

**CENTRO EDUCACIONAL CELSO SUCKOW DA FONSECA –
CEFET/RJ**

**Análise da aderência de reparos com compósito em
chapas metálicas na indústria petrolífera por ensaios
de arrancamento**

Pedro Affonso Lacerda Zugliani

Professor orientador: Silvio Romero de Barros

Rio de Janeiro

Junho de 2016

**CENTRO EDUCACIONAL CELSO SUCKOW DA FONSECA –
CEFET/RJ**

**Análise da aderência de reparos com compósito em
chapas metálicas na indústria petrolífera por ensaios
de arrancamento**

Pedro Affonso Lacerda Zugliani

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

Rio de Janeiro

Junho de 2016

Ficha catalográfica elaborada pela Biblioteca Central do CEFET/RJ

Z94 Zugliani, Pedro Affonso Lacerda
Análise da aderência de reparos com compósito em chapas metálicas na indústria petrolífera por ensaios de arrancamento / Pedro Affonso Lacerda Zugliani.—2016.
x, 53f. : il. (algumas color.) , grafs. , tabs. ; enc.

Projeto Final (Graduação) Centro Federal de Educação Tecnológica Celso Suckow da Fonseca , 2016.

Bibliografia : f. 53

Orientador : Silvio Romero de Barros

1. Engenharia mecânica. 2. Juntas adesivas. 3. Juntas adesivas – Ensaios e provas. 4. Materiais compostos. 5. Indústria petrolífera.
I. Barros, Silvio Romero de (Orient.). II. Título.

CDD 621

AGRADECIMENTOS

Agradeço a todos os que participaram, direta e indiretamente, desse projeto.

RESUMO

A indústria do petróleo possui grande parte de sua estrutura base de produção pautada na utilização de materiais metálicos. No entanto, atualmente, pode ser observado um crescimento na utilização de materiais compósitos como material base (tubulações, estruturas de grades de piso, guarda corpos, etc), e para manutenção de estrutura base formada pelos materiais metálicos, através de juntas coladas. Desse modo, o presente trabalho propõe o estudo da aderência de juntas coladas, compostas de metal e compósito, que estão sendo utilizadas no reparo das estruturas metálicas na indústria petrolífera. Esse estudo busca avaliar a adesão e durabilidade em juntas coladas formadas por metal e compósito, em relação às condições ambientais severas presentes em plataformas petrolíferas. Com esse intuito, este trabalho possui o objetivo de avaliar a aderência e durabilidade de juntas coladas via ensaio de arrancamento, garantindo uma boa fiabilidade às condições ambientais encontradas na indústria de petróleo e utilizadas em reparos. Os ensaios de arrancamento mostraram-se um método adequado para se acessar as informações de adesão em juntas de CFRP – Aço, no entanto, dependendo do material flexível utilizado este tipo de ensaio não é recomendado devido à falha coesiva do aderente, tornando a avaliação da adesão da junta prejudicada. Em relação à durabilidade das juntas expostas às condições de elevada umidade e salinidade, os ensaios demonstraram que a adesão não foi significativamente afetada para os corpos de prova envelhecidos, após trinta dias nessas condições. Apesar do resultado, um envelhecimento mais longo se faz necessário.

Palavras chave: Adesão, juntas adesivas, indústria petrolífera, ensaio de arrancamento

ABSTRACT

The oil industry has its base structure made of metallic material since the beginning of oil exploration. However, now a days, other types of materials are being used in these industry, specially composite materials. One purpose that composite materials are being used is in repairing metallic structures utilizing bonded joints. The goal of this project is to test this kind of bonded joints made of steel and composite as adherends through peel test. Harmful environmental conditions to the joints as salty atmosphere will be tested and analyzed. Tests showed that peel test is a good method to access adhesion's information of CFRP – Steel joints. However, depending on the type of flexible adherend utilized, the specimen faced cohesive failure in this adherend and because of this reason it's not possible to analyze the joint adhesion exclusively through peel test. The specimens adhesion weren't very affected after thirty days of harmful environmental conditions exposure, but longer time of exposure is necessary to understand better how this conditions can affect the joint durability.

Key words: Adhesion, bonded joints, oil industry, peel test

SUMÁRIO

Capítulo 1

Introdução.....	1
1.1. Motivação.....	1
1.2. Objetivo.....	2
1.3. Justificativa.....	2
1.4. Metodologia e trabalho realizado.....	3
1.5. Organização do trabalho.....	3

Capítulo 2

Compósitos na indústria petrolífera.....	5
2.1. Compósitos.....	5
2.2. Indústria petrolífera.....	6
2.3. Reparos com compósitos na indústria petrolífera.....	7

Capítulo 3

Juntas coladas.....	10
3.1. Adesivo.....	10
3.2. Aderente ou substrato.....	11
3.3. Adesão.....	12
3.4. Modos de ruptura.....	14
3.5. Vantagens e desvantagens.....	16

Capítulo 4

Tratamentos superficiais.....	18
4.1. Importância dos tratamentos superficiais.....	18
4.2. Tipos de tratamentos superficiais.....	20
4.2.1. Jateamento de areia (Sand blast).....	20
4.2.2. Jateamento com granalhas de aço (Brit blast).....	21

4.2.3. MBX Bristle blasting.....	22
Capítulo 5	
Efeitos ambientais nas juntas adesivas	24
5.1. Efeitos da temperatura.....	24
5.2. Efeitos da umidade	25
5.3. Efeitos da salinidade	25
Capítulo 6	
Ensaio de arrancamento.....	27
6.1. Características dos ensaios de arrancamento	27
6.2. Floating Roller peel test.....	28
Capítulo 7	
Procedimento experimental.....	31
7.1. Experimento.....	31
7.2. Corpos de prova	32
7.3. Envelhecimento dos corpos de prova.....	35
7.4. Ensaio de arrancamento	35
Capítulo 8	
Resultados.....	38
8.1. Primeira etapa do ensaio.....	38
8.2. Segunda etapa do ensaio.....	40
Capítulo 9	
Análise dos resultados.....	43
9.1. CFRP Flexível – Aço Rígido.....	43
9.2. CFRP Rígido – Aço flexível.....	44

Capítulo 10

Pesquisas em desenvolvimento.....	49
10.1. CFRP Rígido – Aço Flexível.....	49
10.2. CFRP Rígido – CFRP Flexível.....	51

Capítulo 11

Conclusão.....	52
----------------	----

Bibliografia.....	53
--------------------------	-----------

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Camisa em resina epóxi reforçada.....	7
Figura 2: Reparo de duto metálico com compósito insitu	8
Figura 3: Reparo de duto metálico com compósito prepreg	9
Figura 4: Junta adesiva.....	12
Figura 5: Teoria mecânica.....	13
Figura 6: Teoria da adsorção.....	13
Figura 7: Modos de ruptura.....	15
Figura 8: Arrancamento e clivagem.....	17
Figura 9: Ligação da junta colada.....	19
Figura 10: Jateamento com areia.....	21
Figura 11: MBX bristle blast.....	23
Figura 12: Floating roller peel test.....	28
Figura 13: Resultado obtido do ensaio de arrancamento.....	29
Figura 14: Corpo de prova CFRP Flexível – Aço Rígido.....	33
Figura 15: Dimensões corpo de prova.....	33
Figura 16: Corpo de prova CFRP Rígido – Aço Flexível.....	34
Figura 17: Realização do ensaio de arrancamento.....	37
Figura 18: Resultados do ensaio CFRP Rígido – Aço Flexível sem envelhecimento.....	39
Figura 19: Resultados do ensaio CFRP Rígido – Aço Flexível após 30 dias de envelhecimento.....	41
Figura 20: Resultados do ensaio CFRP Rígido – Aço Flexível de referência após 30 dias de envelhecimento fora das condições salinas.....	41
Figura 21: Corpo de prova ensaiado após trinta dias em condições salinas.....	48
Figura 22: Corpos de prova em processo de envelhecimento no LADES.....	50

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Substrato e tamanho da granalha.....	22
Tabela 2: Carregamentos resultantes do ensaio CFRP Rígido – Aço Flexível sem envelhecimento.....	39
Tabela 3: Carregamentos resultantes do ensaio CFRP Rígido – Aço Flexível após 30 dias de envelhecimento.....	42
Tabela 4: Forças máximas de arrancamento obtidas	45
Tabela 5: Forças mínimas de arrancamento obtidas.....	45
Tabela 6: Média das forças de arrancamento antes e após o envelhecimento da junta.....	46

Capítulo 1

Introdução

A utilização de materiais compósitos na indústria petrolífera é crescente, principalmente na última década. Um dos muitos empregos do material compósito nessa indústria é em reparos de estruturas de base metálica, como dutos e tubulações, onde juntas coladas entre compósitos e metais vêm sendo utilizadas. Assim, é de extrema importância a avaliação desse tipo de união, visto que uma falha pode provocar grandes tragédias com perdas de vidas e desastres ambientais.

A fim de desenvolver uma melhor compreensão acerca deste assunto, esse trabalho propõe o estudo e a análise da aderência entre juntas coladas compostas de material compósito e metálico utilizadas em reparos na indústria petrolífera.

Para a abordagem deste tema, pretende-se criar uma metodologia de ensaio de arrancamento que possibilite a melhor repetibilidade possível e, também, que reproduza de modo satisfatório as condições de contorno encontradas na realização do reparo.

1.1. Motivação

Com a introdução do material compósito em reparos de estrutura metálica na indústria petrolífera, através de juntas coladas, o estudo da aderência e do comportamento mecânico desse tipo de junta híbrida tornou-se de grande interesse para o desenvolvimento e avaliação dessa prática.

A indústria petrolífera é de extrema importância para a economia mundial e já provou que os erros e falhas quando cometidos desencadeiam em grandes tragédias humanas e ambientais que precisam ser evitadas a qualquer custo. Não por acaso, as pesquisas para o desenvolvimento de novas tecnologias relacionadas ao tema são crescentes, principalmente no Brasil após a descoberta do pré-sal.

Assim, com essa motivação, esse trabalho pretende através do estudo, ensaios e análise de juntas coladas entre metais e compósitos utilizadas em reparos na indústria

petrolífera, o desenvolvimento e melhor conhecimento do assunto, almejando com os resultados obtidos a diminuição no risco de falhas nas juntas coladas mencionadas.

1.2. Objetivo

Esse trabalho tem como objetivo analisar a aderência de juntas coladas híbridas de metais e compósitos, que estão sendo utilizadas na indústria petrolífera. Através dessa análise pretende-se avaliar a influência das condições ambientais, de elevada umidade e salinidade, encontradas nessa indústria em relação à adesão e durabilidade desse tipo de união.

Além disso, um segundo objetivo desse estudo é verificar se o ensaio de arrancamento é uma metodologia adequada para se acessar informações de adesão e durabilidade em juntas adesivas compostas por aço – compósito.

1.3. Justificativa

Para garantir uma boa ligação em reparos que são utilizadas juntas coladas, não apenas entre metais e compósitos, que é o foco desse estudo, mas, também, entre quaisquer materiais, é de extrema importância a análise da interface para avaliar a aderência da junta.

A aderência entre dois substratos é essencial para garantir uma colagem duradoura. Um dos métodos para a avaliação da aderência entre os dois substratos colados é através de ensaios destrutivos de arrancamento, sendo esse o tipo de ensaio utilizado nesse estudo para a análise das juntas coladas citadas.

Visando especificamente os reparos utilizados na indústria do petróleo, que utilizam juntas coladas híbridas compostas de compósito e metal, esse estudo busca se aprofundar na referida análise, considerando aspectos como as condições ambientais encontradas nessa indústria.

1.4. Metodologia e trabalho realizado

A metodologia desse projeto envolve como primeiro passo uma pesquisa bibliográfica em busca da utilização de materiais compósitos em reparos estruturais resultando em juntas coladas híbridas metal - compósito na indústria petrolífera. Com o conhecimento dos tipos de materiais compósitos e metálicos que envolvem esse tipo de reparo, os tratamentos superficiais e as condições ambientais que estão envolvidas no processo foram estudados.

Em seguida, os corpos de prova foram encomendados e ensaios preliminares realizados. Um grupo de corpos de prova foi ensaiado por arrancamento imediatamente após o seu recebimento, enquanto outro grupo foi colocado em condições salinas de envelhecimento, utilizando-se uma câmara de spray de sal.

Após trinta dias, os corpos de prova envelhecidos foram ensaiados novamente por arrancamento e os resultados obtidos e analisados.

1.5. Organização do trabalho

Os capítulos iniciais desse relatório são destinados às informações pertinentes em relação ao tema do projeto. Sendo assim, do capítulo 2 ao 6 são abordados assuntos como a indústria petrolífera, compósitos, juntas coladas e ensaios de arrancamento.

No capítulo 2 os assuntos são abordados mais especificamente visando à indústria petrolífera. Em seguida realiza-se uma breve revisão de conceitos básicos relacionados a juntas coladas, tratamentos superficiais e os efeitos das condições ambientais em juntas adesivas. No capítulo 6 é feita a introdução do ensaio de arrancamento que foi utilizado nessa pesquisa.

A partir do capítulo 7 inicia-se a descrição dos procedimentos experimentais utilizados para a realização do estudo. Este capítulo fornece informações gerais sobre os corpos de prova utilizados e condições de realização do envelhecimento. O capítulo 8 contém os resultados obtidos com os ensaios de arrancamento tanto antes como após o envelhecimento dos corpos de prova.

No capítulo 9 realiza-se a análise dos resultados obtidos e apresentados no capítulo anterior. No capítulo 10 são informadas as pesquisas relacionadas à adesão de juntas coladas

que estão ainda em desenvolvimento em parceria entre a instituição CEFET-RJ e a universidade de Delft, em Amsterdã.

Capítulo 2

Compósitos e a indústria petrolífera

O emprego do material compósito, com o avanço da tecnologia desse tipo de material, torna-se cada vez maior nas diversas áreas industriais. Uma das áreas em que esse tipo de material passou a ter grande aplicação foi a de produção de petróleo. Apesar do material compósito ser utilizado em determinados componentes base da indústria petrolífera, tem se tornado uma prática industrial comum o emprego desse material como reparo e reforço da estrutura metálica. Esse capítulo destina-se a uma breve introdução a definição e conceitos básicos de materiais compósitos e suas aplicações na indústria do petróleo.

2.1. Compósitos

Materiais compósitos podem ser definidos segundo [1] como materiais de moldagem estrutural, formados por uma fase contínua (matriz) e reforçada por uma fase descontínua (reforço) que se agregam físico-quimicamente após um processo de crosslinking polimérico (cura). Sendo assim, o compósito é composto essencialmente por dois elementos principais matriz e reforço.

Os materiais compósitos são combinações de dois ou mais materiais com propriedades físicas e mecânicas distintas. Consistem de um elemento de reforço envolvido por uma matriz, com o objetivo de obter características específicas e propriedades desejadas. Geralmente, os componentes não se dissolvem um no outro e podem ser identificados fisicamente por uma interface bem definida.

A matriz é o constituinte base do compósito, podendo ser polimérica, cerâmica ou metálica. No entanto, o tipo de matriz mais utilizada atualmente na indústria é a polimérica por suas características superiores em relação à densidade e resistência mecânica. Possui a função de manter o reforço utilizado, por exemplo, as fibras, na orientação adequada, protegendo-as contra a abrasão e efeitos ambientais, além de auxiliar na transferência e distribuição de tensões para todo o material.

O reforço é o componente que proporciona ao compósito sua elevada característica física. Pode estar presente em diferentes proporções difundido no interior da matriz, de acordo com as propriedades mecânicas que se deseja. Normalmente, os reforços são em forma de fibras, malhas ou tecidos, sendo as fibras de carbono e vidro as mais difundidas.

Os materiais compósitos apresentam diversas vantagens e desvantagens em relação aos materiais tradicionais utilizados. Pode se destacar como principal vantagem a relação elevada resistência mecânica e baixa densidade, principalmente tratando se de compósitos poliméricos, além de serem menos suscetíveis a corrosão. No entanto, uma desvantagem a ser destacada é sua propriedade anisotrópica, ou seja, apesar de apresentar excelente resistência quando solicitado na mesma direção em que encontra se o reforço, possui piores propriedades mecânicas nas outras direções, especialmente nas solicitações perpendiculares ao reforço.

O uso desse material se difunde cada vez mais, pois apresentam propriedades melhores que as possíveis de obter com materiais tradicionais, principalmente as relacionadas à resistência/densidade. O conhecimento específico relacionado ao comportamento do material compósito está sendo ampliado como consequência do grande uso pelas indústrias aeroespacial, automotiva e de petróleo.

2.2. Indústria petrolífera

A indústria do petróleo enfrenta 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 que passaram por algum tipo de tratamento químico. Por tal motivo, a estrutura base dessa indústria é constituída por esse tipo de material metálico.

Com o desenvolvimento tecnológico dos materiais compósitos, esses também passaram a ser usados, principalmente devido as suas boas propriedades em relação à corrosão. Por isso, os compósitos, atualmente, também figuram como um tipo de material utilizado na indústria petrolífera, levando ao crescimento no campo de pesquisa de materiais compósitos, também nessa área.

As aplicações do compósito na indústria petrolífera são diversas, 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, ilustrado na figura 1, servindo como barreira eficaz contra a corrosão em uma variedade de aplicações onshore e offshore.

No entanto, uma das aplicações mais recentes encontra-se na área de reparos de dutos, de tubulações metálicas, de cascos e tanques de embarcações, de forma a manter a integridade e garantir a vida útil desses componentes. Esse emprego dos materiais compósitos em reparos é um dos focos do presente estudo e está abordado no próximo item.



Figura 1: Camisa em resina epóxi reforçada [2]

2.3. Reparos com compósito na indústria petrolífera

Em 2006 foi publicada a Norma ISO/PDTS 24817 [3] (Reparos de compósitos para dutos de indústrias de petróleo, petroquímicas e de gás natural – Qualificação, projeto, instalação, teste e inspeção), com o objetivo de qualificar os sistemas de reparos com materiais compósitos.

Essa norma foi confeccionada a fim de fornecer recomendações e exigências em procedimentos de reparo de danos comumente encontrados em dutos de óleo e gás, tanques de armazenamento e vasos de pressão. As situações recomendadas para a utilização do sistema

de reparo com materiais compósitos são corrosão interna e externa, danos externos e fortalecimento estrutural em áreas localizadas.

As técnicas de reparos em dutos mais usuais são o corte e substituição da região de dano, soldagem de dupla calha, fechamento com dupla calha com enchimento de epóxi e por meio do uso de materiais compósitos originando juntas coladas. Essa última pode ser realizada pelo método de impregnação local (insitu), figura 2, quando o duto é envolvido com camadas de material polimérico reforçado com fibras até atingir a espessura desejada ou com uso de finas placas de material compósito pré - fabricadas, onde a matriz polimérica é impregnada anteriormente ao momento da aplicação (prepreg), figura 3.

Dentre as técnicas descritas acima, as que utilizam material compósito apresentam vantagens de não requerer a interrupção do fluxo de produtos nos dutos ou esvaziamento de tanques, podendo ser realizadas com o sistema em operação. Além disso, não exigem processos de soldagem, evitando geração de calor em áreas de processo, reduzindo assim o risco de acidentes.

Assim, pelas vantagens citadas desse tipo de reparo utilizando compósitos e a consequente formação de juntas coladas entre metais e compósitos obtidas, um estudo sobre essa prática tornou se fundamental. Desse modo, esse projeto busca uma melhor avaliação sobre o tema, visando seu desenvolvimento.

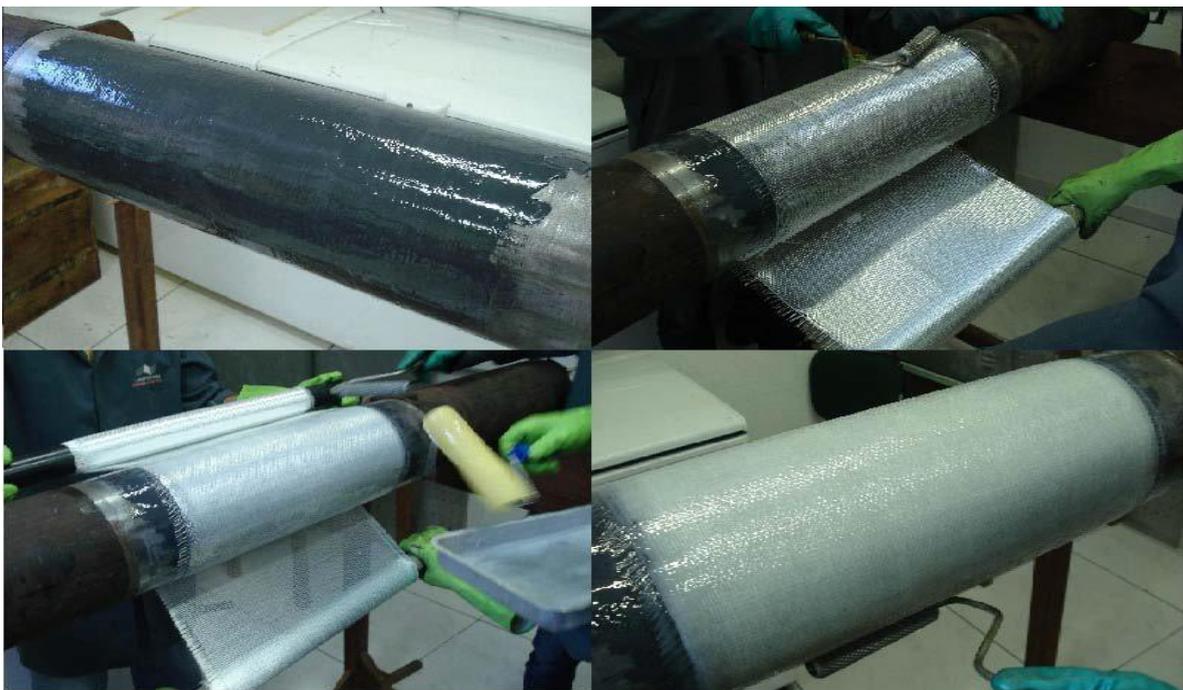


Figura 2: Reparo de duto metálico com compósito insitu [4]

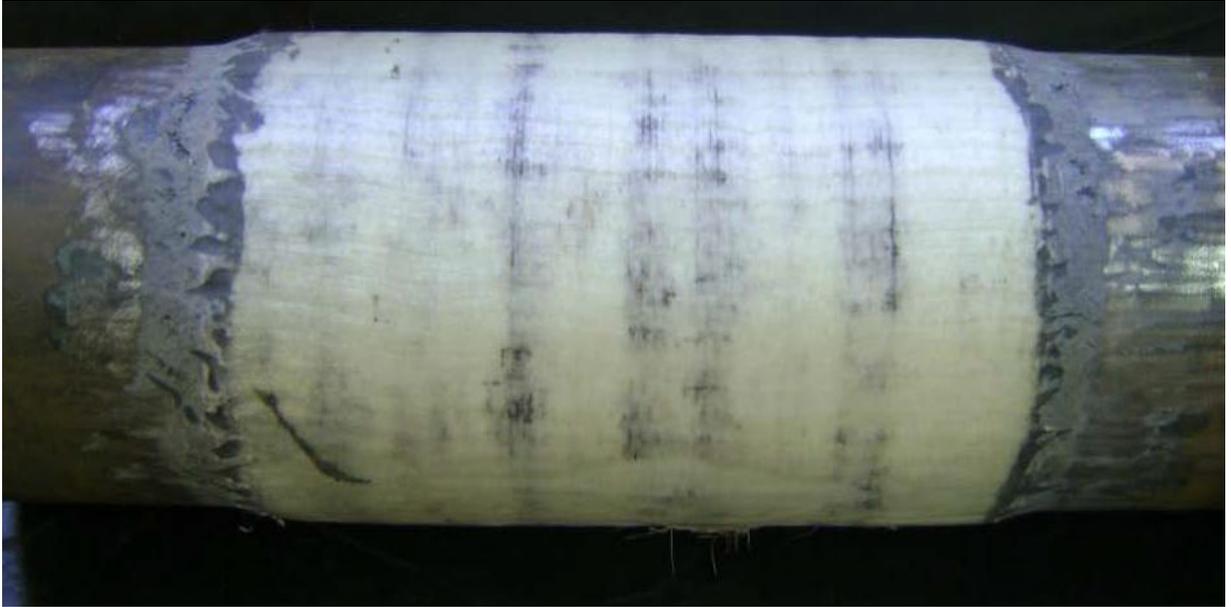


Figura 3: Reparo de duto metálico com compósito prepreg [4]

Capítulo 3

Juntas coladas

Com a crescente utilização do método de reparo explicitado no capítulo anterior, o estudo das juntas coladas compostas da união de material metálico e compósito é o tema a ser avaliado nesse projeto.

Desse modo, esse capítulo destina-se a breve introdução de conceitos básicos relacionados a juntas coladas.

3.1. Adesivo

Os adesivos utilizados, atualmente, são baseados em polímeros sintéticos capazes de se aderir à superfície de diferentes substratos, resistindo aos esforços e a separação da junta. Desse modo, observa-se que as condições superficiais do substrato são de extrema relevância para a adesão com o adesivo.

Os adesivos são compostos basicamente por dois componentes principais que são uma base e um catalisador. Também estão presentes diversos outros componentes, como por exemplo, aceleradores, solventes e inibidores que auxiliam a cura, aplicação, etc.

A maioria dos adesivos necessita um tempo de cura, ou seja, um período para que a base e o catalisador realizem uma reação química levando a solidificação do adesivo. Dependendo do tipo de adesivo, são necessárias temperatura e pressão elevadas para ocorrência da cura.

Por sua base polimérica, os adesivos podem ser classificados em termoplásticos e termoendurecidos, assim como os compósitos de matriz polimérica. A principal diferença entre essas duas classificações está no grau de reticulação presente no adesivo, ou seja, a quantidade e a forma das ligações químicas presentes no adesivo.

Os adesivos termoendurecidos apresentam um maior grau de reticulação, e por esse motivo tendem a possuir propriedades mecânicas superiores que os termoplásticos, inclusive em relação à efeitos de temperatura e umidade. Sendo assim, os adesivos termoendurecidos costumam ser os utilizados para a fabricação de juntas estruturais.

Os adesivos termoplásticos, apesar de apresentarem propriedades mecânicas inferiores, possuem a vantagem de serem recicláveis, ou seja, podem ser aquecidos e reutilizados, enquanto os termoendurecidos quando aquecidos a ponto de quebrarem se as ligações químicas no polímero, não é possível refazê-las, devendo assim ser descartado.

Os tipos de adesivos mais utilizados atualmente são os de resina epóxi, fenólicos, formaldeídos, poliuretanos e cianoacrilatos. Para o emprego em altas temperaturas destacam-se os poli aromáticos denominados poliimidaz e bismaleimidaz.

3.2. Aderente ou substrato

O 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. Duas propriedades do aderente são extremamente importante para uma boa junta adesiva, são elas a energia de superfície e suas condições superficiais.

A energia de superfície do material é uma propriedade que está relacionada diretamente com a molhabilidade do adesivo, ou seja, ao espalhamento do adesivo no aderente. 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.

As condições superficiais do aderente, conforme já verificado em parágrafos anteriores, também são decisivas para uma boa junta adesiva. 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. A figura 4 ilustra uma junta colada.

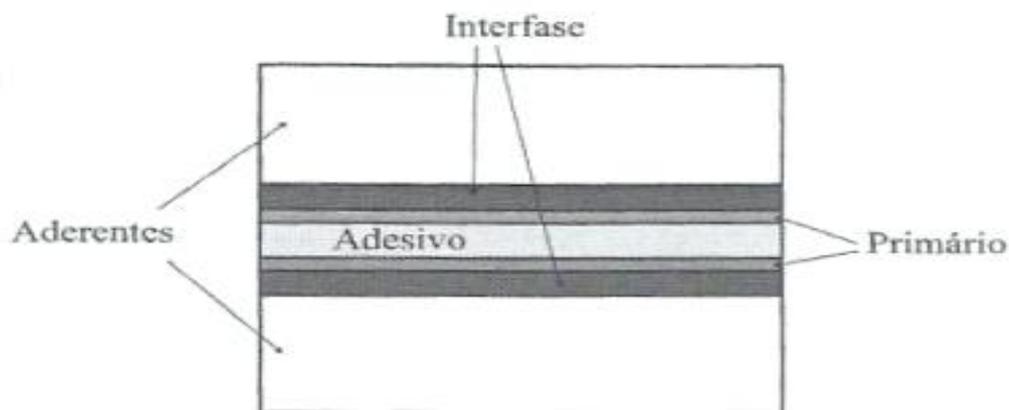


Figura 4: Junta adesiva [5]

3.3. Adesão

A adesão pode ser definida como o modo que o adesivo liga-se ao substrato. Existem duas teorias principais que explicam o funcionamento do fenômeno da adesão para a maioria das juntas. São elas:

- Teoria mecânica

Segundo esta teoria, a adesão ocorre quando o adesivo penetra nos poros e cavidades da superfície do substrato, ficando assim encravado mecanicamente. A explicação esquemática da teoria de adesão mecânica é apresentada na figura 5.

- Teoria da adsorção

Segundo esta teoria, a adesão ocorre pela formação de ligações químicas entre o adesivo e o substrato desde que suas moléculas aproximem-se suficientemente uma das outras. A explicação esquemática da teoria de adsorção é apresentada na figura 6.

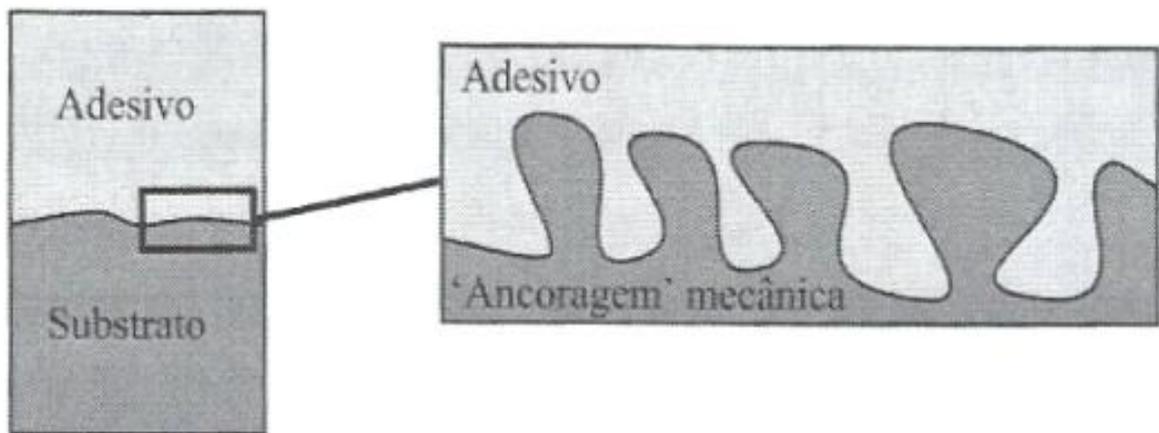


Figura 5: Teoria mecânica [5]



Figura 6: Teoria da adsorção [5]

Portanto, por essas duas teorias, observa-se que, quanto melhor preparada estiver a superfície do substrato, melhor a adesão.

Para garantir uma boa adesão entre o adesivo e o substrato é de suma importância uma boa preparação superficial para a maioria das juntas, sendo esse um fator limitante para a utilização da junção adesiva em diversas aplicações e um campo de pesquisa em crescimento em busca de adesivos que sejam capazes de se aderir bem ao substrato mesmo com uma pobre preparação superficial.

Em relação às condições superficiais do substrato, outro fator importante a mencionar é a rugosidade. Apesar de muitas vezes imperceptível sem o auxílio de um microscópio, a rugosidade possui um papel de destaque 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.

3.4. Modos de ruptura

A ruptura de uma junta adesiva pode ocorrer no aderente, adesivo ou na região entre o adesivo e o aderente. Quando a ruptura ocorre no interior do aderente ou do adesivo, esta é classificada como ruptura coesiva, caso ocorra na região entre o adesivo e o aderente, é denominada ruptura adesiva (interfacial). Os modos de ruptura citados estão ilustrados na figura 7.

Tratando-se de juntas coladas é ideal que a ruptura ocorra coesivamente, pois normalmente os cálculos de esforços máximos são para a resistência do aderente ou do adesivo. Assim, é muito importante garantir que não ocorrerá uma ruptura adesiva antes da coesiva. Para isso, deve-se evitar ao máximo a possibilidade de uma falha de ligação entre o adesivo e aderente, através, por exemplo, de um bom tratamento superficial, conforme mencionado anteriormente.



Ruptura coesiva no aderente



Ruptura coesiva no adesivo



Ruptura adesiva (interfacial)

Figura 7: Modos de ruptura [Fonte: própria]

3.5. 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, ilustrados na figura 8.
- 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.

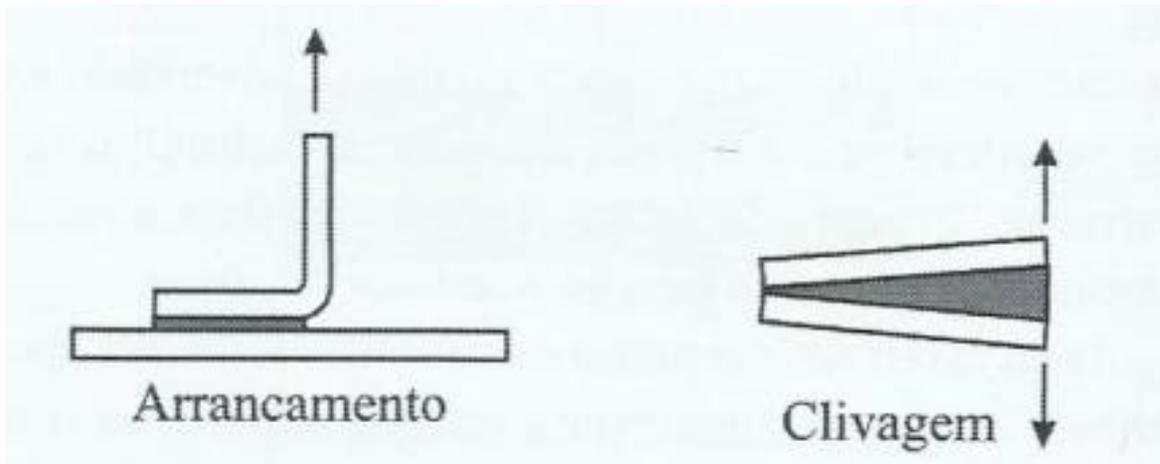


Figura 8: Arrancamento e clivagem [5]

Capítulo 4

Tratamentos superficiais

O tratamento superficial realizado no aderente antes da realização de uma junta colada é primordial na maioria dos casos desse tipo de união. Tratando-se dos reparos utilizando juntas coladas compostas de compósito e metal na indústria do petróleo e as condições ambientais agressivas que os cercam, é extremamente importante garantir a boa aderência entre os substratos e adesivo. Esta aderência é obtida através de tratamento superficial.

Desse modo, esse tema deve ser bem analisado para a obtenção de uma junta colada de qualidade. Esse capítulo destina-se a desenvolver o conhecimento sobre os principais tratamentos superficiais e a importância de sua realização.

4.1. Importância do tratamento superficial

O tratamento superficial é um fator determinante na resistência de uma junta colada, de forma que um tratamento mal realizado, provavelmente, acarretará em uma ruptura adesiva. Uma vez que, idealmente, as uniões coladas são calculadas pela resistência do aderente ou do adesivo, ou seja, para ruptura coesiva, é preocupante ocorrência de uma ruptura adesiva com esforços menores que o esperado.

A ocorrência da ruptura adesiva, normalmente, está relacionada à ligação defeituosa na interface aderente – adesivo. Esse fato pode ocorrer devido a diversos fatores como depósitos soltos [corrosão, pintura pouco aderente, partículas], oleosidade e baixa energia de superfície do aderente.

Assim, os tratamentos superficiais destinam se, justamente, a garantir a preparação ideal da superfície do aderente, de modo que, o ponto mais fraco da junta seja o adesivo ou o aderente, não a interface. Esse tratamento pode ser uma simples remoção de material a alteração da topografia superficial do aderente.

Conforme mencionado no capítulo 3, a rugosidade e a energia superficial do aderente desempenham um papel fundamental para a realização de uma junta colada de qualidade. Uma das funções do tratamento superficial é, exatamente, a de garantir que essas propriedades

sejam melhoradas e tornem se ideais. Para isso, foram desenvolvidos diversos tipos de tratamentos superficiais abrasivos com esse objetivo, e os mais utilizados estão abordados no próximo item.

Outro aspecto importante a salientar é que os tratamentos e uma boa preparação superficial impedem a alteração da superfície após a colocação da junta em serviço, ou seja, melhoram sua resistência inicial e possibilitam a permanência da mesma. No entanto, com o envelhecimento, pode ocorrer a formação de uma camada fraca na interface levando a uma ruptura na interface. Assim, é de vital importância realizar ensaios em juntas coladas não somente quando esta acabou de ser fabricada, mas também após um período de tempo nas condições em que ela estará exposta.

A figura 9 ilustra como é realizada ligação entre substrato e adesivo em uma junta colada.

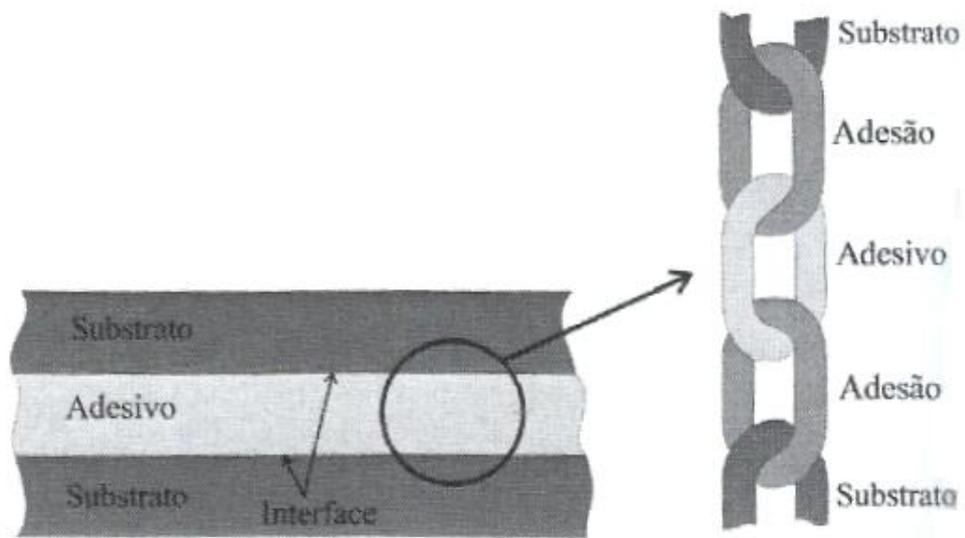


Figura 9: Ligação da junta colada [5]

4.2. Tipos de tratamento superficial

Existem diversos tipos de tratamentos superficiais que podem ser aplicados aos aderentes antes da fabricação de uma união colada. Os três tipos mais rotineiramente utilizados são jateamento com areia (sand blast), jateamento com granalhas de aço (brit blast) e o MBX bristle blast.

Os tratamentos superficiais citados são os utilizados antes da confecção dos corpos de prova para garantir adesão entre aderente e adesivo e são apresentados a seguir.

4.2.1. Jateamento de areia (Sand blast)

Esse tipo de tratamento superficial consiste em projetar partículas abrasivas de areia sobre a superfície a tratar. Utilizando o impacto dessas partículas movimentadas em alta velocidade, é possível remover pintura, oxidação e contaminantes que apresentem baixa aderência com a superfície do material.

Antes da realização do jateamento de areia, deve se realizar a limpeza da superfície do material. É primordial que gorduras, graxas e óleos sejam retirados com solventes ou qualquer outro método que elimine esses contaminantes. Após o jateamento a superfície deve ser limpa com escovas, aspiradores ou jato de ar seco para a remoção de grãos de areia e outras partículas soltas.

A utilização da areia como abrasivo é um dos métodos mais antigos utilizados para o tratamento superficial, devido a sua abundância, baixo custo e boa qualidade na preparação da superfície. No entanto, atualmente, existem diversos tipos de restrições para o emprego desse tipo de partícula abrasiva, pois mediante o impacto da areia, é gerado um particulado que quando aspirado se aloja no pulmão trazendo riscos à saúde.

O tamanho do grão da areia, também conhecido como mesh, influenciará diretamente na rugosidade da superfície a que o tratamento foi imposto. Desse modo, o mesh deve ser escolhido de acordo com o material e a rugosidade desejada.

A figura 10 ilustra a realização de um tratamento superficial utilizando-se o jato de areia.



Figura 10: Jateamento com areia [6]

4.2.2. Jateamento com granalhas de aço (Brit blast)

Esse tipo de jateamento consiste da projeção de partículas de aço em alta velocidade sobre a superfície do material. Essas partículas apresentam as mesmas funções que as citadas para o 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.

Os mesmos cuidados de limpeza da superfície devem ser tomados, que aqueles citados para o jateamento de areia. A superfície deve ser limpa antes e depois do jateamento com granalhas de aço.

Uma das grandes vantagens na utilização desse método é a possibilidade de reutilizar as granalhas de aço diversas vezes, ou seja, é possível reciclar o material. Além disso, por esse tipo de partícula não se fragmentar com o impacto, o emprego da partícula de aço, ao invés da partícula de areia, traz menos riscos à saúde.

O tamanho da granalha deve ser escolhido de acordo com o material em que esse tratamento superficial será aplicado. A rugosidade do material após o tratamento sofrerá influência direta de acordo com a dimensão da granalha. Assim, cada substrato tem uma gama de tamanho de granalha mais apropriada e a tabela 1 apresenta os mais indicados para alguns substratos metálicos.

Tabela 1: Substrato e tamanho da granalha [5]

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

4.2.3. MBX Bristle blasting

O MBX Bristle blasting é um tratamento superficial que utiliza uma máquina rotativa manual com cerdas de arame de aço de alto carbono. A energia cinética de impacto das cerdas com a superfície do aderente é equivalente a do jateamento com granalhas de aço, sendo a limpeza e a rugosidade obtidas também semelhantes. Assim, esse tipo de tratamento é capaz de remover partículas como óxidos e contaminantes, promovendo um eficiente tratamento superficial.

Esse método de preparação superficial apresenta vantagens em relação ao jateamento de partículas, sendo as principais delas a simplicidade, economia e menores riscos à saúde do operador no processo de tratamento. Esse fato deve se a máquina rotativa ser de fácil manuseamento e baixo peso, podendo utilizar fonte elétrica ou pneumática para o seu funcionamento. Além disso, não há necessidade de uso de roupas especiais, respirador e coletor de partículas, componentes esses essenciais na realização da maioria dos jateamentos.

Um estudo realizado por R. J. Stango, Ph.D. e P. Khullar [7], demonstrou bons resultados na utilização desse método de preparação superficial em tubulações API 5L, que apresentam destacado emprego na indústria petrolífera onshore e offshore. Ensaio mostraram que uma tubulação do tipo citado, severamente corroída, pode ser recuperada pelo tratamento de bristle blasting, resultando uma superfície uniforme, sem a presença de qualquer pit de corrosão.

A figura 11 ilustra uma máquina para a realização do tratamento superficial denominado bristle blasting.



Figura 11: MBX bristle blasting [6]

Capítulo 5

Efeitos ambientais nas juntas adesivas

Os efeitos ambientais, como temperatura e umidade, são fatores que podem influenciar diretamente na resistência de uma junta adesiva. Outro fator ambiental, sobre o qual existem menos estudos, mas que também é extremamente importante de se avaliar é o ambiente com alta salinidade.

Neste trabalho existe uma grande preocupação em relação a esses fatores, já que os reparos com juntas adesivas estudados estão imersos em um meio extremamente agressivo. Sendo assim, este capítulo destina-se a apontar os principais danos causados pela temperatura e umidade em uma junta adesiva, que foram os fatores ambientais mais estudados até hoje.

5.1. 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.

5.2. 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 à juntas adesivas nessas condições são de extrema importância.

Os danos relacionados à elevada umidade em juntas adesivas são devido à degradação das propriedades mecânicas, especialmente, no adesivo e na adesão da interface, causada pelo contato com a água. A penetração da água na junta promove alterações dimensionais, como o inchamento, leva a um aumento de tensões em seu interior e uma queda na temperatura de transição vítrea do polímero. Alguns dos danos causados pelo excesso de umidade podem ser reversíveis após a retirada da água e ocorrer a recuperação da resistência da junta, no entanto, alguns danos também persistem irreversíveis.

Existem diversos estudos que demonstram que elevadas condições de umidade levam a deterioração das propriedades mecânicas das juntas adesivas, afetando não apenas o adesivo e a interface como também os substratos, principalmente, quando se trata de materiais compósitos. No entanto, não existem muitos estudos que demonstrem as conseqüências do ambiente salino com elevada umidade caracterizados pelo litoral e oceano adentro, em juntas adesivas. Desse modo, um dos objetivos dessa pesquisa é entender melhor o comportamento desse tipo de junta nessas condições mencionadas.

5.3. 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 conseqüências do ambiente salino com elevada umidade caracterizados pelo litoral e oceano adentro, em juntas adesivas. Pesquisas existentes relacionadas ao tema apontam que os efeitos relativos à salinidade são menos nocivos à juntas adesivas que os fatores de temperatura e umidade, mas maiores estudos precisam ser realizados para investigar o tema.

Desse modo, um dos objetivos dessa pesquisa é entender melhor o comportamento das juntas adesivas formadas por aço e compósito nas condições de elevada umidade e salinidade.

Capítulo 6

Ensaio de arrancamento

Os ensaios de arrancamento são uma metodologia comum para testar a qualidade e a resistência de juntas coladas. Os adesivos tendem a apresentar resistência ao arrancamento e clivagem piores que à tração e compressão. Por isso, esse tipo de ensaio deve ser realizado, preferencialmente, com a junta nas condições em que estará exposta em trabalho para que os resultados obtidos sejam os mais fiéis possíveis. Além disso, ensaios de arrancamento são um modo simples e eficiente para a avaliação de diferentes tratamentos superficiais realizados nos aderentes e a qualidade da junta resultante.

Sendo assim, os ensaios de arrancamento foram a metodologia escolhida para realizar a análise dos reparos realizados na indústria petrolífera, que empregam juntas coladas compostas de aço e compósito.

Esse capítulo destina-se a abordar como são realizados, o tipo de ensaio utilizado nesse estudo e os conceitos mais importantes relacionados ao tema.

6.1. Características dos ensaios de arrancamento

Existem diferentes tipos de ensaio de arrancamento, podendo ser realizados entre dois substratos flexíveis ou entre um substrato rígido e um substrato flexível. Nesse projeto é utilizado um substrato rígido e um substrato flexível para análise desejada, sendo, ambos aço e compósito, ensaiados como substrato rígido e flexível.

O ensaio consiste do arrancamento do substrato flexível separando-o do substrato rígido com uma velocidade constante por uma máquina com garras especiais capazes de realizar essa função. As curvas de carga e deslocamento são obtidas pelo próprio equipamento.

O ensaio utilizado nesse estudo foi o denominado floating roller peel test, tema abordado no próximo item.

6.2. Ensaio de arrancamento (Floating roller peel test)

O floating roller peel test, ilustrado na figura 12, é um ensaio de arrancamento cuja norma é a ASTM D 3167 [8], e como mencionado, anteriormente, consiste do arrancamento do substrato flexível separando o do substrato rígido. Este é um método simples e eficiente de ensaio para se verificar a adesão de uma junta adesiva e por isso vem sendo muito utilizado com esse propósito.

No entanto, a norma que rege esse tipo de ensaio é específica apenas para juntas adesivas compostas de substratos metálicos. Com o crescimento da utilização de juntas coladas híbridas, principalmente, devido ao desenvolvimento e emprego dos materiais compósitos, se faz 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 [9], 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.

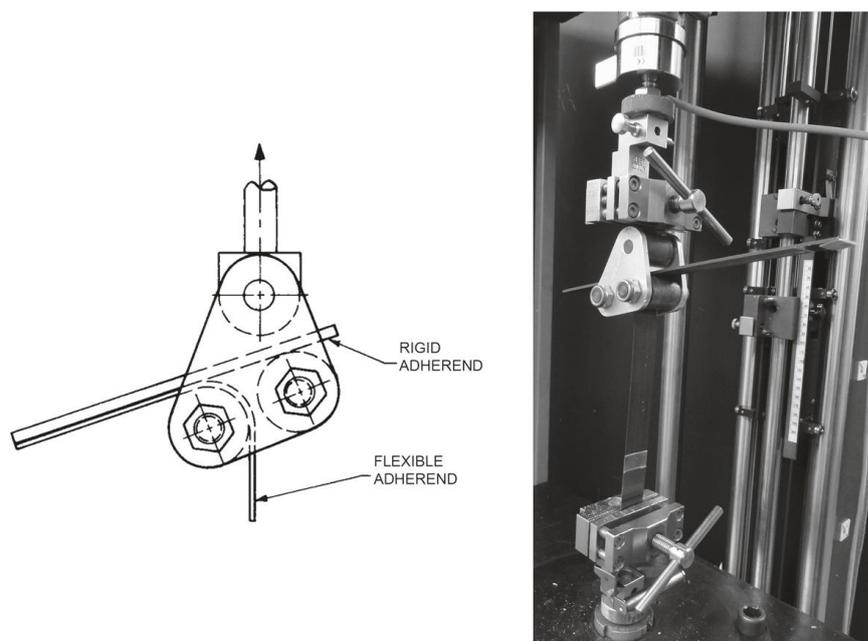


Figura 12: Floating roller peel test [9]

No entanto, o estudo citado apresenta algumas observações para os diferentes substratos ensaiados. Foi constatado, 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 que esta ocorre. Esse fato ocorre devido às diferentes propriedades, principalmente, as relacionadas à plasticidade do substrato flexível, ou seja, a carga de arrancamento resultante será fortemente influenciada pelo material do substrato e não apenas pela resistência do adesivo e adesão da junta, que é o foco do ensaio.

Os ensaios realizados por S. Freitas e J. Sinke [9] 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 13 ilustra as curvas obtidas após o ensaio da junta adesiva composta por compósito - compósito (CPT) e alumínio - alumínio (FRPT), que explicita a diferença de carga de arrancamento mencionada.

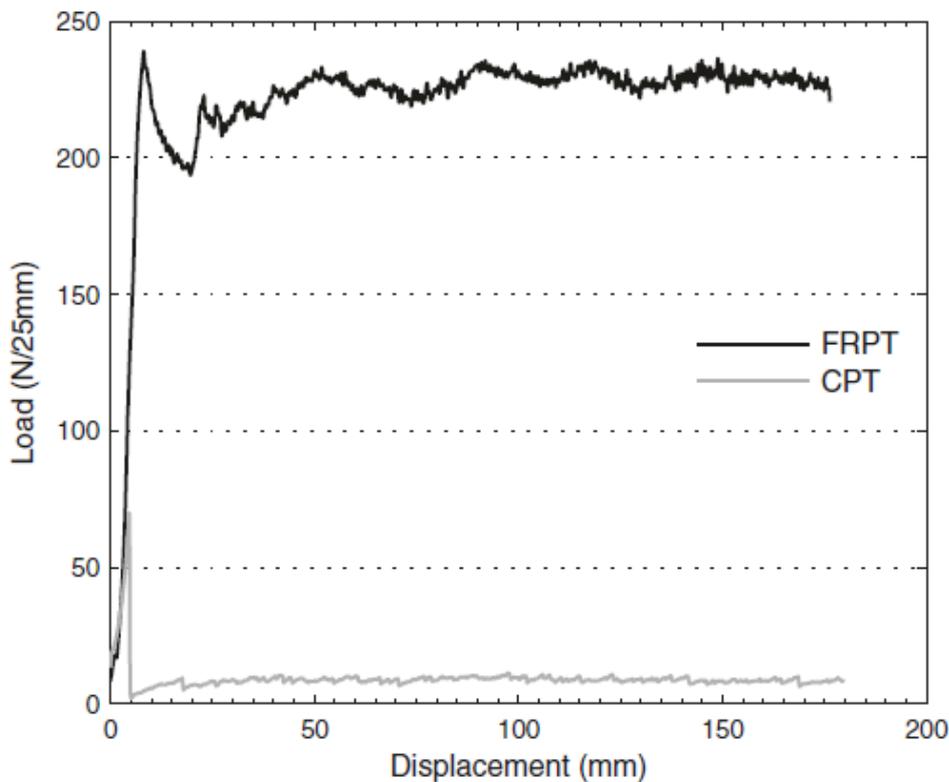


Figura 13: Resultado obtido do ensaio de arrancamento [9]

Concluiu-se que esse fato deve-se a maior energia necessária para a ocorrência da deformação plástica no metal 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.

Portanto, a comparação de carga de ruptura resultante de ensaios de arrancamento do tipo floating roller peel test, para avaliar a qualidade e a resistência de uma junta colada, só pode ser realizada quando os substratos flexíveis utilizados forem compostos do mesmo material.

Com base nas conclusões do estudo citado, esse projeto analisará os resultados obtidos dos ensaios de arrancamento de acordo com a carga de ruptura, apenas para corpos de prova com o mesmo tipo de material como substrato flexível, no caso, aço ou compósito. Para análise geral entre os corpos de prova com diferentes substratos flexíveis, o modo de ruptura é o fator mais importante a se observar.

Capítulo 7

Procedimento experimental

Esse estudo possui o intuito de analisar a adesão e durabilidade das juntas coladas utilizadas na indústria petrolífera, desse modo, todo o procedimento experimental para o ensaio, como os materiais, confecção das juntas e condições ambientais foram os mais semelhantes possíveis ao da citada indústria.

Este capítulo possui como objetivo fornecer mais detalhes de como foi realizado o procedimento experimental, informando os materiais e equipamentos utilizados, a confecção dos corpos de prova, as condições de envelhecimento e a realização dos ensaios de arrancamento.

7.1. Experimento

Esse experimento foi realizado em sincronismo entre o CEFET-RJ junto à universidade de Delft, Amsterdã, com participação da pesquisadora Sofia Freitas. O envelhecimento e ensaios dos corpos de prova foram realizados nos dois locais.

Os corpos de prova foram adquiridos prontos, confeccionados pelo professor Ney Robson Rohen, autor de [4], e consistiam de juntas adesivas cujos aderentes eram formados por aço e compósito. Os ensaios de arrancamento preliminares foram realizados e os resultados obtidos. Em seguida, os corpos de prova foram colocados em uma condição de contorno de forma a simular as condições ambientais encontradas na indústria petrolífera.

Essa simulação consistiu em colocar os corpos de prova em ambiente salino, com auxílio de um mecanismo chamado spray de sal, para simular a atmosfera salina e elevada umidade presentes na maior parte das instalações petrolíferas. O envelhecimento foi realizado e os corpos de prova foram ensaiados por arrancamento após trinta dias. Além disso, corpos de prova de referência envelhecidos fora das condições salinas também foram ensaiados para comparação. Os resultados foram obtidos e comparados.

Os resultados e suas análises estão descritos, respectivamente nos capítulos 8 e 9. Os próximos itens abordam os corpos de prova, materiais, equipamentos, processo de envelhecimento e o ensaio de arrancamento utilizado para a realização desse experimento.

7.2. Corpos de prova

Os corpos de prova foram confeccionados com chapas de aço e compósito. Foi utilizado chapas de aço A36 galvanizado com diferentes espessuras dependendo da configuração do corpo de prova. O tipo de compósito empregado foi o polimérico reforçado com fibra de carbono (CFRP), orientada em diferentes direções. Foi utilizado o adesivo tipo estrutural NVT.

O tratamento superficial utilizado para a confecção de todos os corpos de prova foi o jateamento abrasivo com granalha de aço. A superfície foi limpa com acetona antes e após o jateamento para a remoção das impurezas.

Após a confecção dos corpos de prova a trinca inicial foi promovida manualmente a fim de que a garra da máquina que realiza o ensaio de arrancamento pudesse prender o aderente flexível e o equipamento realizar seu arrancamento de acordo com o previsto para esse tipo de ensaio.

Foram confeccionados duas diferentes configurações de juntas coladas como corpos de prova, conforme listados a seguir:

- ***CFRP (Polímero reforçado com fibra de carbono) Flexível – Aço Rígido***

Nessa configuração de corpo de prova, foi utilizado como elemento rígido uma chapa de aço A36 com 1/8” de espessura. Como aderente flexível foi utilizado um compósito com uma camada de fibra de carbono a 0/90°. Esse tipo de corpo de prova e está ilustrados na figura 14 e suas dimensões são apresentadas na figura 15.

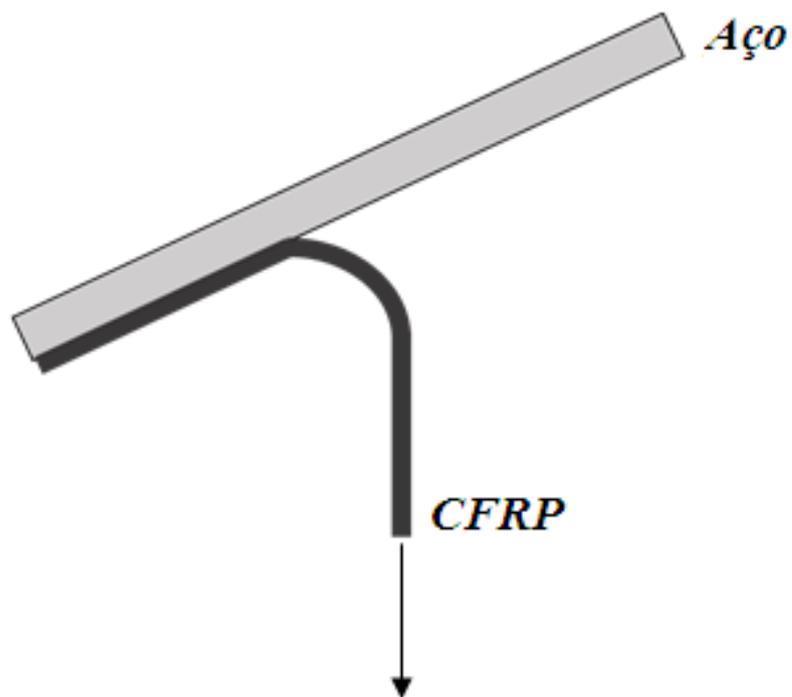


Figura 24: Corpo de prova CFRP Flexível – Aço Rígido [fonte: própria]

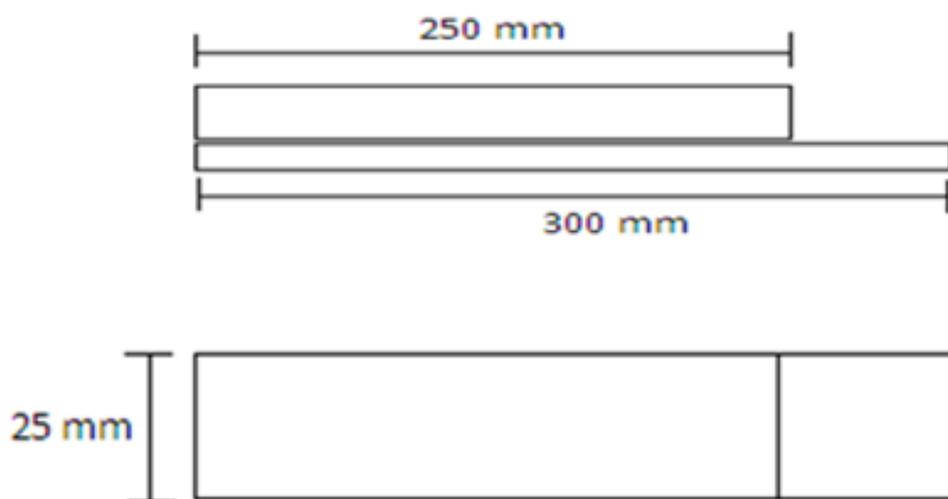


Figura 15: Dimensões corpo de prova [fonte: própria]

- **CFRP (Polímero reforçado com fibra de carbono) Rígido – Aço Flexível**

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 galvanizado de 0,6 mm de espessura. Este tipo de corpo de prova está ilustrado na figura 16 e suas dimensões são apresentadas na figura 15.

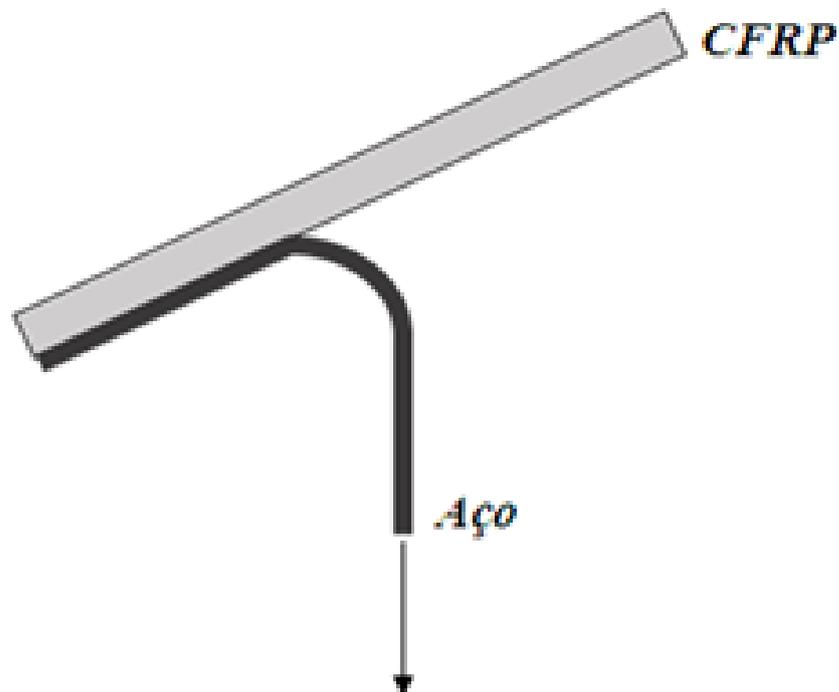


Figura 16: Corpo de prova CFRP Rígido – Aço Flexível [fonte: própria]

7.3. Envelhecimento dos corpos de prova

O método utilizado para o envelhecimento dos corpos de prova, a fim de simular as condições salinas encontradas na indústria petrolífera, foi a utilização do spray de sal. Esta simulação foi realizada nas dependências da universidade de Delft e consiste de um método comum e simples para a averiguação da resistência de materiais a ambientes corrosivos, utilizado em diversos campos de pesquisas.

Conforme a norma ISO 9227 [10], que rege os ensaios de envelhecimento em atmosfera artificial, o procedimento foi realizado com a colocação dos corpos de prova em uma câmara fechada, a temperatura ambiente, onde uma solução de 5% de NaCl dissolvida em água foi pulverizada através de injetores pressurizados a ar, criando as condições ambientais desejadas.

A seguir é apresentado como esse envelhecimento foi realizado em cada configuração de corpo de prova.

- ***CFRP Flexível – Aço Rígido***

Não foi realizado o envelhecimento nesse tipo de configuração de corpo de prova.

- ***CFRP Rígido – Aço Flexível***

Seis corpos de prova com esse tipo de configuração foram colocados em atmosfera salina com o método de spray de sal. Um corpo de prova não foi colocado nas condições salinas para servir como referência para a influência do tempo decorrido na junta adesiva.

Após 30 dias de envelhecimento nas condições mencionadas, três dos corpos de prova que estavam expostos ao spray de sal foram ensaiados, assim como o corpo de prova de referência.

7.4. Ensaio de arrancamento

O ensaio foi realizado conforme a norma ASTM D 3167 [8], para todos os tipos de configurações de corpos de prova já mencionados e consistiu do arrancamento do substrato flexível da junta colada com o auxílio de um mecanismo especialmente utilizado para esse tipo de ensaio. Foram utilizadas as máquinas de ensaio da instituição CEFET-RJ e da

universidade de DELFT. O software que acompanha a máquina forneceu os resultados e gráficos necessários para a análise da adesão presente na junta.

Os ensaios de arrancamento, conforme relatado anteriormente, foram realizados em duas etapas. A primeira etapa ocorreu imediatamente após o recebimento dos corpos de prova, e a segunda etapa após trinta dias de envelhecimento dos corpos de prova.

- ***CFRP Flexível – Aço Rígido***

Esse tipo de configuração de corpo de prova foi ensaiado logo após seu recebimento e não passou por nenhum processo de envelhecimento devido ao resultado obtido no ensaio de arrancamento preliminar.

Esse ensaio foi realizado na instituição CEFET-RJ em uma máquina Instron com célula de carga de 1 KN.

- ***CFRP Rígido – Aço Flexível***

Logo após o recebimento três corpos de prova com essa configuração foram ensaiados.

Os corpos de prova colocados em atmosfera salina foram ensaiados por arrancamento logo após a sua retirada das condições de envelhecimento em que se encontravam.

Os ensaios preliminares dos corpos de prova compostos de CFRP rígido – Aço flexível foram realizados na instituição CEFET-RJ em uma máquina Instron com célula de carga de 1 KN e velocidade de 125 mm/min. Os ensaios após o envelhecimento dos corpos de prova foram realizados na universidade de Delft em uma máquina eletromecânica Zwick com célula de carga de 1 KN e velocidade de 125 mm/min. A figura 17 ilustra a realização de um ensaio de arrancamento.



Figura 17: Realização do ensaio de arrancamento [fonte: própria]

Os resultados obtidos para cada configuração de corpos de prova encontram-se no próximo capítulo.

Capítulo 8

Resultados

Este capítulo aborda os resultados obtidos nos ensaios de arrancamento (Floating Roller Peel test) em cada tipo de configuração diferente de corpos de prova. Os resultados das duas etapas do ensaio de arrancamento realizado são descritos nesse capítulo.

8.1. Primeira etapa do ensaio

Esta etapa foi comum a ambas as configurações de corpos de prova e realizada logo após o seu recebimento sem passar por qualquer tipo de envelhecimento. A seguir, os resultados de acordo com as diferentes configurações de corpos de prova ensaiados.

- *CFRP Flexível – Aço Rígido*

Após o ensaio do corpo de prova com essa configuração, foi verificada ruptura coesiva no substrato flexível. Essa falha foi observada pela quebra das fibras no compósito de CFRP, na medida em que o ensaio de arrancamento se desenvolvia e este material sofria flexão. Por esse motivo, essa configuração de corpo de prova para o ensaio de arrancamento com o objetivo de se verificar a adesão da junta foi descartado.

- *CFRP Rígido – Aço Flexível*

Nessa etapa, três corpos de prova com essa configuração foram ensaiados ao arrancamento e resultaram em ruptura coesiva no adesivo. A figura 18 ilustra o gráfico obtido do ensaio desses três corpos de prova e a tabela 2 informa os valores máximos e mínimos de carga de arrancamento obtidos, e a média das forças de arrancamento em cada corpo de prova ensaiado, descartados os primeiros 25,4 mm, conforme dita a norma [8]. Foram levados em conta os valores entre 25,4 mm e 150 mm de comprimento de arrancamento.

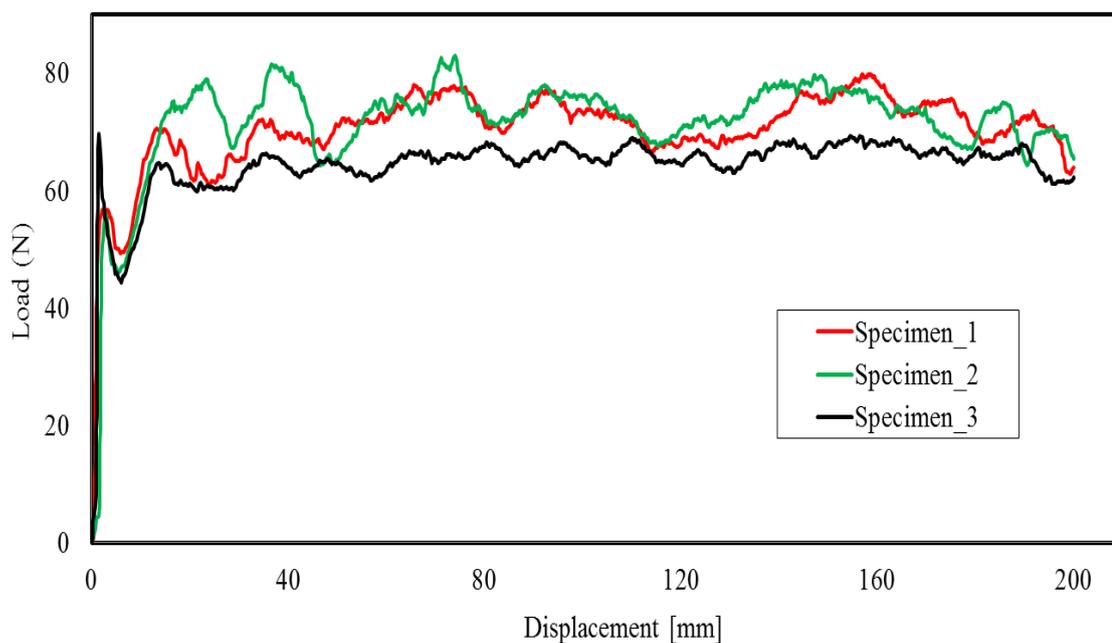


Figura 18: Resultados do ensaio CFRP Rígido – Aço Flexível sem envelhecimento

Tabela 2: Carregamentos resultantes do ensaio CFRP Rígido – Aço Flexível sem envelhecimento

<i>C.P.</i>	<i>F máx. (N)</i>	<i>F mín.(N)</i>	<i>Média (N)</i>
<i>1</i>	<i>78,05</i>	<i>62,37</i>	<i>71,72</i>
<i>2</i>	<i>83,09</i>	<i>64,38</i>	<i>74,00</i>
<i>3</i>	<i>68,93</i>	<i>60,15</i>	<i>65,39</i>

8.2. Segunda etapa do ensaio

Esta etapa foi realizada após trinta dias de envelhecimento dos corpos de prova. No entanto, como os ensaios preliminares demonstraram que a configuração de junta colada formada por CFRP Flexível – Aço Rígido apresenta ruptura coesiva do aderente flexível, prejudicando assim a análise da adesão que é o objetivo principal desse estudo, não foi realizado o envelhecimento nesse tipo de corpo de prova.

Portanto esta etapa foi realizada apenas para as juntas compostas por CFRP Rígido – Aço flexível, que apresentaram ruptura predominantemente coesiva do adesivo nos ensaios preliminares, tipo de ruptura ideal para análise da adesão. A seguir, os resultados de acordo com as diferentes configurações de corpos de prova ensaiados.

- ***CFRP Flexível – Aço Rígido***

Não foi realizado.

- ***CFRP Rígido – Aço Flexível***

A segunda etapa dos ensaios de arrancamento para essa configuração de corpos de prova foi realizada após trinta dias de envelhecimento em atmosfera salina, utilizando-se o spray de sal. Três corpos de prova envelhecidos nessas condições foram ensaiados, seus resultados estão apresentados na figura 19.

Um corpo de prova que não foi colocado nas condições salinas de envelhecimento após a primeira etapa dos ensaios, também foi ensaiado como referência para a influência do tempo nas propriedades mecânicas da junta adesiva, e seu gráfico obtido está apresentado na figura 20.

A tabela 3 informa os valores máximos e mínimos de carga de arrancamento obtidos após o envelhecimento, e a média das forças de arrancamento em cada corpo de prova ensaiado, descartados os primeiros 25,4 mm, conforme dita a norma [8]. Foram levados em conta os valores de carga obtidos entre 25,4 mm e 150 mm de comprimento de arrancamento.

Após o ensaio foi verificado o ingresso de umidade nas regiões próximas as superfícies laterais da junta, apesar desse fato, foi verificada ruptura predominantemente coesiva do adesivo em toda a extensão da junta.

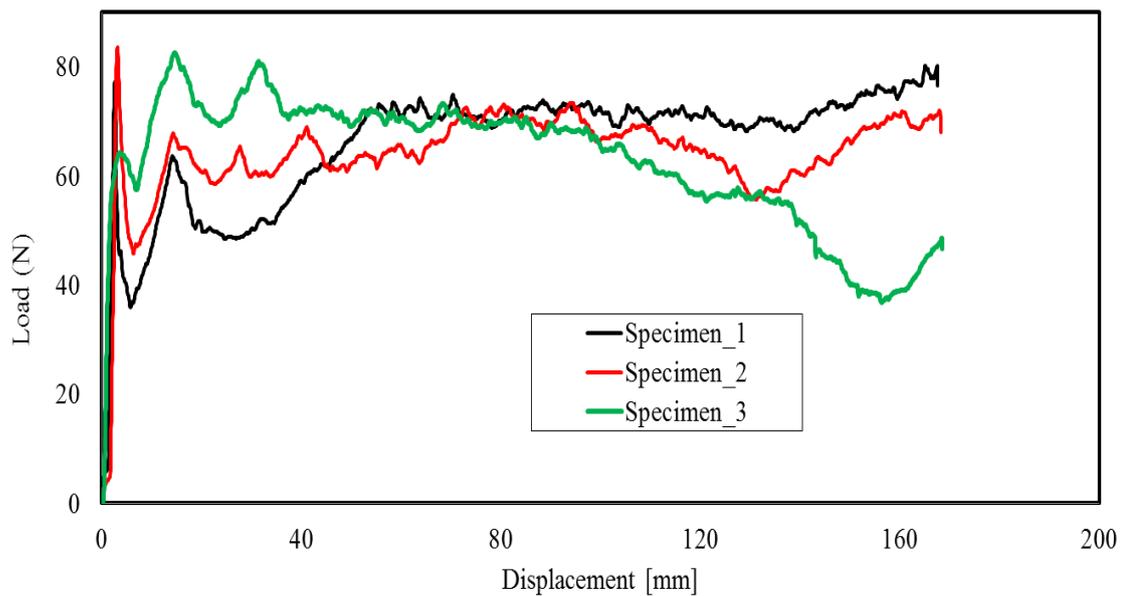


Figura 19: Resultados do ensaio CFRP Rígido – Aço Flexível após 30 dias de envelhecimento

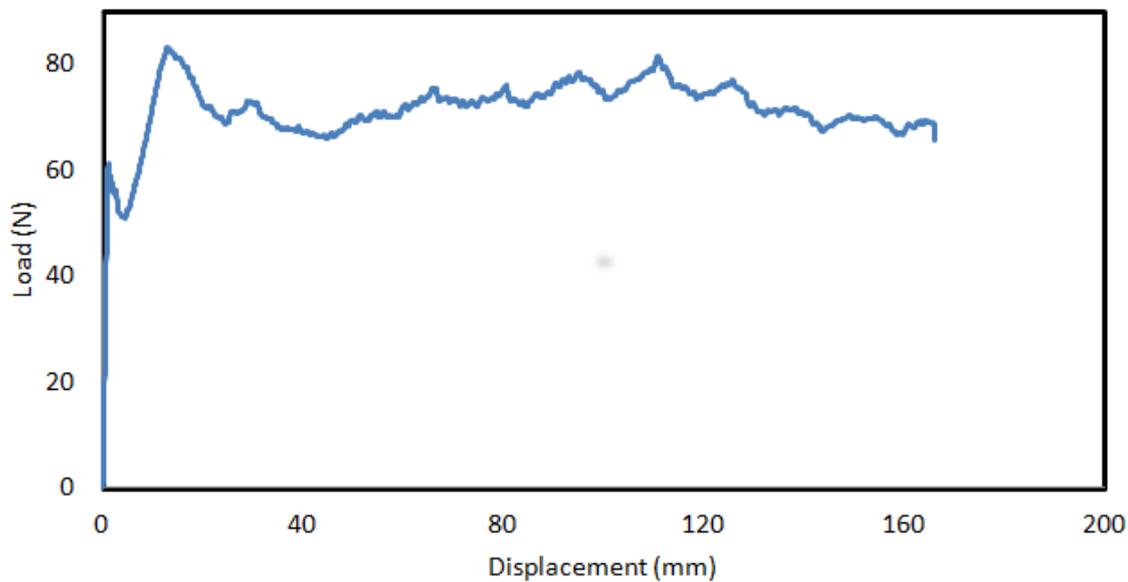


Figura 20: Resultados do ensaio CFRP Rígido – Aço Flexível de referência após 30 dias de envelhecimento fora das condições salinas

Tabela 3: Carregamentos resultantes do ensaio CFRP Rígido – Aço Flexível após 30 dias de envelhecimento

<i>C.P.</i>	<i>F máx. (N)</i>	<i>F mín. (N)</i>	<i>Média (N)</i>
<i>1</i>	<i>74,79</i>	<i>48,53</i>	<i>68,36</i>
<i>2</i>	<i>73,36</i>	<i>55,62</i>	<i>65,25</i>
<i>3</i>	<i>80,97</i>	<i>40,09</i>	<i>64,94</i>
<i>Ref.</i>	<i>81,51</i>	<i>66,05</i>	<i>72,60</i>

Capítulo 9

Análise dos resultados

Este capítulo destina-se a análise e discussão dos resultados obtidos nos ensaios de arrancamento realizados para as diferentes configurações de corpos de prova e expostos no capítulo anterior.

9.1. CFRP Flexível – Aço Rígido

Esta configuração de corpo de prova obteve nos ensaios preliminares ruptura coesiva no aderente flexível, CFRP, que foi observada pela quebra dos reforços compostos de fibra de carbono antes mesmo do início do arrancamento, ou seja, do início da separação entre o adesivo e o aderente.

Devido ao interesse desse estudo ser o de verificar a adesão presente na junta formada por Aço – CFRP, e pelo fato dos resultados do ensaio ficarem prejudicados pela ruptura das fibras do CFRP, não é possível realizar análises de adesão por esse método de ensaio de arrancamento. Sendo assim, esse tipo de configuração de corpo de prova, para análise da adesão por ensaios de arrancamento, foi descartado e descontinuado. A referida análise da adesão foi realizada pela configuração de junta composta por CFRP Rígido - Aço flexível, apresentada no próximo item.

Este estudo propõe que outros métodos de ensaio sejam utilizados para acessar as informações pertinentes sobre adesão em configurações de juntas adesivas compostas por CFRP Flexível – Aço rígido, por exemplo, ensaios de três pontos, como o MMF. Também se propõe modificações no layout do compósito utilizado como aderente flexível para a fabricação de corpos de prova futuros, com o intuito da realização de ensaio de arrancamento, a fim de que este não se rompa ao ser fletido.

9.2. CFRP Rígido – Aço Flexível

O ensaio de arrancamento, para essa configuração de corpos de prova, demonstrou ser um método adequado para se obter informações relacionadas à adesão em juntas de Aço - compósito. Este fato deve-se à ocorrência da ruptura predominantemente coesiva no adesivo em todos os ensaios realizados, tanto antes como após o período de envelhecimento, sendo este o tipo de ruptura ideal para a análise de adesão de uma junta colada.

- Após trinta dias de envelhecimento:

Os resultados dos ensaios de carga x deslocamento por ensaio de arrancamento expostos no capítulo anterior demonstram que não existe uma diferença significativa na carga máxima de arrancamento obtidas antes e após os trinta dias de envelhecimento.

No entanto, ao se verificar as cargas mínimas antes e após o envelhecimento das juntas adesivas no spray de sal, é possível verificar uma diferença mais acentuada, conforme pode ser observado comparando as tabelas 4 e 5, fato que pode ser atribuído ao fator das condições ambientais.

O fato constatado no parágrafo anterior pode ser atribuído às condições ambientais, pois o corpo de prova que foi envelhecido fora das condições de elevada umidade e salinidade apresentou uma força mínima de arrancamento semelhante aos corpos de prova ensaiados antes do envelhecimento. Sendo assim, pode-se afirmar que a queda na força mínima de arrancamento para os corpos de prova envelhecidos no spray de sal foi devido ao fator condições ambientais impostas, e não devido ao fator tempo de envelhecimento.

As tabelas 4 e 5 apresentam os valores de força máxima e mínima de arrancamento obtidas para cada corpo de prova, antes e após o envelhecimento. A média apresentada nas tabelas é soma dos valores de força máxima (tabela 4) e força mínima (tabela 5) divididos pelo número de corpos de prova ensaiados, no caso três corpos de prova antes do envelhecimento e três corpos de prova após o envelhecimento nas condições salinas.

Tabela 4: Forças máximas de arrancamento obtidas

Corpo de prova	F máx. (N)			Média F máx. (N)
	1	2	3	
Antes do envelhecimento	78,05	83,09	68,93	76,69
Após trinta dias de envelhecimento nas condições salinas	74,79	73,36	80,97	76,37
Após trinta dias de envelhecimento fora das condições salinas	81,52			

Tabela 5: Forças mínimas de arrancamento obtida

Corpo de prova	F mín. (N)			Média F mín. (N)
	1	2	3	
Antes do envelhecimento	62,37	64,38	60,15	62,30
Após trinta dias de envelhecimento nas condições salinas	48,53	55,62	40,09	48,08
Após trinta dias de envelhecimento fora das condições salinas	66,05			

Em relação à média da força de arrancamento obtida do ensaio, observa-se que houve uma queda nesse valor para os corpos que foram envelhecidos no spray de sal, enquanto no corpo de prova de referência, envelhecido fora das condições salinas, essa média manteve-se mais próxima dos resultados obtidos nos ensaios preliminares.

A tabela 6 ilustra a comparação entre a média das forças de arrancamento antes e após o envelhecimento da junta adesiva composta de CFRP Rígido – Aço Flexível para o comprimento de arrancamento entre 25,4 mm e 150 mm. A média dos três corpos de prova, presentes na tabela, é o valor somado dos valores da média das forças de arrancamento obtidos em cada corpo de prova, divididos pelo número de corpos de prova ensaiados, no caso três antes do envelhecimento e três após os trinta dias de envelhecimento nas condições salinas.

Tabela 6: Média das forças de arrancamento antes e após o envelhecimento da junta

Corpo de prova	Média das forças de arrancamento (N)			Média dos três corpos de prova (N)
	1	2	3	
Antes do envelhecimento	71,73	74,00	65,39	70,37
Após trinta dias de envelhecimento nas condições salinas	68,36	65,25	64,94	66,20
Após trinta dias de envelhecimento fora das condições salinas	72,60			

Pode-se concluir, portanto, que existe uma degradação nas propriedades mecânicas da junta após seu envelhecimento nas condições de elevada umidade e salinidade, especialmente, em relação aos valores de cargas mínimas de arrancamento obtidas em que houve uma queda de aproximadamente 23% comparada à média dos ensaios preliminares. Também pode ser atribuída à influência das condições ambientais a pequena queda na média da força de arrancamento.

A análise visual das curvas de carga x deslocamento apontam diferenças entre os ensaios realizados antes e após o envelhecimento dos corpos de prova. A diferença mais marcante que pode ser observada é a maior instabilidade das curvas obtidas após o envelhecimento em atmosfera salina, ou seja, a maior diferença entre picos e vales (diferença entre forças) da curva quando comparado aos ensaios realizados antes do envelhecimento e após o envelhecimento fora das condições salinas.

A diferença de estabilidade nas curvas de carga x deslocamento citadas no parágrafo anterior e a queda nos valores de cargas mínimas e médias das forças de arrancamento após o envelhecimento no spray de sal podem ser explicadas pela verificação do ingresso de umidade no interior da junta após os trinta dias de envelhecimento nas condições salinas.

Essa entrada da umidade no interior da junta foi observada após a realização do ensaio de arrancamento e análise do local da ruptura, encontrando-se confinada próxima às paredes da junta, conforme ilustrado na figura 21.

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 nas propriedades mecânicas do adesivo e por esse fato se faz necessário uma melhor averiguação do fato.

Com esse intuito, corpos de prova estão em processo envelhecimento por noventa dias nas mesmas condições salinas para se verificar se haveria uma maior umidade ingressada na junta e se esta afetaria de alguma maneira mais proeminente as curvas de carga x deslocamento e a adesão da junta.



Figura 21: Corpo de prova ensaiado após trinta dias em condições salinas [fonte: própria]

Capítulo 10

Pesquisas em desenvolvimento

O estudo da adesão e durabilidade de juntas coladas compostas por aderentes metálicos e compósitos encontra-se ainda em desenvolvimento. Esse estudo não se limita apenas a juntas adesivas formadas por compósito – aço, mas também compósito – compósito. No entanto, como os resultados após o envelhecimento dessas juntas não puderam ser obtidos até a data de entrega desse relatório, não foi possível sua análise.

Este capítulo destina-se a apresentar as pesquisas que ainda estão em andamento, relacionadas à adesão e durabilidade de juntas adesivas, e que estão sendo realizadas em parceria entre o CEFET-RJ e a universidade de Delft.

10.1. CFRP Rígido – Aço Flexível

Essa configuração de junta adesiva, que foi o foco principal desse relatório, ainda está em desenvolvimento. Os resultados apresentados foram apenas pelos primeiros trinta dias de envelhecimento, no entanto, essa pesquisa continua e existem corpos de prova em processo de envelhecimento e que serão ensaiados após noventa dias nas condições salinas. Devido ao prazo limite de entrega desse relatório, não foi possível obter esses resultados.

Além do envelhecimento dos corpos de prova com essa configuração em atmosfera salina, pelo método de spray de sal, também está sendo realizado em um grupo de corpos de prova o envelhecimento com seu comprimento completamente submerso em água salina, e em outro grupo apenas com 50% de seu comprimento de arrancamento submerso. A água salina simula a água dos oceanos, com uma solução de 5% de NaCl diluídos em água. Esse tipo de envelhecimento visa verificar a influência da elevada umidade e salinidade na durabilidade e adesão das juntas adesivas compostas por aço – compósito.

Para o ensaio dos corpos de prova que ficaram completamente submersos e apenas metade de seu comprimento de arrancamento submersos, existem planos de que alguns desses corpos de prova sejam secos em fornos antes de serem ensaiados e outros sejam ensaiados imediatamente após serem retirados da condição de envelhecimento, ou seja, molhados. Essa

variação visa verificar se após a retirada da umidade, que eventualmente possa haver penetrado na junta adesiva, ocorrem variações na adesão.

Esse estudo está em andamento, com os corpos de prova em processo de envelhecimento, nas condições mencionadas, no laboratório de Compósitos e Adesivos (LADES) na instituição CEFET-RJ, ilustrado na figura 22, e seus resultados dos ensaios de arrancamento devem ser obtidos, apenas, após a metade de 2016.



Figura 22: Corpos de prova em processo de envelhecimento no LADES [fonte: própria]

10.2. CFRP Rígido – CFRP Flexível

Encontra-se ainda em progresso o envelhecimento dos corpos de prova formados por aderentes compósitos. Os ensaios preliminares demonstraram que o método de arrancamento pode ser utilizado para acessar as propriedades de adesão nesse tipo de junta adesiva, em que foi constatada ruptura predominantemente coesiva do adesivo.

Esses corpos de prova estão sendo envelhecidos completamente submersos em água salina, e assim como os corpos de prova compostos por compósito – aço, um grupo será ensaiado após serem secos em um forno e outro grupo será ensaiado na condição em que foi retirado do envelhecimento, ou seja, molhados.

Esse estudo está em andamento, com os corpos de prova em processo de envelhecimento, nas condições mencionadas, no laboratório de Compósitos e Adesivos (LADES) na instituição CEFET-RJ, ilustrado na figura 22 e seus resultados dos ensaios de arrancamento devem ser obtidos, apenas, após a metade de 2016.

Capítulo 11

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 em pesquisa anterior [9].

No entanto, esse estudo demonstrou que nem todas as configurações de juntas coladas podem ser ensaiadas pelo método do arrancamento, visto que, as juntas coladas compostas por CFRP flexível – Aço rígido sofreram ruptura coesiva no aderente compósito, prejudicando o acesso às informações sobre a adesão da junta. Conclui-se que é necessária especial atenção na fabricação do aderente flexível para a realização do ensaio de arrancamento.

Em relação à durabilidade e adesão após o processo de envelhecimento, ficou comprovado que as condições de elevada umidade e salinidade a que as juntas adesivas foram expostas não afetaram de maneira significativa a adesão. Entretanto, as propriedades mecânicas do adesivo, já que a ruptura foi predominantemente coesiva no adesivo em todos os ensaios, e as curvas de carga x deslocamento foram influenciadas por essas condições ambientais.

Essa influência nas propriedades mecânicas do adesivo e das curvas podem ser atribuídas à penetração da umidade no interior da junta, observada após os ensaios de arrancamento nos corpos de prova expostos às condições de atmosfera salina. Por esse motivo, existe a necessidade de se averiguar melhor a influência dessas condições ambientais e o ingresso de umidade em juntas adesivas.

Para isso, a pesquisa continua, e corpos de prova continuam em processo de envelhecimento. Após noventa dias de envelhecimento novos ensaios serão realizados e conclusões mais significativas, provavelmente, poderão ser obtidas.

Bibliografia

- [1] ALMACO – Associação Latino Americana de Materiais Compósitos
- [2] Duoline Technologies
- [3] Norma ISO PDTS 24817
- [4] 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
- [5] L. Da Silva, António Magalhães, Marcelo de Moura, “Juntas adesivas estruturais”, publindústria Ltda, 2007
- [6] MBX Bristle Blaster – http://www.mbxit.com/files/data_sheets/Bristle_Blaster_Brochure
- [7] Robert J. Stango, Ph.D., P.E. and Piyush Khullar, “Introduction to the Bristle Blasting Process for Simultaneous Corrosion Removal/Anchor Profile”, corrosion e materials vol. 33, 2008
- [8] ASTM D 3167: Standard test method for floating roller peel test resistance of adhesives
- [9] 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.
- [10] ISO 9227: Corrosion tests in artificial atmosphere – Salt spray tests