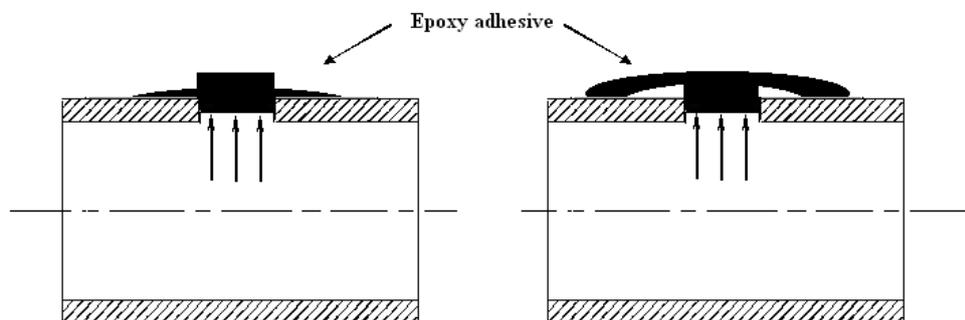


Fig. 4.13: Tipos de falha brutal da camada adesiva.

Nas seções seguintes serão apresentadas as análises das performances de dois diferentes adesivos epóxi utilizando a metodologia de reparo demonstrada nos capítulos anteriores.

#### **4.4. Materiais e Métodos**

Dois adesivos comerciais epóxi de cura rápida foram considerados para realizar reparos de danos transpassantes em tubos metálicos usando a metodologia proposta na seção anterior. Ambos os adesivos são compostos por dois componentes, uma base e um endurecedor. O primeiro adesivo (Sistema 1 - BELZONA 1221) é um sistema de adesivo epóxi bicomponente desenvolvido nos anos 70 que é reconhecido pelo seu odor característico e é utilizado como um excelente método de reparo emergencial. Este adesivo tem como base um sistema polimérico que foi desenvolvido pela indústria aeroespacial e agora é utilizado em aplicações emergenciais. Este adesivo é extremamente resistente a uma grande variedade de produtos químicos e limitado quanto à imersão em água. O produto tem como base uma liga de aço com silicone misturado com polímeros e oligômeros de alto peso molecular e está parcialmente curada (para usinagem e/ou suportar pouco peso) após 35 minutos a 25°C e o produto tem cura completa após 1 hora. As propriedades mecânicas do Sistema 1 são apresentadas na tabela 4.1.

O segundo adesivo estudado (Sistema 2 - MM METAL SS AÇO CERÂMICO) também é um adesivo de base polimérica especialmente desenvolvido para reparos. Consiste numa mistura de resina epóxi e pó de alumínio e está parcialmente curado (para usinagem e/ou suportar pouco peso)

após 18 minutos a 25°C e o produto tem cura completa após 40 minutos. As propriedades mecânicas do Sistema 2 são apresentadas na tabela 2.

Tabela 4.1 - Propriedades Mecânicas do Sistema 1

|                                |        |
|--------------------------------|--------|
| Resistência à flexão           | 59 MPa |
| Tensão de cisalhamento no aço  | 17 MPa |
| Resistência à compressão       | 56 MPa |
| Temperatura de distorção (HDT) | 51°C   |

Tabela 4.2 - Propriedades Mecânicas do Sistema dois

|                                |         |
|--------------------------------|---------|
| Resistência à flexão           | 67 MPa  |
| Tensão de cisalhamento no aço  | 19 MPa  |
| Resistência à compressão       | 104 MPa |
| Temperatura de distorção (HDT) | 120°C   |

Testes hidrostáticos utilizando os dois sistemas de reparo apresentados foram realizados utilizando duas temperaturas de ensaio – temperatura ambiente e 80°C. Um aparato experimental foi desenvolvido para avaliar a eficácia da metodologia de reparo tentado estar o mais próximo possível de uma situação real de operação. Tubos de aço API 5L grau B, normalmente utilizados em plataforma de petróleo para o transporte de água produzida, foram utilizados para serem feitos os ensaios hidrostáticos. Cinco tipos diferentes de amostras foram utilizados:

1. Tubos com diâmetro de 2" sch80 e furo circular de 3 mm;
2. Tubos com diâmetro de 2" sch80 e furo circular de 10 mm;
3. Tubos com diâmetro de 12" sch20 e furo circular de 10 mm;
4. Tubos com diâmetro de 12" sch20 e furo circular de 30 mm;
5. Tubos de campo com diâmetro de 3,5" sch20 e defeitos de corrosão (Fig. 4.7).

Todos os tubos considerados têm comprimento de 1300 mm exceto o tubo de campo que tem 1000 mm de comprimento.

Inicialmente todos os tubos reparados utilizando os dois adesivos e o procedimento descrito na seção 4.3. (não foram utilizadas luvas de material compósito) foram submetidos a testes hidrostáticos clássicos a temperatura ambiente para avaliar a resistência e eficiência do sistema de reparo. O tempo máximo permitido para realizar cada reparo foi de 1 hora e todos os ensaios foram realizados exatamente 1 hora e 15 minutos depois do início do procedimento de reparo.

Nesses ensaios, a pressão no tubo foi elevada a  $30 \text{ kg/cm}^2$  e mantida por uma hora. Após cinco ciclos de carga e descarga, se o reparo não falhasse brutalmente, o tubo era inspecionado para avaliação.

Posteriormente a esse passo, os tubos (nenhuma luva foi utilizada, somente abraçadeiras) foram submetidos a cinco ciclos de pressão (1 hora a  $30 \text{ kg/cm}^2$ ), porém a água dentro da amostra estava a  $80^\circ\text{C}$ . Esse patamar de temperatura foi utilizado com o intuito de simular as condições médias do fluido numa plataforma offshore. A temperatura do fluido foi elevada a  $80^\circ\text{C}$  e a pressão ambiente foi mantida. Somente após a estabilização da

temperatura a 80°C a pressão foi elevada. Após cada ciclo de pressão o tubo reparado era resfriado até a temperatura ambiente. Cada tubo reparado foi submetido a cinco ciclos de temperatura durante os ensaios. Novamente, o tempo máximo permitido para realizar cada reparo foi de 1 hora e todos os ensaios foram realizados exatamente 1 hora e 15 minutos depois do início do procedimento de reparo.

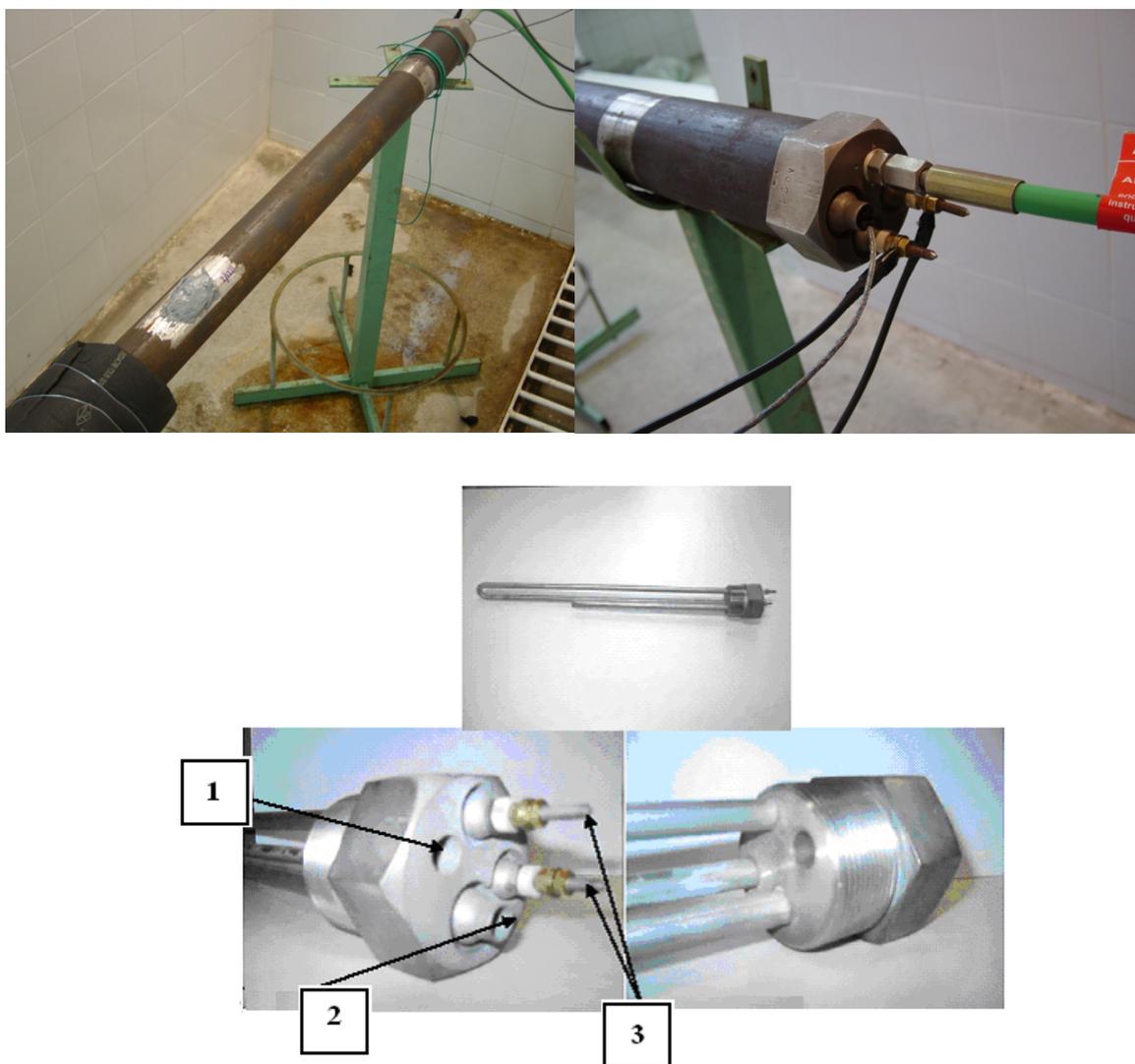


Fig.4.14 – Aparato de teste e detalhe do sistema de controle da temperatura.

O sistema de controle da temperatura do fluido dentro do tubo foi desenvolvido especialmente para realizar esses ensaios. O sistema de controle completo (incluindo a resistência elétrica) é enroscado em uma das extremidades do tubo, veja Fig. 4.14 (numero 1 é a entrada da mangueira de água, 2 é o termostato de controle da temperatura e 3 é a resistência elétrica).

#### **4.5. Resultados e Discussão**

Todos os reparos realizados com os adesivos Sistema I e II usando a metodologia proposta resistiram a 5 ciclos de pressão com água a temperatura ambiente – cinco reparos/testes para cada (1), (2), (3), (4) e (5). Os reparos realizados resistiram de tal forma a um nível de pressão que não foi possível obter a pressão de ruptura. As tampas soldadas nas extremidades deformaram plasticamente a falharam antes do reparo Fig.4.15.



Figura 4.15 – Tampas soldadas deformadas após ensaio a  $60 \text{ kg/cm}^2$  e  $80^\circ\text{C}$ .

A figura 4.16 mostra o tubo tipo 5 (tubo de campo) antes e depois do procedimento de reparo ser realizado (pressão interna de  $30 \text{ kg/cm}^2$ ).



Fig. 4.16: Tubo com diâmetro de 3,5” sch 20 com defeito causado por corrosão antes e depois do reparo

Se o procedimento proposto não fosse utilizado (basicamente o uso da tampa plástica) o reparo não resistira ao carregamento. A tabela 4.3 apresenta as pressões de ruptura para os tubos tipo (2) – diâmetro de 2” sch 80 e furo circular de 10 mm – reparados utilizando a adesivo sistema I sem a aplicação de tampa plástica e abraçadeira.

Tabela 4.3 – Pressões de ruptura para os tubos tipo (2) sem tampa interior plástica

| Teste | Pressão de Ruptura<br>(kg/cm <sup>2</sup> ) |
|-------|---|
| 1     | 8.92  |
| 2     | 17.64                                       |
| 3     | 16.17                                       |
| 4     | 18.35                                       |
| 5     | 14.27                                       |
| média | 15,07                                       |

Todos os tubos reparados com o adesivo sistema II a 80°C resistiram aos 5 ciclos. Para decidirmos se um adesivo epóxi pode ser utilizado à temperatura elevadas é sugerido que sejam utilizadas as mesmas condições propostas em [2] para luvas de material compósito - Para uma temperatura de trabalho superior a 40°C o sistema de reparo não deve ser utilizado, ou seja, uma temperatura superior a temperatura de transição vítrea (Tg) do adesivo menos 30°C. Para sistemas de reparos onde a Tg não pode ser determinada, o sistema de reparo não deve ser utilizado a uma temperatura superior a temperatura de distorção (HDT) do adesivo menos 20°C. Para adesivos que não apresentam claramente um ponto de transição, isto é, uma redução significativa em suas propriedades mecânicas a temperaturas elevadas, então uma temperatura limite, Tm, deve ser definida ou informada pelo fabricante.

É interessante ressaltar que o adesivo sistema I comporta-se surpreendentemente bem para o procedimento de reparo proposto, até para temperatura de trabalho superiores a HDT. Todos os reparos resistiram a cinco ciclos de pressão a 80°C nos ensaio realizados com os tubos (1), (2) e

(3). Todos os reparos realizados nos tubos tipo (5) – tubos de campo com defeitos reais – falharam.

# Capítulo 5

## Conclusão

Esse trabalho é um primeiro passo na definição de um procedimento mais seguro e confiável de aplicação de reparos com adesivos epóxi em tubos metálicos com danos por corrosão localizados.

Para o caso de dano transpassante causado por corrosão, foi proposta uma metodologia simples que pode ser utilizada como ferramenta auxiliar para a confecção de sistemas de reparo com adesivos epóxi. Essa metodologia pode ser útil na definição da pressão de aplicação e espessura necessária de uma luva de material compósito que assegure reparos mais eficazes e seguros.

Para o caso de dano transpassante, a idéia é realizar uma aplicação de uma camada de adesivo epóxi de forma a estancar o vazamento da tubulação como procedimento complementar a aplicação da luva de material compósito que asseguraria um nível satisfatório de integridade estrutural. A pressão

interna do fluido atuando na parte inferior do reparo e a pressão externa exercida pela abraçadeira (ou luva) fazem com que o adesivo epóxi dilate no interior do furo promovendo uma melhor vedação. A sugestão é aplicar a metodologia de reparo descrita nesse trabalho em conjunto com a luva de material compósito, com espessura controlada, para restringir a deformação plástica e garantir um nível adequado de integridade estrutural. Os requisitos principais para os adesivos epóxi a serem utilizados nessa metodologia descrita são: cura rápida e elevada temperatura de distorção (HDT). A validação completa dessa metodologia de reparo ainda necessita de um extensivo programa experimental principalmente no que diz respeito ao comportamento à fadiga, fluência, envelhecimento, resistência a degradação por raios UV e degradação por intempéries.

## Referências Bibliográficas

- [1] C.A. Jaske, B.O. Hart, W.A. Bruce. Pipeline Repair Manual, Pipeline Research Council International, Inc. Virginia; 2006..
- [2] ISO Technical Specification 24817. Petroleum, petrochemical and natural gas industries. Composite repairs for pipework. Qualification and design, installation, testing and inspection; 2006.
- [3] D. Ouinas, B. Bachir Bouiadjra, B. Achour, N.Benderdouche. Modelling of a cracked aluminium plate repaired with composite octagonal patch in mode I and mixed mode. *Materials and Design* 2009; 30: 590–595
- [4] D. Ouinas, M. Sahnoune, N. Benderdouche, B. BachirBouiadjra. SIF analysis for notched cracked structure repaired by composite patching. *Materials and Design* 2008; doi: 10.1016/j.matdes.2008.11.014
- [5] H. S. da Costa Mattos, J. M. L. dos Reis, V. Perrut e R. F. Sampaio. An alternative methodology to repair localized corrosion damage in metallic pipelines with epoxy resins. *Materials and Design*. Vol 30, no 9, pp. 3581-3591, 2009. DOI information 10.1016/j.matdes.2009.02.026. <http://dx.doi.org/10.1016/j.matdes.2009.02.026>

[6] H. Costa Mattos, J. M. L. dos Reis, V. Perrut e R. F. Sampaio. Epoxy Rehabilitation of Corroded Steel Pipelines with Through-Thickness Damage. *Journal of Pipeline Engineering*, Vol 7, 2008.

[http://www.pipedata.net/store/itemdetailcat.cfm?cat\\_no=2151s](http://www.pipedata.net/store/itemdetailcat.cfm?cat_no=2151s)

[7] H. Costa Mattos, R. F. Sampaio, J. M. L. Reis e V. A. Perrut. Rehabilitation of Corroded Steel Pipelines With Epoxy Repair Systems. In *Solid Mechanics In Brazil 2007 – Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering*, Eds M. Alves and H. S. da Costa Mattos, ISBN 978-85-85769-30-7. pp. 485 – 496, 2007.

[8] H. Costa Mattos, J.M.L. Reis, R.F. Sampaio and V.A. Perrut. A simple methodology to repair localized corrosion damage in metallic pipelines with epoxy resins”. In *Solid Mechanics in Brazil 2009 – Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering*, Eds M. Alves and H. S. da Costa Mattos, ISBN 978-85-85769-43-7. pp. 125-144, 2009.

[9] M.D. Chapetti, J.L. Otegui, C. Manfredi, C.F. Martins. Full scale experimental analysis of stress states in sleeve repairs of gas pipelines. *Int. J. Pressure Vessels Piping*. Vol 78, pp. 379-387, 2001.

[10] J.L. Otegui, A. Cisilino, A.E. Rivas, M. Chapetti, G. Soula . Influence of multiple sleeve repairs on the structural integrity of gas pipelines. *Int. J. Pressure Vessels Piping* Vol 79, pp. 759-765, 2002.

[11] A.P. Cisilino, M.D. Chapetti, J.L. Otegui. Minimum thickness for circumferential sleeve repair fillet welds in corroded gas pipelines. *Int. J. Pressure Vessels Piping*. Vol 79, pp. 67-76, 2002.

- [12] W.K. Goertzen, M.R. Kessler. Dynamic mechanical analysis of carbon/epoxy composites for structural pipeline repair. *Composites Part B*. Vol 38, pp. 1–9, 2007.
- [13] Dicionário Howaiss – Instituto da Língua Portuguesa Antonio Howaiss. Editora Objetivo. Rio de Janeiro. 1ª edição 2001.
- [14] S.V. Canevarolo Jr. Ciências dos Polímeros. Um texto básico para tecnólogos e engenheiros. II Edição. São Paulo: Editora Altiliber, 2002. p.183
- [15] A.C. Harper. Handbook of Plastics. Elastomers and Composites. New York: McGraw-Hill 1992. Cap. 1, p. 1.1-1.100: Fundamentals of Plastics and Elastomers.
- [16] N.J. Mills. Plastics Microstructure and Engineering Applications. London: Edward Arnold 2ª Ed. 1993. Cap.2.p. 31-51: Microstructure.
- [17] C.V.T. Bruni, D.R. Deanin. Recycling of cured Epoxy resins. In: Ray A. D. Labana, S.S. Bauer. R.S. Cross-linked polymers: chemistry, properties and applications. Washington. DC. American Chemical Society. 1988. p.237-241
- [18] W.D. Callister Jr. Ciência e Engenharia de Materiais: Uma introdução. Rio de Janeiro: Livros Técnicos e Científicos 5ª edição, 2002. p.589.
- [19] F. Rodriguez. Principles of polymer system. New York: Hemisphere Pub. 3rd. pp.43-70: Physical States and Transitions, 1989.
- [20] K.S. Schweizer, E.J. Saltzman. Theory of dynamic barriers activated hopping and glass transition in polymers necks. *Journal of Chemical Physics*. Vol 121.nº.4. july.2004.
- [21] M. Mézard, Statistical physics of the glass phase. *Physica A* 306 (2002) p.25-38.

- [22] F.A. Padilha. Materiais de Engenharia Microestrutura e Propriedades. Ed.Hemus, pp.251-269, Propriedades Mecânicas.1997.
- [23] P.R.Khalackar, E.I. Chairman. Adhesives Bonding Metals. Welding handbook 8th American Welding Society, Miami, VoL2. p.840-862, 1991.
- [24] F. Galembeck. M.C. Gandur. Cientistas explicam o fenômeno de adesão. Química e Derivados. Edição n° 393 de Maio de 2001. Disponível em [www.quimica.com.br/revista/qd393/adesivo\\_tec.htm](http://www.quimica.com.br/revista/qd393/adesivo_tec.htm)
- [25] G.L Scheneber. Adhesive in the Automobile Industry. Handbook of Adhesives 3rd vol. 1, pp.729-735.
- [26] J.L. Cotter, M.G.D. Hockney. Metal Joining with Adhesives". International Metallurgical Reviews, 1974. vol 19. Review 183. pp. 103-115.
- [27] T.A. Barnes, I.R. Pashby. Joining techniques for aluminum spaceframes used in automobiles: Part II — adhesive bonding and mechanical fasteners. Journal of Materials Processing Technology Vol.99 (1), March. p.72-79, (2000).
- [28] A. Higgins. Adhesive Bonding Aircraft Structures. International Journal of Adhesion & Adhesives. Vol.20 issue (5), (2000). pp.367-376.
- [29] E.B. Mano. Polímeros como Material de Engenharia. São Paulo: Edgard Blucher. 1991. p. 197.
- [30] D.C Miles, J.H. Briston Tecnologia dos Polímeros. São Paulo: Polígono . Ed. da Universidade de São Paulo. 1975. Cap. 6.,pag 105-125 : Resinas Epóxi
- [31] Epóxi Disponível em <[www.silaex.com.br](http://www.silaex.com.br)> no link : epóxi .
- [32] A.E. Turi. Thermal Characterization of Polymers Materials. New York: Academic Press, 972 p.1981

- [33] P.V. Arnum. Adhesives Sticking Around for Moderate Growth. Disponível em:  
[www.findarticles.com/of-o/mofup/24-258/683238/27print.jhtml](http://www.findarticles.com/of-o/mofup/24-258/683238/27print.jhtml)
- [34] Adhesively Bonding Plastic Structural Components in Automotive Applications Disponível em  
[www.dow.com/webapps/lit/litorder.asp?filepath=automotive/pdfs/noreg/299-50555.pdf&pdf=true](http://www.dow.com/webapps/lit/litorder.asp?filepath=automotive/pdfs/noreg/299-50555.pdf&pdf=true).
- [35] H. Lee, K.H. Neville. Handbook of epoxy resins. New York: McGraw-Hill, 1967, Cap.5 Epoxy Resin curing mechanism, pp. 5-1 a 5-39.
- [36] The Dow Chemical Company. "Formulation with Dow Epoxy Resins". Catálogo Técnico. Midland Michigan. 1976. págs 1-36.
- [37] Pipeline Repair Manual, Pipeline Research Council International, 2006.
- [38] D.R. Stephens, R.B. Francini, A review and evaluation of remaining strength criteria for corrosion defects in transmission pipelines, ETCE2000/OGPT-10255, Proceedings of ETCE/OMAE2000Joint Conference, Energy for the New Millennium, New Orleans, USA; 2000.
- [39] Manual for Determining the Remaining Strength of Corroded Pipelines, A Supplement to ASME B31 Code for Pressure Piping, ASME B31G-1991 (Revision of ANSI/ASME B31G-1984), New York: The American Society of Mechanical Engineers; 1991.
- [40] Fitness-For-Service, API Recommended Practice 579, First Edition: American Petroleum Institute; January 2000.
- [41] S.C. Duane, J.P. Roy. Prediction of the failure pressure for complex corrosion defects. Int. J. Pressure Vessels Piping 2002; 79: 279-287

# Apêndice A

## Resultados dos ensaios preliminares

Antes do desenvolvimento do procedimento apresentado no capítulo 4, foi realizada uma série de ensaios nos quais todos os adesivos falharam. Nesse testes, além dos dois adesivos mencionados no capítulo 4 (BELZONA 1221 e MM METAL SS AÇO CERÂMICO) foi considerado o adesivo ARC 5ES, posteriormente descartado. O aprendizado com as falhas de procedimento cometidas nestes testes é que permitiu chegar ao formato final do procedimento para reparo proposto no capítulo 4.

### **A.1. Ensaios Preliminares (Teste de Estanqueidade do Sistema).**

Inicialmente foram testados os adesivos ARC 5ES e BELZONA 1221 em ensaios a temperatura ambiente. A pressão foi elevada lentamente até o

valor de 441 psi (30,41 bar) e, caso não houvesse falha brutal ou vazamento, mantida por uma hora.

O tratamento superficial consistiu basicamente de:

- Lixamento (lixa 120 e lixa 150 ou DREMEL - ferramenta rotativa de alta velocidade) até a superfície ficar branca com a eliminação de eventuais camadas de óxido (ver a figura 6).
- Aplicação de um redutor (Thinner Industrial).

O tempo de cura mínimo foi de 45 minutos para o adesivo ARC 5ES e de 60 minutos para o adesivo BELZONA 1221. Dados fornecidos pelos fabricantes para polimerização total. Os adesivos foram aplicados diretamente sobre o furo. Não houve controle dimensional da área colada. Considera-se uma falha como ruptura quando não é mais possível manter uma pressão constante no corpo de prova.

Tabela A.1. Resultados – Adesivos ARC 5ES

| Ensaio | 1ª Etapa<br>TESTE DE<br>ESTANQUEIDADE |  | 2ª Etapa<br>TESTE COM TEMPERATURA |                                    |
|--------|---------------------------------------|--|-----------------------------------|------------------------------------|
|        | Pressão de Falha psi (bar)            |  | Temperatura<br>de Falha<br>(°C)   | Pressão de<br>Ruptura<br>psi (bar) |
| 1      | -                                     |  | 45                                | 131 (9,03)                         |
| 2      | 319 (21,99)                           |  | -                                 | -                                  |
| 3      | -                                     |  | 52                                | 147 (10,14)                        |
| 4      | -                                     |  | 83                                | 230 (15,86)                        |
| 5      | -                                     |  | 54                                | 261 (18,00)                        |
| média  |                                       |  |                                   | 192 (13,26)                        |

Tabela A.2. Resultados – Adesivos BELZONA 1221

| Ensaio | 1ª Etapa<br>TESTE DE<br>ESTANQUEIDADE |  | 2ª Etapa<br>TESTE COM<br>TEMPERATURA |                                    |
|--------|---------------------------------------|--|--------------------------------------|------------------------------------|
|        | Pressão de Falha psi (bar)            |  | Temperatura<br>de Falha<br>(°C)      | Pressão de<br>Ruptura<br>psi (bar) |
| 1      | -                                     |  | 53                                   | 73 (5,03)                          |
| 2      | -                                     |  | 45                                   | 39 (2,69)                          |
| 3      | -                                     |  | 49                                   | 61 (4,21)                          |
| 4      | -                                     |  | 49                                   | 64 (4,41)                          |
| média  |                                       |  |                                      | 59 (4,09)                          |

Após a realização dos ensaios preliminares detectou-se que o procedimento da 2ª etapa não estava sendo realizado da forma mais adequada. Estava-se aumentando simultaneamente a temperatura e pressão até atingir 80°C e 441 psi (30,41 bar), respectivamente. O ideal seria aumentar a temperatura sem deixar que a pressão se elevasse e posteriormente aumentar a pressão até 441 psi (30,41 bar). Por conseqüência observaram-se pressões de ruptura baixas antes do fluido atingir a temperatura desejada.

O ensaio 2 do adesivo ARC 5ES foi realizado com um tempo de cura inferior aos restantes, apenas 4 horas, o restante aguardou 72 horas para ser ensaiado.

Durante o processo aplicação da pressão necessária para validação do ensaio, alcançada de forma gradual, observou-se à formação de uma trinca na região do reparo. Logo em seguida, ocorreu a ruptura total do reparo com a pressão de saída de 319 psi (21,99 bar), (ensaio 2).

Após a ruptura, em todos os testes realizados, observou-se que o reparo formava uma espécie de bucha de resina, conforme mostram as figuras A.1 e A.2.



Figura. A.1 – Falha do adesivo ARC 5ES



Figura. A.2 – Falha do adesivo BELZONA 1221

O desempenho do adesivo ARC 5ES foi significativamente melhor do que do adesivo BELZONA 1221, 324.47%, nos ensaios preliminares realizados.

O desempenho de todos os dois adesivos considerados é significativamente afetado por um pequeno aumento da temperatura do fluido.

As pressões de falha são tão baixas que o procedimento de aplicação das resinas sem nenhum outro complemento (luvas, tratamento superficial especial, etc.) não deve ser recomendado, no caso de fluidos com temperaturas acima de 40°C.

Foi decidida a realização de novos ensaios de ambos os adesivos aumentando a temperatura e aliviando a pressão fazendo com que a pressão se mantenha baixa durante o incremento de temperatura para posteriormente ser elevada a pressão de 440 psi (30,34 bar).

## **A.2 Análise do Efeito da Temperatura – Segunda Batelada de Testes.**

Como os testes anteriores foram realizados aumentando-se simultaneamente a temperatura e a pressão, foi feita uma nova batelada de testes com os dois adesivos da seguinte maneira.

### **1ª Etapa (TESTE DE ESTANQUEIDADE)**

- Corpo de prova com fluido a temperatura ambiente submetido a 441 psi (30,41 bar) por 1 hora

### **2ª ETAPA (TESTE COM TEMPERATURA)**

- Corpo de prova com fluido a temperatura de 80°C submetido a 441 psi (30,41 bar) por 5 horas
- Corpo de prova com fluido a temperatura de 80°C pressurizado até a ruptura.

O incremento de pressão só foi feito quando o fluido atingiu a temperatura de 80°C. O tratamento superficial e o tempo de cura obedeceram os mesmos parâmetros dos ensaios anteriores. Nestes ensaios, também, procurou-se fazer que a área externa colada fosse de, aproximadamente, duas vezes o diâmetro do furo.

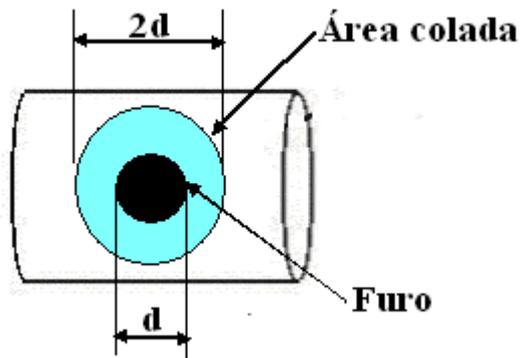


Fig. A.3. – Padronização da área colada

No caso do BELZONA 1221 não houve nenhum vazamento, mas no caso do ARC 5ES houve vazamento em todos os testes, antes mesmo da temperatura atingir 80°C (devido à pressão interna, que não é igual à pressão atmosférica, pois ela aumenta com a temperatura) sem, contudo, haver ruptura brutal.

Tabela A.3. Resultados – Adesivo ARC 5ES

| 1ª Etapa<br>TESTE DE<br>ESTANQUEIDADE |                            | 2ª Etapa<br>TESTE COM TEMPERATURA |                                    |
|---------------------------------------|----------------------------|-----------------------------------|------------------------------------|
| Ensaio                                | Pressão de Falha psi (bar) | Temperatura<br>de Falha<br>(°C)   | Pressão de<br>Ruptura<br>psi (bar) |
| 1                                     | -                          | 69                                | 142 (9,79)                         |
| 2                                     | -                          | 49                                | 57 (3,93)                          |
| 3                                     | -                          | 49                                | 57 (3,93)                          |
| 4                                     | -                          | 45                                | 28 (1,93)                          |
| 5                                     | -                          | 43                                | 71 (4,90)                          |
| média                                 | -                          | 51                                | 71 (4,90)                          |

Tabela A.4. Resultados – Adesivo BELZONA 1221

| 1ª Etapa<br>TESTE DE<br>ESTANQUEIDADE |                            | 2ª Etapa<br>TESTE COM TEMPERATURA |                                    |
|---------------------------------------|----------------------------|-----------------------------------|------------------------------------|
| Ensaio                                | Pressão de Falha psi (bar) | Temperatura<br>de Falha<br>(°C)   | Pressão de<br>Ruptura<br>psi (bar) |
| 1                                     | -                          | 80                                | 114 (7,86)                         |
| 2                                     | -                          | 80                                | 243 (16,75)                        |
| 3                                     | -                          | 80                                | 227 (15,65)                        |
| 4                                     | -                          | 80                                | 256 (17,65)                        |
| 5                                     | -                          | 80                                | 199 (13,72)                        |
| média                                 | -                          | 80                                | 208 (14,33)                        |

As figuras A.4 e A.5 mostram os sistemas de reparo antes e depois dos testes. A figura A.4 corresponde ao adesivo ARC 5ES e a figura A.5 ao adesivo BELZONA 1221.

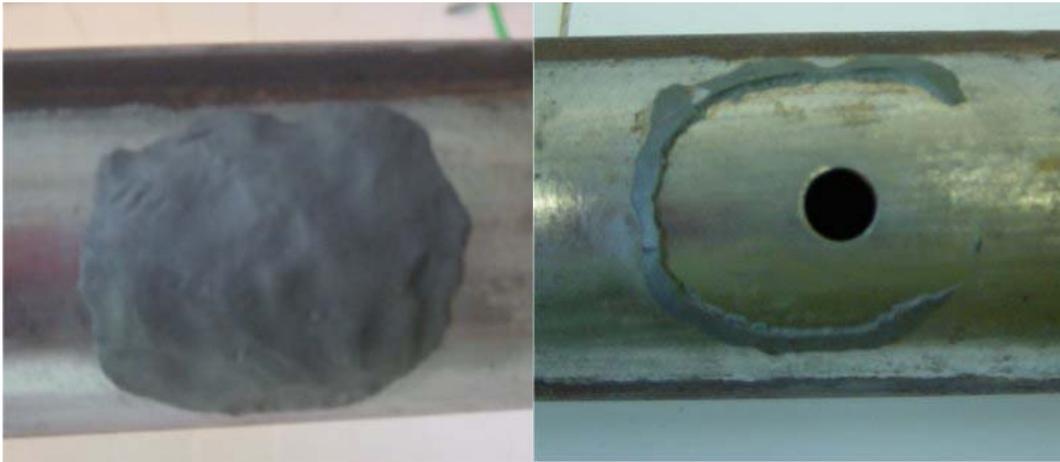


Figura A.4 - falha do sistema de reparo com o adesivo ARC 5ES



Figura A.5 - falha dos sistema de reparo com o adesivo BELZONA 1221

O desempenho do adesivo BELZONA 1221 foi significativamente melhor do que do adesivo ARC 5ES, 292.4%.

Como nos ensaios anteriores ambos adesivos foram significativamente afetados por um aumento da temperatura do fluido ocorrendo falha antes do fluido atingir a pressão de 441 psi (30,41 bar).

O adesivo BELZONA 1221 suporta a temperatura de 80°C, mas não até atingir a pressão desejada de 441 psi (30,41 bar) rompendo precocemente.

O adesivo ARC 5ES rompe antes mesmo da temperatura se estabilizar à 80oC, falhando devido ao aumento da pressão interna devido apenas ao aumento da temperatura.

O melhor desempenho do adesivo BELZONA 1221 do que o ARC 5ES nesta batelada de ensaio pode ser explicado pela padronização da área colada. Nos ensaios preliminares, a área colada era muito pequena (ver a figura A.6).



Figura A.6 – Área de colagem do adesivo BEZONA 1221 na primeira batelada de ensaios.

Os procedimentos usados na segunda batelada de ensaios foram adotados em todos os testes futuros.

### **A.3. Ensaio Realizados nos Corpos de Prova com Superfície Limpa**

Foram testados os adesivos ARC 858, BELZONA 1111 e MM-METAL SS AÇO CERÂMICA em ensaios a temperatura ambiente. A pressão foi elevada lentamente até o valor de 441 psi (30,41 bar) e, caso não houvesse falha brutal ou vazamento, mantida por uma hora.

Toda preparação da superfície dos corpos de prova foi realizada pelo Laboratório de Adesão e Aderência (LAA – UERJ/IPRJ). A preparação das superfícies consistiu nos seguintes processos:

**JATEAMENTO** - Os corpos de prova foram tratados mecanicamente adotando-se o procedimento de jateamento abrasivo seco, utilizando-se granalha de perfil angular comercial de aço (G25). O jateamento feito com a granalha G25 foi feito utilizando-se máquina de jateamento por pressão.

**TRATAMENTO QUÍMICO** - Os Cp's produzidos pelo tratamento mecânico foram tratados quimicamente com o ataque P2 (mistura de ácido sulfúrico e sulfato férrico). Foram usados os seguintes procedimentos no preparo das superfícies:

Limpeza com acetona em ultra-som por 5 minutos e logo após, limpeza em água corrente destilada por 5 minutos;

Limpeza alcalina em solução com 38% de  $\text{Na}_2\text{B}_4\text{O}_7$ , 12.2% de  $\text{Na}_3\text{PO}_4$ , 49.9% de  $\text{H}_2\text{O}$ , em seguida, banho agitado em água destilada por 5 minutos;

Ataque químico P2 composto de 155.5ml de H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>, 112.5gr de sulfato férrico dissolvido em 0,75l de água destilada. Com tempo de ataque de 10 minutos à temperatura de 65°C e, em seguida, banho agitado em água destilada por 5 minutos.

APLICAÇÃO DA RESINA - Após o tratamento da superfície, efetuou-se a preparação da resina segundo método indicado pelo fabricante.

Finalizado o processo, aplicou-se a resina no defeito dos corpos de prova e armazenou os mesmos, respeitando o tempo de cura indicado pelos fabricantes de 20 horas.

Tabela A.5. Resultados – Adesivo ARC 858

| Ensaio | 1ª Etapa<br>TESTE DE<br>ESTANQUEIDADE |  | 2ª Etapa<br>TESTE COM TEMPERATURA |                              |
|--------|---------------------------------------|--|-----------------------------------|------------------------------|
|        | Pressão de Falha psi (bar)            |  | Temperatura de Falha (°C)         | Pressão de Ruptura psi (bar) |
| 1      | -                                     |  | 80                                | 252 (17,37)                  |
| 2      | -                                     |  | 74                                | 33 (2,28)                    |
| 3      | -                                     |  | 80                                | 147 (10,14)                  |
| 4      | 227 (15,65)                           |  | -                                 | -                            |
| 5      | -                                     |  | 80                                | 154 (10,62)                  |
| 6      | -                                     |  | 80                                | 203 (14,00)                  |
| média  | -                                     |  |                                   | 158 (10,88)                  |

Como observado na tabela A.5, os ensaios 2 e 4 do adesivo ARC 858 tiveram os resultados influenciados por falha na aplicação do adesivo. O ensaio 2 falhou durante o processo de obtenção da temperatura de validação (80°C); já o ensaio 4, apresentou a falha durante o teste de estanqueidade sem aplicação da temperatura. Nos demais ensaios, a falha do reparo ocorreu

durante a segunda etapa do ensaio final, ocasionando um vazamento no corpo de prova.

Durante a confecção dos corpos de prova optou-se por se utilizar um limitador de da área colada para efetivamente obtermos uma área colada com duas vezes o diâmetro do furo. Este procedimento foi realizado nos ensaios 2, 3 e 4. Contudo, deixou-se um acabamento abrupto nas bordas, que afetou significativamente o desempenho do reparo.



Fig. A.7. Detalhe do Reparo

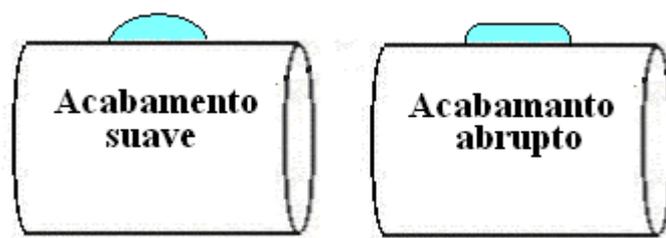


Fig. A.8 – Possíveis acabamentos das bordas dos reparos.

O reparo com acabamento suave nas bordas tem melhor desempenho.

Tabela A.6. Resultados – Adesivo BELZONA 1111. Pressão referente a primeira falha do reparo

| Ensaio | 1ª Etapa<br>TESTE DE<br>ESTANQUEIDADE |                                  | 2ª Etapa<br>TESTE COM TEMPERATURA |                                    |
|--------|---------------------------------------|----------------------------------|-----------------------------------|------------------------------------|
|        | Pressão de Falha<br>psi (bar)         | Pressão<br>de<br>Falha1<br>(bar) | Temperatura<br>de Falha<br>(°C)   | Pressão de<br>Ruptura psi<br>(bar) |
| 1      | -                                     | 441<br>(30,41)                   | 80                                | 1053 (72,60)                       |
| 2      | -                                     | 441<br>(30,41)                   | 80                                | 622 (42,88)                        |
| 3      | -                                     | 273<br>(18,82)                   | 80                                | 387 (26,68)                        |
| 4      | -                                     | 441<br>(30,41)                   | 80                                | 441 (30,41)                        |
| 5      | -                                     | 261<br>(18,00)                   | 80                                | 444 (30,61)                        |
| média  |                                       | 371<br>(25,61)                   |                                   | 590 (40,63)                        |

Como observado, alguns ensaios até alcançaram a pressão de validação, porém, logo em seguida, apresentaram falha no reparo (ensaios 3,4 e 5). No ensaio 1, a temperatura e a pressão de validação foram alcançadas, contudo, decorridos 1 minuto e 47 segundos de ensaio, ocorreu a primeira falha do reparo (pequeno vazamento). Em seguida aumentou-se a pressão do sistema e o reparo apresentou falha total com a pressão de 1053 psi (72,60 bar).

De maneira análoga, o ensaio 2 também alcançou a temperatura e a pressão de validação, porém apresentou um pequeno vazamento no reparo depois de 3 minutos de ensaio. Em seguida aumentou-se a pressão do sistema e o reparo apresentou falha total com a pressão de 622 psi (42,88 bar).

No ensaio 4, a temperatura de validação foi alcançada, mas no momento em que se atingiu a pressão de validação ocorreu a falha total do reparo.

Nos demais ensaios (3 e 5), a falha total do reparo ocorreu durante o aumento da pressão, com a temperatura de validação já estabilizada.

A figura A.10 mostra o que foi considerado uma falha no reparo, ou seja, um vazamento sem comprometer o reparo. A figura A.11 mostra uma seqüência de aumento de pressão até a ruptura total do reparo.



Fig. A.9 - Detalhe do Reparo. BELZONA 1111.



Fig. A.10 - Falha do Reparo (pequeno vazamento). BELZONA 1111.



Fig. A.11 – Falha total do reparo. BELZONA 1111.



Fig. A.12 – Falha total do reparo. BELZONA 1111.

Em geral, as falhas iniciam-se com fissuras na área sobre o furo até um eventual descolamento da “bucha” de material polimérico.

Tabela A.7- Resultados – Adesivo MM-METAL SS AÇO CERÂMICA  
Pressão referente à primeira falha

| Ensaio | 1ª Etapa                   |                         | 2ª Etapa                  |                              |
|--------|----------------------------|-------------------------|---------------------------|------------------------------|
|        | Pressão de Falha psi (bar) | Pressão de Falha1 (bar) | Temperatura de Falha (°C) | Pressão de Ruptura psi (bar) |
| 1      | -                          | 441 (30,41)             | 80                        | 1185 (81,70)                 |
| 2      | -                          | 441 (30,41)             | 80                        | 441 (30,41)                  |
| 3      | -                          | 368 (25,37)             | 80                        | 441 (30,41)                  |
| 4      | -                          | -                       | 80                        | 431 (29,72)                  |
| 5      | -                          | 1478 (101,91)           | 80                        | 2322 (160,10)                |

Como observado na tabela A.7, alguns ensaios alcançaram a pressão e a temperatura de validação sem apresentar qualquer tipo de falha no reparo. Nesses ensaios, a temperatura e a pressão de validação foram aplicadas durante de 5 horas.

No ensaio 1, a pressão e a temperatura de validação também foram alcançadas e mantidas durante 2 horas. Porém, logo depois, ocorreu uma falha no reparo (pequeno vazamento). Em seguida, aumentou-se a pressão até o rompimento do reparo, com a pressão de 1.185 psi (81,70 bar).

No ensaio 2, alcançou-se a temperatura de validação, porém, quando o sistema atingiu a pressão de validação, o reparo apresentou um pequeno vazamento. Continuando com o ensaio, decorridos 7 minutos, ocorreu a falha total do reparo com a pressão de 441 psi (30,41 bar).

De maneira semelhante, no ensaio 3 alcançou-se a temperatura de validação porém, durante o processo de aumento da pressão, o reparo apresentou um pequeno vazamento com a pressão de 368 psi (25,37 bar). Continuando com o ensaio (aumento da pressão até 441 psi (30,41 bar)) e, decorridos 10 minutos de pressão estabilizada, ocorreu a falha total do reparo.

No ensaio 4, a pressão de validação foi alcançada. Contudo, durante o aumento da pressão ocorreu à falha total do reparo com a pressão de 431 psi (29,71 bar).

Já no ensaio 5, foi avaliada a resistência do reparo, aumentando a pressão do sistema até a ocorrência da falha total do mesmo.

Nos reparos dos corpos de prova nos ensaios 2, 3 e 4 foi utilizado o dispositivo para limitar da área colada, com acabamento abrupto nas bordas, ocasionando a falha prematura dos reparos.



Fig. A.13 - Detalhe do Reparo. MM-METAL SS AÇO CERÂMICA



Fig. A.14 - Falha do Reparo (pequeno vazamento). MM-METAL SS  
AÇO CERÂMICA

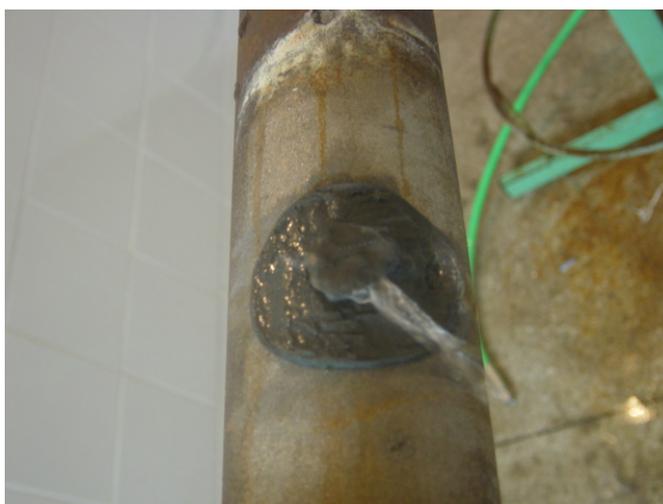


Figura A.15 – Falha total do reparo. MM-METAL SS AÇO CERÂMICA



Figura A.16 – Falha total do reparo. MM-METAL SS AÇO  
CERÂMICA.

De acordo com os resultados apresentados, os adesivos usados com a superfície preparada têm desempenho superior aos para superfície contaminada.

O adesivo MM-METAL SS AÇO CERÂMICA tem desempenho melhor do que os demais. Contudo, o adesivo BELZONA 1111, de menor custo, também teve um desempenho razoável. O adesivo ARC 858 pode ser preliminarmente descartado como alternativa, pois teve desempenho muito inferior aos outros.

O acabamento das bordas da camada de adesivo deve ser suave para evitar pequenos vazamentos devidos às infiltrações na superfície colada.

## **Apêndice B**

### **Paper:**

*An alternative methodology to repair localized corrosion damage in metallic pipelines with epoxy resins. Materials and Design. Vol 30, n° 9, pp. 3581-3591, 2009.*