

**CENTRO FEDERAL DE EDUCAÇÃO TECNOLÓGICA CELSO
SUCKOW DA FONSECA – CEFET/RJ**

Aderência de Reparo Compósito

Francisco Bernardo de Oliveira Cardoso
Pablo Aguiar Raposo

Prof. orientador: Sílvio Romero de Barros
Prof. coorientadora: Doina Mariana Banea

**Rio de Janeiro
Dezembro de 2017**

**CENTRO FEDERAL DE EDUCAÇÃO TECNOLÓGICA CELSO
SUCKOW DA FONSECA – CEFET/RJ**

Aderência de Reparo Compósito

Francisco Bernardo de Oliveira Cardoso
Pablo Aguiar Raposo

Projeto final apresentado em cumprimento às normas do Departamento de Educação Superior do CEFET/RJ, como parte dos requisitos para obtenção do título de Bacharel em Engenharia Mecânica

Professor Orientador: Silvio Romero de Barros
Professora Coorientadora: Doina Mariana Banea

**Rio de Janeiro
Dezembro de 2017**

Agradecimentos

Agradeço aos meus pais, Dartagnan e Lucimar, por sempre terem se esforçado para me dar a melhor educação possível, me permitindo chegar até aqui e sempre me incentivarem a nunca desistir dos meus sonhos.

Agradeço aos meus tios Luiz e Simone, por sempre serem presentes em minha vida, e me ajudando nos momentos difíceis ao longo da graduação para que eu conseguisse termina-la.

Agradeço aos meus avós Clotilde e Francisco (*in memoriam*), por me incentivarem desde criança na busca por conhecimento e por sempre me mostrarem o valor da educação.

Agradeço ao professor Silvo de Barros, por me deixar participar de suas pesquisas e atividades laboratoriais nesses quase três anos de iniciação científica, e por me passar o seu gosto pela área de materiais compósitos e pela área da pesquisa acadêmica.

Francisco Bernardo de Oliveira Cardoso

Dedico esse projeto aos meus familiares, amigos e parceiros do CEFET que me ajudaram nessa caminhada.

Pablo Aguiar Raposo

RESUMO

Devido ao grande desenvolvimento tecnológico que está ocorrendo hoje em dia, as indústrias estão sempre desenvolvendo novos processos e materiais para melhorar a produção, a fim de evitar perdas e maximizar seus lucros. Nesse sentido, o uso de materiais compósitos está crescendo cada vez mais, e uma das aplicações desenvolvidas é o uso de reparos compósitos. O presente projeto tem como objetivo realizar um estudo sobre o uso de reparos de compósitos em estruturas danificadas. Inicialmente, uma análise dos materiais utilizados sem reparo foi realizada. Em seguida, testes do tipo “peel test” foram realizados usando juntas formadas por um compósito de fibra de carbono e um substrato metálico representando a superfície a ser reparada. O processo de envelhecimento das juntas também foi estudado colocando os corpos de prova em água salgada durante 40 e 150 dias.

Palavras-chave: Compósito, juntas, teste, reparo

ABSTRACT

Due to the great technological development that is taking place nowadays, the industries are always developing new process and materials to improve the production in order to avoid losses and maximize their profits. In this sense, the use of composite materials is growing more and more, and one of the applications that has been developed is the composite repairs. The present project aims to conduct a study on the use of composites repairs in damaged structures. Initially, an analysis of the materials used without repair was performed. Then peel tests were performed using joints formed by a carbon fiber composite and a metallic substrate representing the surface to be repaired. The ageing process of the joints was also studied putting the specimens in salt water during 40 and 150 days.

Key-words: Composite, joints, test, repair

SUMÁRIO

1. Introdução.....	1
1.1. Motivação.....	1
1.2. Justificativa	1
1.3. Objetivos.....	2
1.4 Metodologia.....	2
1.5 Organização do Trabalho.....	3
2. Fundamentação Teórica.....	4
2.1. Polímeros.....	4
2.2. Copósitos.....	4
2.2.1. Compósitos tipo CFRP.....	6
2.2.2. Compósito com Matriz Polimérica.....	8
2.2.3. Compósitos Poliméricos Reforçados com Fibra de Vidro.....	8
2.2.4. Compósitos Laminados.....	9
2.3 Aplicações em reparos.....	10
2.3.1. Aplicações em reparos de tubulações.....	12
2.3.2. Aplicações em reparos de cascos de navios.....	13
3. Adesão.....	14
3.1. Definições básicas.....	14
3.2. Adesivos.....	15
3.3. Juntas coladas.....	16
3.4. Aderente ou substrato.....	17
3.5. Teorias de adesão.....	17
3.5.1. Teoria eletroestática.....	18
3.5.2. Teoria mecânica.....	18
3.5.3. Teoria de adsorção.....	19
3.5.4. Teoria de difusão.....	20
3.6. Ângulo de contato.....	21
3.7. Características principais.....	22
3.8. Vantagens e desvantagens.....	22
3.9. Seleção de adesivos.....	23
3.10. Defeitos em juntas coladas.....	24
3.10.1. Falha por camada fraca.....	24
3.10.2. Falha por concentração de tensões.....	25
3.10.3. Falha por irregularidade de superfícies.....	25
4. Efeitos ambientais.....	27
4.1. Efeitos da umidade.....	27
4.2. Efeitos da temperatura.....	28
4.3. Efeitos da salinidade.....	28

5. Tratamentos superficiais.....	29
5.1. Tipos de tratamentos superficiais.....	29
5.1.1. Jateamento com areia.....	29
5.1.2. Jateamento com granalha de aço.....	31
5.1.3. Jateamento com esferas de vidro.....	33
5.2.Importância dos tratamentos superficiais.....	34
6. Ensaio de arrancamento.....	35
6.1. Características dos ensaios de arrancamento.....	35
6.2. Ensaio de arrancamento (Floating Roller peel test).....	35
7. Procedimentos experimentais.....	38
7.1. Materiais.....	38
7.1.1. Aço A36.....	38
7.1.2. CFRP (Polímero reforçado com fibra de carbono).....	39
7.2. Corpos de prova.....	39
7.3. Métodos e experimentos.....	41
7.3.1. Envelhecimento.....	41
7.3.2. Tratamento superficial.....	42
7.3.3. Ensaio de arrancamento Peel Test.....	42
8. Resultados.....	44
8.1. Primeira etapa.....	44
8.2. Segunda etapa.....	46
8.3. Terceira etapa.....	48
9. Conclusão.....	52
Referencias bibliográficas.....	53

LISTA DE FIGURAS

FIGURA 1: Esquema de planejamento do projeto	2
FIGURA 2: Esquema de classificação para vários tipos de compósitos	5
FIGURA 3: Montagem da fuselagem do cargueiro X-55A.....	6
FIGURA 4: Representação esquemáticas de compósitos reforçados com fibras (a) contínuas e alinhadas, (b) descontínuas e alinhadas e (c) descontínuas e orientadas aleatoriamente...7	
FIGURA 5: Uso de polímeros reforçados com fibras no Airbus A380 (Partes em cinza)	8
FIGURA 6: Empilhamento de camadas sucessivas reforçadas com fibras para formar um compósito laminado.....	9
FIGURA 7: Laminado Angle-ply.....	10
FIGURA 8: Laminado Cross-ply.....	10
FIGURA 9: Reparo de tubulação utilizando compósito de fibra de carbono.....	11
FIGURA 10: Aplicação de material compósito em um segmento de duto de aço.....	12
FIGURA 11: Aplicação de material compósito em casco de navio.....	13
FIGURA 12: Estrutura interna de diferentes tipos de adesivos.....	15
FIGURA 13: Single-lap joint.....	16
FIGURA 14: Funcionamento da teoria eletroestática.....	18
FIGURA 15: Esquema da teoria da adesão mecânica.....	19
FIGURA 16a): Esquema de adesão por adsorção física.....	19
FIGURA 16b): Esquema de adesão por adsorção química.....	20
FIGURA 17: mecanismo de adesão por difusão.....	20
FIGURA 18: a) sem molhabilidade, b) molhabilidade parcial, c) boa molhabilidade [20].....	21
FIGURA 19: Distribuições de tensões em uma junta colada.....	26
FIGURA 20: Irregularidades na superfície de uma junta colada.....	26
FIGURA 21: Processo de jateamento com areia.....	30
FIGURA 22: Granalhas de aço esféricas.....	31
FIGURA 23: Granalhas de aço angular.....	33

FIGURA 24: Granalha de vidro usada no jateamento.....	34
FIGURA 25: Máquina utilizada para ensaio de arrancamento floating roller peel test [9].....	36
FIGURA 26: Resultado obtido no ensaio de arrancamento.....	37
FIGURA 27: Esboço do corpo de prova.....	40
FIGURA 28: Corpos de prova submetidos ao processo de envelhecimento no LADES.....	41
FIGURA 29: Esquema de ensaio de arrancamento.....	43
FIGURA 30: Resultados do ensaio CFRP Rígido – Aço Flexível após 40 dias de envelhecimento.....	44
FIGURA 31: Corpos de prova envelhecidos 40 dias no tanque após ensaio de arrancamento	45
FIGURA 32: Resultados do ensaio CFRP Rígido – Aço Flexível após 150 dias de envelhecimento.....	46
FIGURA 33: Corpos de prova envelhecidos 150 dias no tanque após ensaio de arrancamento	47
FIGURA 34: Resultados do ensaio CFRP Rígido – Aço Flexível envelhecido fora das condições de salinidade e umidade.....	48
FIGURA 35: Corpos de prova envelhecidos 150 dias fora do tanque após ensaio de arrancamento.....	49

LISTA DE TABELAS

TABELA 1: Composição química do Composto Polimérico com Fibra de Vidro.....	9
TABELA 2: Características das granalhas de aço.....	32
TABELA 3: Composição química e propriedades mecânicas do ASTM A-36.....	39
TABELA 4: Propriedades mecânicas do adesivo NVT.....	40
TABELA 5: Substrato e tamanho das granalhas.....	42
TABELA 6: Carregamentos resultantes do ensaio CFRP Rígido – Aço Flexível envelhecido 40 dias.....	45
TABELA 7: Carregamentos resultantes do ensaio CFRP Rígido – Aço Flexível envelhecido 150 dias.....	47
TABELA 8: Carregamentos resultantes do ensaio CFRP Rígido – Aço Flexível sem envelhecimento em condições salinas.....	49
TABELA 9: Forças máximas de arrancamento obtidas.....	50
TABELA 10: Forças mínimas de arrancamento obtidas.....	51

Capítulo 1

Introdução

Na indústria é comum materiais se danificarem seja por corrosão, fadiga ou sofrendo um grande impacto. Muitos métodos podem ser utilizados para fazer o reparo desses materiais e este projeto avaliará o uso de materiais compósitos para fazer tal reparo.

A utilização de compósitos representa uma alternativa para reparos visto que são materiais com propriedades bem específicas, como seu baixo peso, que podem promover reparo bem-sucedido a um preço mais baixo que com outros materiais.

Neste projeto vamos fazer experimentos para avaliar os benefícios e os malefícios da utilização deste tipo de material em alguns tipos de reparo e compará-los com outros utilizados na indústria.

Para isso utiliza-se uma metodologia a qual será composta de ensaios de arrancamento em juntas híbridas compostas de um material compósito de fibra de carbono e aço, com suas dimensões normatizadas, tentando reproduzir as condições de contorno, fazendo os resultados serem os mais próximos possíveis da realidade em que esse tipo de material será aplicado.

1.1. Motivação

Com o uso crescente dos compósitos nas mais diferentes indústrias, e com o aumento da utilização de colagens entre dois substratos diferentes, tornaram-se necessários estudos e pesquisas nessas áreas, fazendo com que se tenha cada vez mais entendimento e compreensão sobre esse tipo de uso para os materiais compósitos e suas aplicações para a engenharia mecânica.

Analisando especificamente o uso dos compósitos em reparos estruturais, os quais utilizam juntas coladas híbridas compostas de compósito e metal, esse projeto busca se aprofundar nas análises dessas juntas, considerando vários aspectos, como por exemplo as condições ambientais e influências que essas juntas sofrerão nas diferentes aplicações de seu uso.

1.2. Justificativa

Este Projeto tem como objetivo o estudo da aderência de uma junta híbrida de compósito-metal no uso de reparos. O estudo nessa área é importante pois estes reparos vêm se tornando cada vez mais comuns, e por isso cada vez mais estudos são necessários para se ter um entendimento melhor das características dessas juntas, visando assim, a diminuição dos riscos de falha durante sua aplicação.

1.3 Objetivos

O objetivo principal deste trabalho é o estudo da aderência de um material compósito aplicado em um reparo industrial. Para isso, será feita uma análise experimental de juntas coladas formadas por um compósito e um metal e, espera-se observar o seu comportamento mecânico, através de ensaios de arrancamento relacionando com estes as influencias provocadas pelo ambiente, como a umidade e a salinidade.

1.4 Metodologia

A metodologia deste projeto consistiu primeiramente de uma pesquisa bibliográfica em busca de informações mais atuais a respeito dos materiais compósitos, bem como o seu uso em reparos estruturais. Com o conhecimento dos tipos de materiais compósitos e metálicos que são utilizados em juntas para reparos, o próximo passo foi estudar os tipos de tratamentos superficiais aplicados nesses materiais e as condições ambientais envolvidas no processo.

A segunda etapa consistiu na seleção dos materiais que seriam utilizados e do tratamento térmico a serem utilizados.

Com os materiais escolhidos, na terceira etapa do trabalho houve a encomenda dos corpos de prova, com dimensões especificadas.

Na quarta etapa, os ensaios foram realizados em vários corpos de prova. O ensaio utilizado foi o ensaio de arrancamento, também conhecido como "peel test".

Na quinta etapa os resultados obtidos foram analisados numericamente e graficamente, fazendo com que se chegasse nas conclusões apresentadas nesse trabalho. Na figura 1 é possível ver o esquema de etapas o projeto.

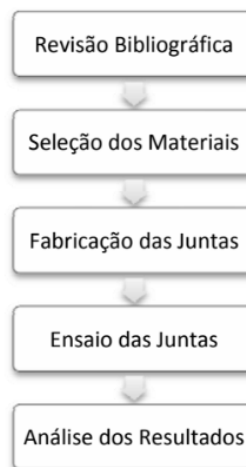


Figura 1:Esquema de planejamento do projeto [fonte: própria]

1.5 Organização do Trabalho

Este Projeto foi organizado em 8 etapas. Primeiramente, no capítulo 2, é feita uma introdução e explicação referente ao tema do projeto à fim de proporcionar ao leitor um maior entendimento do experimento realizado e também mostrar as principais características dos materiais usados. O capítulo 3 apresenta detalhes a respeito do fenômeno de adesão, que é o principal responsável pela união entre juntas coladas, mostrando os requisitos necessários para uma boa adesão, além das limitações e problemas que podem ocorrer. O capítulo 4 mostra o efeito dos fenômenos ambientais nas juntas coladas, em especial o efeito da umidade da salinidade, os quais são os efeitos mais aparentes no projeto.

Já o capítulo 5 aborda o tema de tratamentos superficiais, mostrando cada um dos tratamentos existentes que são voltados para materiais que serão colados e a sua importância na limpeza da superfície dos materiais. O capítulo 6 diz respeito aos ensaios comumente usados no estudo de juntas coladas, com uma ênfase maior ao ensaio de arrancamento, que foi o ensaio utilizado nos experimentos do presente trabalho, mostrando suas variações e sua efetividade na obtenção de resultados. Capítulo 7 é referente aos experimentos em si, mostrando passo a passo como foi o processo de preparação e confecção dos corpos de prova, assim como as circunstâncias em que ocorreu os ensaios.

Por sua vez, os dois últimos capítulos são referentes aos resultados obtidos com os ensaios de arrancamento e as conclusões que puderam ser tiradas a respeito desse tipo de ensaio e do comportamento dos corpos de prova.

Capítulo 2

Fundamentação Teórica

Neste capítulo, será apresentado uma revisão sobre polímeros e compósitos e suas principais características, com um enfoque mais específico nos materiais que serão utilizados nesse projeto. Seguidamente, será introduzido uma descrição sobre juntas coladas.

2.1. Polímeros

Polímeros são macromoléculas formadas por unidades estruturais chamadas de monômeros as quais são um tipo de material que possui um alto peso molecular, variando de 10.000 a mais de 1.000.000 g/mol. Polímeros estão presentes de uma forma numerosa na natureza, em tecidos animais e vegetais. Sendo assim, polímeros consistem de várias unidades estruturais ligadas por covalência [1].

Um dos tipos de classificação dos polímeros se dá baseado pela sua resposta à elevação de temperatura. Nesse formato, pode-se dizer que existem dois tipos de polímeros: os termoplásticos e os termofixos. Como principal característica, os termoplásticos amolecem em altas temperaturas e endurecem com sua diminuição. Esse processo de aquecimento e arrefecimento pode ser feito diversas vezes sem afetar as propriedades do polímero. Já os termofixos, por outro lado, amolecem apenas na primeira vez que são aquecidos. Um processo de cura acontece, ou seja, ocorre o endurecimento do material e depois disso caso haja um novo reaquecimento, o material se degrada [2].

2.2. Compósitos

Muitas aplicações industriais exigem combinações de propriedades dificilmente alcançadas por materiais metálicos, cerâmicos ou poliméricos convencionais. Os materiais compósitos podem suprir essa necessidade por conter características como baixo peso e alta resistência, o que é muito importante para aplicações aeronáuticas e subaquáticas, por exemplo [3,4].

Podemos definir materiais compósitos como sendo materiais de moldagem estrutural, formados por uma fase contínua polimérica (matriz) e reforçada por uma fase descontínua (fibras) que se agregam físico-quimicamente após um processo de crosslinking polimérico (cura) [5].

Compósitos são materiais que podem ser encontrados na natureza ou criados pelo homem, tendo-se registros muito antigo de uso desses materiais. Os primeiros materiais

compósitos criados pelo homem foram palha e lama combinados, formando tijolos para construção civil. Essas formações de tijolos foram documentadas em pinturas em túmulos egípcios. Compósitos como pau a pique e concreto são utilizados pelo homem a mais de seis mil anos. O uso dos compósitos como sendo uma classe de materiais distinta aconteceu por volta da metade do século XX através do desenvolvimento de materiais mais complexos como os polímeros reforçados com fibra de vidro [6].

Assim, cientistas e engenheiros, combinaram materiais diferentes para alcançar um novo tipo de material com características mecânicas superiores. Os compósitos gerados, foram constituídos de duas ou mais fases, sendo uma chamada de fase matriz e as outras podem ser denominadas fases dispersas. As propriedades resultantes serão geradas em função das propriedades das fases constituintes, da quantidade e geometria de cada fase [3].

Dentre muitas características possíveis para um compósito, as mais impactantes para a indústrias são as de: leveza e facilidade de transporte, resistência química, resistência as intempéries, flexibilidade arquitetônica, durabilidade, fácil manutenção, alta resistência mecânica e possibilidade de ser um produto feito sob medida [5].

A figura 2 mostra um esquema de classificação para vários tipos de compósitos, mostrando três classificações sendo essas: compósitos reforçados com partículas, reforçados com fibras e estrutural. Cada classificação possui suas subclassificações, como mostrado na figura:



Figura 2: Esquema de classificação para vários tipos de compósitos [3]

2.2.1 Compósitos tipo CFRP

Os compósitos do tipo CFRP são compósitos filamentosos constituídos por mais de 90% de carbono e filamentos de 5 a 15 μm de diâmetro. As fibras são unidas entre si por um polímero denominado de matriz (resina), que funciona como uma espécie de cola, que liga as fibras na forma de fios, dá forma ao material e distribui a força no interior do conjunto.

Os objetivos de projetos de um compósito reforçado por fibras incluem, normalmente, alta resistência e/ou rigidez em relação ao peso. Essas características são expressas em termos dos parâmetros de resistência específica e módulo específico, aos quais correspondem, respectivamente, ao limite de resistência à tração e o peso específico e entre o módulo de elasticidade e o peso específico. Os compósitos reforçados com fibras com resistência e módulos de elasticidade extremamente elevados têm sido fabricados empregando materiais de baixo peso específico tanto para fibra quanto para a matriz [3].

As características mecânicas de um compósito reforçado por fibras não dependem somente das propriedades das fibras, mas também do grau pelo qual uma carga aplicada é transmitida para as fibras pela fase da matriz. A figura 3 ilustra um exemplo de aplicação deste compósito, na montagem da fuselagem de um cargueiro.



Figura 3: Montagem da fuselagem do cargueiro X-55A. [4]

A resistência e outras propriedades dos compósitos reforçados com fibras sofre uma influência significativa de 3 fatores. São eles:

- O arranjo ou a orientação das fibras uma em relação às outras;
- A concentração das fibras;
- A distribuição das fibras;

São possíveis duas formações em relação à orientação das fibras: um alinhamento das fibras paralelo ao eixo longitudinal em uma única direção ou um alinhamento totalmente aleatório. Geralmente, as fibras contínuas são alinhadas, enquanto as fibras descontínuas podem ser alinhadas, orientadas aleatoriamente ou parcialmente orientadas. As melhores propriedades são alcançadas em um compósito quando suas fibras estão orientadas de forma contínua [3]. Essas diferentes orientações e concentrações das fibras são mostradas na Figura 4.

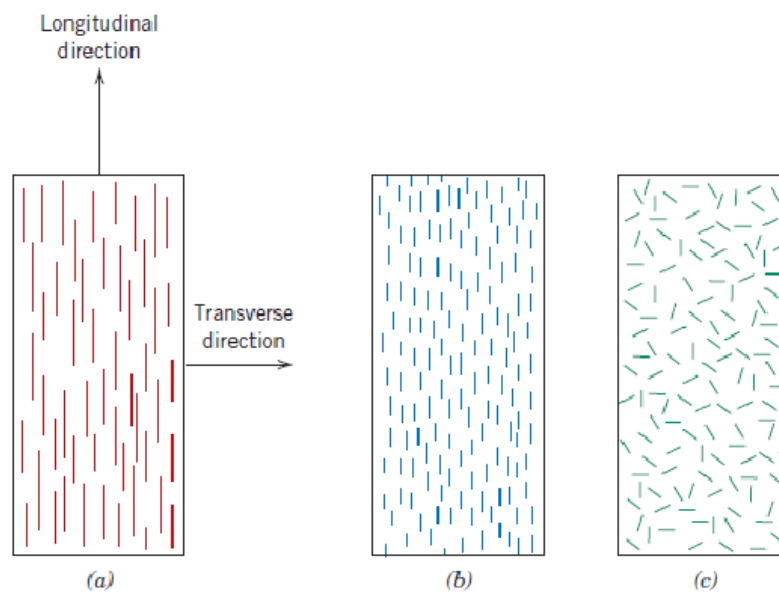


Figura 4: Representação esquemática de compósitos reforçados com fibras (a) contínuas e alinhadas, (b) descontínuas e alinhadas e (c) descontínuas e orientadas aleatoriamente [3].

As fibras podem ser divididas em três classificações diferentes: whiskers, fibras e arames. Os whiskers são monocristais muito finos que possuem um comprimento extremamente elevado em relação ao seu diâmetro e, apesar da sua elevada resistência, não é extensivamente utilizado devido ao seu alto valor no mercado. Já os arames possuem grandes diâmetros e normalmente são de aço, molibdênio ou tungstênio. São usados como reforços radial de aço nos pneus de automóveis, nas carcaças de foguetes e em mangueiras de alta pressão. Os classificados como fibras, possuem pequenos diâmetros e podem ser tanto policristalinos quanto amorfos (sem forma definida). São geralmente polímeros ou cerâmicas (vidro, carbono, óxido de alumínio, carbetto de silício, grafite, etc.). A fase matriz dos compósitos reforçados com fibra pode ser de metal, polímero ou cerâmica. Geralmente, utiliza-se os metais e polímeros, pois estes materiais conferem ductilidade ao compósito. Na figura 5 é possível observar um avião no qual algumas partes foram substituídas por polímeros reforçados com fibra [3].

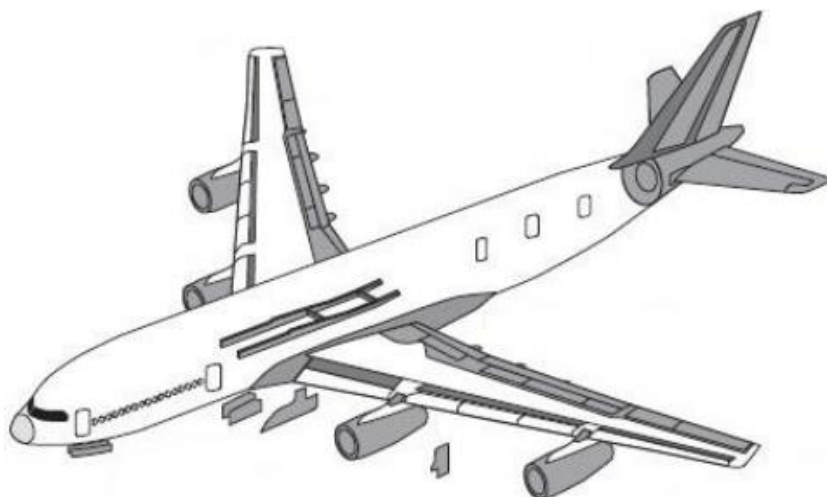


Figura 5: Uso de polímeros reforçados com fibras no Airbus A380 (Partes em cinza) [4]

A matriz tem várias funções, entre elas ligar as fibras umas às outras e atuar como o meio pelo qual a tensão, que é aplicada externamente, seja transmitida e distribuída para as fibras. Outra função, é proteger as fibras contra danos superficiais decorrentes de abrasão mecânica ou de reações químicas com o ambiente. Por fim, a matriz faz com que as fibras fiquem separadas umas das outras e, por causa da sua baixa dureza e plasticidade, ajuda a prevenir a propagação de trincas de uma fibra para outra [4].

2.2.2 Compósitos com matriz polimérica

Os compósitos com matriz polimérica (PMC – Polymer-matrix composites) são materiais que possuem uma resina polimérica como a sua fase matriz e com fibras comumente de vidro, carbono ou aramida como meio de reforço. Esses materiais são usados em grande quantidade devido às suas boas propriedades, como resistência, rigidez, facilidade de fabricação e custo. Esses compósitos podem ser divididos em: plásticos reforçados e compósito avançado. A distinção desses dois grupos se dá pelo nível das propriedades mecânicas (geralmente resistência e rigidez). Porém, não há um limite concreto que separem os dois. Os plásticos reforçados são relativamente baratos e consistem tipicamente de uma resina poliéster reforçada com uma fibra de vidro de baixa rigidez. Já os compósitos avançados, seu uso apenas nos últimos 15 anos, tem como principal aplicação o setor aeroespacial. Possui resistência e rigidez superiores e são relativamente caros [7].

2.2.3. Compósitos poliméricos reforçados com fibras de vidro

A fibra de vidro é o tipo de fibra mais utilizado em compósitos com matriz polimérica. Isso se dá principalmente ao seu baixo custo, elevada resistência química, excelentes

propriedades de isolamento e uma boa resistência à tração. Suas desvantagens estão associadas ao seu baixo módulo de elasticidade, alta densidade, alta dureza, sensibilidade à abrasão durante manuseio e a baixa resistência à fadiga [8]. A resistência à tração nas fibras de vidro está no intervalo entre 1,72 e 2,07 GPa.

Sua diminuição acelera conforme a superfície entra em contato com cargas cíclicas, já que esse material não possui uma boa resistência à fadiga. A resistência a tração também é reduzida em ambiente hidrotérmico desfavorável (umidade e temperatura). Xu Jiang [9] realizou um experimento para verificar como um compósito reforçado com fibra de vidro se comporta em um ambiente com essas características e confirmou que um ambiente quente e molhado pode acelerar significativamente o processo de enfraquecimento do compósito por umidade. Na tabela 1 é possível ver a composição do Composto Polimérico de Fibra de Vidro.

Tabela 1: Composição química do Composto Polimérico com Fibra de Vidro [3].

Composição (% Peso)					
	SiO ₂	CaO	Al ₂ O ₃	B ₂ O ₃	MgO
Fibra de vidro	55	16	15	10	4

2.2.4. Compósitos laminados

O compósito laminado é o compósito estrutural mais comum. É composto por lâminas que são empilhadas (laminado) e subsequentemente unidas umas às outras, de tal modo, que a orientação da direção de alta resistência varie com cada camada sucessiva como pode ser visto na figura 6. Um compósito laminado apresenta resistência relativamente alta em várias direções no plano bidimensional, porém é muito difícil prever seu complexo processo de falha, já que cada camada possui diferentes orientações de fibra [10].

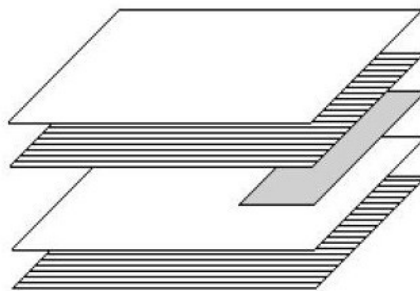


Figura 6: Empilhamento de camadas sucessivas reforçadas com fibras para formar um compósito laminado [10]

Compósitos laminados têm sido estudados por muitos devido a sua elevada resistência e rigidez comparado ao seu peso e o fato de que as direções das suas propriedades mecânicas podem ser adaptadas conforme a aplicação do material. Existem diversos tipos de orientação das lâminas, os dois mais aplicados estão citados abaixo [10].

Na figura 7 é possível ver como se dá o esquema do laminado "angle-ply", onde os ângulos estão no formato $/\theta/ -\theta/ \theta/ -\theta/$.

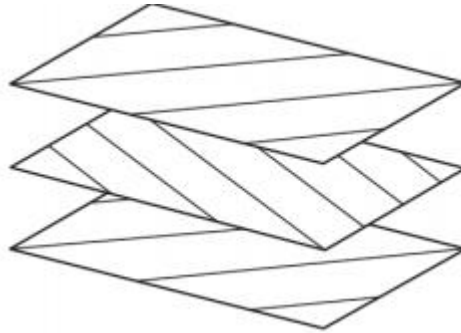


Figura 7: Laminado angle-ply [10]

Na figura 8 é mostrado o esquema do laminado "cross-ply", onde as fibras estão com as camadas na forma $/0^\circ/90^\circ/0^\circ/90^\circ/$.

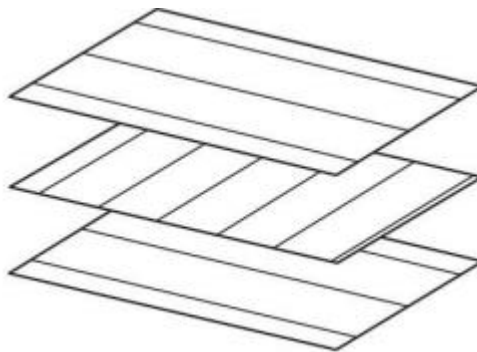


Figura 8: Laminado Cross-ply [10]

2.3 Aplicações de compósitos em reparos

A utilização de materiais compósitos é cada vez mais diversificada e estudada. Uma das áreas em que esse tipo de material passou a ter grande aplicação foi na área de reparo. Além de fazer parte de componentes essenciais para indústrias como a petrolífera e a de aviação, tem se tornado uma prática industrial comum o emprego desse material como reparo e reforço de estruturas metálicas.

A deterioração de pontes, viadutos e edifícios resultante do envelhecimento, projeto e construção deficiente, ou até mesmo falta de manutenção adequada tem levado a degradação

crecente de estruturas. A necessidade de reparos atua em conjunto com a necessidade de reforço de estruturas, para que essas possam desempenhar suas funções com segurança. [11].

Muitas vezes o projetista está limitado na escolha do material a ser utilizado para o reparo, seja por conta de agressividade vinda do meio, que amplifica a degradação do material, seja por atuar em materiais muito sensíveis, por exemplo, do ponto de vista magnético. [11,12]

Algumas das áreas que mais vem usado esse tipo de material, destacando-se a indústria naval e a indústria petrolífera e essas duas áreas comumente são áreas onde suas estruturas enfrentam ambientes extremamente agressivos, o que exige a utilização de materiais com elevada resistência à corrosão e tenacidade, propriedades presentes nos aços, especialmente, aços inoxidáveis ou aços que passaram por algum tipo de tratamento químico.

Devido a isso, a estrutura base dessas indústrias é constituída por esse tipo de material metálico. Dentre as aplicações dos compósitos nessas indústrias, pode-se citar o uso como material base para tubulações e estruturas de grades de piso, guarda corpos e sistema de bandejamento elétrico, além de sua aplicação como camisas de proteção de tubo. No entanto, algumas das aplicações mais recentes encontram-se no reparo de dutos, de tubulações metálicas, de cascos e tanques de embarcações, de forma a manter a integridade e garantir a vida útil desses componentes nas mais diversas condições ambientais.

O maior benefício em utilizar compósitos para o reparo é sua elevada resistência a corrosão, baixo peso e fácil aplicação. Por outro lado, também existem desvantagens na utilização deste tipo de material, em especial sua baixa resistência ao fogo e fragilidade a longo prazo em ambientes com baixo índice de raios UV. A figura 9 mostra um exemplo de utilização de reparo com material compósito em forma de "fita", em uma tubulação.



Figura 9: Reparo de tubulação utilizando compósito de fibra de carbono [13]

2.3.1 Aplicações de compósitos em reparos de tubulações

Tubulações de transferência de óleo e gás estão diariamente sujeitas à acidentes de grandes proporções, assim, no momento em que um dano é verificado, medidas corretivas são tomadas para reparar o dano e evitar os possíveis acidentes, além de evitar a inutilização do condutor.

O reparo em dutos deve ser sempre acompanhado de um controle de evolução de corrosão. Sendo assim mais indicado para reparo externo, pois se interno, dificulta o processo de controle. Reparos internos de dutos por polímeros são considerados provisórios.

As técnicas mais utilizadas para reparar os dutos são [13]:

- Corte e substituição da região danificada: utilizada nos casos de corrosão de grau avançado, transtornos operacionais e logísticos, perda de estanqueidade. O processo ocorre mediante parada operacional e devem ser desenvolvidos testes de desempenho posteriores.
- Dupla calha soldada: envolvimento do tubo com duas meia-calhas, soldadas entre si;
- Dupla calha com preenchimento: Abarcamento do tubo por meio de luva e preenchimento da região anelar com resina. As calhas são ligadas por solda ou flanges.

Considerando essas técnicas é possível perceber desvantagens significativas, como a parada operacional ou necessidade de solda, demora no reparo, e risco de acidentes. O uso de materiais compósitos tem se mostrado uma excelente opção para reparar danos em tubulações de aço, pois minimiza tais problemas [13].

A principal desvantagem dos compósitos é a falta de resistência ao fogo e degradação sob a luz ultravioleta induzindo a problemas a longo prazo. Na figura 10 é possível ver um exemplo de uma tubulação com revestimento de polímero para seu reparo.



Figura 10: Aplicação de material compósito em um segmento de duto de aço [14]

2.3.2. Aplicações em reparos de cascos de navios

Apesar de a ideia de uso de materiais compósitos ser muito assimilada aos reparos de tubulações ou outras estruturas de formatos tubulares, uma outra aplicação onde esse material vem sendo cada vez mais utilizado é na indústria naval, em especial no reparo de cascos de navios, que são em geral voltados para a indústria petrolífera. A figura 11 mostra o momento da aplicação de compósitos para fazer reparos em um casco de um navio.



Figura 11: Aplicação de material compósito em casco de navio [15]

3. Adesão

Importantes aplicações tecnológicas dos materiais, como reparos, requerem que os mesmos sejam aderentes a outras substâncias, como por exemplo um polímero em um material metálico. Além disso, a aderência tem influência preponderante em muitas aplicações práticas, como fiação de polímeros, adesão, estabilidade de dispersões e molhamento de sólidos por líquidos.

Sendo assim, neste capítulo serão abordados os principais conceitos a respeito de adesão, que é um fenômeno que ocorre em juntas coladas, além das principais teorias a seu respeito, e os principais motivos que podem levar à sua falha.

3.1 Definições Básicas

Pode-se definir adesão como a manifestação de forças atrativas entre duas substâncias, como superfícies ou átomos. Trazendo essa definição para o ambiente dos materiais compósitos, esse seria o fenômeno responsável pela união do adesivo com o substrato. Se tratando de adesão, existem alguns fatores que devem ser considerados e que afetarão as suas características [16]:

- Presença de grupos funcionais superficiais produzidos por algum tipo de tratamento superficial;
- Orientação, arranjo atômico, cristalinidade e propriedades químicas dos materiais.
- Constituição química dos elementos;
- Difusividade dos elementos de cada constituinte.

As moléculas superficiais em um sólido ou em um líquido são influenciadas por forças moleculares desbalanceadas e, portanto, possuem energia adicional em contraste com as moléculas no interior do líquido ou do sólido. Essa energia é classificada como energia livre interfacial. Para que uma junta colada tenha suas propriedades preservadas, alguns cuidados devem ser tomados para garantir o máximo possível de adesão entre materiais. Dentre eles, é de grande importância que se tenha uma boa preparação superficial, tanto na parte de limpeza para retirar impurezas, quanto na parte de rugosidade. Mesmo sendo imperceptível sem o auxílio de um microscópio, a rugosidade tem um grande papel em relação à adesão do adesivo ao substrato. Esse fato ocorre devido a maior ou menor área de contato entre o adesivo e o substrato de acordo com a maior ou menor rugosidade do material [16].

3.2. Adesivos

Pode-se definir adesivos como um tipo de material que tem a característica de unir materiais quando aplicado entre eles e de resistir às forças de separação que esses materiais irão realizar. Atualmente os adesivos são compostos basicamente por dois componentes principais que são uma base e um catalisador. Além disso, na composição dos adesivos também é possível encontrar outros componentes como aceleradores, inibidores, solventes e diversos outros, cada um com uma aplicação específica [17].

Devido à sua base polimérica, é possível classificar os adesivos em termoplásticos e termoendurecidos, assim como os compósitos de matriz polimérica. A principal diferença que pode ser observada entre essas duas classificações para os adesivos, são seus graus de reticulação, ou seja, a capacidade de formar ligações químicas e a quantidade presente das mesmas. Nesse âmbito, os adesivos termoendurecidos possuem uma reticulação maior e isso traz como consequência propriedades mecânicas superiores quando comparados aos termoplásticos, podendo inclusive ter resistência maior a alguns fatores ambientais como a temperatura e a umidade. Apesar disso, uma desvantagem que os adesivos termoendurecidos possuem é que eles não podem ser aquecidos repetidas vezes após a sua cura, diferente do termoplástico. Isso acontece pois após a cura inicial, a estrutura do adesivo fica fraca devido ao excesso de temperatura e acaba oxidando e tento as suas cadeias moleculares quebradas. Apesar disso, esse tipo de adesivo pode ser aquecido até certas temperaturas não muito altas, o que é chamado de reaquecimento [17].

Já os adesivos termoplásticos, mesmo possuindo propriedades consideravelmente inferiores aos termoendurecidos, possuem a vantagem de serem adesivos recicláveis, ou seja, podem ser reutilizados, bastando apenas serem aquecidos. Esse comportamento ocorre devido ao fato de que a cura desse tipo de adesivo é diferente dos termoendurecidos, pois não ocorre de forma que as moléculas estejam em uma estrutura reticulada. Durante a colagem, o adesivo é fundido e aplicado sobre a superfície que se deseja colar, e conforme o adesivo vai diminuindo sua temperatura, ocorre a cristalização e conseqüentemente a união dos materiais a serem colados. A figura 12 representa a estrutura interna dos adesivos termoplásticos e termorrígidos (termoendurecidos) [17].

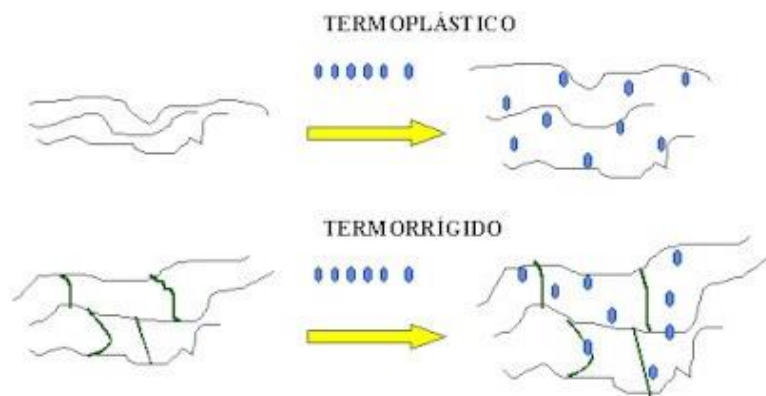


Figura 12: Estrutura interna de diferentes tipos de adesivos [17]

Apesar desse tipo de adesivo poder ser reciclado, é importante lembrar que ele possui um limite de ciclos, ou seja, a medida que forem se realizando ciclos térmicos nesse adesivo, ele irá se degradar, chegando ao ponto em que não poderá mais ser utilizado. É importante notar que número elevado de ciclos térmicos pode causar a degradação do material. Além disso, possuem temperatura de serviço mais limitada, podem apresentar fluência mesmo a baixas temperaturas [14].

Nos dias de hoje, os tipos de adesivos que mais vem sendo utilizado são os de resina epóxi, fenólicos, formaldeídos, poliuretanos e cianoacrilatos. Para o uso em altas temperaturas, os mais indicados são os poliaromáticos, que também podem ser chamados de poliamidas e bismaleimidias [14].

3.3. Juntas coladas

Uma junta pode ser fixada por meio de parafusos, rebites ou adesivos. O comportamento dessa junta é influenciado principalmente pelo tipo de compósito. Além disso, o meio de fixação também provoca consequências nas propriedades da junta. as juntas com adesivos (juntas coladas) fornecem uma transferência de carga bem mais eficiente que as juntas com parafuso ou rebites (juntas mecânicas). Nas juntas coladas, a carga é transmitida de um substrato (componente) para o outro, de forma suave, através de uma camada adesiva justaposta que serve como um meio para transmissão de carga. A maior diferença entre a ligação através de um adesivo e as juntas mecânicas é a área de conexão [11].

A área de juntas coladas é bem maior, o que faz com que a concentração de tensão seja minimizada e a distribuição da tensão seja mais uniforme ao longo da região de sobreposição. Porém, outras características tornam as juntas coladas mais atrativas que as juntas mecânicas, entre elas, a resistência superior à fadiga; a excelente relação peso-resistência; o custo de processo de fabricação e a melhor aparência visual [18].

A Figura 13 mostra o modelo geométrico para uma junta colada do tipo cisalhamento simples (single-lap joints – SLJ), que tem como característica ser eficiente e simples e é bastante utilizada em aplicações industriais, além de ser modelo padrão para testes de adesivos [18].

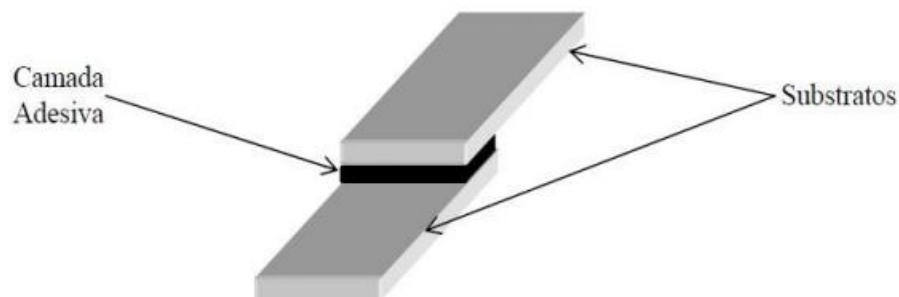


Figura 103: Single-lap joint [9]

Shiuh-Chuan [19] realizou um estudo interessante fazendo uma análise da tensão em uma junta do tipo single-lap com dois compósitos como substrato e desenvolveu um modelo analítico que quando comparado com o modelo em elementos finitos, apresentam resultados semelhantes. Obteve-se algumas conclusões interessantes, como:

- O ponto de maior concentração de tensão ocorre nas extremidades livres da região com adesivo. A tensão de cisalhamento e normal na camada adesiva são responsáveis para o começo do processo de falha da junta.
- O aumento da espessura do adesivo conduz para que a região com menor tensão de cisalhamento seja na região colada. Assim, uma camada mais espessa de adesivo torna a junta mais resistente.
- À medida que as espessuras dos substratos sejam diferentes, o maior valor de tensão é encontrado na extremidade livre da região colada mais perto do componente mais fino.

3.4. Aderente ou substrato

Aderente ou substrato pode ser definido como o material a ser unido pelo adesivo. Diversos tipos de materiais são utilizados com o adesivo como método de adesão, principalmente metais, polímeros e compósitos. Existem duas propriedades dos aderentes que são de extrema importância: a energia de superfície e suas condições superficiais.

Quanto maior a energia superficial do material, mais facilmente o adesivo pode ser aplicado na superfície do aderente e, conseqüentemente, maior a área de contato entre adesivo e aderente, melhor a ligação. Desse modo, existe uma maior facilidade na obtenção de uma junta adesiva entre substratos metálicos, que possuem elevada energia superficial em relação à junção adesiva entre substratos poliméricos que apresentam baixa energia superficial.

Na presença de camadas fracamente ligadas a superfície do aderente, como por exemplo, óxidos e contaminantes como óleo, gordura, etc. a formação da ligação entre adesivo e aderente fica prejudicada, podendo provocar um elo fraco de resistência da junta. Sendo assim, é quase imprescindível a realização de um bom tratamento superficial na maioria dos aderentes [20].

3.5. Teorias de adesão

Várias teorias foram criadas e propostas para poder explicar o fenômeno de adesão, e todas elas foram associadas com resultados experimentais. Apesar disso, ainda não existe uma teoria que seja completa para o estudo desse fenômeno. Sendo assim, pode-se concluir que o fenômeno de adesão pode ser tratado como uma combinação das diversas teorias e estudos do mesmo com o passar do tempo. Como se sabe, a função de um adesivo é realizar a união entre duas ou mais partes através de combinações de diversas forças, as quais trabalham entre si, e

influenciam umas às outras. Segundo Sampaio [20], dentre todas as teorias que explicam a adesão, quatro delas podem ser citadas por apresentar destaques nos seus estudos: Teoria eletroestática, teoria mecânica, teoria da adsorção, teoria da difusão.

3.5.1. Teoria eletroestática

Essa teoria é utilizada em adesivos que são sensíveis à pressão. No âmbito geral essa teoria propõe que a adesão entre superfícies acontece através da transferência de elétrons pela interface, fazendo com que sejam criadas cargas positivas e cargas negativas, as quais irão se atrair. No caso de uma colagem onde geralmente se tem duas superfícies unidas por um adesivo, são formadas duplas camadas elétricas de cargas opostas, que provocam o surgimento de forças que tendem a impedir a separação das superfícies. Existem diversos estudos e experimentos que comprovam essa teoria, porém alguns pesquisadores acreditam que o surgimento das forças eletroestáticas seria o resultado da junta e não a sua causa. Na figura 14 é possível ver de forma esquematizada o funcionamento dessa teoria [21].

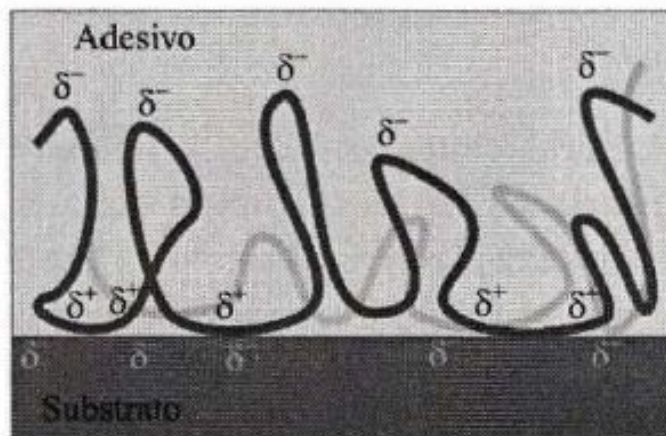


Figura 14: Funcionamento da teoria eletroestática [21]

3.5.2. Teoria mecânica

Essa teoria foi a primeira a ser proposta, e se originou no princípio de que as superfícies dos substratos não são totalmente lisas, ou seja, são compostas por picos e vales de determinado tamanho e perfil. Sendo assim essa teoria propõe que a adesão ocorre através da penetração do adesivo nos poros e cavidades na superfície do substrato. Além disso, o adesivo deve molhar o substrato e também ter as propriedades adequadas para penetrar nos poros e aberturas em tempo razoável [21].

Apesar dessa teoria ser uma das mais aceitas, ela tem uma falha, pois é possível que ocorra uma boa adesão em superfícies que são extremamente lisas. Isso acaba reforçando o fato de que uma única teoria não pode ser levada em consideração de forma absoluta. Na figura 15 é demonstrado como é o processo de adesão mecânica.

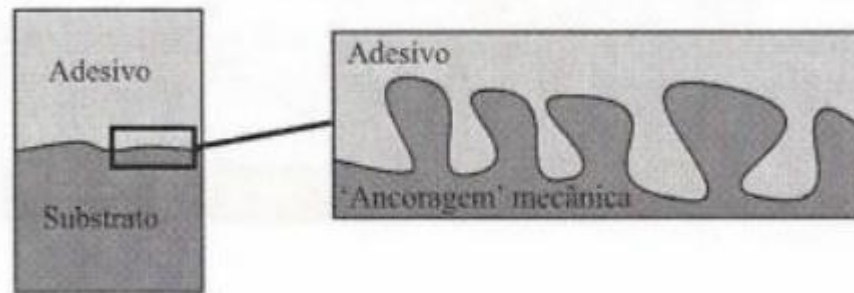


Figura 15: Esquema da teoria da adesão mecânica [21]

3.5.3. Teoria de adsorção

Pode-se definir adsorção como a adesão de moléculas de um fluido a uma superfície sólida. O grau de adsorção depende da pressão, temperatura e área de superfície. As forças que atraem o adsorvato (ação de adsorção e absorção simultânea) podem ser químicas ou físicas.

Nessa teoria, são consideradas forças de superfície. As forças físicas, chamada força de van der Waals atuam no nível molecular, considerando a molhabilidade e a existência da camada limite [21]. Já as forças químicas ocorrem no nível atômico através das ligações químicas primárias, com ligações iônicas, covalentes e metálicas. A figura 16a mostra como essas forças atuam por adsorção física e a figura 16b mostra a atuação das forças por adsorção química.

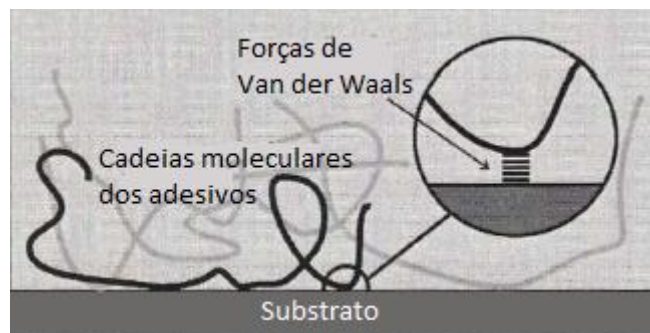


Figura 16 a): Esquema de adesão por adsorção física [21]



Figura 16 b) Esquema de adesão por adsorção química [21]

3.5.4. Teoria da difusão

Nessa teoria a adesão ocorre através da difusão de segmentos de cadeias de polímeros, a nível molecular, ou seja, a adesão ocorre através da difusão da cadeia molecular da superfície de um polímero sobre a superfície de outro polímero, o que resulta em uma ponte através da interface. A figura 17 mostra a nível molecular como ocorre a adesão por difusão [21].

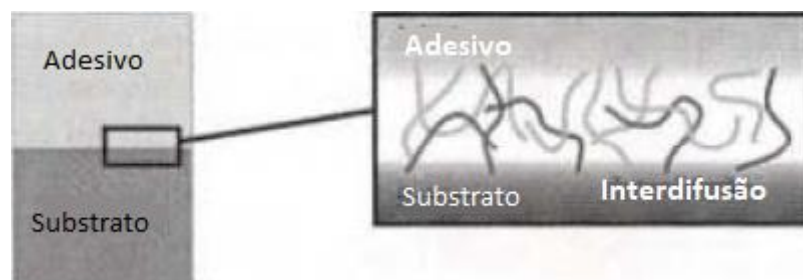


Figura 17: mecanismo de adesão por difusão [21]

Vale salientar que este método de adesão não ocorre para todos os materiais. Ocorre apenas em materiais poliméricos, e não é aplicável em materiais a ligar que não são solúveis ou quando o movimento da cadeia de polímeros é restringido por sua estrutura cristalina. Quando estes são diferentes, chamamos de heteroadesão, quando a adesão ocorre entre um material polimérico e ele próprio, chamamos de auto adesão

3.6. Ângulo de contato

Quando um líquido é sobreposto em uma superfície sólida, podem ocorrer dois fenômenos: o líquido se espalha na superfície ou tende a formar uma gota esférica. O ângulo formado entre o líquido e o sólido, considerando estas duas situações opostas, vai indicar o grau de interação entre os dois materiais e a magnitude desse ângulo vai depender do tipo de líquido e do tipo de substrato sólido. Esse ângulo é chamado de ângulo de contato e é formado por um plano tangente à gota formada a o plano que contém a superfície onde o líquido se encontra [22].

O tipo de superfície do substrato sólido também pode influenciar no ângulo de contato. Quanto menor o ângulo de contato, melhor a molhabilidade da superfície. Sendo assim pode-se dizer que o ângulo de contato representa uma medida quantitativa do processo de molhabilidade. Um dos princípios da molhabilidade é baseado no fato de que um material de menor energia superficial se espalha em uma superfície de maior energia superficial. Devido a esse fato, tratamentos de superfície, como por exemplo o jateamento, aumentam a energia superficial, melhorando assim a molhabilidade [22]. Na figura 18, é possível ver o comportamento de líquidos em diferentes superfícies sem molhabilidade, com molhabilidade parcial e com boa molhabilidade, respectivamente.

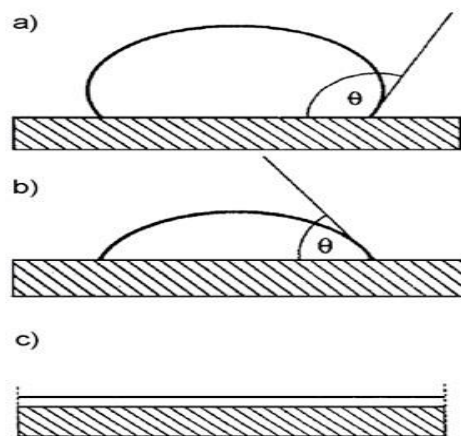


Figura 18: a) sem molhabilidade, b) molhabilidade parcial, c) boa molhabilidade [22]

Nesse âmbito o conceito de energia superficial pode ser aplicado e melhor compreendido tratando-se de líquidos. Durante a aplicação de um adesivo, os átomos e as moléculas do mesmo poderão se mover livremente, e procurar uma posição de menor energia potencial, onde as forças atrativas e repulsivas estejam em equilíbrio. Essa diferença entre energias fará com que por exemplo, uma gota de água tenha a forma esférica. Da mesma forma, a adesão de um material sobre outro será tanto melhor quando maiores forem as energias de superfícies envolvidas [7].

3.7. Características principais

A utilização de juntas adesivas vem encontrando cada vez mais utilização na indústria. Atualmente, o uso de adesivos estruturais na colagem de metais é muito utilizado na indústria aeronáutica, automobilística e de construção civil. Desta forma, o uso de adesivos em ligações estruturais continua a ser um tema de investigação [22].

Um dos requisitos importantes das juntas coladas é que continue a suportar cargas estáticas e dinâmicas, em condições de serviço, durante o seu ciclo de vida. O seu comportamento perante condições ambientais adversas e diferentes acabamentos superficiais do substrato constituem dois parâmetros importantes para se ter atenção.

O desenvolvimento da ciência dos adesivos possibilitou a introdução de adesivos sintéticos que eram produzidos em harmonia com a utilização que lhe estava destinada, ou seja, com propriedades adequadas no sentido de suportarem as solicitações em serviço. Os adesivos utilizados na construção mecânica são, por natureza, da família dos materiais poliméricos. Os adesivos sintéticos resultam de reações de polimerização entre monómeros, que dependendo de sua estrutura, reatividade e proporção na mistura, originam polímeros de cadeias macromoleculares lineares ou em rede tridimensional [7].

Atualmente nas aplicações de reparo, o adesivo que mais vem sendo utilizado são os adesivos baseados em polímeros sintéticos capazes de se aderir à superfície de diferentes substratos, resistindo aos esforços e a separação da junta. Desse modo, é de extrema importância que a superfície onde o adesivo será aplicado, o substrato, seja limpa e polida, dando a melhor aderência possível [22].

3.8. Vantagens e desvantagens

Existem diversas vantagens na utilização de adesivos em relação a outros métodos de união de chapas. Entre as principais vantagens pode se citar as seguintes:

- Bom comportamento à esforços de tração e compressão.
- Distribuição mais uniforme de tensões ao longo da área ligada que a maioria dos outros métodos de união.
- Amortecimento de vibrações que permite a absorção parcial das tensões e contribui para uma maior resistência a fadiga.
- Podem ser utilizados em conjunto a outros métodos de união para aproveitar as vantagens citadas e vedar a região entre os dois materiais.

As principais desvantagens na utilização de adesivos que se pode citar são:

- Apresentam pior comportamento aos esforços de arrancamento e clivagem comparados com outros materiais

- Necessidade de um determinado período de tempo para a reticulação do adesivo
- Dependendo do tipo de adesivo é necessária a aplicação de temperatura e pressão para a fabricação da junta
- É imprescindível a realização de tratamento superficial no aderente para a fabricação da maioria das juntas adesivas, assim garantindo uma melhor adesão [21].

3.9. Seleção de adesivos

A primeira consideração a ser feita na seleção de um adesivo é a escolha, entre os vários tipos de adesivos, aquele que eficientemente une os materiais de interesse. Muitos fatores devem ser considerados na escolha de um adesivo para determinada aplicação e condições de serviço. Já que não existe nenhum adesivo universal que desempenhe todos os requisitos de aderência para todos os materiais, para todas as aplicações possíveis, é, então, necessário conhecer as propriedades de ligações desejadas, e decidir quais são as mais importantes ou não para cada aplicação. Os materiais a serem unidos, a força da ligação e durabilidade, tipo de montagem e considerações de custos são geralmente os maiores fatores a serem avaliados. Além desses fatores o grau de aderência, tipo de esforço (tensão, compressão, cisalhamento, dentre outros), dimensões dos materiais e montagem, condições ambientais são outros fatores importantes.

Para John Shields [23], os fatores a serem considerados na escolha de um adesivo são:

- **Materiais a serem unidos:** Devem ser consideradas as propriedades mecânicas e físicas dos materiais aderentes; o grau de preparação das superfícies para a união; a espessura e a resistência, particularmente onde as constantes elásticas do adesivo são relevantes à junção. Diferenças na flexibilidade ou expansão térmica entre aderentes podem introduzir tensões internas na linha de cola, que podem levar a falhas prematuras de uma união antes da imposição de algum esforço externo e perigo quando a temperatura de serviço for abaixo de zero. O objetivo é ter o mínimo de tensões entre os materiais aderentes e é desejável escolher um adesivo que seja semelhante aos materiais aderentes em relação às propriedades reológicas, expansão térmica e resistência química.
- **Compatibilidade de aderentes e adesivos** A escolha imprópria de um adesivo pode causar danos em uma montagem onde aderentes e adesivos são incompatíveis. Exemplos: corrosão de partes metálicas por adesivos ácidos, migração de plastificantes de um material plástico flexível para o adesivo com consequente perda de adesão na interface, e ação do solvente do adesivo e voláteis na aderência plástica. O potencial de corrosão de um adesivo é frequentemente acentuado devido ao controle ineficiente do processo de mistura e condições de cura. Quando possível, é desejável submeter amostras dos materiais a serem unidos junto com suas especificações e propriedades aos fabricantes de adesivos para a escolha de um adesivo adequado.

- Esforços de uniões: As propriedades das forças coesivas dos adesivos variam muito de materiais; de macios a duros. Adesivos com forças mais baixas ou mesmo pouco superior do que as necessárias não devem ser consideradas, a menos que sejam importantes para outra propriedade. Para aplicações onde o adesivo tem que satisfazer determinada força é necessário considerar os esforços as quais a junção será submetida. De importância são a natureza e o grau do esforço e as condições sobre as quais são aplicadas.
- Condições de processamento: As condições sobre as quais o adesivo é aplicado são critérios importantes para a seleção de um adesivo correto. Fatores típicos envolvidos em montagens incluem: forma do adesivo; método de preparação e uso; tempo de armazenagem; vida útil; método ou equipamento necessário para a união; as variáveis de processamento (tempo permitido entre a demão e aderência, tempo e temperatura de secagem, temperatura de aplicação e cura, pressão e tempo de aplicação requeridos, velocidade de desenvolvimento da força aderente a várias temperaturas); propriedades como: odor, inflamabilidade e toxicidade do adesivo, as quais exigem equipamentos extras e medidas de segurança.
- Custos: Propriedades mais adequadas devem ser mais importantes na seleção de um adesivo do que considerações de custos. Entretanto, onde a seleção indicar que vários adesivos são válidos a escolha baseada em custos, torna-se matéria de economia para um processo de união como um todo.
- Outras considerações especiais que causam menor impacto: exemplo: propriedades ópticas e elétricas.

3.10. Defeitos em juntas coladas

Apesar de o método de colagem ser cada vez mais utilizado atualmente e possuir boas propriedades mecânicas, assim como qualquer outro meio de união, ele é suscetível à falhas, as quais podem ocorrer por diversos fatores, desde problemas do próprio material, até mesmo problemas durante a execução da colagem por falha do operador. Dentre os diversos defeitos que podem ocorrer em uma junta colada, 3 são os mais comuns de ocorrerem, que são os defeitos devido à camada fraca, devido à concentração de tensões e o mais comum de todos, os defeitos causados por irregularidades superficiais. Ambos serão discutidos a seguir.

3.10.1 Falha por camada fraca

A falha por camada fraca é um tipo de falha que ocorre na junta e que geralmente é causada devido às propriedades distintas entre as superfícies e o interior dos materiais a serem colados, fazendo com que uma camada fraca seja formada. Essa diferença entre a superfície e o interior do material pode ocorrer por diversos motivos, dentre eles a inclusão de gases ou vazios gerando

a formação de bolhas, concentração de constituintes diferentes na superfície e formação de óxidos superficiais com baixa energia de ligação [24].

3.10.2 Falha por concentração de tensões

O segundo fator que pode gerar falha em uma junta colada é a concentração de tensões. Essa falha ocorre quando a distribuição de tensões sobre uma junta colada não é uniforme, ocorrendo concentração de tensões em suas extremidades e fazendo com que algumas áreas da junta tenham uma baixa resistência. Esse tipo de falha explica o motivo de existência de um limite para o comprimento de sobreposição, que será o comprimento no qual esse tipo de falha não representa perigo para a junta. Na figura 19 é possível ver como as tensões se comportam em uma junta colada [21].

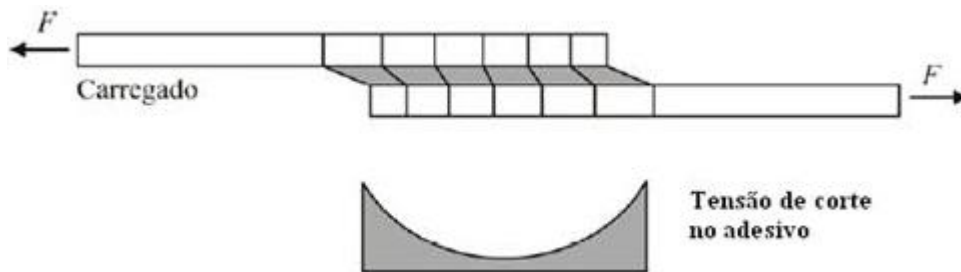


Figura 19: Distribuições de tensões em uma junta colada [21]

3.10.3 Falha por irregularidades de superfícies

A terceira falha que pode ocorrer em uma junta colada, e também considerada a que mais ocorre é a falha devido às irregularidades superficiais, que estão ligadas diretamente à formação e propagação de trincas na junta. Essas falhas podem ser originadas principalmente por uma má preparação das superfícies antes de ser realizada a colagem. Outro fator que pode contribuir é a não uniformidade do adesivo, fazendo com que algumas partes da junta tenham uma camada maior de adesivo do que outras. Por isso é ideal que as superfícies sejam completamente limpas para retirar as impurezas e que sejam aplicados alguns tratamentos superficiais, para que esse tipo de falha seja evitado e a junta colada tenha qualidade. Na figura 20 é possível notar as irregularidades na superfície e ter uma noção de como isso afetará a junta em seu estágio final de colagem [21].

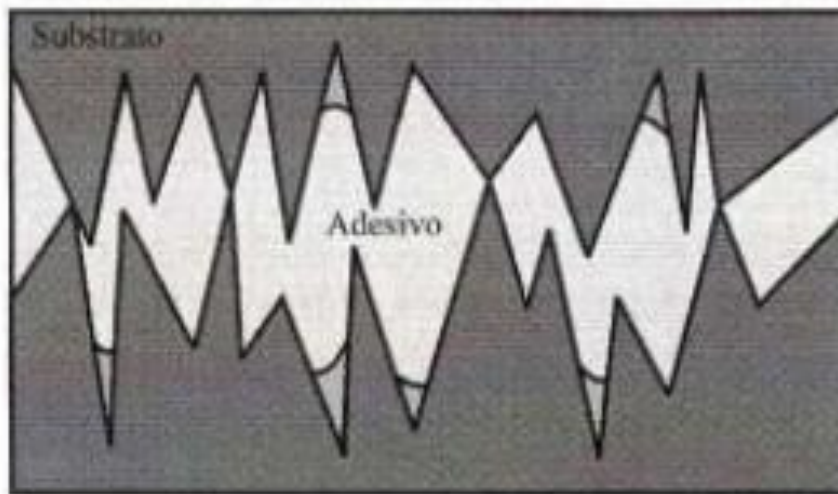


Figura 20: Irregularidades na superfície de uma junta colada [21].

4. Efeitos ambientais

Apesar de serem materiais de extrema resistência mecânica e por possuir diversas aplicabilidades, os materiais compósitos ainda hoje tem algumas limitações em seu uso e essas limitações estão diretamente ligadas com efeitos causados pelo ambiente, tanto em sua estrutura, quanto na estrutura interna de juntas coladas.

Sendo assim, nesse capítulo serão abordados os principais efeitos que podem afetar de alguma maneira o uso de materiais compósitos, além de algumas soluções existentes para minimizar os malefícios causados por esses efeitos, permitindo assim o uso desse tipo de material em condições extremas de trabalho.

4.1. Efeitos da umidade

O efeito da umidade em uma junta adesiva é um dos focos desse estudo, pois na indústria petrolífera, especialmente, no Brasil, o petróleo encontra-se no fundo do oceano e mesmo a maioria das unidades "on-shore", estão localizadas próximas ao litoral. Sendo assim, a umidade tende a ser elevada nessas regiões e conseqüentemente um estudo dos danos causados às juntas adesivas nessas condições é de extrema importância. A água reduz a resistência das juntas adesivas, causando deterioração. Por intermédio da realização de testes de recuperação das juntas, foi confirmada a hipótese de que a ação da água envolve a quebra de ligação covalentes que foram formadas durante o processo de cura.

Esses testes foram feitos colocando as juntas em um ambiente seco onde era possível voltarem as ligações de hidrogênio. Kwei [25] verificou que não houve recuperação total da resistência das juntas. Tais pressupostos indicam a hidrólise de determinadas ligações covalentes da estrutura.

A presença de umidade provoca formação de poros, o que permite o agrupamento de moléculas de água, contribuindo para a destruição de sua integridade física e mecânica, pois atuam como iniciadores de fendas na estrutura do adesivo.

A água pode entrar na junta por difusão, através da matriz ou transportada ao longo da interface do metal com o adesivo. Depende do tipo do adesivo, de sua espessura e da temperatura [25].

4.2. Efeitos da temperatura

As variações extremas de temperatura podem causar alterações nas propriedades mecânicas da junta, especialmente no adesivo e na interface. Quando se trata de exposição a altas temperaturas, os materiais poliméricos tendem a degradar-se, principalmente, em adesivos que apresentam baixa reticulação.

A elevadas temperaturas os adesivos possuem uma maior tenacidade e menor resistência mecânica. Quando a exposição ocorre por longo período de tempo, iniciam-se processos de oxidação e alterações químicas e físicas, especialmente, na interface da junta adesiva.

A baixas temperaturas as tensões internas tendem a aumentar na junta devido a diferença entre os coeficientes de expansão térmica entre o adesivo e o substrato. Além disso, a baixas temperaturas, há uma maior dificuldade na libertação de bolhas de ar aprisionadas no processo de formação da junta, o que leva a um aumento ainda maior das tensões internas podendo levar ao aparecimento de trincas [25].

4.3. Efeitos da salinidade

Existem diversos estudos que demonstram que elevadas condições de umidade e temperatura levam a deterioração das propriedades mecânicas das juntas adesivas, afetando não apenas o adesivo e a interface como também os substratos. No entanto, não existem muitos estudos que demonstrem as consequências do ambiente salino com elevada umidade caracterizados pelo litoral e oceano adentro, em juntas adesivas. [25]

Assim, com a necessidade de utilização de juntas adesivas em ambientes expostos ao efeito da salinidade, como na indústria petrolífera, é de extrema importância que esta condição seja estudada. Este projeto tem como um de seus objetivos investigar se a salinidade afeta ou não a aderência de uma junta adesiva.

Capítulo 5

Tratamentos superficiais

Com o crescente uso de materiais adesivos na obtenção de juntas unidas, tornou-se cada vez mais necessário a obtenção de juntas unidas com boa qualidade de adesão. Porém para se atingir uma alta qualidade na junta, são necessárias algumas medidas, as quais terão como objetivo principal, melhorar a aderência do adesivo com os substratos, visto que existe uma forte dependência entre as microrrugosidades existentes na superfície dos aderentes e o comportamento que a junta colada terá [26].

A princípio pode parecer um processo simples, porém a dependência propriedades-rugosidade é muito complexa, e diversos fatores podem afetar essa dependência, tanto para trazer benefícios, quanto para trazer malefícios, principalmente em juntas que estarão suscetíveis a condições ambientais extremas, como é o caso das juntas analisadas nesse projeto. Sendo assim, esse capítulo falará sobre os diferentes tipos de tratamentos superficiais realizados em juntas coladas e sua importância na obtenção de uma junta de alta qualidade e alta aderência.

5.1. Tipos de tratamentos superficiais

Existem diversos tipos de tratamentos superficiais para o tratamento dos substratos que formarão a junta colada, porém o mais utilizado para juntas compostas por materiais compósitos é o jateamento.

Esse tratamento superficial a frio, consiste em atingir a superfície do substrato com um fluxo propulsor de material abrasivo em alta velocidade, fazendo com que a superfície sofra erosão, tornando-a rugosa, além de remover boa parte dos seus contaminantes. Para esse tipo de tratamento, o meio propulsor na maioria dos casos é o ar comprimido, porém também pode ser usado como meio propulsor, a água. O que torna os tratamentos diferentes entre si é o material abrasivo usado, e sendo assim, os três tratamentos superficiais mais utilizados em juntas coladas são mostrados a seguir.

5.1.1. Jateamento com areia

O jateamento com areia, também chamado de "sand blast", é um tipo de jateamento no qual o abrasivo que é projetado na superfície a ser tratada, são partículas de areia. Esse tratamento ocorre através de um fluxo propulsor, o qual faz a areia chocar-se com a superfície em alta velocidade, removendo assim os contaminantes da mesma, assim como possíveis pinturas ou regiões de oxidação presentes. Por ser um processo que tem como objetivo a maior qualidade de aderência possível da superfície trabalhada, antes de ocorrer o jateamento, a superfície deve ser limpa a fim de remover gorduras e óleos que podem ser encontrados. Para essa remoção comumente são usados solventes [26].

Com relação ao tipo de areia usada nesse tipo de jateamento, pode-se optar por uma infinidade de tipos, e o uso de cada uma vai depender do tipo de trabalho a ser realizado, e do material que será jateado. Dentre todos os tipos, a areia mais usada nesse tipo de jateamento é a areia de sílica branca, composta principalmente por cristais de quartzo. Esse tipo de areia é a mais usada porque não se trata apenas de boa qualidade e durabilidade do material, mas também é devido ao fato de ser um tipo de areia de baixo custo e que pode ser encontrada facilmente em lojas especializadas. Além disso, a areia de sílica também pode ser reutilizada até certo ponto, o que não pode ocorrer com outros tipos de areias ao contrário de alguns outros materiais [26]. Outro tipo de areia que pode ser usada, é a areia de praia, porém ela apresenta algumas desvantagens, dentre elas a grande presença de sal em sua composição, o qual contribui para a corrosão e ferrugem do material jateado, em especial ao usado no presente projeto. A figura 21 mostra o operador utilizando o jato de areia.



Figura 21: Processo de jateamento com areia [26].

Apesar de sua facilidade de uso e baixo custo, esse tipo de jateamento tem uma grande desvantagem, pois ele traz riscos para a saúde, já que esse tipo de jateamento gera grande quantidade de poeira no ambiente em que é utilizado [26].

A areia de jateamento também é avaliada por granulometria, que é o tamanho de partículas conhecidas como "grãos". O revestimento resultante após o método de jateamento é determinado pela areia, com os grãos mais finos deixando um acabamento mais suave e os grãos grossos deixando um acabamento áspero. Outros fatores além do tamanho das partículas afetam o processo de jateamento, tais como a forma do grão de areia [27].

Assim como antes do jateamento, após o jateamento a superfície também deve ser limpa para tirar as partículas de areia que podem ter se prendido na superfície e para retirá-las geralmente utilizam-se escovas ou jato de ar seco. Apesar de ser um processo ainda bastante usado, atualmente existem outros materiais abrasivos que substituem com grande eficiência a areia e que possuem muitas vantagens em relação à areia, como poderá ser visto adiante [27].

5.1.2. Jateamento com granalha de aço

Esse tipo de jateamento, também chamado de "brit blast", é o tipo de jateamento no qual o abrasivo são granalhas de aço, as quais podem ser esféricas ou angulares. As granalhas de aço são um dos mais importantes materiais de jateamento disponíveis no mercado e foi um dos primeiros tipos de abrasivos produzidos artificialmente. Além disso, com o tempo de uso e após diversos tipos de pesquisa a respeito de seu uso, ele foi ganhando cada vez mais reconhecimento pela sua alta eficiência e uniformidade quando comparada com a areia [28].

Apesar disso, inicialmente esse tipo de granalha era feito de ferro fundido, e devido a isso, fragmentavam-se durante o impacto com a superfície jateada, fazendo com que o seu consumo fosse elevado, o que muitas vezes prejudicava tanto a superfície, quanto o equipamento responsável pelo jateamento. Na figura 22 é possível ver uma das configurações existentes de granalha de aço que é a granalha de aço esférica.

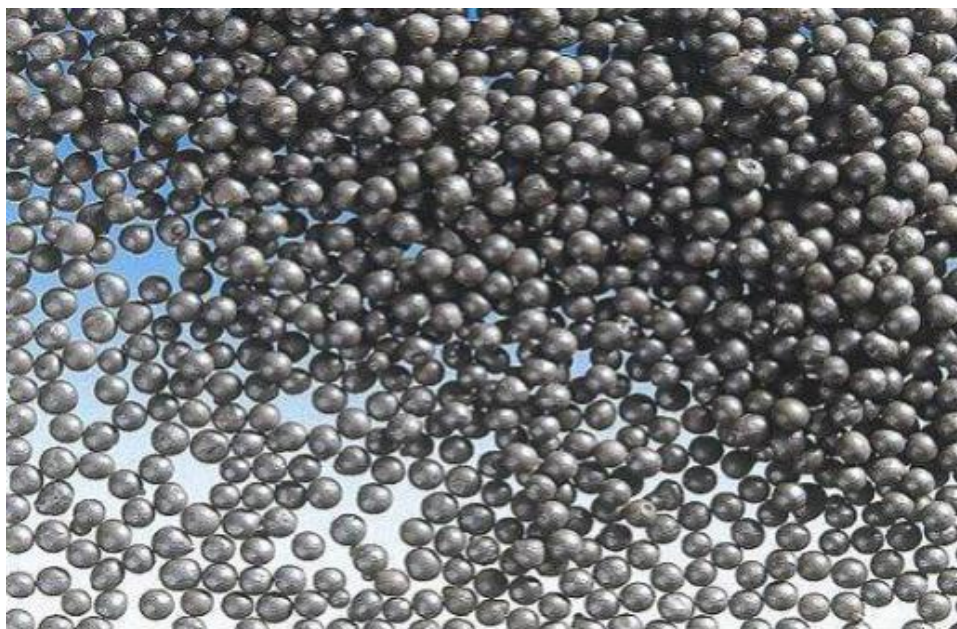


Figura 22: Granalhas de aço esféricas [28]

Mesmo as granalhas iniciais de ferro fundido tendo se tornado bem populares nas indústrias, elas só começaram a ser comercializadas no Brasil a partir dos anos 60 e desde de então passaram a dominar o mercado devido às suas vantagens sobre a areia sílica, as quais são listadas abaixo:

- Baixo custo operacional se comparada com a areia, pois mesmo tendo um custo maior de compra, a granalha de aço pode ser usada por 300 a 400 ciclos de uso, enquanto a melhor das areias pode ser usada somente por no máximo 3 ciclos
- A velocidade de limpeza utilizando granalha de aço é bem maior que a de areia e também mais eficiente pois como o aço é mais denso que a areia, suas granalhas podem

ser impulsionadas com uma velocidade maior e como também é um material mais duro, a limpeza na superfície se torna mais fácil

- A uniformidade no acabamento da superfície é maior, devido ao tamanho uniforme das granalhas, que se deve ao fato de serem feitas artificialmente
- Uma das vantagens mais importantes com relação a granalha de areia é com relação a saúde do usuário que realiza o processo de jateamento pois a geração de pó criada pela granalha de aço é consideravelmente menor do que a gerada com areia, visto que a fragmentação do aço é menor e, portanto, o único pó gerado é o que se encontra na superfície jateada [28].

Na tabela 2, é possível observar as principais características das granalhas de aço, em especial sua composição química, mostrando a porcentagem máxima de cada elemento dentro de sua estrutura.

Tabela 2: Características das granalhas de aço [28]

Material	Composição Química	Dureza Média (HRC)	Densidade Média (g/cm³)	Microestrutura
Aço	C= 0,8-1,20 Mn= 0,35-1,20 Si 0,40 mín. P 0,05 máx. S 0,05 máx.	43-65	7,3	Martensita revenida com finos carbonetos bem distribuídos

Ainda dentro das granalhas de aço, podemos encontrar dois tipos existentes, cada um com suas vantagens e desvantagens. Esses dois tipos são a granalha de aço esférica, e a granalha de aço angular.

A granalha esférica, também chamada de "shot", geralmente é usada para eliminar rebarbas grandes nas superfícies e para o uso no "shot peening". Como são pouco abrasivas, seu custo é pequeno, e sua durabilidade é grande [27].

Já a granalha angular é formada por pequenos pedaços de aço, podendo ser esféricos ou não e são mais empregadas para limpeza em geral, além de ser a mais indicada para usar em superfícies que sofrerão algum tipo de colagem devido ao fato de ser mais abrasiva que a esférica. Assim como a granalha esférica, ela também é econômica devido a sua alta durabilidade [28]. Na figura 23 é possível notar a diferença mais aparente da granalha angular com a esférica, que é justamente o seu formato, que diferente da esférica, é composto por várias granalhas de diferentes angulações.



Figura 23: Granalhas de aço angular [28]

5.1.3. Jateamento com esferas de vidro

Esse tipo de jateamento, como o próprio nome já diz, é um tipo de jateamento, onde o abrasivo são esferas de vidro. Basicamente esse tipo de jateamento segue o mesmo princípio que os dois anteriores, pois o processo também consiste em atingir a superfície a qual deseja-se fazer a limpeza, utilizando ar comprimido. Diferente dos outros dos métodos, o jateamento com esferas de vidro oferece algumas vantagens para o processo de acabamento superficial, e dentre elas a que mais se destaca é a ausência de contaminação por parte do vidro pois como o vidro é um material virtualmente inerte, o mesmo não reage quimicamente com nenhum tipo de superfície que será tratada, mantendo as mesmas propriedades de antes do jateamento [27]. Na figura 24 é mostrado um exemplo de granalha de vidro existente no mercado.



Figura 24: Granalha de vidro usada no jateamento [27]

Uma outra vantagem com a qual a esfera de vidro está relacionada, é na pouca formação de pó durante o jateamento, podendo muitas vezes produzir a mesma quantidade ou até menos pó do que as granalhas de aço.

5.2. Importância dos tratamentos superficiais

Tratamento ou preparação de superfícies é definido como uma ou uma série de operações incluindo limpeza, remoção de partículas soltas e mudanças físicas ou químicas da superfície a qual um adesivo é aplicado para colagem [27].

O tratamento superficial é um fato de extrema importância na resistência de uma junta colada, e muitas vezes o seu mal emprego pode causar sérios problemas, dentre eles a ruptura adesiva, pois devido ao mal-uso do tratamento superficial, as forças de ruptura necessárias podem ser menores, fazendo com que a junta se rompa com esforços muito abaixo do suportado.

Em colagem, o preparo da superfície tem como objetivo aumentar a polaridade da mesma, melhorando a molhabilidade do adesivo, e criando pontos de interação entre o adesivo e o substrato. Já algumas superfícies de metais são cobertas por camadas de óxidos, tornando-a altamente polar e apta para uma boa ligação adesiva. Preparação de superfície destina-se a aumentar a resistência à colagem na superfície do substrato e, principalmente, melhorar a durabilidade do adesivo, especialmente quando expostos a ambientes úmidos [26].

Portanto, um tratamento eficiente e de qualidade é extremamente importante para que a durabilidade da junta colada seja a maior possível e que a sua ruptura com determinados esforços não seja um fator para se preocupar.

Capítulo 6

Ensaio de arrancamento

Os ensaios de arrancamento são uma metodologia muito utilizada nos testes de qualidade e resistência de juntas coladas. Os adesivos tendem a apresentar resistência ao arrancamento e clivagem piores do que à tração e compressão e por conta disso, esse tipo de ensaio deve ser realizado, com a junta nas condições mais próximas possíveis das que estará exposta em trabalho, com o objetivo de que os resultados encontrados sejam os mais fiéis possíveis [29].

Sendo assim, os ensaios de arrancamento foram a metodologia escolhida para realizar a análise dos corpos de prova desse projeto, simulando um reparo industrial utilizando juntas coladas compostas de aço e compósito. Esse capítulo destina-se a abordar como são realizados os ensaios de arrancamento e os conceitos mais importantes relacionados ao mesmo.

6.1. Características dos ensaios de arrancamento

Os ensaios de arrancamento podem ser realizados de diferentes maneiras, podendo ser realizados entre dois substratos flexíveis ou entre um substrato rígido e um substrato flexível. Nesse projeto foi utilizado um substrato rígido e um substrato flexível para análise desejada, sendo o substrato flexível composto por uma chapa de aço A36 e o substrato rígido composto por material compósito de fibra de carbono. O ensaio de arrancamento consiste do arrancamento do substrato flexível do corpo de prova, separando-o do substrato rígido com uma velocidade constante através de uma máquina de ensaios mecânicos com garras especiais capazes de realizar essa função de ensaio. As curvas de força e deslocamento, assim como os dados numéricos são obtidos pelo próprio equipamento [29].

6.2 Ensaio de arrancamento (Floating roller peel test)

O "floating roller peel test", é um ensaio de arrancamento cuja norma é a ASTM D 3167[30], e consiste do arrancamento do substrato flexível separando-o do substrato rígido. Este método é simples e eficiente para se verificar a adesão de uma junta adesiva e por isso vem sendo muito utilizado com esse propósito. A figura 25 mostra um equipamento utilizado para este tipo de ensaio.



Figura 25: Máquina utilizada para ensaio de arrancamento Floating roller peel test [29]

Apesar de ser muito utilizado na análise de aderência em juntas coladas, a norma que rege esse tipo de ensaio é específica apenas para juntas adesivas compostas de substratos metálicos e devido a isso se fez necessário o estudo da empregabilidade desse ensaio em casos de substratos não metálicos. Nesse sentido, foi realizado um estudo pela pesquisadora S. Freitas e J. Sinke [31], no qual foram ensaiados, três tipos de juntas coladas compostas de metal – metal, compósito – metal e compósito – compósito. Os resultados foram obtidos e comparados, chegando se a conclusão de que o ensaio do tipo floating roller peel test pode ser também utilizado para substratos não metálicos.

Os ensaios realizados por S. Freitas e J. Sinke [31] constataram que o fator mais importante para a comparação da adesão entre diferentes tipos de juntas coladas é o modo de ruptura e não a carga utilizada. Além disso, os ensaios também mostraram que quando o substrato flexível era composto pelo material metálico, a carga de arrancamento chegou a ser até 10 vezes maior que nos corpos de prova cujo substrato flexível era o compósito. A figura 26 mostra as curvas obtidas após o ensaio das juntas adesivas compostas por compósito - compósito (CPT) e alumínio-alumínio (FRPT), e a diferença entre as cargas de arrancamento.

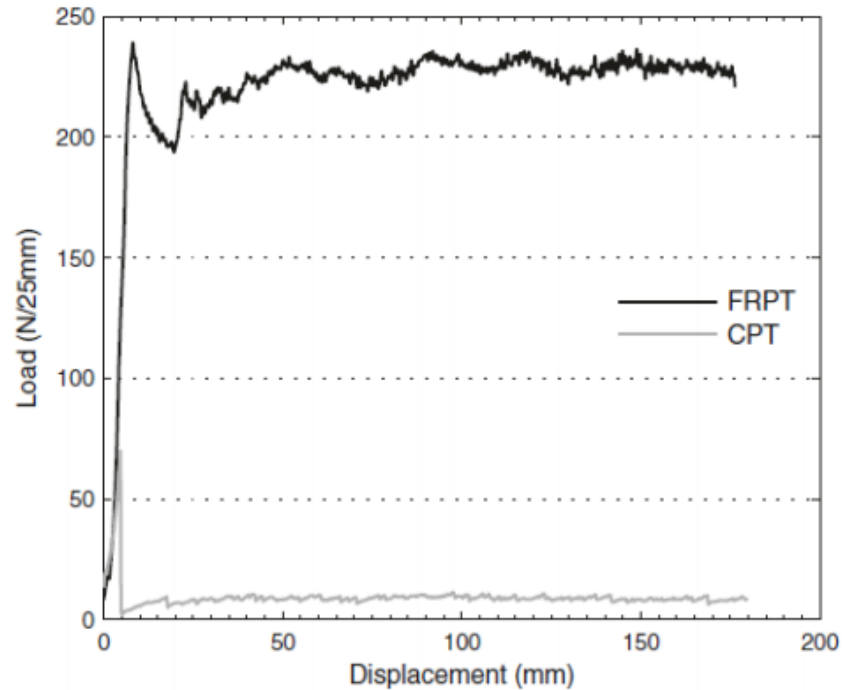


Figura 26: Resultado obtido no ensaio de arrancamento [31]

Com os resultados da figura 26, concluiu-se que a causa da grande diferença entre as cargas era o fato de que foi necessária uma quantidade maior de energia para a ocorrência da deformação plástica no metal do que no compósito como substratos flexíveis, e não devido a uma pior ligação entre o adesivo e os diferentes tipos de substrato.

Essa conclusão pôde ser tomada, pois mesmo nos casos em que ocorriam falhas predominantemente coesivas do adesivo, ou seja, a falha ideal para medir a resistência ao arrancamento do adesivo, a grande diferença mencionada na carga de ruptura obtida continuava a ocorrer. Sendo assim, ficou claro que essa diferença de carga obtida, foi muito mais influenciada pelo material do substrato flexível que propriamente pela adesão entre o adesivo e os diferentes substratos [31].

Capítulo 7

Procedimentos Experimentais

Neste capítulo serão abordados os materiais utilizados no experimento, assim como o método usado e os resultados encontrados. Como o projeto trata da análise de aderência de juntas coladas em reparos industriais, é de extrema importância que as condições para as quais os corpos de prova sejam submetidos sejam as mais semelhantes possíveis com as da realidade. Sendo assim, nesse capítulo será abordado os meios usados para atingir essas condições, bem como o método usado para a obtenção das informações, e as características das juntas coladas

7.1 Materiais

Para este projeto, as juntas usadas, foram compostas por dois materiais distintos. Uma das partes foi composta de aço A36 galvanizado e a outra por compósito de fibra de carbono CFRP. O adesivo à base de epóxi utilizado para colagem dos substratos foi o NVT (adesivo estrutural desenvolvido pela NOVATEC).

7.1.1 Aço A36

O aço A36 é um tipo de aço que possui pequenas quantidades de carbono em sua composição. Dentre suas principais características estão a baixa resistência, baixa usinabilidade e boa soldabilidade. Sua resistência a tração entre 400 MPa a 550MPa, e além disso, são utilizados em componentes estruturais variados, desde os mais comuns até os mais elaborados como pontes, locomotivas, estruturas de máquinas, galpões, edifícios etc [32]. Na Tabela 3 podemos analisar algumas propriedades químicas desse aço e alguns de suas características mecânicas. Para esse projeto, as medidas do aço A-36 foram de 540 mm de comprimento, 25mm de largura e 0,6mm de espessura.

Tabela 3: Composição química e propriedades mecânicas do ASTM A-36[32]

Composição Química %Peso	ASTM A-36
C Max	0,25
Mn Max	1,35
Si	---
P Max	0,035
S	0,04
Al	----
Cu Max	0,2
Ni Max	0,2
Cr Max	0,15
Mo Max	0,06
V Max	0,008
Propriedades em Tração	
Limite de Escoamento (Mpa Min)	250
Limite de Resistência (Mpa)	400 a 550
Alongamento após Ruptura (%)	20 mín.

7.1.2 CFRP (Polímero reforçado com fibra de carbono)

Já o outro material utilizado na formação do corpo de prova foi o Polímero Reforçado com Fibra de Carbono, em inglês, “carbon fiber–reinforced polymer” - CFRP, frequentemente chamados de fibra de carbono, são plásticos que são reforçados com fibras de carbono as quais são extremamente fortes e leves [2].

As fibras de carbono do CFRP necessitam de polímeros de ligação, e geralmente o mais usado é uma resina termoendurecível, como o epóxi, ou algumas vezes polímeros termoplásticos como vinila, ou poliéster. Para este projeto foi utilizada uma barra de CFRP com 500 mm de comprimento, 25mm de largura e 4mm de espessura.

7.2. Corpos de prova

Os corpos de prova foram adquiridos prontos, confeccionados pelo professor Ney Robson Rohen [4], e consistiam de juntas adesivas cujos aderentes eram formados por aço e compósito. Nessa configuração de corpo de prova, foi utilizado como elemento rígido o compósito com seis camadas de fibra de carbono orientadas a $+45^{\circ}/-45^{\circ}$. Como aderente flexível foi utilizado uma chapa de aço A-36 galvanizado de 0,6 mm de espessura. Na figura 27 é possível ver uma ilustração do esquema do corpo de prova utilizado, com todas as suas

dimensões, onde a linha em vermelho representa o adesivo utilizado para colar os dois substratos.

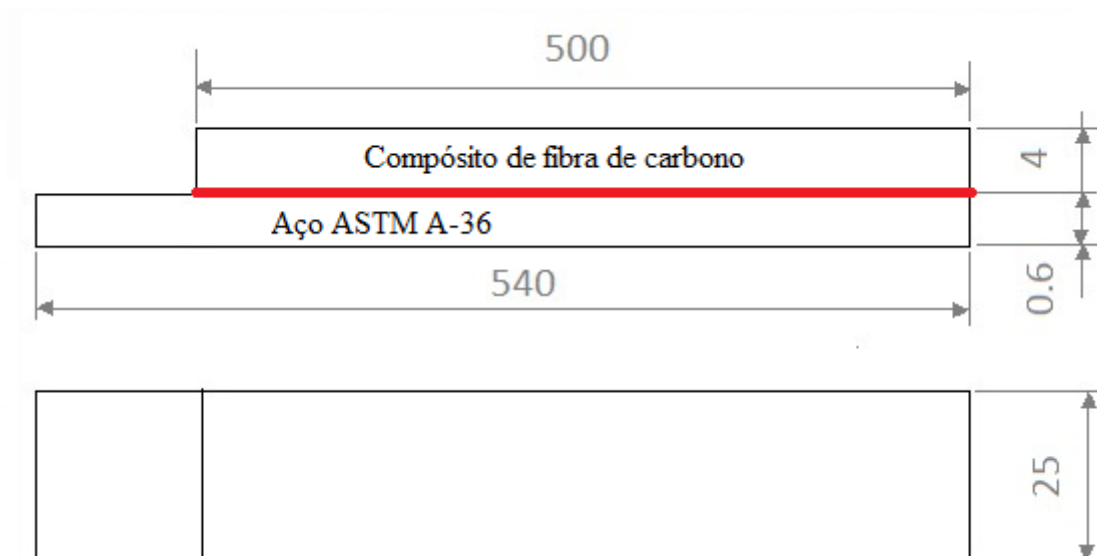


Figura 27: Esboço do corpo de prova [fonte: própria].

Já para a colagem desses dois substratos, o adesivo utilizado foi o adesivo estrutural NVT que é um adesivo epóxi de alta resistência à abrasão, com proteção anticorrosiva e de cura inicial rápida [33]. Na tabela 4 é possível ver as principais características desse adesivo.

Tabela 4: Propriedades mecânicas do adesivo NVT [33].

Parâmetros	Valores
Tensão Máxima - ASTM D638 (Mpa)	27,25
Tensão de Cisalhamento - ASTM D1002 (Mpa)	2105,0
Teste de Abrasão - DIN 53516 (% de perda de massa)	0,45
Dureza - ASTM D2240 (Shore D)	60
Perda de Massa - TGA (°C)	>300

Além da confecção e colagem desses materiais utilizando adesivo estrutural NVT, os corpos de prova passaram por um tratamento superficial por meio de jateamento abrasivo de granalha de aço e uma limpeza superficial com acetona para remover as impurezas remanescentes.

7.3. Métodos e experimentos

Para este projeto foram analisadas três configurações diferentes de juntas metal-compósito, e ambas passaram por um processo de envelhecimento, porém duas dessas configurações ocorreram dentro de um tanque com água salgada, para simular as condições reais para as quais essas juntas serão submetidas. Após esse envelhecimento, foram realizados os ensaios de arrancamento.

7.3.1. Envelhecimento

Com o intuito de criar condições de contorno para simular condições reais de uso da junta, alguns procedimentos foram tomados, entre eles o envelhecimento de 9 corpos de prova antes do ensaio de arrancamento. O envelhecimento ocorreu através da permanência de 3 corpos de prova em um tanque com água salgada a temperatura ambiente por 40 dias e 3 corpos de prova por 150 dias no Laboratório de Compósitos e Adesivos (LADES) no CEFET-RJ. Esses 6 corpos de prova permaneceram dentro do tanque totalmente submersos na posição horizontal. Os 3 corpos de prova restantes foram envelhecidos, porém fora das condições de salinidade e umidade. Dentro do tanque os corpos sofreram com as ações de corrosão e salinidade e posteriormente foram testados e seus resultados comparados com os resultados obtidos dos corpos de prova que não permaneceram no tanque.

Foi utilizado como base para esse envelhecimento, a norma ISO 9227 [34], que rege os ensaios de envelhecimento simulados, nos quais as condições ambientais são criadas artificialmente, como por exemplo o uso do aquário. Após 40 dias, três corpos de prova foram testados e os restantes, após 150 dias, incluindo os que não permaneceram no aquário. Na figura 28 é possível observar alguns corpos de prova imersos na água com sal e outros com apenas metade de seu comprimento imerso. Esses últimos são corpos que serão utilizados em futuras pesquisas.



Figura 28: Corpos de prova submetidos ao processo de envelhecimento no LADES [fonte: própria].

7.3.2 Tratamento superficial

O tratamento superficial utilizado nos corpos de prova foi o jateamento abrasivo com granalhas de aço. Esse tipo de jateamento consiste da projeção de partículas de aço em altas velocidades sobre a superfície do material que receberá o tratamento. Esse tipo de jateamento é muito similar ao jateamento de areia, no entanto, as arestas vivas e a dureza das granalhas de aço tendem a ser mais eficazes que a areia, que é menos dura e apresenta arestas menos cortantes.

Antes e após o tratamento superficial, a superfície foi limpa com acetona, para eliminar as impurezas remanescentes. Uma das grandes vantagens na utilização do método de jateamento abrasivo é a possibilidade de reutilizar as granalhas de aço diversas vezes, ou seja, é possível reciclar o material, utilizando as mesmas granalhas em vários corpos de prova. Na tabela 5 é possível analisar o tamanho de granalha de aço ideal para cada tipo de superfície que será jateada. Para este projeto, o tipo de granalha utilizada foi a granalha de aço de tamanho 80-100.

Tabela 5: Substrato e tamanho das granalhas [28].

Substrato	Tamanho de granalha (índice)
Aço	80-100
Alumínio	140-325
Latão	80-100
Aço inoxidável	140-325

7.3.3. Ensaio de arrancamento Peel Test

Para esse experimento o método utilizado será o Peel Test, também conhecido como ensaio de arrancamento, que consiste no arrancamento da parte flexível da junta, separando-a da parte rígida. Este método é eficaz e simples para analisar a adesão de uma junta adesiva e cada vez mais vem sendo usado.

O ensaio foi realizado conforme a norma ASTM D 3167 [30], para as três configurações de corpos de prova já mencionados e consistiu do arrancamento do substrato flexível da junta colada com o auxílio de garras especiais que foram acopladas na máquina de ensaio. Foi utilizada uma máquina de marca Instron modelo 5966 do CEFET-RJ utilizando-se uma célula de carga de 1KN com velocidade constante de 125 mm/min. na figura 29 é possível observar a realização do ensaio de arrancamento para um dos corpos de prova selecionados.



Figura 29: Esquema de ensaio de arrancamento [fonte: própria].

Capítulo 8

Resultados

Nesse capítulo serão abordados os resultados dos experimentos realizados, para os três intervalos de envelhecimento dos corpos de prova, mostrando detalhadamente o comportamento de cada um para as diferentes configurações, suas cargas máximas e mínimas, assim como suas cargas médias e comparações entre os três intervalos. Como visto no capítulo anterior, o ensaio foi o de arrancamento "floating roller peel test".

8.1. Primeira etapa do ensaio

Para essa etapa foram utilizados três corpos de prova, os quais foram envelhecidos por 40 dias em um tanque com água salgada. Foi utilizado um tanque contendo água salgada a qual simulou a água dos oceanos, com uma solução de 5% de NaCl diluídos em água doce. Foi utilizado esse método pois essa seria uma das maneiras mais práticas para se realizar o envelhecimento do material em um espaço pequeno como o de um laboratório. Apesar disso, existem outras formas de realização de envelhecimento, como por exemplo o spray de sal.

O ensaio de arrancamento foi feito em uma máquina de marca Instron modelo 5966 do CEFET-RJ utilizando-se uma célula de carga de 1KN com velocidade de 125 mm/min. A figura 30 ilustra as curvas obtidas nos ensaios dos três corpos de prova. Nessa figura possível notar que as curvas se comportaram de maneira instável, em especial a curva do corpo de prova 3, na qual formou-se uma espécie de "vala" onde a força de arrancamento caiu bruscamente comparada com as outras curvas.

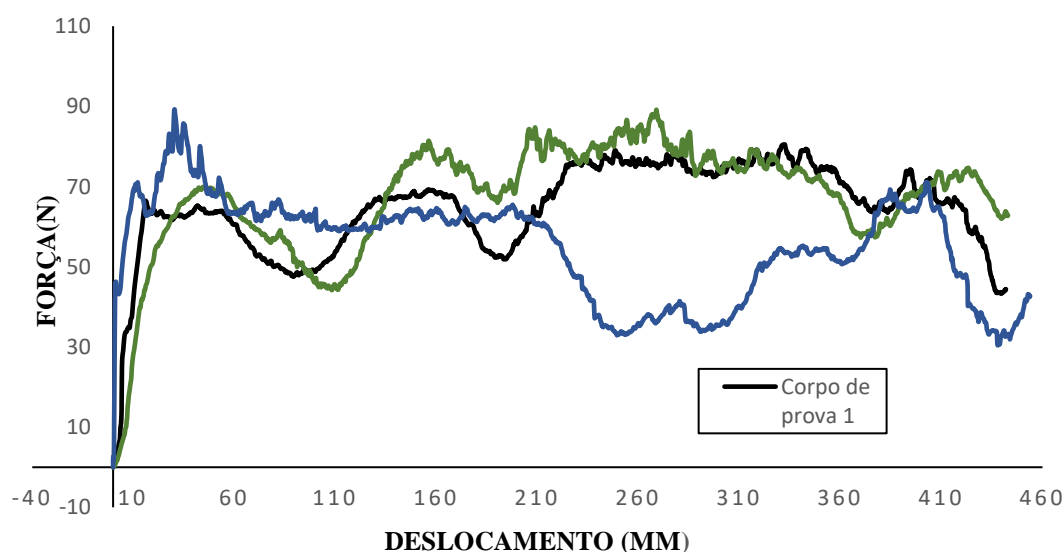


Figura 30: Resultados do ensaio CFRP Rígido – Aço Flexível após 40 dias de envelhecimento

Para o cálculo das forças de arrancamento obtidas nesse ensaio, foi utilizado o software Excel, onde por meio de uma média aritmética entre as forças de arrancamento encontradas em diferentes pontos pela máquina de ensaio, foi possível encontrar a força média de cada corpo de prova, assim como suas forças máximas e mínimas. Vale salientar que nos cálculos das forças, foram ignorados os primeiros 25,4mm do corpo de prova, assim como diz a norma ASTM D 3167[30]. Na tabela 6 é possível ver os resultados obtidos desses cálculos.

Tabela 6: Carregamentos resultantes do ensaio CFRP Rígido – Aço Flexível envelhecido 40 dias [fonte: própria].

Corpo de Prova	F. Max (N)	F. Min (N)	F. Média (N)
1	80,51	43,29	65,95
2	89,18	44,16	69,66
3	89,26	30,39	54,63

É possível notar que o corpo de prova 3 apresentou uma força mínima muito inferior se comparado com os outros dois corpos de prova e isso foi investigado através da análise da superfície dos substratos. Essa análise é mostrada na figura 31.



Figura 31: Corpos de prova envelhecidos 40 dias no tanque após ensaio de arrancamento [fonte: própria].

Analisando a figura 31, é possível ver que o tipo de ruptura predominante foi a ruptura coesiva, ou seja, a ruptura ocorreu no próprio adesivo. Apesar disso, o corpo de prova 2 apresentou uma região com concentração de rupturas adesivas, que é a ruptura que ocorre entre o adesivo e o substrato. Com o auxílio de um paquímetro foi constatado que essa ruptura adesiva aconteceu na mesma área em que aconteceu a “vala” mostrada no gráfico do corpo de prova 3 na figura 30.

8.2. Segunda etapa do ensaio

Na segunda etapa dos ensaios de arrancamento, os corpos de prova possuíam as mesmas dimensões dos corpos de prova envelhecidos por 40 dias, além de se utilizar as mesmas configurações para a máquina Instron, ou seja, uma célula de carga de 1KN com velocidade de 125 mm/min.

A única diferença nessa etapa do ensaio foi o tempo de envelhecimento que diferentemente da primeira etapa, nessa os corpos de prova permaneceram envelhecidos por 150 dias. A figura 32 mostra a análise gráfica dos três ensaios realizados. Nela é possível analisar uma maior instabilidade nas curvas em comparação com as curvas referentes aos corpos de prova com 40 dias dentro do tanque.

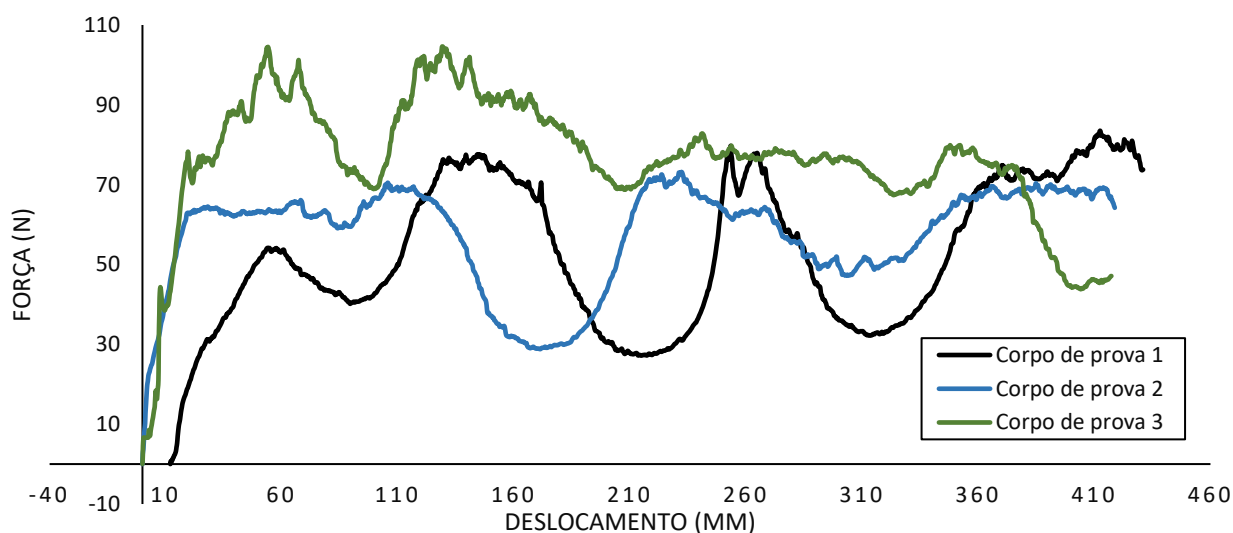


Figura 32: Resultados do ensaio CFRP Rígido – Aço Flexível após 150 dias de envelhecimento

As forças de arrancamento para essa segunda etapa do ensaio, também foram obtidas com os mesmos métodos usados para os corpos de prova que ficaram 40 dias no tanque, ou seja, foi utilizado o software Excel, onde por meio de uma média aritmética entre as forças de arrancamento encontradas em diferentes pontos pela máquina de ensaio, foi possível encontrar a força média de cada corpo de prova, assim como suas forças máximas e mínimas e nessa segunda etapa também foram ignorados os primeiros 25,4mm do corpo de prova, assim como diz a norma ASTM D 3167[30]. Na tabela 7 é possível ver os resultados obtidos desses cálculos.

É possível notar que as forças mínimas necessárias para provocar o arrancamento diminuíram em comparação com as forças obtidas para o ensaio com 40 dias dentro do tanque.

Tabela 7: Carregamentos resultantes do ensaio CFRP Rígido – Aço Flexível envelhecido 150 dias [fonte: própria].

Corpo de Prova	F. Max (N)	F. Min (N)	F. Média (N)
1	83,51	27,17	54,14
2	73,14	28,79	58,21
3	104,61	43,78	78,15

Assim como foi feito para os corpos envelhecidos no tanque por 40 dias, os corpos de prova que ficaram no tanque por 150 dias também passaram por uma análise de sua superfície após o ensaio de arrancamento. Na figura 33 é possível ver a superfície dos corpos de prova após o ensaio de arrancamento.



Figura 33: Corpos de prova envelhecidos 150 dias em aquário após ensaio de arrancamento [fonte: própria].

Os corpos de prova que permaneceram no tanque por 150 dias também sofreram coesão predominantemente coesiva, e os corpos de prova 1 e 2 apresentaram algumas regiões com concentração de ruptura adesiva, regiões essas que coincidiram com as “valas” mostradas no gráfico da figura 32.

8.3. Terceira etapa do ensaio

Nessa última etapa, os ensaios dos corpos de prova ocorreram logo após os ensaios dos corpos de prova envelhecidos por 150 dias e isso deve-se ao fato de que os três corpos de prova dessa etapa não foram envelhecidos no aquário com água salgada, ou seja, seu envelhecimento se deu fora de condições salinas. Apesar dessa diferença nesses corpos de prova, eles foram ensaiados sobre as mesmas condições que os corpos de prova das duas etapas anteriores. As curvas obtidas para esse ensaio podem ser vistas na figura 34.

Nela é possível notar que as curvas foram mais estáveis, se comparadas com as curvas das etapas anteriores, e a oscilação de força de arrancamento foi menor. Apesar disso, o corpo de prova 3 teve uma pequena instabilidade entre 300 e 350 mm, que pode ser justificada por uma má preparação da superfície durante a colagem, ou seja, não ocorreu um tratamento superficial eficiente, fazendo com que a colagem nessa região tenha sido comprometida.

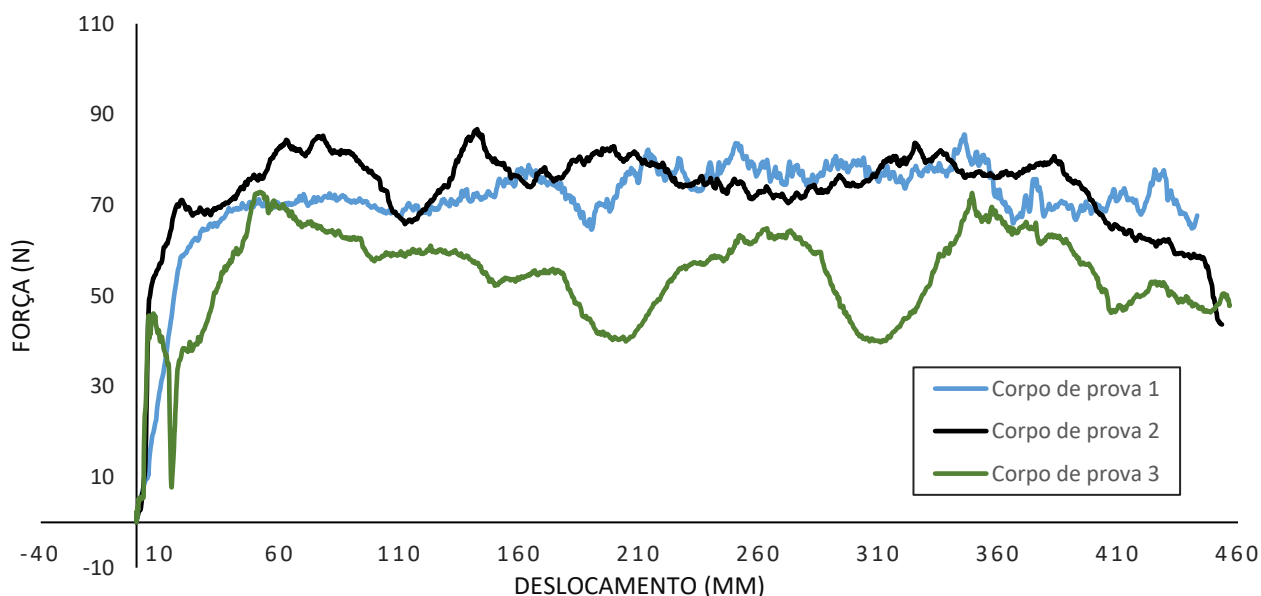


Figura 34: Resultados do ensaio CFRP Rígido – Aço Flexível envelhecido fora das condições de salinidade e umidade

As forças de arrancamento para terceira etapa do ensaio, também foram obtidas com os mesmos métodos usados para os corpos de prova anteriores, ou seja, foi utilizado o software Excel, onde por meio de uma média aritmética entre as forças de arrancamento encontradas em diferentes pontos pela máquina de ensaio, foi possível encontrar a força média de cada corpo de prova, assim como suas forças máximas e mínimas.

Na tabela 8 é possível ver os resultados obtidos desses cálculos. É possível notar que as forças mínimas necessárias para provocar o arrancamento foram maiores do que as forças mínimas necessárias para realizar o arrancamento nos corpos de prova que permaneceram no tanque por 40 dias e 150 dias. Além disso, é possível notar que as forças máximas não tiveram mudanças significativas.

Tabela 8: Carregamentos resultantes do ensaio CFRP Rígido – Aço Flexível sem envelhecimento em condições salinas [fonte: própria].

Corpo de Prova	F. Max (N)	F. Min (N)	F. Média (N)
1	85,56	62,16	73,35
2	86,75	43,65	74,76
3	72,88	39,28	55,90

As superfícies dos corpos de prova para essa etapa também foram analisadas, em especial a superfície do corpo de prova 3, devido a pequena instabilidade em sua curva, que ocorreu por volta dos 310 mm durante o ensaio. Na figura 35 é mostrada a superfície dos três corpos de prova envelhecidos fora do tanque, após o ensaio de arrancamento.



Figura 35: Corpos de prova envelhecidos 150 dias fora do tanque após ensaio de arrancamento [fonte: própria].

Como foi mostrado na figura 35, os corpos de prova que permaneceram fora do tanque sofreram ruptura predominantemente coesiva, e de todos os corpos de prova submetidos ao teste de arrancamento, foram os que menos tiveram regiões de ruptura adesiva. Apesar disso, vale salientar que o corpo de prova 3 apresentou uma pequena região em que a ruptura adesiva ocorreu, gerando assim a pequena instabilidade em sua curva na figura 34.

Na tabela 9 são mostradas as forças máximas médias obtidas em cada configuração de envelhecimento. Para o cálculo dessas forças, foi feita uma média aritmética entre as forças máximas dos três corpos de prova de cada uma das configurações de envelhecimento. Após esse procedimento ser feito para os 9 corpos de prova, foi criada a tabela 9, onde é possível ver a comparação entre os resultados.

Tabela 9: Forças máximas médias de arrancamento obtidas [fonte: própria].

Corpo de Prova	Força Máxima (N)			Força Máxima Média(N)
	1	2	3	
Envelhecimento 40 dias no tanque	80,51	89,18	89,26	86,31
Envelhecimento 150 dias no tanque	83,51	73,14	104,61	87,08
Envelhecimento fora do tanque	85,56	86,75	72,88	81,73

Através dos resultados apresentados na tabela 9, pôde-se constatar que não houve uma diferença muito acentuada nas cargas máximas dos corpos de prova envelhecidos em água salgada se comparados com os corpos de prova que não foram imersos. A diferença entre as cargas foi cerca de 10%.

Apesar disso, ao se analisar as cargas mínimas, é possível ver uma diferença maior entre as cargas, principalmente quando são comparados os valores entre as cargas mínimas dos corpos que ficaram em ambiente salino e os que não ficaram. Essa diferença foi de 45% entre o corpo de prova fora do tanque e o corpo de prova envelhecido no tanque por 150 dias e cerca de 27% entre o corpo de prova envelhecido fora do tanque e o corpo de prova envelhecido dentro do tanque por 40 dias.

Esse fato pode ser atribuído às condições ambientais para as quais os corpos de prova foram submetidos, ou seja, alta umidade e alta salinidade. Nesse sentido é possível concluir que o maior tempo de envelhecimento não afetou a aderência de uma junta metal-compósito. Sendo que a exposição a condições mais severas já demonstrou afetar a aderência com o tempo mais curto de exposição de 40 dias. Na tabela 10 é possível ver uma comparação entre as forças mínimas médias dos corpos de prova ensaiados.

Tabela 10: Forças mínimas médias de arrancamento obtidas [fonte: própria].

Corpo de Prova	Força Mínima (N)			Força Mínima Média (N)
	1	2	3	
Envelhecimento 40 dias no tanque	43,29	44,16	30,39	39,284
Envelhecimento 150 dias no tanque	27,17	28,79	43,78	33,24
Envelhecimento fora do tanque	62,16	43,65	39,28	48,36

Capítulo 9

Conclusão

Esse estudo conclui que é possível acessar as informações de adesão utilizando-se ensaios de arrancamento, em juntas formadas por compósito – metal, assim como demonstrou Sofia Freitas [31] em pesquisa anterior.

Os resultados mostrados no capítulo anterior para os corpos de prova envelhecidos no tanque com água salgada, demonstraram que não existe uma diferença muito acentuada na carga máxima dos corpos de prova envelhecidos se comparados com os corpos de prova que não sofreram envelhecimento. Por outro lado, as cargas mínimas apresentaram uma maior diferença entre cargas, em especial entre os corpos que ficaram em ambiente salino e os que não ficaram.

Além da análise quantitativa, é possível fazer uma análise qualitativa das curvas de carga x deslocamento, onde é possível verificar diferenças entre os ensaios realizados entre os corpos em ambiente salino e os que não ficaram nesse tipo de ambiente. A diferença mais marcante que pode ser observada é a instabilidade das curvas obtidas após o envelhecimento em atmosfera salina, ou seja, a maior diferença entre picos e vales, que seriam as diferenças de força no decorrer do deslocamento.

Apesar do ingresso de umidade não haver prejudicado a adesão da junta de maneira significativa, já que a ruptura permaneceu predominantemente coesiva no adesivo para todos os ensaios realizados, houve um decréscimo na aderência do adesivo e por esse fato se faz necessário uma melhor averiguação do fato.

Além disso, um dos corpos de prova que ficou fora do tanque apresentou regiões com concentrações de rupturas adesivas, que geralmente ocorrem devido a um mau tratamento superficial ou por causa de alguma falha durante a confecção da junta colada. Sendo assim, existe a necessidade de se averiguar melhor a influência dessas condições ambientais e o ingresso de umidade em juntas adesivas.

Referências Bibliográficas

- [1] VAN DER VEGT, A.K. From polymers to plastic. Delft, DUP Blue Print, 2002.
- [2] KUMAR, A.; GUPTA, R. K. Fundamentals of Polymer Engineering, 2 th ed. New York, Marcel Dekker, Inc. 2003.
- [3] CALLISTER, W. D.; RETHWISCH, D.G. *Ciência e engenharia de matérias - uma introdução*, 7ª ed. Rio de Janeiro, LTC, 2012. Página 423
- [4] RODRIGO ZANATTA, “Materiais compósitos na aviação: os materiais que prometem reduzir o peso e o consumo das aeronaves modernas.”, 2012, atualizado em 2015. Disponível em: <http://www.aviacao.org/article/materiais-compósitos/>. Acesso em: 15/03/2017
- [5] ALMACO- Associação latino-americana de materiais compósitos
- [6] SHAFFER, G.D. "An Archaeomagnetic Study of a Wattle and Daub Building Collapse." *Journal of Field Archaeology*, 20, No. 1. 1993. Acesso em: 15/03/2017
- [7] MONTEIRO, DELFIM FERREIRA. "Análise do comportamento a fractura de juntas de aço efectuadas com adesivos estruturais." (2012).
- [8] MALLICK, P. K. Fiber-reinforced composites - materials, manufacturing and desing, 3th ed. Florida, CRC Press, 2007.
- [9] JIANG, X.; KOLSTEIN, H.; BIJLAARD, F.; QIANG, X. “Effects of hygrothermal aging on glass-fibre reinforced polymerlaminates and adhesive of FRP composite bridge: Moisture diffusion characteristics”. *Composites: Part A* 57, pp. 49–58, 2014.
- [10] VENTURINI NETO, S. Estudo de junções aeronáuticas híbridas (metal-compósito) unidas mecanicamente. Dissertação de M.Sc., Escola de Engenharia de São Carlos, USP, São Carlos, São Paulo, RJ, Brasil, 2010
- [11] DIOGO M.M.A., “reforço de estruturas de betão com colagem de sistemas compósitos de CFRP recomendações para dimensionamento.” Novembro de 2008. Acesso em: 15/08/2017
- [12] P. BALAGURU E STEPHEN KURTZ, “use of inorganic polymer-fiber composites for repair and rehabilitation of infrascutures. “, 1997. Acesso em 21/07/217
- [13] Catálogo da empresa BELZONA, disponível em:<http://www.belzona.com/pt/products/applied/superwrap.aspx>, acessado às 15 horas do dia 10/08/2017
- [14] Fujiyama, R.T.; A.N.; Bastian, F.L. - USO DE MATERIAIS COMPÓSITOS EM REPAROS DE DUTOS DE AÇO - 2º CONGRESSO BRASILEIRO DE P&D EM PETRÓLEO E GÁS
- [15] MENICONI, L. C. M.; LANA, L. D. M.; MORIKANA, S. R. K.: “Experimental Fatigue Evaluation of the Composite Repair of a Metallic Ship Hull”. 2nd Brazilian Conference on Composite Materials, São José dos Campos, São Paulo, Brasil, 15-18 September 2014.
- [16] PARDINI, L. C.; LEVY, F. *Compósitos estruturais: ciência e tecnologia*. São Paulo: Edgard Blucher, 2006

- [17] DE BARROS, S.; BANEIA, M. D.; BUDHE, S.; DE SIQUEIRA, C. E. R.; LOBÃO, B. S. P.; SOUZA, L.F.G. . Experimental analysis of metal-composite repair of floating offshore units (FPSO). *The Journal of Adhesion (Print)*, v. 93, p. 147-158, 2016.
- [18] DA FONSECA, A. H. M.; DA SILVA, T. Proposta de um critério de resistência para juntas metálicas coladas. Dissertação de M.Sc., UFF, Niterói, RJ, Brasil, 2007.
- [19] SHIUH-CHUAN. “Stress analysis of adhesively-bonded lap joints”. *Composite Structures* 47, pp. 673-678, 1999
- [20] SAMPAIO, E. M. *Um modelo de danos para juntas coladas*. 1998. Tese (Doutorado) COPPEUFRJ, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 1998.
- [21] DA SILVA, L. F. M.; DE MAGALHÃES, A. G.; DE MOURA, M. F. S. F. Juntas adesivas estruturais. Porto, Publindústria, 2007.
- [22] EBNEAJJAD, S. *Adhesives Technology Handbook*. 2 nd ed. New York: William Andrew Inc, 2008. 363p
- [23] SHIELDS, John. *Adesives handbook*. 3rd ed. Butterworth & Co. 1984.
- [24] BIKERMANN J. J.; *The science of adhesive joints*, Academic, London, 1961
- [25] Kwei, T.K. “phase separation in segment polyurethanes”, *J.Appl.Polym* 1982
- [26] T.C.Mourão, G.C.Mourão, J.R. Berretta, I. de S.Bottl , J.R.M.d’Almeida, *Efeito do tratamento superficial sobre a carga de ruptura de juntas sobrepostas simples unidades por adesão*, Junho.2014
- [27] PAREDES, Ramón S. Cortés (Dr. Eng^o.) *Aplicações gerais do processo de jateamento*, Departamento de Engenharia Mecânica - DEMEC Universidade Federal do Paraná - UFPR
- [28] Catálogo da empresa Zirtec, disponível em <http://www.zirtec.com.br/abrasivos/granalha-de-aco-inoxidavel/> acessado no dia 8/9/2017
- [29] Kim, J., Kim, K.-S. and Kim, Y.H. (1989). Mechanical effects of peel adhesion test. *Journal of Adhesion Science and Technology* 3, 175–187.
- [30] ASTM D 3167: Standard test method for floating roller peel test resistance of adhesives
- [31] S. Teixeira de Freitas and J. Sinke, “Test method to assess interface adhesion in composite bonding,” *Appl. Adhes. Sci.*, vol. 3, no. 1, pp. 1–13, 2015.
- [32] Catálogo da empresa CBCA, disponível no site: [http:// www.cbca-acobrasil.org.br/site/construcao-em-aco-acos-estruturais.php](http://www.cbca-acobrasil.org.br/site/construcao-em-aco-acos-estruturais.php), acessado dia 05/12/2017
- [33] Ney Robson Ferreira Rohen, “Desenvolvimento de sistema de reparo para dutos e tubulações industriais utilizando materiais compósitos de matriz polimérica”, dissertação de Mestrado, UERJ, 2010
- [34] ISO 9227: Corrosion tests in artificial atmosphere – Salt spray tests