CEFET/RJ
DIRETORIA DE PESQUISA E PÓS-GRADUAÇÃO

ANÁLISE EXPERIMENTAL DE REPARO DE COMPÓSITOS

Francisco Andson Marques

Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós-graduação em Engenharia Mecânica e Tecnologia de Materiais, Centro Federal de Educação Tecnológica Celso Suckow da Fonseca, CEFET/RJ, como parte dos requisitos necessários à obtenção do título de mestre em Engenharia Mecânica e Tecnologia de Materiais.

Orientador: Silvio Romero de Barros

Rio de Janeiro

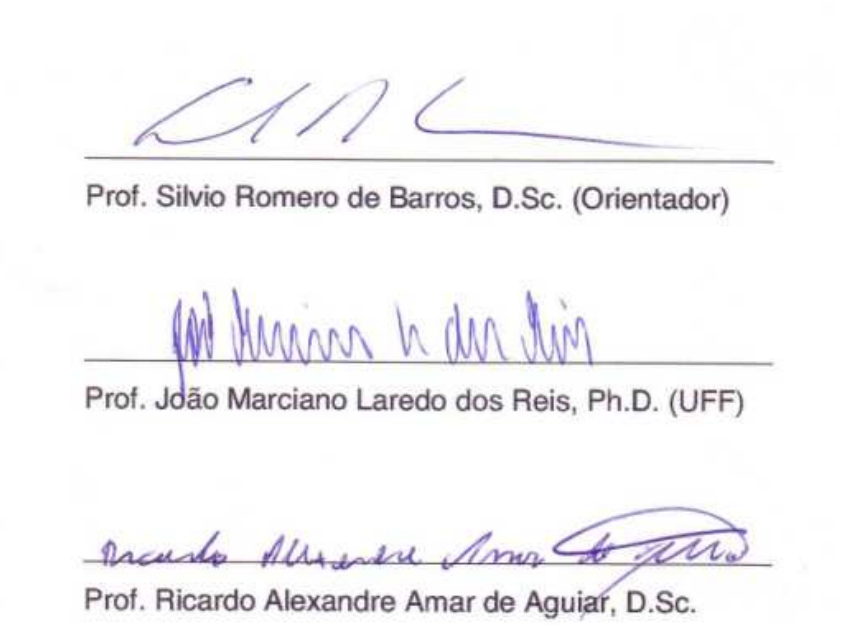
Fevereiro, 2015

ANÁLISE EXPERIMENTAL DE REPARO DE COMPÓSITOS

Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós-graduação em Engenharia Mecânica e Tecnologia de Materiais do Centro Federal de Educação Tecnológica Celso Suckow da Fonseca, CEFET/RJ, como parte dos requisitos necessários à obtenção do título de Mestre em Engenharia Mecânica e Tecnologia de Materiais.

Francisco Andson Marques

Aprovada por:



Prof. Silvio Romero de Barros, D.Sc. (Orientador)

Prof. João Marciano Laredo dos Reis, Ph.D. (UFF)

Prof. Ricardo Alexandre Amar de Aguiar, D.Sc.

Rio de Janeiro

Fevereiro, 2015

Ficha catalográfica elaborada pela Biblioteca Central do CEFET/RJ

M357 Marques, Francisco Andson
Análise experimental de reparos de compósitos / Francisco Andson Marques.—2015.
xii, 32f. : il.color. , grafs. , tabs. ; enc.

Dissertação (Mestrado) Centro Federal de Educação Tecnológica Celso Suckow da Fonseca, 2015.
Bibliografia : f. 31-32
Orientador : Silvio Romero de Barros

1. Engenharia mecânica. 2. Materiais compostos. 3. Aço-Fadiga. 4. Juntas (Engenharia). I. Barros, Silvio Romero de (Orient.). II. Título.

CDD 620.118

DEDICATÓRIA

Dedido esse trabalho aos meus pais,

Francisco Rodrigues Marques e

Maria José de Jesus Marques

AGRADECIMENTOS

À Deus que me iluminou e me permitiu avançar mais uma importante etapa em minha vida.

À minha família, meus pais e minha irmã, que sempre me motivaram a e me ensinaram a nunca desistir dos meus objetivos.

Ao meu orientador, Professor Silvio Romero de Barros, pela confiança, pelo incentivo e por todos os conhecimentos adquiridos ao longo desse trabalho.

Ao Professor Luiz Felipe, pelo apoio na realização dos ensaios.

Ao laboratório de Adesão e Aderência da Universidade Estadual do Rio de Janeiro (UERJ) no campus de Nova Friburgo, pela confecção dos corpos de provas.

Aos amigos Bruno Lobão, Bruno Cavalcante e Rebeca Gonçalves, que nos momentos difíceis não permitiram que eu desistisse.

À Sabrina de Magalhães, pelo companheirismo e pela paciência.

À Michelin, em especial ao gerente de manutenção Luiz Kelly, por acreditar no meu potencial.

RESUMO

ANÁLISE EXPERIMENTAL DE REPARO DE COMPÓSITOS

Francisco Andson Marques

Orientador:

Silvio Romero de Barros

Resumo da Dissertação de Mestrado submetida ao Programa de Pós-graduação de Engenharia Mecânica e Tecnologia de Materiais do Centro Federal de Educação Tecnológica Celso Suckow da Fonseca, CEFET/RJ, como parte dos requisitos necessários à obtenção do título de mestre em Engenharia Mecânica e Tecnologia de Materiais.

Com a expansão das atividades de exploração de petróleo, alternativas para reduzir os custos de fabricação, produção e manutenção sem prejudicar a confiabilidade tornaram-se essenciais para manter a rentabilidade do negócio. O uso das técnicas de colagem para reparo de tubulações, vasos e cascos de navio se destaca como boa prática pelo fato de não apresentar os riscos do trabalho a quente e poder ser realizado no local (*insitu*), por consequência sem a necessidade da interrupção da atividade. A nova proposta se baseia na aplicação de camadas de material compósito com adesivo epóxi até que se atinja a espessura necessária para que a estrutura reparada se torne confiável novamente. Este trabalho tem como objetivo analisar os resultados experimentais de ensaios realizados em juntas de aço e compósito de fibra de carbono e estabelecer a vida útil do reparo em numero ciclos de fadiga.

Palavras-Chave:

Materiais compósitos; Reparos colados; Ensaios de fadiga

Rio de Janeiro

Fevereiro, 2015

ABSTRACT

EXPERIMENTAL ANALYSIS OF COMPOSITE REPAIR

Francisco Andson Marques

Advisor:

Silvio Romero de Barros

Abstract of dissertation submitted to Programa de Pós-graduação Engenharia Mecânica e Tecnologia de Materiais do Centro Federal de Educação Tecnológica Celso Suckow da Fonseca CEFET/RJ as partial fulfillment of the requirements for the degree of Master in Mechanical Engineering and Technolgy of Materials.

With the expansion of oil exploration activities, alternatives to reduce fabrication, production and maintenance costs, keeping the reliability indicators, become essential to maintain the profitability of the business. Adhesion techniques has been used to repair pipes, vessels and ship hulls and they are highlighted as good practices because they can be performed on site (*insitu*) and do not present the risks of hot work and residual stresses, therefore without necessity of interrupting the activity. The new proposal is based on apply layers of composite material with epoxy adhesive until it reaches the required thickness for the repaired structure becomes reliably again. This work aims to analyze the experimental results of tests on steel joints and carbon fiber composite and to predict lifetime of the repair.

Keywords:

Composites materials; Bonded Patches; Fatigue tests

Rio de Janeiro

2015, February

Sumário

Capítulo I - Introdução 1

I.1 Motivação 1

I.2 Objetivo, contexto e contribuição 2

I.3 Organização do texto 2

Capítulo II - Revisão bibliográfica 3

II.1 Juntas coladas 3

II.1.1 Teoria Mecânica 8

II.1.2 Teoria da adsorção 9

II.1.3 Teoria da Difusão 9

II.1.4 Teoria eletrostática 10

II.2 Compósitos 10

II.2.1 Compósitos reforçados com fibras 12

II.2.2 Influência do comprimento da fibra 13

II.2.3 Influência da orientação e concentração da fibra 14

II.2.4 Fase matriz 16

II.2.5 Aplicações 16

Capítulo III - Materiais e métodos 17

III.1 Reparo de compósito 17

III.2 Preparação do corpo de prova 18

III.3 Características do compósito 21

III.4 Características do adesivo 21

III.5 Ensaios mecânicos 21

III.5.2 Ensaios estáticos 23

III.5.3 Ensaios dinâmicos 23

Capítulo IV - Resultados 24

IV.1 Ensaios estáticos 24

IV.2 Ensaios dinâmicos 27

Capítulo V - Conclusões 29

Sugestões para trabalhos futuros..... 30

Referências bibliográficas..... 31

Lista de figuras

Figura I.1 : FPSO em atividade nos dias atuais. Fonte: (MODEC) 1

Figura II.1 : Disciplinas envolvidas na ciência da adesão. Fonte: Adaptado de (DA SILVA, MAGALHÃES e MOURA, 2007) 4

Figura II.2 : Esquema de uma junta colada. Fonte:(DA FONSECA, 2007). 5

Figura II.3 : Ângulo de contato para uma gota de molhagem. Fonte:(DA FONSECA, 2007). 6

Figura II.4 : Balanço de forças em moléculas de um liquido. Fonte: Adaptado de EBNESAJJAD, 2008. 6

Figura II.5 : Esquema de adesão por adsorção. Fonte:(DA SILVA, 2008). 9

Figura II.6 : Teoria da adesão eletrostática. Fonte:(DA SILVA, 2008) 10

Figura II.7 : Representação esquemática das variações da geometria da fase dispersa em um compósito. Fonte:(CALLISTER e RETHWISCH, 2010) 11

Figura II.8 Esquema com a classificação dos tipos de compósitos. Fonte: Adaptado de(CALLISTER e RETHWISCH, 2010) 12

Figura II.9 : Curvas tensão-deformação. Fonte: (CALLISTER e RETHWISCH, 2010). 15

Figura II.10 : Construção de um compósito laminado Fonte: (CALLISTER e RETHWISCH, 2010). 16

Figura III.1 : Conceito de reparo de compósito para fissuras e perda de espessura por corrosão. Fonte: (MCGEORGE, ECHTERMEYER, *et al.*, 2009) 17

Figura III.2 : Jateamento da superfície da chapa de aço. 19

Figura III.3 : Chapa de aço após a aplicação da resina. 19

Figura III.4 : (a) Processo de fabricação do reparo. (b) reparo de compósito. 20

Figura III.5 : Esquema do corpo de prova utilizado nos ensaios 20

Figura III.6 : Máquina servo-hidráulica Instron 100kN. Fonte: CEFET/RJ 22

Figura III.7 : Esquema do ensaio de flexão três pontos. 22

Figura III.8 : Modos de ruptura. Fonte:(DA SILVA, MAGALHÃES e MOURA, 2007) 23

Figura IV.1 : Teste de flexão três pontos. 24

Figura IV.2 : Ensaio estático CP_CFRP_I X Chapa A36 25

Figura IV.3 : Ensaio estático CP_CFRP_I X CP_CFRP_II 26

Figura IV.4 : Corpos de provas usados nos ensaios estáticos. 26

Figura IV.5 : Número de ciclos para cada faixa de tensão. 28

Lista de tabelas

Tabela II.1 : Tratamento de superfície. 7

Tabela II.2 : Teoria da adesão. 8

Tabela II.3 Comparação das propriedades mecânicas entre metais, compósitos e suas fibras e matrizes em separado. 13

Tabela II.4 : Eficiência de compósitos reforçados com fibra para diferentes orientações da fibra e direções da tensão aplicada. 14

Tabela III.1 : Dimensões da chapa de aço ASTM A36. 18

Tabela III.2 : Propriedade do compósito 21

Tabela III.3 : Propriedade do adesivo 21

Tabela IV.1 : Valores da carga para ensaio dinâmico. 27

Tabela IV.2 : Numero de ciclos obtidos para cada faixa de carga. 27

Capítulo I - Introdução

I.1 Motivação

Com os novos desafios enfrentados pelas grandes companhias produtoras de petróleo, métodos e processos devem ser revistos para que os resultados esperados sejam alcançados. Entre eles os que estão relacionados diretamente a segurança e a confiabilidade de equipamentos e estruturas de processos de produção.

Os FPSO's (*Floating, Production, Storage and Offloading*) normalmente são navios que atuavam em outras atividades que foram reformados para as atividades de exploração e produção de petróleo(MCGEORGE, ECHTERMEYER, *et al.*, 2009). Durante inspeções é comum encontrar trincas e danos causados por corrosão. Em procedimentos tradicionais estes normalmente são corrigidos através das técnicas de soldagem. A figura I.1 mostra um exemplo de um típico FPSO em um dia de exploração e produção.



Figura I.1 : FPSO em atividade nos dias atuais. Fonte: (MODEC)

Por motivos de segurança, o método clássico de reparo usando soldagem requer que as operações sejam interrompidas. O tempo de um navio parado em um estaleiro e interrupção da produção em muitos casos é algo extremamente caro. (MCGEORGE, ECHTERMEYER, *et al.*, 2009).

A utilização de reparos de compósitos vem sendo utilizado cada vez com mais aceitação pela indústria offshore como uma alternativa ao reparo convencional. Por não necessitar interromper a produção, pela praticidade na aplicação, por ganhos em relação a

segurança e por redução das tensões residuais é que este método vem sendo estudado por instituições de pesquisas e grandes companhias.

I.2 Objetivo, contexto e contribuição

O objetivo desse trabalho é estudar uniões coladas entre a placa de aço carbono e o compósito de matriz epóxi com reforço de fibra de carbono, submetidas a cargas alternadas e avaliar sua vida a fadiga.

Os materiais escolhidos para os corpos de provas são os mesmos que a PETROBRAS utiliza para confecção dos reparos em campo. O aço A36 foi usado para simular a chaparia do casco do navio a ser reparado.

Pelo não conhecimento de uma norma especifica para a utilização desse tipo de reparo foi utilizado as Práticas Recomendadas da Det Norske Veritas (DNV, 2012) para realização dos ensaios: DNV-RP-C301 – Práticas recomendadas para projeto, fabricação, operação e qualificação de reparos colados.

I.3 Organização do texto

O texto deste trabalho está divido da seguinte forma:

O Capítulo 1 apresenta uma breve contextualização sobre o assunto que será abordado, além de pontuar as motivações e mostrar como a dissertação foi organizada.

No Capítulo 2 tem uma apresentação sobre colagem e suas tecnologias, teoria da adesão e outros assuntos relevantes para compreensão deste trabalho como um todo. A segunda parte desse capítulo introduz alguns conceitos sobre materiais compósitos.

O Capitulo 3 aborda os materiais e métodos utilizados para confecção dos corpos de prova e a realização dos testes.

Os resultados destes ensaios são apresentados e discutidos no capitulo 4.

No capitulo 5 a conclusão e por seguinte propostas para trabalhos posteriores.

Capítulo II - Revisão bibliográfica

Neste capitulo será apresentado de forma sucinta a teoria da adesão e as tecnologias envolvidas assim como uma revisão das principais características de materiais compósitos e metálicos e o comportamento mecânico das juntas adesivas.

II.1 Juntas coladas

Não é de hoje que as juntas adesivas estruturais vêm sendo utilizadas como alternativa as juntas tradicionais. No inicio do século XX as aeronaves utilizavam adesivos baseados em caseína, um material polimérico natural derivado do leite. Contudo, absorvendo água eles se tornavam fracos e exalavam cheiros desagradáveis(DA SILVA, MAGALHÃES e MOURA, 2007).

A confiabilidade e a durabilidade dos adesivos começa a ganhar corpo com a introdução dos adesivos sintéticos poliméricos no inicio dos anos 40. A evolução química dos adesivos permitiu, por exemplo, a ligação de materiais metálicos e de madeira com sucesso. Esta foi a tecnologia utilizada pelos engenheiros no projeto da aeronave Comet como solução para a redução de peso da fuselagem metálica(DA SILVA, MAGALHÃES e MOURA, 2007).

A tecnologia da adesão avançou muito e atualmente é utilizada como principal alternativa as juntas convencionais devido a reduzida concentração de tensões, pela transferência suave de carga em largas áreas de colagem, pela resistência superior a fadiga, pela excelente relação peso-resistência, pela aerodinâmica otimizada, pelos baixos custos no processo de fabricação, pela facilidade de manipulação, possibilidade de união entre diferentes tipos de materiais, entre outros (DA FONSECA, 2007). Algumas das vantagens e as desvantagens observada em muitos aspectos para a utilização das técnicas de colagem listados por (EBNESAJJAD, 2008) são:

Vantagens:

- Distribuição uniforme das tensões.
- Possibilidade de unir materiais de diferentes espessuras.
- Possibilidade de unir materiais dissimilares.
- Diminui ou previne a corrosão eletroquímica entre materiais dissimilares.
- Boa relação resistência/ peso.

Desvantagens:

- A colagem geralmente não permite inspeção visual da área colada.
- Necessidade de tratamento da superfície para obtenção de juntas duráveis.
- Necessidade de longos períodos de cura para algumas aplicações.

- Necessidade da utilização de ferramentas para manter a junta na posição, autoclaves, fornos.
- Serviços em altas temperaturas limitam a utilização da técnica.

A ciência da adesão é uma área que requer o conhecimento de prévio de varias outras disciplinas científicas como física, química e mecânica para que seja aplicada com sucesso. Pode-se dizer que esta é uma tecnologia pluridisciplinar. Na figura II.1 estão representadas as principais áreas envolvidas.

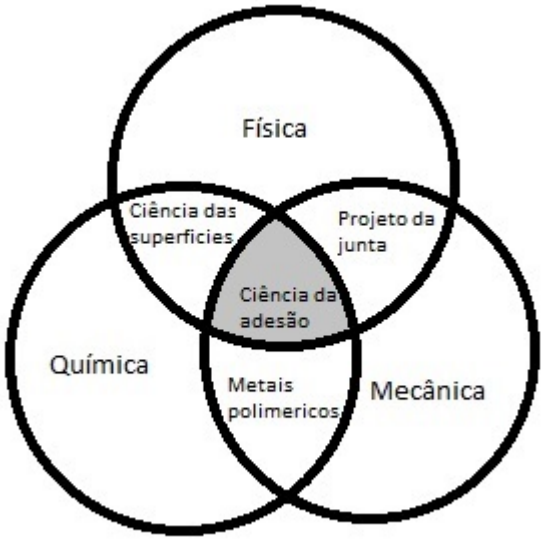


Figura II.1 : Disciplinas envolvidas na ciência da adesão. Fonte: Adaptado de (DA SILVA, MAGALHÃES e MOURA, 2007)

Segundo a definição de (DA SILVA, MAGALHÃES e MOURA, 2007) “Um adesivo estrutural é um adesivo que resiste a forças substanciais e que é responsável pela resistência e rigidez da estrutura”

Uma junta colada constitui basicamente de substratos (ou aderentes), que são os materiais a serem colados, e o adesivo, que é o responsável pela ligação entre os dois materiais. A figura II.2 mostra o esquema de uma junta colada e algumas nomenclaturas.

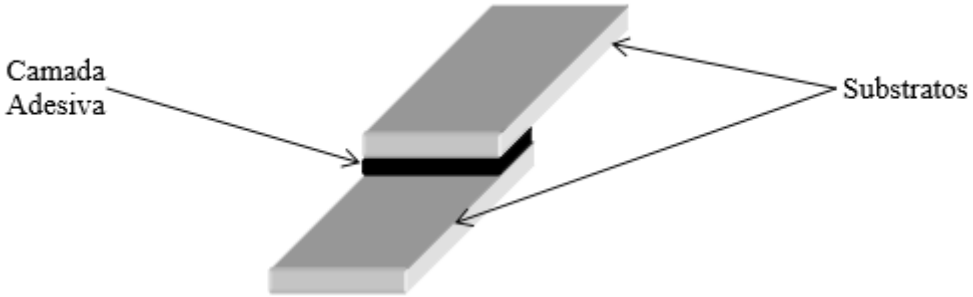


Figura II.2 : Esquema de uma junta colada. Fonte:(DA FONSECA, 2007).

O aderente, ou substrato, é o material a ser ligado que pode ser metálico, cerâmico ou polimérico e não há necessidade que os dois substratos sejam do mesmo material.

O adesivo pode ser entendido como um material polimérico que quando aplicado a superfícies pode ligá-las e resistir a separação (DA SILVA, MAGALHÃES e MOURA, 2007)

O conceito das forças intermoleculares que se estabelecem entre as duas substâncias é chamado de adesão. Chama-se coesão quando as forças atuam em apenas uma substância. Estas forças são principalmente forças de Van der Waals.

Entende-se como interfase a região entre o adesivo e o aderente, e esta fina área tem características físicas e químicas diferentes da parte maciça do adesivo ou do aderente e é um fator critico para determinação das propriedades de uma ligação adesiva.

Adesão é um conceito um pouco mais difícil para definir e não existe uma definição que foi aceita de forma completamente satisfatória. Segundo (WU, 1982):

"Adesão refere-se ao estado no qual dois corpos dissimilares são mantidos juntos por intimo contato interfacial tanto por força mecânica ou por trabalho transferido através da interface. As forças interfaciais que mantém as duas fases unidas pode ser de Van der Waals, ligação química, ou atração eletrostática. A força mecânica do sistema não é determinada apenas pelas forças interfaciais, mas também pelas propriedades mecânicas da zona interfacial e o volume das duas fases"

Em superfícies sujas contendo partículas gordurosas é possível se notar que o líquido irá se espalhar com mais dificuldade que naquela limpa e bem tratada. Dessa observação surge o conceito de molhabilidade que é a capacidade de um liquido se espalhar numa superfície solida (DA SILVA, MAGALHÃES e MOURA, 2007).

Traçando-se uma tangente junto a gota de liquido depositada na superfície solida é possível se chegar ao ângulo de contato (θ) como mostrada na figura II.3. O ângulo de contato depende das tensões superficiais do adesivo e do substrato, da rugosidade e da viscosidade do adesivo. Quanto menor for esse ângulo melhor é a molhagem.

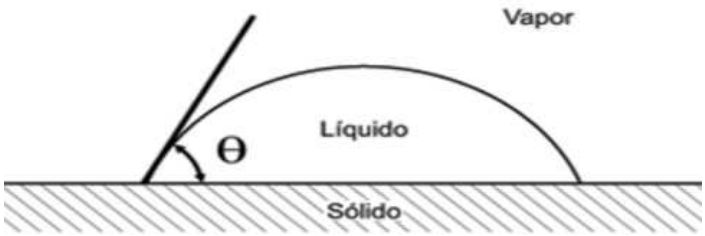


Figura II.3 : Ângulo de contato para uma gota de molhagem. Fonte:(DA FONSECA, 2007).

As moléculas de um líquido se mantêm unidas porque existem forças de atração entre elas. Dentro do liquido estas forças estão em equilíbrio, contudo na superfície a força em relação ao volume é diferente de zero (Figura II.4). A energia consumida durante esse processo é chamada de “energia de superfície”.

Para trazer novas moléculas a superfície é necessário fornecer uma quantidade de energia superior às que estão no interior, essa energia extra fornecida às moléculas é chamada de “energia livre de superfície”.

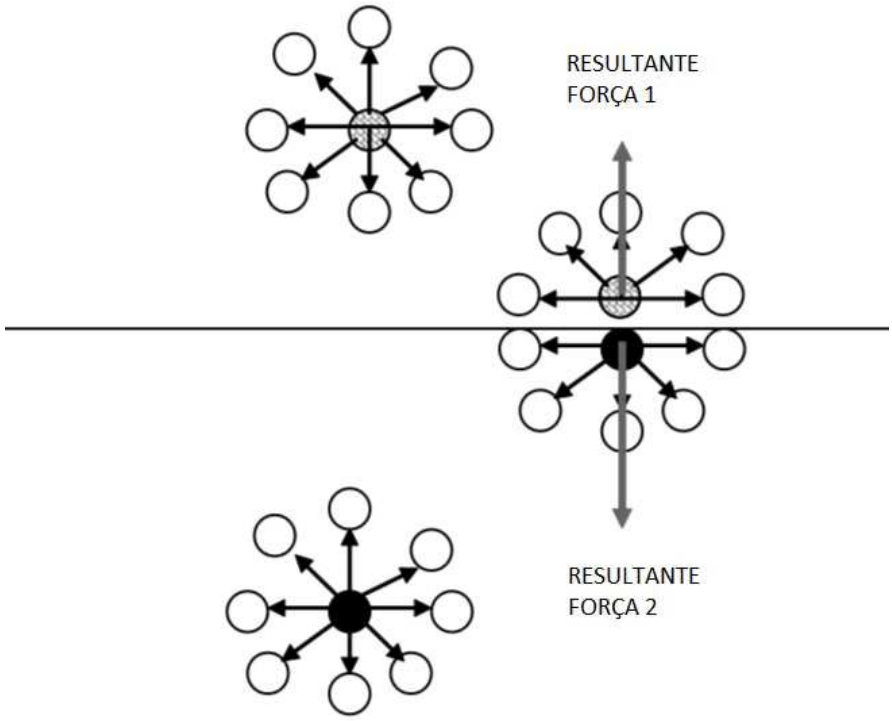


Figura II.4 : Balanço de forças em moléculas de um liquido. Fonte: Adaptado de EBNESAJJAD, 2008.

Para que a adesão aconteça de forma satisfatória, é vital que a preparação das superfícies da junta seja bem executada. Esta preparação está diretamente relacionada a resistência e a durabilidade da junta.

Uma das razões para preparar as superfícies antes de iniciar o processo de colagem é que se deseja que o contato entre o aderente e o adesivo ocorra diretamente, sem a intervenção de camadas de filmes de óxidos, tinta e inclusão de ar (ou outros gases) em vazios na região ligada. Essas camadas são chamadas de camadas fracas.

Para cada tipo de material existem procedimentos para a preparação da superfície. Na tabela II.1 tem-se uma listagem com os principais métodos de tratamento relacionado a cada tipo de material

Tabela II.1 : Tratamento de superfície.

Substrato	Método	Resultado
Metal	Desengraxar	Limpeza da superfície
Metal	Jateamento com granalha	Remoção da camada fraca e aumento de contato da superfície.
Metal	Ataque com ácidos	Remoção da camada fraca
Não metais	Descarga de Corona	Remoção da camada fraca
Não metais	Tratamento por chama	Remoção da camada fraca
Não metais	Ataque químico	Remoção da camada fraca

Fonte: Adaptado de EBNESAJJAD, 2008

As etapas principais da preparação da superfície metálica são a limpeza e o jateamento. Os metais possuem uma alta energia de superfície e absorvem óleo e outros contaminantes que podem existir no ambiente. Por sua vez estes contaminantes gordurosos possuem fraca energia de superfície e podem trazer problemas de molhagem.

Uma das melhores formas de limpeza da superfície metálica é com o uso de desengordurante com solventes orgânicos como o tricloroetano (EBNESAJJAD, 2008). Neste trabalho foi utilizado a acetona como solvente para preparação da superfície metálica.

O jateamento com granalha de aço aumenta a superfície de área de contato do adesivo através do tratamento na rugosidade do metal. A rugosidade das superfícies tratadas com esse

procedimento aumenta, e a resistência e a adesão da junta adesiva tendem a melhorar. Esse método consiste em projetar partículas abrasivas sobre a superfície que se deseja tratar. Para cada substrato existe uma serie de tamanho de granalha mais apropriado a se utilizar. Neste trabalho a granalha utilizada foi a G40.

Para compreender o fenômeno da adesão é necessário examinar as forças disponíveis e as relações entre superfícies sólidas e líquidas em conjunto. A ligação de um adesivo a uma superfície é o somatório de todas as forças mecânicas, químicas e físicas envolvidas (DA SILVA, MAGALHÃES e MOURA, 2007). A combinação de diferentes mecanismos é o mais provável responsável pela adesão em sistema adesivo e o papel de cada mecanismo pode variar de acordo com o sistema utilizado (EBNESAJJAD, 2008).

Um fator importante a ser observado é a escala de interação entre o aderente e o adesivo. A tabela II.2 mostra a escala de interação para cada mecanismo.

Tabela II.2 : Teoria da adesão.

Tradicional	**Recente**	**Escala de interação**
Mecânica	Mecânica	Microscópica
Eletrostática	Eletrostática	Macroscópica
Difusão	Difusão	Molecular
Adsorção	Molhagem	Molecular
	Colagem química	Atômica
	Camada fraca	Molecular

Fonte: Adaptado de EBNESAJJAD, 2008.

Não existe uma teoria única que explique a adesão de forma completa e geral. A seguir são descritas as quatro teorias da adesão tradicionais: Mecânica, adsorção, difusão e eletrostática.

II.1.1 Teoria Mecânica

Segundo esta teoria, que é a mais antiga, a boa adesão se dá quando o adesivo penetra nos poros, fendas e cavidades da superfície do substrato e fica ancorado nele. O adesivo deve ter as propriedades adequadas para adentrar as irregularidades da superfície do substrato num tempo razoável, assim como a superfície deverá ter o tratamento adequado.

Contudo a boa adesão pode acontecer em superfícies lisas, o que quer dizer que o ancoramento mecânico ajuda na adesão mas não pode ser tomado como teoria geral para todos os casos de adesão.

Os tratamentos superficiais tendem a melhorar a adesão uma vez que resultam em ancoramento mecânico, que melhoram a resistência e a durabilidade da junta. Outros fatores como limpeza, maior área de contato, maior cinética de molhagem e aumento de mecanismos de dissipação de energia do adesivo podem melhorar a adesão.

II.1.2 Teoria da adsorção

A teoria da adsorção se baseia na utilização das forças de superfície. As moléculas do adesivo e do aderente estando suficiente próximas uma da outra, as forças de Van der Waals permitem ter adsorção física. As ligações covalentes, interações ácido-base e pontes de hidrogênio podem ser consideradas adsorção química.

Ligações iônicas e covalentes são ligações químicas que proveem valores de adesão muito mais elevados se comparados a outras ligações.

Em ambas, adsorção física ou química, a ligação se baseia na proximidade entre adesivo e substrato a ponto de possibilitar a interação entre as moléculas de cada um. A figura II.5 mostra esquematicamente como acontece a adesão por adsorção.

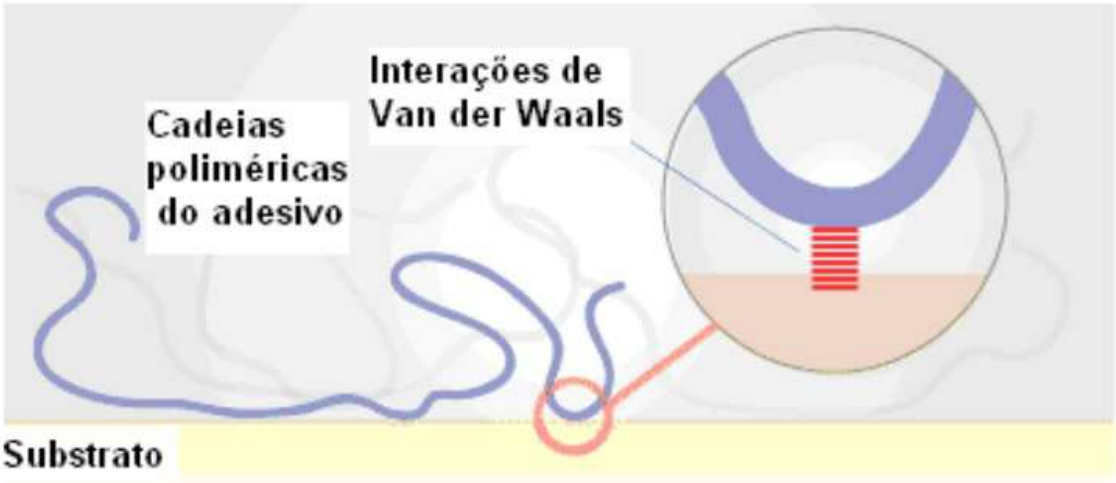


Figura II.5 : Esquema de adesão por adsorção. Fonte:(DA SILVA, 2008).

II.1.3 Teoria da Difusão

Quando o adesivo e o aderente são ambos polímeros é possível que a adesão se dê pela interdifusão de uma cadeia de uma molécula do polímero da superfície do substrato com a estrutura da superfície do adesivo formando uma ponte através da interface.

É necessário que substrato e adesivos sejam polímeros e que haja uma certa capacidade de movimentação das moléculas para que adesão ocorra. Quando aderente e adesivos são do mesmo material o fenômeno é denominado “autoadesão”, no caso de materiais diferente designa-se por “heteroadesão”. Este processo pode ser dado com a utilização de solventes ou soldagem.

II.1.4 Teoria eletrostática

Essa teoria propõe que a adesão se dá pelo efeito eletrostático entre adesivo e aderente. A força de adesão é atribuída a transferência de elétrons através da interface, criando zonas com cargas negativas e positivas que se atraem.

Esta teoria ganha reforço pelo fato de que em ensaios de arrancamento são notadas descargas elétricas. A figura II.6 ilustra esse tipo de ligação.

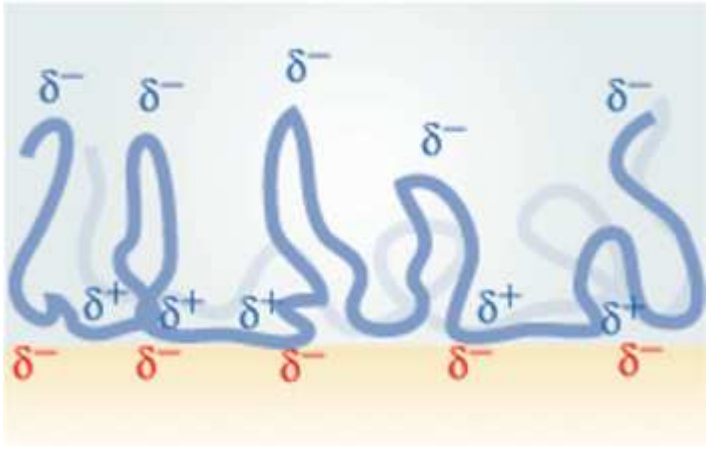


Figura II.6 : Teoria da adesão eletrostática. Fonte:(DA SILVA, 2008).

II.2 Compósitos

A terminologia “compósito” é relativamente nova, mas a utilização de fibras em matrizes mais simples para incrementar a resistência mecânica é muito antiga. A utilização de pelo de cavalo e palha para a fabricação de tijolos reporta de mais de 5000 anos atrás (DA SILVA, MAGALHÃES e MOURA, 2007). O próprio papel é um compósito. Praticamente todos os materiais naturais que devem suportar cargas (madeira, ossos, músculos) são compósitos.

A necessidade do desenvolvimento de materiais com propriedades específicas se tornou muito comum em aplicações de alta tecnologia como a indústria aeroespacial, submarina, bioengenharia e as indústrias de transportes. Como exemplo temos os engenheiros aeroespaciais em suas pesquisas por materiais estruturais que ofereçam ao mesmo tempo baixa densidade e propriedades mecânicas que atendam as exigências de projeto.

De uma forma mais generalista pode se dizer que compósitos são todos os materiais com mais de uma fase que preservam características de ambas buscando a melhor combinação entre as diferentes propriedades de cada fase(CALLISTER e RETHWISCH, 2010).

A maioria dos compósitos possuem apenas duas fases: Uma fase denominada de matriz, que é continua e que envolve a outra fase, chamada de fase dispersa. As propriedades dos compósitos são função das propriedades dos constituintes de cada fase, das quantidades relativas de cada uma e da geometria da fase dispersa. Quando se fala em geometria da fase dispersa se refere ao formato, tamanho, orientação, concentração e distribuição. A figura II.7 traz uma representação esquemática dos diferentes tipos de geometria da fase dispersa de um compósito: (a) Concentração; (b)Tamanho; (c) Formato; (d) Distribuição e (e) Orientação.

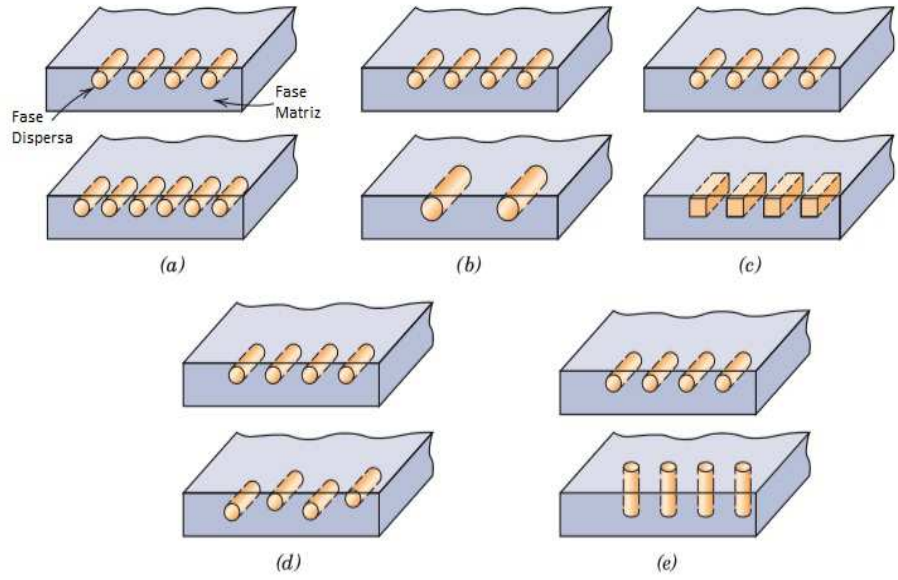


Figura II.7 : Representação esquemática das variações da geometria da fase dispersa em um compósito. Fonte:(CALLISTER e RETHWISCH, 2010)

Os compósitos são classificados em três grupos: reforçados com fibras, reforçados com partículas e estrutural. Cada grupo desses é subdivido em no mínimo dois subgrupos e agrupam os compósitos por suas características. A figura II.8 mostra um esquema que reuni os principais grupos e subgrupos de compósitos.



Figura II.8 Esquema com a classificação dos tipos de compósitos. Fonte: Adaptado de(CALLISTER e RETHWISCH, 2010)

II.2.1 Compósitos reforçados com fibras

A indústria dos compósitos propriamente dita é nova e cresceu muito nas ultimas três décadas com o desenvolvimento de compósitos fibrosos: Primeiro com a fibra de vidro (GFRP – *Glass Fiber Reinforced Polymer*) e depois com a fibra de carbono (CFRP – *Carbon Fiber Reinforced Polymer*). Esses materiais estão sendo amplamente utilizados nas indústrias naval e aeroespacial em substituição a materiais metálicos.

Polímeros são dúcteis, mas não tem muita resistência. Já os materiais cerâmicos são muito resistentes, mas são frágeis. A utilização de fibras em matrizes poliméricas permite o ganho da resistência proveniente dos materiais cerâmicos evitando o risco de uma fratura frágil. As fibras conduzem a uma fratura progressiva, não repentina (ASHBY e JONES, 1998).

Os compósitos reforçados com fibra possuem densidade muito inferior e resistência próxima, e às vezes superior, se comparado a ligas metálicas. Na tabela II.3 podemos ver as propriedades das fibras, polímeros e compararmos com os compósitos e metais.

Tabela II.3 Comparação das propriedades mecânicas entre metais, compósitos e suas fibras e matrizes em separado.

Material	Densidade ρ(Mg m-3)	Modulo de Elastic. E (GPa)	Resistência σ(MPa)
Fibras			
Carbono	1,95	390	2200
Vidro	2,56	76	1400 – 2500
Kevlar	1,45	125	2760
Matrizes			
Epóxi	1,2 – 1,4	2,1 – 5,5	40 – 85
Poliéster	1,1 – 1,4	1,3 – 4,5	45 – 85
Compósitos			
CFRP em Epóxi	1,5	189	1050
GFRP em Poliéster	2,0	48	1240
Metais			
Aço	7,8	207	1000
Liga de alumínio	2,8	71	500

Fonte: Adaptado de(ASHBY e JONES, 1998).

Fatores como comprimento, orientação e concentração das fibras apresentam influência significativa sobre a resistência e outras propriedades dos compósitos reforçados por fibras.

II.2.2 Influência do comprimento da fibra

As características mecânicas do compósito dependem do grau que a carga aplicada é transmitida para as fibras pela matriz, e a magnitude da ligação interfacial matriz-fibra é importante para a transferência de carga (CALLISTER e RETHWISCH, 2010).

Durante a aplicação de uma tensão a ligação fibra-matriz termina na extremidade da fibra, produzindo uma deformação na matriz. Então para um fortalecimento ou endurecimento do compósito é necessário ter o conhecimento do tamanho critico da fibra. Para o cálculo do tamanho crítico, o diâmetro da fibra, a tensão de ruptura da fibra e a tensão de escoamento da matriz são considerados.

As fibras com comprimento maior que quinze vezes o comprimento crítico ($l > 15l_c$) são chamadas de contínuas. As fibras descontínuas ou curtas são as fibras menores que o estabelecido para as fibras continuas (CALLISTER e RETHWISCH, 2010).

Para as fibras descontinuas com comprimento menor que o crítico, a matriz se deforma no entorno da fibra, não transmitindo tensão. São essencialmente compósitos particulados. DE

uma maneira geral, para um ganho significante na resistência do compósito as fibras devem ser contínuas.

II.2.3 Influência da orientação e concentração da fibra

A distribuição e orientação de uma fibra em relação à outra é um fator muito importante para a caracterização da resistência e de outras propriedades dos compósitos reforçados com fibras. Em relação à orientação dois modelos são possíveis: As fibras alinhadas paralelamente em uma única direção ou totalmente aleatória. As fibras contínuas são normalmente alinhadas enquanto as descontínuas podem ser alinhadas ou aleatórias (CALLISTER e RETHWISCH, 2010).

Os compósitos com fibras alinhadas são considerados anisotrópicos, ou seja, o comportamento tensão-deformação dependerá da direção onde a carga é aplicada em relação à orientação das fibras. Os compósitos reforçados com fibras contínuas, dependendo da orientação da carga, são os que têm o maior nível de eficiência. A eficiência é máxima quando a carga é aplicada no sentido longitudinal da fibra e nula no sentido perpendicular. A tabela II.4 apresenta algumas situações.

Tabela II.4 : Eficiência de compósitos reforçados com fibra para diferentes orientações da fibra e direções da tensão aplicada.

Orientação da Fibra	Direção da tensão	Eficiência do reforço
Todas as fibras paralelas	Paralela às fibras	1
	Perpendicular às fibras	0
Fibras distribuídas uniforme e aleatoriamente em uma superfície plana	Qualquer direção no plano	3/8
Fibras distribuídas uniforme e aleatoriamente em três dimensões no espaço	Qualquer direção	1/5

Fonte: Adaptado de (CALLISTER e RETHWISCH, 2010).

As reações mecânicas desse tipo de compósito dependem, além da orientação das fibras, do comportamento tensão-deformação e das proporções de cada fase, matriz e fibras. Como mostrado na figura II.9, a curva tensão deformação do compósito é uma combinação das

duas fases. A figura II.9 (a) mostra as curvas de uma fibra frágil e de uma matriz dúctil e figura II.9 (b) mostra a curva tensão-deformação do compósito com as curvas de cada fase sobreposta.

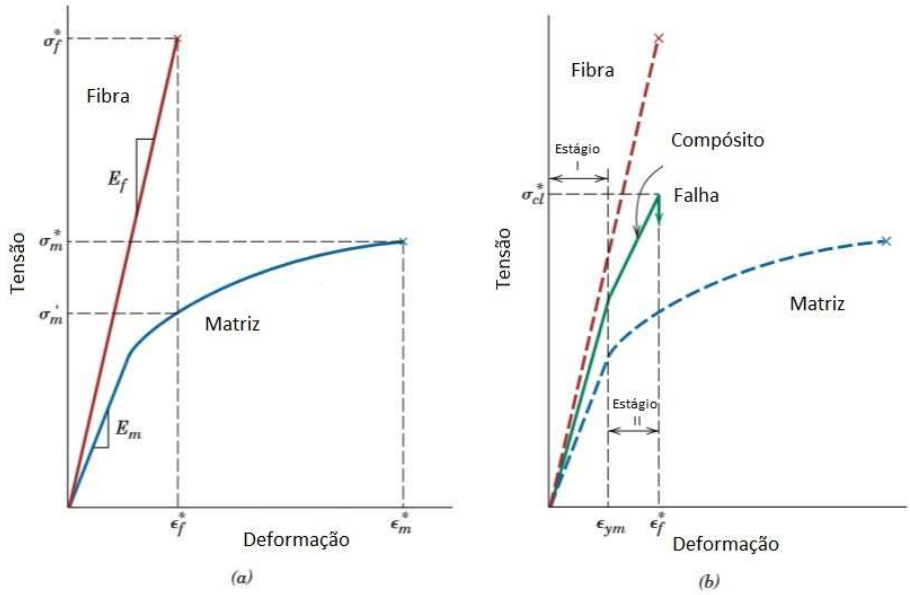


Figura II.9 : Curvas tensão-deformação. Fonte: (CALLISTER e RETHWISCH, 2010).

Quando o compósito é submetido a solicitações multidirecionais é comum posicionar as camadas, uma sobre as outras, em orientações diferentes. Esse tipo de compósito é chamado de laminado, como mostrado na figura II.10.

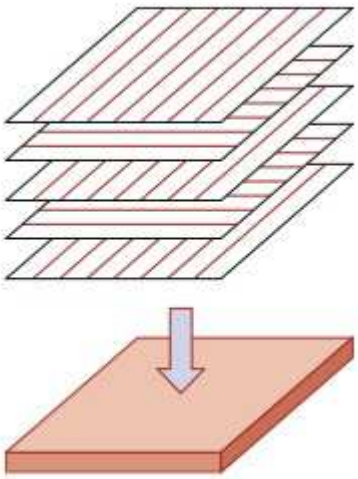


Figura II.10 : Construção de um compósito laminado Fonte: (CALLISTER e RETHWISCH, 2010).

O compósito laminado é composto de camadas que são empilhadas em direções diferentes, de forma que a orientação de maior resistência varia a cada camada.

II.2.4 Fase matriz

A fase matriz de compósitos reforçados com fibras pode ser metálica, polimérica ou cerâmica. Polímeros e metais são mais usados porque a matriz precisa ter ductilidade. No caso dos cerâmicos, a adição de fibras tem a função de aumentar a tenacidade do material.

Uma das principais funções da fase matriz é ligar uma fibra a outra e atuar como o meio onde a carga que é aplicada externamente é transmitida para as fibras. Uma característica importante é proteger as fibras da abrasão e de reações químicas com o ambiente. Outra função é separar uma fibra da outra, por sua natureza dúctil e plasticidade relativa, inibe que trincas se propagem e previne que uma falha catastrófica que se daria pela transmissão de trinca de uma fibra para outra aconteça. Uma fratura individual de uma fibra pode acontecer, mas a falha total do polímero só ocorrerá se um grande número de fibras adjacentes falharem e formarem um conglomerado com dimensões críticas (CALLISTER e RETHWISCH, 2010).

II.2.5 Aplicações

Pode-se observar o emprego do compósito de fibra de carbono nas mais variadas aplicações, como em equipamentos esportivos e de entretenimento (taco de golfe, bicicleta, vara de pesca), em carcaças de motores, em vasos de pressão e em componentes estruturais de aeronaves.

No nosso estudo o compósito de fibra de carbono tem a função de reparo de estruturas danificadas de embarcações.

Capítulo III - Materiais e métodos

Neste capítulo veremos de uma forma mais ampla os materiais, suas propriedades e como foram preparados, assim como os métodos que foram utilizados para realização dos ensaios.

III.1 Reparo de compósito

O reparo de estruturas utilizando compósitos consiste na aplicação do remendo colado sobre a região que sofreu dano, como trincas ou perda de espessura por corrosão conforme ilustrado na figura III.1.

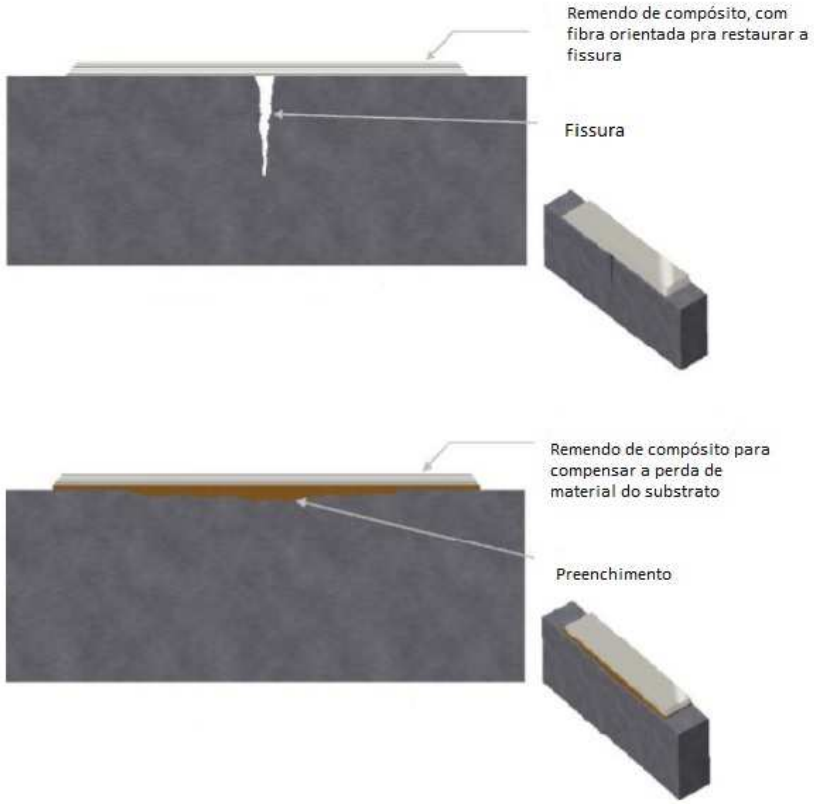


Figura III.1 **:** Conceito de reparo de compósito para fissuras e perda de espessura por corrosão.
Fonte: (MCGEORGE, ECHTERMEYER, *et al.*, 2009)

Como se trata de uma tecnologia relativamente nova, ainda não se pode assegurar a performance baseado em estudos cuja duração é muito mais curta que o pretendido para a vida em serviço. Aproximações são usadas normalmente em muitos campos da engenharia para transpor esse problema, mas de qualquer forma extrapolações nessas condições de teste

para longa vida em serviço com níveis de segurança assegurados introduzem uma grande fonte de incerteza (MCGEORGE, ECHTERMEYER, *et al.*, 2009).

A solução pratica adotada para reparo colados em FPSO (*Floating Production Storage and Offloading unit*) foi limitar os reparos a casos não críticos. Entende-se como caso não critico aquele que mesmo com reparo falhando não colocaria em risco a estrutura como um todo.

III.2 Preparação do corpo de prova

Conforme proposto pela DNV-RP-301 (DNV, 2012), o processo de manufatura do reparo, o tratamento das superfícies dos materiais, o processo de laminação, o adesivo, o modo de aplicação do adesivo, o tempo de cura do laminado e do adesivo devem ser o mesmo da aplicação real.

Os corpos de prova e os ensaios das propriedades do compósito e dos adesivos deste trabalho foram confeccionados em parceria com o laboratório de Adesão e Aderência da Universidade Estadual do Rio de Janeiro (UERJ) no campus de Nova Friburgo, de forma a simular as características dos reparos aplicados nas instalações da PETROBRAS SA.

Para preparação dos corpos de prova foi utilizada uma chapa de aço carbono ASTM A36 (com dimensões descritas na tabela III.1) para simular o casco do FPSO.

Tabela III.1 **:** Dimensões da chapa de aço ASTM A36.

Chapa de aço carbono ASTM A36	
Largura	425,00 mm
Comprimento	180,00 mm
Espessura	6,35 mm

Primeiramente essa chapa foi limpa e desengordurada com a utilização de acetona e em seguida passou pelo processo de jateamento com granalha de aço G-40, conforme mostrado na figura III.2, para a preparação da superfície.



Figura III.2 : Jateamento da superfície da chapa de aço.

Antes da aplicação da primeira camada de fibra de carbono foi aplicada sobre a superfície do material a resina Epóxi NVT (Polinova S.A., Rio de Janeiro, Brasil). Esta resina é responsável pela adesão entre o metal e o compósito. A figura III.3 mostra a chapa de aço logo após a aplicação da resina.



Figura III.3 : Chapa de aço após a aplicação da resina.

Em seguida as lâminas de fibra de carbono foram empilhadas sobre a chapa de aço, aplicando entre cada camada o adesivo Epóxi Pipefix (Polinova S.A., Rio de Janeiro, Brasil). Ao todo foram utilizadas dez lâminas de fibra de carbono de 120 mm de largura por 425 mm de comprimento para criar o reparo de compósito. A espessura final do reparo ficou com 6,35 mm, mesma espessura da chapa de aço. Cada lamina é composta de duas camadas de fibra de

carbono orientadas a ± 45°. A figura III.4.a ilustra o processo de fabricação do reparo e a figura III.4.b o reparo depois do processo concluído.



(a) (b)

Figura III.4 : (a) Processo de fabricação do reparo. (b) reparo de compósito.

O processo de cura é de 24 horas, e depois desse período a chapa foi cortada no sentido transversal em corpos de prova com 25 mm de largura cada. Foi feito um corte a 90° em cada extremidade da fibra de carbono, na divisa entre o filete e a fibra. Este artifício foi realizado com o intuito de manter as características dos ensaios condizentes com as condições reais, uma vez que a contribuição do filete nas dimensões reais de aplicação não é considerada. A figura III.5 é um esquema do corpo de prova com suas dimensões e os detalhes mencionados no texto.



Figura III.5 : Esquema do corpo de prova utilizado nos ensaios

III.3 Características do compósito

Assim como os corpos de prova, os ensaios para obtenção das propriedades do compósito e do adesivo foram realizados no laboratório de Adesão e Aderência da Universidade Estadual do Rio de Janeiro (UERJ) no campus de Nova Friburgo O compósito utilizado para o reparo a fibra de carbono biaxial 45°/ -45° e as propriedades do material foram identificadas através de ensaios de tração conforme a norma ASTM D3039. Foram utilizadas quatro camadas do tecido de fibra de carbono laminados com o adesivo Epóxi Pipefix (mesmo aplicado no corpo de prova com o reparo) para a realização do ensaio.

Tabela III.2 : Propriedade do compósito

Propriedade do compósito	
Resistência à tração	651 MPa
Modulo de Young	46 GPa
Coeficiente de Poisson	0,05

III.4 Características do adesivo

Para determinar as propriedades da resina utilizada para a laminação do compósito (Epóxi Pipefix - Polinova S.A., Rio de Janeiro, Brasil) foram realizados ensaios em corpos de prova segundo a norma ASTM D 638. As propriedades encontradas durante os ensaios estão na tabela III.3.

Tabela III.3 : Propriedade do adesivo

Propriedade do adesivo	
Resistência à tração	50 Mpa
Modulo de Young	2,30 GPa
Coeficiente de Poisson	0,38

III.5 Ensaios mecânicos

Os ensaios apresentados nesse item se referem aos ensaios estáticos e dinâmicos realizados nos corpos de prova com o reparo de compósito.

Os ensaios estáticos e dinâmicos foram realizados na máquina de teste servo-hidráulica Instron (Figura III.6) no Laboratório de Materiais (LAMAT) do Centro Federal de Educação Tecnológica Celso Suckow da Fonseca (CEFET/RJ) com célula de carga de 100kN, utilizando o modelo de flexão de três pontos. A distância entre apoios utilizados nos ensaios foi de 160 mm. A figura III.7 mostra um esquema da montagem do ensaio com as dimensões utilizadas no teste.



Figura III.6 : Máquina servo-hidráulica Instron 100kN. Fonte: CEFET/RJ



Figura III.7 : Esquema do ensaio de flexão três pontos.

III.5.2 Ensaios estáticos

Os ensaios estáticos foram realizados a fim de se obter carga máxima de descolamento do reparo. Além dos ensaios em corpos de prova com o corte (CP_FRP_II) comentado no item anterior também foi realizado ensaios em corpos de prova sem esse corte. A ruptura nesse tipo de corpo de prova acontecia no filete de adesivo mostrando a influência da existência do filete conforme já foi relatado na literatura (ADAMS, 2006).

A carga máxima encontrada nos ensaios estáticos foi utilizada como dado de entrada para o cálculo das cargas máximas adotadas nos ensaios dinâmicos.

III.5.3 Ensaios dinâmicos

Os ensaios dinâmicos têm como objetivo estimar o número de ciclos, para cada faixa percentual de carregamento, que a interface do adesivo resiste até acontecer o descolamento.

Os ensaios de fadiga foram realizados em flexão na condição três pontos em faixas percentuais da carga máxima obtida durante os ensaios estáticos, variando a cada 10% de 50% a 90%. Foi utilizada para os ensaios uma faixa de carga mantendo a razão de 0,1 entre a carga máxima e mínima (R=Min/Máx) (MENICONI, 2014).

Os esforços externos podem exercer sobre a junta, tensões normais (modo I) ou tensões cisalhantes (modo II). Como a direção da propagação da fenda está restringida pelos substratos na grande maioria dos casos a propagação se dá em modo misto (modo I + modo II). Ver Figura III.8.

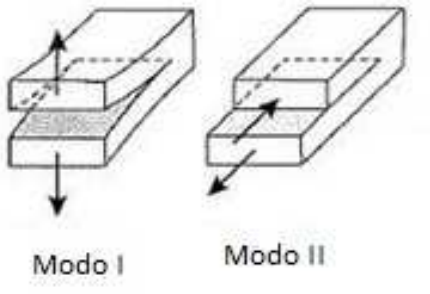


Figura III.8 **:** Modos de ruptura. Fonte:(DA SILVA, MAGALHÃES e MOURA, 2007)

Os ensaios deste trabalho foram realizados no modo misto, que submete a junta ao efeito combinado de tensões normais e tensões de corte.

Existem diversos ensaios para caracterizar o comportamento de juntas coladas em modo misto, porém não existe nenhum normatizado (DA SILVA, MAGALHÃES e MOURA, 2007). O modelo empregado nesse estudo é o baseado no ensaio MMF (*Mixed Mode Flexure*). Contudo, os apoios foram posicionados de forma a preservar o compósito.

Capítulo IV - Resultados

IV.1 Ensaios estáticos

Os ensaios estáticos foram realizados no modelo de flexão de três pontos conforme mostrado na Figura IV.1. A carga de falha assumida é àquela registrada no momento do descolamento do compósito da placa metálica durante a flexão do corpo de prova.



Figura IV.1 : Teste de flexão três pontos.

Os resultados obtidos nesses ensaios foram usados como dado de entrada para os ensaios dinâmicos. Também foram realizados ensaios com o intuito comparativo entre a chapa de aço e a mesma reforçada com o reparo. Ensaios comparativos foram realizados também em dois modelos de corpo de prova com reparo: com o corte logo no inicio do filete do adesivo outro sem esse corte, caracterizando assim os modelos sem filete e com filete respectivamente.

A figura IV.1 mostra o resultado do ensaio comparativo realizado entre o corpo de prova com reparo de compósito com filete (CP_CFRP_I) e a chapa de aço.

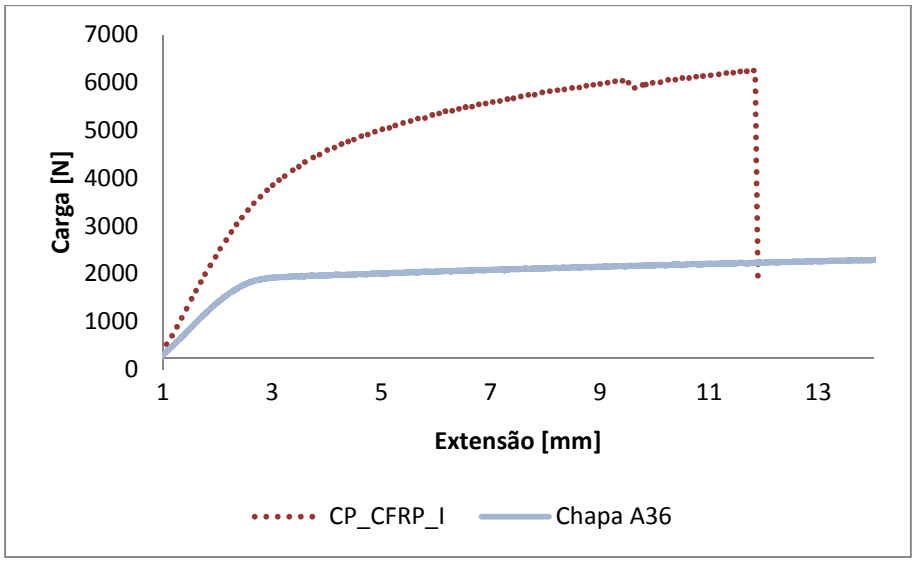


Figura IV.2 : Ensaio estático CP_CFRP_I X Chapa A36

Observando-se o gráfico pode-se notar que a inclinação da curva do corpo de prova com reparo é muito mais acentuada (maior ângulo entre a curva e o eixo x) evidenciando a contribuição do compósito no incremento de rigidez da placa metálica. Com a flecha do corpo de prova da chapa de aço em 2,5mm (onde se estabiliza um patamar de carga) a carga registrada é aproximadamente de 2000 N enquanto o corpo de prova com reforço na mesma faixa de extensão marca praticamente o dobro de carga.

Em seguida foi investigada a influência dos filetes na carga de falha dos corpos de prova. Os filetes são provenientes do adesivo que é expelido quando os substratos são pressionados durante o processo de manufatura da junta. Como demonstrado na literatura (ADAMS, 2006), juntas com extremidades em ângulo reto tendem a concentrar as tensões na região entre o substrato que está sendo carregado e o adesivo adjacente. Já as juntas com filetes tendem a falhar na seção do filete.

Os próximos ensaios estáticos foram realizados como foco de comparar os dois tipos de corpos de prova com reparo de compósito confeccionados: Com filete (CP_CFRP_I) e sem filete (CP_CFRP_II). Fig. IV.3.

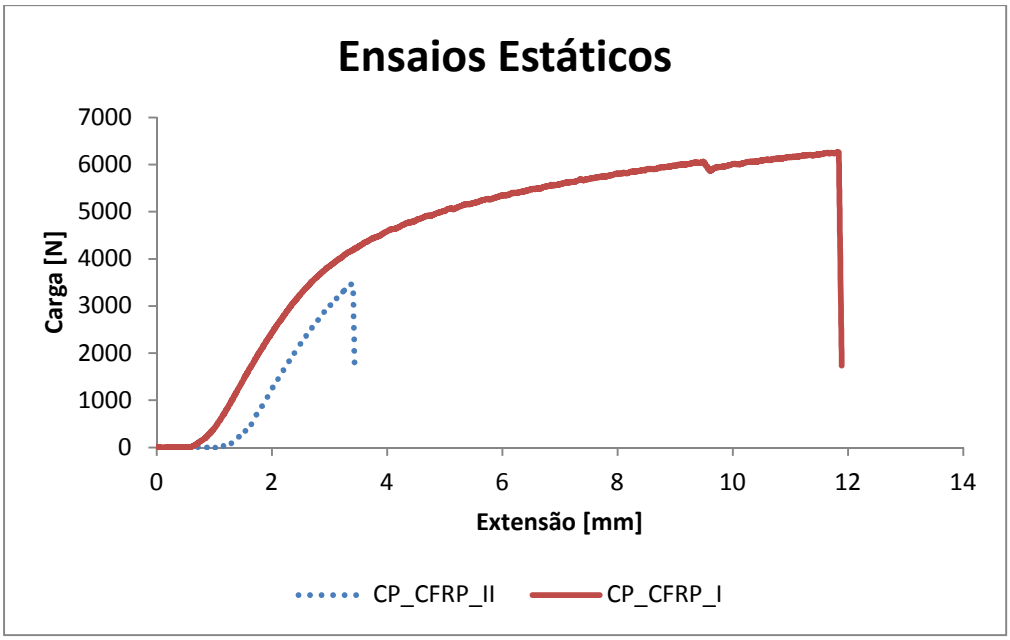


Figura IV.3 : Ensaio estático CP_CFRP_I X CP_CFRP_II

A carga de ruptura do modelo com filete é cerca de 45% superior a carga de ruptura do modelo sem filete.

A figura IV.4 mostra os dois corpos de prova (com e sem filete) e onde as rupturas aconteceram. Na parte de cima vemos o corpo de prova ensaiado com filete e na parte de baixo o corpo de prova onde o filete foi separado do compósito através de um entalhe em ângulo reto.



Figura IV.4 : Corpos de provas usados nos ensaios estáticos.

Foram realizados três ensaios dinâmicos no corpo de prova com filete, porém todos tenderam a vida infinita. Como nosso objetivo nesse trabalho é observar a interação entre o compósito e o adesivo, o segundo modelo de corpo de prova foi adotado para os ensaios dinâmicos. Devemos considerar ainda que as dimensões reais desse tipo de reparo são muito maiores que as do corpo de prova. Sendo assim o filete formado nas extremidades da

superfície do reparo não terá grande influência na aderência na interface na área central do reparo.

IV.2 Ensaios dinâmicos

Assim como os ensaios estáticos, os ensaios dinâmicos foram realizados conforme o modelo três apoios. Inicialmente foi adotado o corpo de prova com filete nos ensaios dinâmicos e pelas razões já apontadas anteriormente, os resultados foram inconclusivos, uma vez que os corpos de provas apresentaram vida infinita, ciclos acima de 10^6.

No modelo sem o filete a frequência escolhida para os testes foi de 20 Hz e foram considerados três ensaios (exceto nas extremidades, onde foram considerados apenas um) para cada faixa entre 50% e 90% da carga máxima obtida no ensaio estático (3,4 KN). Foi mantida a razão de 0,1 entre a carga máxima e mínima (MENICONI, 2014) conforme pode ser visto na tabela IV.1.

Tabela IV.1 : Valores da carga para ensaio dinâmico.

%Carga	Max (kN)	Min (kN)	R (Min/Max)
50	1,75	0,175	0,1
60	2,10	0,210	0,1
70	2,45	0,245	0,1
80	2,80	0,280	0,1
90	3,15	0,315	0,1

Com as faixas de cargas definidas, os corpos de prova foram ensaiados na máquina servo hidráulica até a falha. O número de ciclos para cada faixa é mostrado na tabela IV.2.

Tabela IV.2 : Numero de ciclos obtidos para cada faixa de carga.

	Número de ciclos para ruptura		
Carga	CP1	CP2	CP3
50%	330518	-	-
60%	93400	52160	62500
70%	8579	11301	7333
80%	1248	1543	2586
90%	7	-	-

Na faixa de 50% o ensaio foi interrompido no número de ciclos mostrado na tabela, considerando-se vida infinita para esta faixa. Na faixa de 90% a ruptura ocorreu rapidamente nos primeiros ciclos.

Os resultados dos ensaios dinâmicos em números de ciclos foram plotados no gráfico mostrado na Figura IV.5.

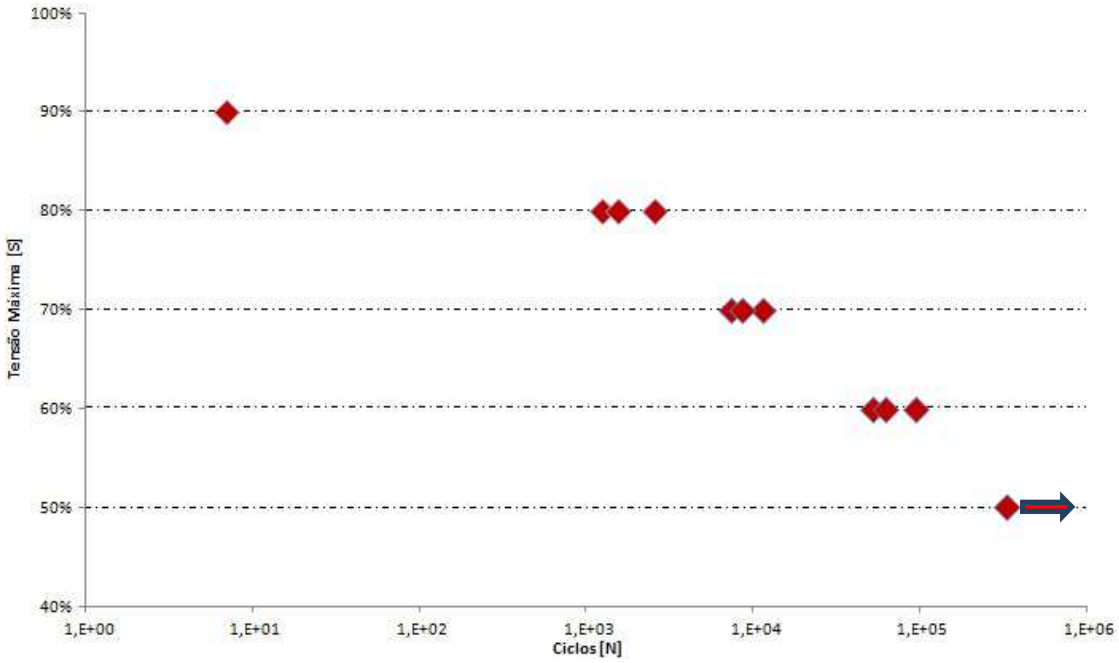


Figura IV.5 : Número de ciclos para cada faixa de tensão.

Até próximo de 10^5 ciclos os corpos de prova falharam em quantidade de ciclos proporcionais a faixa percentual de tensão máxima, e acima disso os ensaios foram interrompidos porque atingiram um patamar que pode ser considerado como vida infinita.

Foram realizados mais ensaios nas faixas tensão intermediarias, as maiores dispersões foram descartadas até se chegar ao gráfico mostrado na figura IV.5.

Conforme a seção 8 das recomendações de boas práticas DNV-RP-C301, um reparo de compósito pode ser qualificado em função de sua vida a fadiga se este for capaz de resistir no mínimo 10.000 ciclos.

Com 90% da carga o descolamento acontece logo nos primeiros ciclos. Com 80% da carga máxima os reparos falharam em torno de 10^3 ciclos. Com 70% da carga máxima apenas um dos corpos de prova conseguiu ultrapassar os 10.000 ciclos, indicando que seria arriscado trabalhar nesse nível de esforço se quisermos respeitar as recomendações da DNV. Contudo para esforços em 60% da carga máxima todos os corpos de prova conseguiram suportar mais de 50.000 ciclos durante os ensaios, o que classifica o reparo para uso nesse nível de solicitações em cargas dinâmicas, segundo as recomendações da DNV.

Capítulo V - Conclusões

Nesse trabalho foram feitos ensaios estáticos e dinâmicos em corpos de prova que representavam reparos de materiais compósitos em superfícies metálicas.

O estudo permitiu avaliar a técnica da colagem aplicada a reparo de compósito, em especial as interfases metal-adesivo e adesivo-compósito. O número de ciclos de vida a fadiga foi calculado como um parâmetro para estimar a vida útil do reparo.

Com base nos resultados obtidos foi evidenciado a influência do filete para determinadas extensões de juntas, e consequentemente para a vida dos reparos.

Nesse trabalho também foi possível compreender as variáveis intrínsecas na construção de um reparo de compósito e características passíveis de alterações para projetos futuros.

Através dos resultados foi observado para valores inferiores a 60% da carga máxima os corpos de prova começaram a apresentar vida infinita e portanto, pode-se dizer, que a partir dessa faixa, segundo as referências da DNV que foram consideradas nesse trabalho, o reparo aplicado é qualificável para uso.

A compreensão da vida útil do reparo permite que os projetos dos reparos de compósitos tornem-se mais confiáveis e mais baratos. Conclui-se portanto que a maior contribuição deste trabalho foi estimar o percentual de carga máxima aplicada ao reparo sem comprometer a confiabilidade do mesmo.

Sugestões para trabalhos futuros

Os resultados obtidos nesse estudo não têm a pretensão de encerrar o assunto. Durante a construção desse trabalho se buscou clareza e qualidade nos resultados apresentados para que futuros pesquisadores possam dar continuidade ao estudo de reparo de compósitos. Abaixo seguem algumas sugestões para trabalhos futuros que poderão contribuir para este campo de pesquisa.

- Simulação numérica da vida a fadiga do reparo usando o método dos elementos finitos.

- Realização de ensaios com diferentes condições de colagem (superfície colada maiores, tratamentos superficiais, adesivos diferentes, etc.)

- Realização de ensaios em diferentes modos (Modo I - DCB (*Double Cantilever Beam*) e Modo II - ENF (*End Notched Flexure*)).

Referências bibliográficas

ADAMS, R. D. Strength Predictions for Lap Joints, Especially with Composite Adherends. A Review. **The Journal of Adhesion**, Bristol, v. 30: 1-4, p. 219-242, Outubro 2006.

ASHBY, M. F.; JONES, D. R. H. **An introduction to microstructures, processing and design**. 2ª ediçaõ. ed. Oxford: Butterworth-Heinemann, v. II, 1998.

CALLISTER, W. D.; RETHWISCH, D. G. **Materials Science and Engineering - An introduction**. 8ª. ed. [S.l.]: John Wiley & Sons , 2010.

CEFET. Programa de Pós Graduação em Engenharia Mecânica e Tecnologia de Materiais. **Laboratório de Materiais (LAMAT)**. Disponivel em: <http://dippg.cefet-rj.br/>. Acesso em: 2 janeiro 2015.

DA FONSECA, A. H. M. **Proposta de um criterio resistência para juntas metalicas coladas**. UFF. Niteroi. 2007.

DA SILVA, L. F. M.; MAGALHÃES, A. G.; MOURA, M. F. S. F. **Juntas adesivas estruturais**. [S.l.]: Publindustria, 2007.

DA SILVA, S. A. **; Estudo do comportamento reológico dos adesivos hot melt PSA e sua relação com a composição e as propriedades adesivas**. UFRGS. Porto Alegre. 2008.

DNV. **Design, fabrication, operation and qualification of bonded repair of steek structures**. [S.l.]: DNV, 2012.

EBNESAJJAD, S. **Adhesives technology handbook**. 2ª edição. ed. Nova Iorque: Willian Andrew, 2008.

MCGEORGE, D. et al. Repair of floating offshore units bonded fibre composite materials. **Elsevier**, p. 1364-1380, Janeiro 2009.

MENICONI, L. C. M. Experimental fatigue and aging evaluation of the composite patch repair of a metallic ship hull. **Applied adhesion science**, p. 2-27, 2014.

MODEC. MODEC. **Floating Production Solutions**. Disponivel em: <http//www.modec.com>. Acesso em: 5 novembro 2014.

SIQUEIRA, C. E. R. **Analysis of Repairs in Metal-Composite**. ESSS CONFERENCE & ANSYS USERS MEETING. São Paulo: [s.n.]. maio 2014. 2014 ESSS CONFERENCE & ANSYS USERS MEETING.

WU, S. **Polymer Interface and Adhesion**. 1° Edição. ed. Nova Iorque: Marcel Dekker, 1982.

YIN, R. **Case Study Research**. 5th. ed. Thousand Oaks: SAGE, 2013.