CEFET/RJ
DIRETORIA DE PESQUISA E PÓS-GRADUAÇÃO

EFEITO DA UMIDADE NA ADESÃO DE JUNTAS COLADAS CFRP-AÇO

Marcio Moreira Arouche

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

Orientador: Dr. Silvio Romero de Barros

Rio de Janeiro
Novembro de 2016

EFEITO DA UMIDADE NA ADESÃO DE JUNTAS COLADAS CFRP-AÇO

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

Marcio Moreira Arouche

Banca Examinadora:

_____

Presidente, Professor Dr. Silvio Romero de Barros (CEFET/RJ) (orientador)

_____

Professora Dra. Doina Mariana Banea (CEFET/RJ)

_____

Professora Dra. Sofia Teixeira de Freitas (TU DELFT)

SUPLENTES

_____

Professor Dr. Hector Reynaldo Meneses Costa (CEFET/RJ)

_____

Professor Dr. João Marciano Laredo dos Reis (UFF)

Rio de Janeiro

Novembro de 2016

RESUMO

Um estudo experimental foi realizado para verificar o efeito de condições ambientais severas na adesão de juntas coladas compósito-metal. Foram realizados ensaios de arrancamento de roletes flutuantes com base numa adaptação da norma ASTM para utilização de substratos compósitos. A configuração dos corpos de prova foi definida de modo a ter o compósito de fibra de carbono em matriz polimérica (CFRP) como substrato rígido, e aço carbono como substrato flexível. As amostras foram expostas à água salgada durante 40 e 150 dias. É sugerido um novo método para verificar o feito do envelhecimento através da utilização de corpos de prova com 500 mm de comprimento e parcialmente imersos. O objetivo é comparar a parte com envelhecimento e sem envelhecimento num mesmo corpo de prova. Os resultados mostram uma relação inversa entre a penetração da umidade na interface adesiva e a carga de arrancamento. A presença de umidade nas superfícies de fratura aumenta com o tempo de envelhecimento. Superfícies de fratura da amostra sem envelhecimento exibiu uma falha coesiva na camada adesiva, o que indica boa adesão da junta. Amostras parcialmente imersas em água salgada foram utilizadas com sucesso na análise comparativa do efeito da umidade na adesão no mesmo corpo de prova.

Palavras-chave: ensaios de arrancamento, adesão, juntas coladas, CFRP-aço, envelhecimento

ABSTRACT

An experimental study was carried out to evaluate the effect of severe environmental conditions in the adhesion of composite-metal bonded joints. Floating Roller Peel tests were performed according to an adaptation of the ASTM standard for composite substrates. The lay-up of the specimens were defined in order to have the Carbon Fiber Reinforced Polymer (CFRP) as rigid substrate and carbon steel as flexible substrate. Specimens were exposed to salt water for 40 and 150 days. It is suggested a new method to verify the ageing effect by testing partially immersed specimens with 500 mm length. The aim is to compare aged and non-aged parts of the same specimen. The results show an inverse relationship between the penetration of moisture into the adhesive layer and the peel load. The presence of moisture in the fracture surfaces increases with ageing times. Fracture surfaces of non-aged specimen exhibit a cohesive failure within the adhesive layer, which indicates a good adhesion of the joint. Partially immersed samples were successfully used in the comparative analysis of moisture effect on adhesion in the same specimen.

Keywords: peel tests, adhesion, bonded joints, CFRP-steel, ageing

Sumário

1. Introdução 8

2. Revisão Bibliográfica 13

2.1 Materiais Compósitos 13

2.1.1 Matrizes 13

2.1.2 Reforços 15

2.1.3 Processamento 18

2.1.4 Comportamento Mecânico 20

2.2 Adesão e Adesivos 27

2.2.1 Teoria da Adesão 27

2.2.2 Preparação da Superfície 31

2.2.3 Tipos de Adesivos 33

2.2.4 Carregamento em Juntas Adesivas 34

2.2.5 Falha em Juntas Adesivas 36

3. Materiais e Métodos 39

3.1 Materiais Utilizados 39

3.2 Métodos Experimentais 41

3.2.1 Envelhecimento em Água Salgada 41

3.2.2 Ensaio de Arrancamento 46

4. Resultados e Discussão 48

4.1 Gráficos dos Ensaios 48

4.1.1 Juntas sem Envelhecimento 48

4.1.2 Juntas com Envelhecimento Durante 40 Dias 50

4.1.3 Juntas com Envelhecimento Durante 150 Dias 52

4.2 Cargas de Arrancamento Média 53

4.3 Superfícies de Fratura 56

4.4 Análise dos Resultados 58

5. Conclusão 61

Referências Bibliográficas 63

APÊNDICE A - Ensaios em Juntas CFRP-CFRP 69

Capítulo 1

Introdução

A tecnologia dos compósitos surgiu em meados do século XX, a partir da exigência de materiais com combinações de propriedades e facilidade de processamento que não podem ser atendidas pelos materiais usuais, nomeadamente metais, cerâmicos e polímeros. Um material compósito, neste contexto, é um material multifásico, feito artificialmente, que exibe uma proporção significativa das propriedades das fases que o constituem. Essas fases devem ser quimicamente diferentes e estar separadas por uma interface distinta [1].

As excelentes propriedades dos materiais compósitos resultam do fato de que as fibras apresentam propriedades mecânicas muito superiores às dos materiais idênticos em forma maciça. Porém, devido a pequena seção resistente, as fibras não são diretamente usadas em aplicações de engenharia, cabendo à matriz as funções de dar forma estável ao compósito, assegurar a distribuição eficiente de cargas entre as fibras e proteger a sua superfície.

Os adesivos têm sido usados há muitos séculos como método de ligação de materiais. No entanto, este tipo de ligação evoluiu significativamente na primeira metade do século XX, com o desenvolvimento dos adesivos sintéticos poliméricos, impulsionados pela indústria aeronáutica. Os adesivos sintéticos poliméricos dão a ligação propriedades mecânicas superiores aos de material polimérico natural, utilizados até então, possibilitando o uso desta tecnologia em aplicações de engenharia.

A tecnologia das ligações adesivas foi desenvolvida substancialmente desde então, a partir de pesquisas sobre a teoria da adesão, estudos de preparação da superfície, desenvolvimento de adesivos estruturais cada vez mais eficientes e metodologias de testes e projeto de junta, tornando a sua aplicação cada vez mais ampla e diversificada.

O uso de adesivos estruturais tem se intensificado na indústria dos compósitos uma vez que este se mostra a forma mais eficiente de fixação mecânica de materiais dissimilares se comparando aos métodos de ligação tais como parafusos ou rebites [2-

3]. Entre as principais vantagens estão a distribuição mais uniforme das tensões ao longo da área total da união, permitindo além de uma distribuição mais uniforma de cargas estáticas e dinâmicas, a redução nos custos de produção e manutenção. Permite a ligação de materiais de composições diferentes e com coeficientes de expansão distintos devido a flexibilidade do adesivo, garante ainda maior amortecimento de vibrações e em muitos casos maior produtividade nos processos de montagem.

A escolha do tema tem por base o crescente interesse na tecnologia dos materiais compósitos e o seu avanço exponencial em aplicações estruturais nos últimos anos. Esta tecnologia está disseminada em diferentes áreas de atividade, como as indústrias aeroespacial, de defesa, de transportes, construção civil, eletroeletrônica e em artigos esportivos, além da recente utilização na indústria naval e do petróleo. O vasto leque de possibilidades imprime desafios tecnológicos permanentes.

A presença dos compósitos na indústria introduz a utilização de colagem de estruturas de materiais diferentes (juntas híbridas). Pesquisadores encontraram uma influência positiva da colagem de metal-compósito na performance de estruturas [4-5]. Neste âmbito, a literatura carece de trabalhos que decorram sobre as propriedades de adesão de juntas coladas entre materiais distintos.

Fatores ambientais apresentam um desafio constante no desempenho de juntas adesivas. Diversos trabalhos foram realizados com o objetivo de investigar a influência de parâmetros ambientais na durabilidade de estruturas coladas [6-11]. Esses estudos apontam para a presença de umidade como o principal problema que afeta o desempenho a longo prazo de juntas entre compósito e metal, sendo a água salgada o fator ambiental mais prejudicial.

A deterioração de estruturas submetidas ao ambiente marinho, extremamente agressivo, estimula o surgimento de novas tecnologias para manutenção da integridade em plataformas de exploração de petróleo. Nesse contexto, a tecnologia de reparo com compósitos surgiu com a vantagem de evitar o trabalho à quente, o que permite maior segurança da operação e evita interrupção do serviço.

Diversos estudos experimentais e numéricos foram então realizados para se avaliar a utilização de materiais compósitos em estruturas navais [12-16]. Alguns exemplos de reparos com compósitos foram usados para conter a propagação de trincas na estrutura do navio e para compensar a perda de espessura em um tanque devido à

corrosão. Os resultados mostraram a viabilidade do uso de reparos com compósitos nas condições ambientais severas de operação.

Uma grande quantidade de autores utilizou ensaios em juntas de sobreposição simples (*Single Lap Shear Test*) e duplas (*Double Lap Shear Test*), DCB (*Double Cantilever Beam*) ou juntas tipo T (*T-Peel Tests*) para avaliar a durabilidade de juntas coladas com compósito e metal [17-19]. Juntas compósito-compósito e metal-compósito foram avaliadas, entre outros fatores, sob o efeito da água salgada [20-26]. Entretanto, estes estudos estão mais focados nos efeitos das propriedades mecânicas que nas propriedades de adesão.

Diversos trabalhos existentes na literatura avaliaram parâmetros presentes na utilização de juntas adesivas através do ensaio de arrancamento de rolete flutuante (*Floating Roller Peel Test*) para colagem de metais [27-34]. Estudos do efeito do aderente flexível na medição da força de arrancamento concluíram que a força de arrancamento medida é uma combinação da força de adesão da junta com a resistência à deformação do aderente flexível.

Estudos recentes das propriedades de adesão de juntas coladas compósito-metal e compósito-compósito foram realizados utilizando os ensaios de arrancamento de rolete flutuante, normatizado pela ASTM D3167 [35] para colagem de substratos metálicos. Os resultados mostram que os ensaios de arrancamento também podem ser usados para avaliar propriedades de adesão em colagem com materiais compósitos. Foi então introduzido um novo tipo de ensaio de arrancamento utilizado para colagem com substratos compósitos (*Composite Peel Tests*) [36-37].

Entretanto, poucas são as pesquisas disponíveis que avaliam as propriedades de adesão de juntas coladas entre compósito e aço. Com o aumento do uso da colagem de compósitos com metais, deve-se ter atenção na qualidade da adesão sob efeitos ambientais. Informações sobre a durabilidade da colagem são extremamente importantes para se evitar falha em serviço de juntas adesivas. Testes de adesão em corpos de prova submetidos a condições ambientais severas devem ser realizados para garantir a integridade de uma junta em longo prazo.

Um estudo recente avaliou a qualidade da adesão em juntas CFRP-aço em condições iniciais e após envelhecimento em névoa salina durante 30 dias [38]. Os resultados mostraram que este período de absorção de umidade não apresenta mudanças

significativas na adesão, devendo ser mantidos em envelhecimento por um período mais longo para que seja possível observar a tendência de degradação da junta.

O presente trabalho tem como objetivo avaliar o efeito da umidade na adesão de juntas CFRP-aço imersos em água salgada. Testes de arrancamento são realizados para estudar a qualidade da adesão entre substratos de CFRP (*Carbon Fiber Reinforced Polymer*) e aço carbono. Os ensaios são realizados de acordo com o novo teste proposto (*Composite Peel Tests*), uma adaptação da norma ASTM para testes de arrancamento de rolete flutuante com uma nova configuração dos corpos de prova. A configuração e a geometria dos corpos de prova são definidas de forma a ter o compósito como substrato rígido e o aço como substrato flexível.

Um novo método de análise é proposto, através da utilização de corpos de prova com maior comprimento e parcialmente envelhecidos. Com esta nova configuração é possível analisar as condições de envelhecimento e não-envelhecimento em um mesmo corpo de prova. A qualidade da adesão da junta CFRP-aço também é avaliada antes e após envelhecimento durante diferentes períodos.

Este trabalho inclui uma abordagem teórica sobre os assuntos pertencentes ao tema. No Capítulo 2, é feita uma síntese a partir da teoria disponível na literatura sobre materiais compósitos, necessária para melhor compreensão do trabalho. Na primeira seção do capítulo é abordada a composição física deste tipo de material, com ênfase nos laminados, material utilizado em aplicações estruturais. Em seguida, são descritos os métodos de processamento do material. Por último, são estabelecidas as características do comportamento mecânico a partir de uma camada até a análise completa do laminado.

Na seção seguinte, ainda no Capítulo 2, são apresentados os conceitos básicos sobre ligações adesivas. A Teoria da Adesão, base para compreensão dos fenômenos que envolvem o processo de colagem, é inicialmente abordada. Em seguida, são descritos os métodos de preparação da superfície dos substratos, e então os tipos de adesivos estruturais existentes. São descritos ainda as tensões atuantes na junta e, por fim, os modos de falha presentes numa junta adesiva.

No Capítulo 3 são descritos os materiais utilizados no estudo e os procedimentos experimentais de avaliação. Primeiro, são especificados os corpos de prova usados e sua fabricação. Em seguida, é mostrado o processo de envelhecimento utilizado, e os seus

efeitos nos corpos de prova. Por último, é introduzido o ensaio de arrancamento e mostrada a realização dos testes.

O Capítulo 4 apresenta os dados obtidos através dos procedimentos experimentais e uma discussão acerca dos resultados. São apresentadas as curvas carga-deslocamento obtidas durante os ensaios de arrancamento e as cargas médias dos ensaios. Em seguida, mostradas então as superfícies de fratura dos corpos de prova testados. Na última parte, gráfico e superfície de fratura são comparados e observações são feitas sobre os pontos de destaque.

O Capítulo 5 é dedicado à conclusão deste trabalho. São elencados os pontos principais alcançados ao longo deste trabalho e possíveis evoluções sobre o tema.

Capítulo 2

Revisão Bibliográfica

No presente capítulo, são apresentadas de forma sucinta teorias e trabalhos publicados sobre colagem estrutural e materiais compósitos. Primeiro, é apresentada uma revisão sobre materiais compósitos, evidenciando suas principais características e comportamento mecânico. Nesta etapa é dado destaque aos compósitos laminados, material utilizado em aplicações estruturais e objeto de estudo neste trabalho. Em seguida, são introduzidos conceitos sobre adesão e adesivos. São abordadas a Teoria da Adesão, as principais características dos adesivos estruturais, a análise de tensões em juntas adesivas e, finalmente, os modos de falha de juntas coladas.

2.1 Materiais Compósitos

Nesta seção são abordados os aspectos teóricos relevantes sobre os materiais compósitos. Primeiro, são determinadas as características dos compósitos e seus constituintes, nomeadamente reforço e matriz. Em seguida, é exposto o que existe na literatura relativo a análise do comportamento mecânico dos compósitos. É abordado o comportamento mecânico de uma camada de compósito até a análise completa do laminado. Os compósitos laminados são os materiais de interesse em aplicações estruturais.

2.1.1 Matrizes

Os materiais compósitos podem ser classificados segundo diferentes critérios, sendo o tipo de matriz um dos mais relevantes. São distinguidos os compósitos de matriz polimérica, metálica e cerâmica. Devido a facilidade de processamento e a baixa densidade dos polímeros, os compósitos de matriz polimérica possuem o melhor

desempenho e são os mais utilizados, por isso, apenas estes são abordados no presente trabalho. Estes materiais são divididos em termoplásticos e termofíxos ou termorrígidos.

As matrizes termoplásticas são formadas a partir de macromoléculas individuais lineares unidas por ligações atômicas secundárias, como as forças de van der Waals e ligações de hidrogênio. Quando aquecidos, essas ligações são quebradas permitindo a reconformação e com o resfriamento posterior as moléculas reestabelecem as ligações atômicas. Os termoplásticos apresentam maior resistência ao impacto, maior tenacidade e menor capacidade de absorver água em relação aos termorrígidos, e são facilmente processados por injeção ou por termoformação, além da sua capacidade de reciclagem. As matrizes termoplásticas mais utilizadas em aplicações estruturais são o PEEK (poli-éter-éter-cetona), as poliimidas e o PPS (polisulfureto de fenileno).

As matrizes termorrígidas são constituídas por moléculas que formam estruturas tridimensionais bastante rígidas. Ao contrário dos termoplásticos, assumem uma forma permanente após o aquecimento. Estes polímeros são processados a partir da mistura adequada de resina, acelerador e catalizador, ocorrendo a polimerização e a constituição de estrutura tridimensional, num processo chamado de cura. Algumas resinas necessitam da aplicação de calor e pressão para efetuar a cura. Uma das principais vantagens das matrizes termorrígidas está relacionada a maior facilidade de impregnação do reforço, pois antes da cura apresentam viscosidade muito inferior às dos termoplásticos. As resinas mais utilizadas em aplicações estruturais são os epóxidos, as bismaleimidas e as poliimidas.

Uma característica importante dos polímeros se dá pelas temperaturas de transição. Os polímeros termoplásticos total ou parcialmente amorfos são caracterizados pela sua temperatura de transição vítrea, que marca a mudança de um comportamento rígido para um comportamento dúctil e facilmente deformável. Continuando a aumentar a temperatura atinge-se a temperatura de fusão, quando se torna um líquido viscoso. No caso dos polímeros totalmente cristalinos, não há temperatura de transição vítrea, e quando se aproxima da temperatura de fusão, a sua estrutura sofre um colapso consequente do aumento brusco de seu volume específico, passando ao estado de líquido viscoso.

Nos polímeros termorrígidos a temperatura de transição vítrea é controlada pelo grau de reticulação da estrutura, possuindo alterações muito menos acentuadas que os

termoplásticos. Estes polímeros não apresentam fusão, degradando-se de forma irreversível a altas temperaturas.

Quando comparados aos metais, com compósitos poliméricos são resistentes ao ataque químico, são não-magnéticos, não-condutores, apresentam uma excepcional relação resistência/peso e permitem a eliminação de elementos de fixação. As aplicações estruturais com polímeros são projetadas para uma temperatura máxima de trabalho inferior a temperatura de transição vítrea do material, que para a maioria das matrizes poliméricas é abaixo de 200°C. A versatilidade que os compósitos poliméricos oferecem permite a fabricação de uma grande quantidade de produtos [39].

2.1.2 Reforços

Com relação ao tipo de reforço, a classificação desses materiais é dividida em compósitos reforçados com fibras, compósitos reforçados com partículas e compósitos estruturais, como mostrado com mais detalhes na Figura 1.

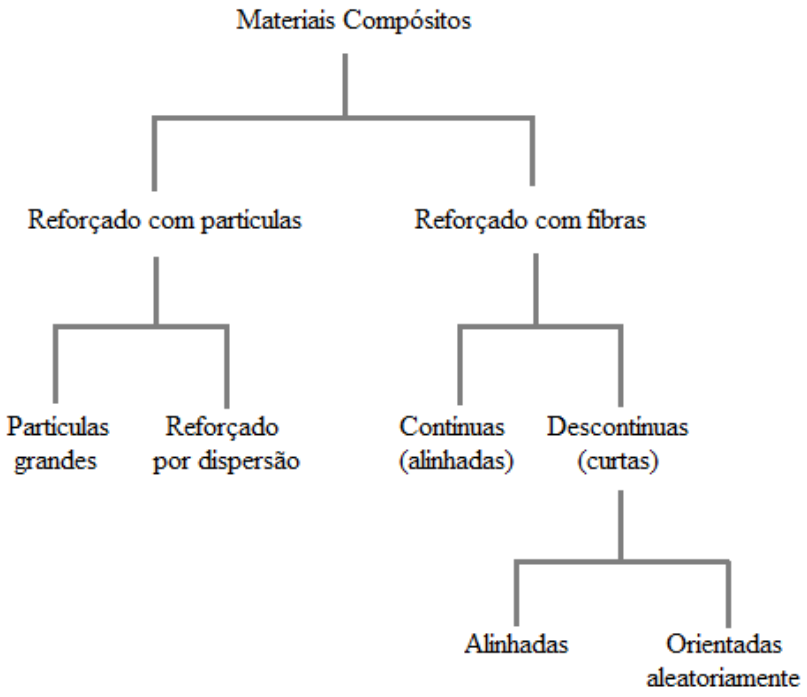


Figura 1: Classificação dos materiais compósitos pelo tipo de reforço.

Como observado na Figura 1, os compósitos reforçados com partículas grandes e os compósitos reforçados por dispersão distinguem pelo mecanismo de aumento de resistência, ou seja, pela fase particulada mais dura e rígida que a fase matriz. No primeiro, as partículas são grandes o suficiente para que não possam ser tratadas a nível atômico, e no segundo as partículas são muito pequenas tal que as interações ocorrem a nível molecular. Um exemplo comum de compósito reforçado com partículas grandes é o concreto, que apresenta areia e brita dispersas no cimento (fase matriz).

Os compósitos reforçados com fibras são mais importantes para aplicações em estruturas mecânicas pois possuem alta resistência e alta rigidez em relação ao peso. Esses materiais são classificados de acordo com o comprimento das fibras. As propriedades mecânicas do compósito reforçado com fibras não dependem apenas das propriedades da fibra, mas também da transmissão da carga aplicada da matriz para as fibras, o que demanda que as fibras sejam suficientemente grandes e, por isso fibras curtas não produzem uma melhoria significativa na resistência do material. A orientação das fibras também influencia nas propriedades mecânicas do compósito, podendo estas serem alinhadas ou orientadas aleatoriamente. Normalmente, a fibras contínuas são alinhadas e as descontínuas podem ser alinhadas ou aleatórias, como mostra a Figura 2.

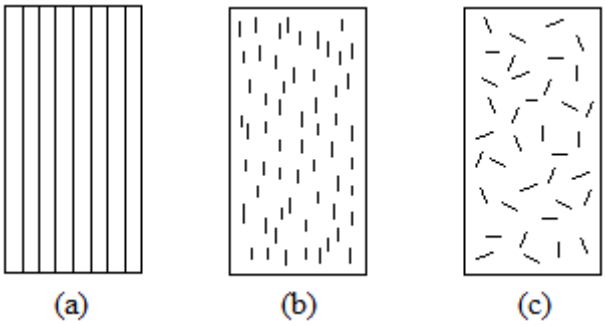


Figura 2: Representação de compósitos reforçados com fibras (a) contínuas e alinhadas, (b) descontínuas e alinhadas e (c) descontínuas e orientadas aleatoriamente [40, modificado].

As respostas mecânicas de um compósito reforçado com fibras contínuas dependem de diversos fatores, entre eles os comportamentos mecânicos das fases fibra e matriz, as frações volumétricas das fases e a direção na qual a carga é aplicada. A resistência à tração nesse material é muito alta na direção longitudinal às fibras e muito

baixa na direção transversal. Dentre estes compósitos, destacam-se na indústria aqueles com fibra de vidro (GFRP – Glass Fiber-Reinforced Polymer), com fibra de carbono (CFRP – Carbon Fiber-Reinforced Polymer) e os com fibras aramidas.

As fibras de vidro constituem o tipo de reforço mais utilizado. São fabricadas através do estiramento de vidro fundido, a aproximadamente 1260ºC, através de uma fieira com orifícios de dimensões muito precisas.

As fibras de carbono são usadas para aplicações de maior desempenho mecânico. São fabricadas a partir da decomposição térmica de um precursor orgânico, sendo mais utilizado o poliacrilonitrilo (PAN). As fibras são aquecidas até 300ºC em atmosfera rica em oxigênio, para suprimir artificialmente o ponto de fusão das fibras. Em seguida é aquecida progressivamente até 1100ºC em atmosfera neutra permitindo que apenas átomos de carbono permaneçam no final, obtendo-se fibras com boas propriedades mecânicas. Depois é feita a pirólise das fibras em atmosfera neutra, obtendo-se um elevado grau de orientação da estrutura, e um tratamento superficial com ácido nítrico ou ácido sulfúrico para que a superfície da fibra possua elevada adesão a matriz.

As fibras aramidas são produzidas a partir de poliamidas aromáticas mantidas a baixa temperatura (entre -50ºC e -80ºC) e depois extrudadas a aproximadamente 200ºC. Estas fibras apresentam excelente resistência química, ao impacto e à fadiga, além de boa capacidade de amortecimento de vibrações, porém possuem baixa resistência à compressão e à flexão e elevada sensibilidade ao cisalhamento interlaminar. Entre suas aplicações estão cabos, equipamentos de proteção e estruturas de barcos, aviões e automóveis.

Os reforços fibrosos podem apresentar diferentes formas. Estes podem ser um cordão de filamentos contínuos enrolados em bobinas ou mantas em que as fibras são distribuídas aleatoriamente e agregadas com um ligante especial. Também podem ser obtidos em forma de tecidos com diversos tipos de orientação das fibras ou em malhas obtidas pela ligação sucessiva de camadas de fibras alinhadas. Utilizando diferentes orientações das fibras consegue-se obter uma malha com propriedades aproximadamente isotrópicas. Exista ainda diversas outras formas de reforços produzidas, visando características específicas para sua finalidade.

2.1.3 Processamento

O desenvolvimento das técnicas de fabricação de materiais compósitos tem sido um dos fatores principais na contínua expansão das suas aplicações. Os diferentes processos podem ser genericamente classificados em processos em molde aberto ou processos em molde fechado. No primeiro, apenas uma das superfícies tem bom acabamento, porém é possível a obtenção de peças de grandes dimensões e de geometria complexa, pois a pressão exercida é reduzida ou inexistente. No caso dos processos em molde fechado obtém-se excelente acabamento nas duas superfícies, ótima reprodutibilidade e menor emissão de substâncias nocivas à saúde.

Outro fator que diferencia os processos de fabricação é o tipo de matriz. Em matrizes termoplásticas, o aquecimento inicial provoca a fusão e a combinação com o reforço é feita sob pressões elevadas, seguido do resfriamento do molde. No caso de matrizes termorrígidas os ciclos térmicos são usados para iniciar e controlar o processo de cura, de modo a garantir o preenchimento do molde. A elevada fluidez das resinas permite a utilização de pressões baixas.

O método mais comum e mais econômico de fabricação de compósitos é a moldação por contato. Neste processo, o empilhamento e a impregnação de sucessivas camadas de reforço é feita manualmente em molde aberto, e pode ser automatizado para pequenas produções. Deve ser realizado em locais com boa ventilação devido à liberação de voláteis e não necessita de mão-de-obra especializada, porém a qualidade depende muito da habilidade e cuidado do operador. Este processo é habitualmente usado em reparos ou reforços estruturais em embarcações.

Quando um compósito é submetido a solicitações multidirecionais, é de grande interesse posicionar as diversas camadas de reforço em orientações diferentes, de modo que a orientação de maior resistência varie em cada camada. Este tipo de compósito é chamado de laminado. Os laminados podem apresentar as mais diversas orientações das camadas, gerando maior flexibilidade em relação as características que se deseja obter. Os compósitos laminados são, de fato, os materiais utilizados em aplicações estruturais.

Os reparos pré-fabricados são produzidos em moldes com a geometria do substrato, de modo a se evitar tensões residuais após a aplicação do reparo. A escolha do método de fabricação é governada principalmente por requisitos de geometria,

qualidade, tempo e ferramentas disponíveis e repetitividade do processo. Os métodos principais de fabricação são: laminação manual, em que o operador impregna manualmente as camadas do reforço sobre o molde, de modo que a qualidade do laminado depende diretamente da habilidade e cuidado do operador durante o processamento; laminação pré-impregnada, que usa camadas de reforço pré-impregnadas no processo de laminação, eliminando a necessidade de manuseio da resina durante o processo de fabricação e garantindo melhor controle sobre o processo; técnicas de infusão de resina, que requerem experiência e controle do processo, gerando laminados de excelente qualidade; extrusão ou pultrusão, usados para produzir elementos prismáticos como placas e barras planas ou curvas.

O processo de laminação direta requer maior controle para se obter resistência suficiente no reparo. Os parâmetros de processo mais importantes são: preparação da superfície do substrato; manuseio e preparo dos constituintes do material; controle da laminação; controle da quantidade de material da matriz; controle da temperatura e tempo de cura. A Figura 3 mostra a aplicação de um reparo estrutural com compósito no tanque de lastro de uma plataforma de petróleo.



Figura 3: Aplicação de reparo com compósito no tanque de lastro da plataforma P-20 realizado pela Petrobras [15].

2.1.4 Comportamento Mecânico

Os materiais compósitos de fibras contínuas são os que apresentam melhores características mecânicas para aplicações estruturais, sendo geralmente utilizados em forma de uma estrutura laminada, ou seja, com diversas camadas nas quais as fibras são unidirecionais. Por isso, é importante entender o comportamento mecânico e as tensões atuantes em uma única camada.

Para estabelecer a análise de uma camada se faz necessário algumas hipóteses simplificadoras. Primeiro, é conveniente trata-la como um sólido homogêneo para descrever seu comportamento mecânico, ou seja, as tensões e deformações consideradas são quantidades médias de um volume representativo, de grandeza superior à do diâmetro da fibra. Ainda assim, o comportamento de uma camada é complexo, pois esta é anisotrópica, ou seja, a rigidez na direção das fibras é muito superior à rigidez na direção perpendicular. Outra hipótese então admitida é a camada ter comportamento linear elástico, que é adequada na grande maioria dos casos de projetos de estruturas de materiais compósitos.

A camada de um laminado é ortotrópica, ou seja, possui três planos de simetria mutualmente perpendiculares. Os eixos de ortotropia são mostrados na Figura 4, estabelecidos de modo que o eixo 1 possui a direção das fibras e o eixo 3 é perpendicular ao plano da camada.

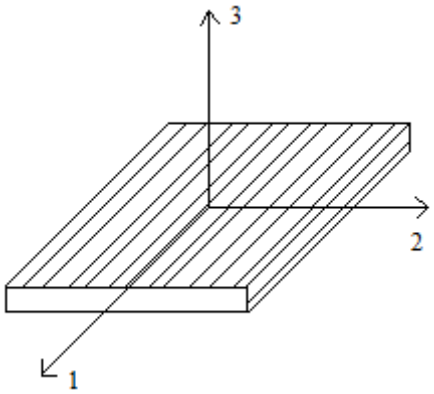


Figura 4: Eixos principais da camada [40, modificado].

Nota-se que as fibras estão distribuídas aleatoriamente no plano transversal <23>, e por isso a camada apresenta isotropia transversal, ou seja, suas constantes elásticas são independentes da orientação dos eixos no plano <23>. Desta forma, possui então seis constantes elásticas independentes apresentando, portanto, um comportamento muito mais complexo do que os materiais isotrópicos, como o aço.

As constantes elásticas necessárias para caracterizar o comportamento tensão-deformação de uma camada são: E_1 (módulo de elasticidade longitudinal), E_2 (módulo de elasticidade transversal), G_{12} (módulo de cisalhamento longitudinal), G_{23} (módulo de cisalhamento transversal), ν_{12} (coeficiente de Poisson longitudinal), ν_{23} (coeficiente de Poisson transversal).

O módulo de elasticidade representa a relação linear entre tensão e deformação dentro da região elástica do material. O coeficiente de Poisson determina a razão entre as deformações lateral e longitudinal de um material dentro da faixa elástica. O módulo de cisalhamento representa a relação linear entre tensão de cisalhamento e deformação angular do material dentro da região elástica [41].

Devido às excelentes propriedades mecânicas da camada, os laminados são produzidos geralmente sob a forma de placas relativamente finas. É legítimo admitir então que as camadas estão sob um estado plano de tensões, ou seja, que as tensões na direção da espessura têm valores desprezáveis em relação às tensões no plano da camada.

Na maioria das aplicações usa-se laminados multidirecionais, ou seja, constituídos por camada com diferentes orientações. Desta forma, é necessário obter a lei constitutiva para um referencial genérico {xyz}, em que x e y estão deslocados a um ângulo θ dos eixos principais no plano da camada (Figura 5).

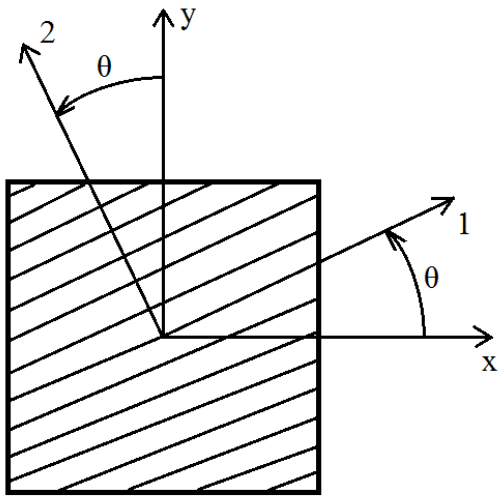


Figura 5: Mudança de referencial [40].

É importante notar que em um referencial genérico surge uma relação entre tração e cisalhamento, descrita pela Figura 6 para o caso de uma única tensão de tração. Isto ilustra bem as particularidades do comportamento dos compósitos.

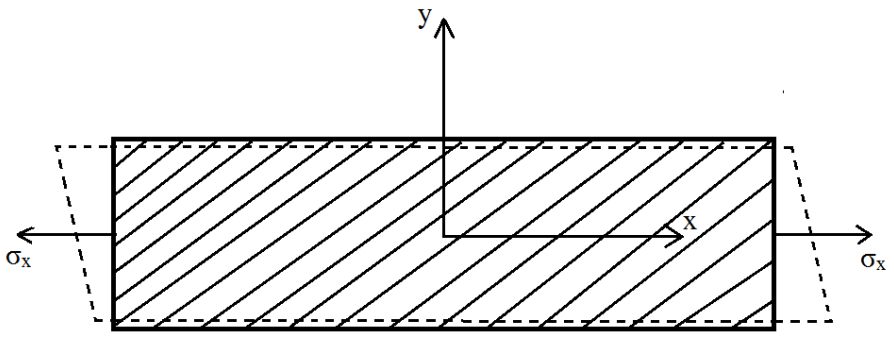


Figura 6: Representação da deformação da camada sob uma tensão desviada dos eixos principais [40].

A análise micromecânica também permite tirar conclusões úteis acerca dos mecanismos de ruptura da camada. Os modos básicos de solicitação da camada, mostrados na Figura 7, correspondem à tensão de ruptura longitudinal à tração (σ_{ut1}), tensão de ruptura longitudinal à compressão (σ_{uc1}), tensão de ruptura transversal à tração (σ_{ut2}), tensão de ruptura transversal à compressão (σ_{uc2}) e tensão de ruptura ao cisalhamento (τ_{u12}), respectivamente.

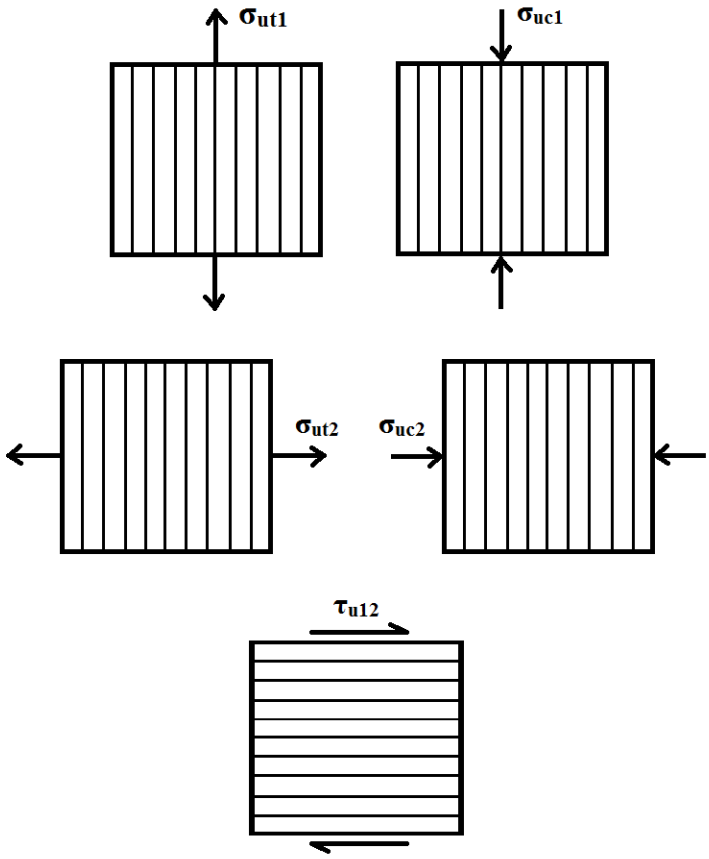


Figura 7: Modos básicos de solicitação da camada [40, modificado].

Por se tratarem das mais elevadas, existe o interesse de que as resistências longitudinais de tração e de compressão estejam orientadas nas direções das cargas principais e consequentemente suportem a maior parte do esforço. Portanto, a análise destas resistências são as mais importantes.

Como as matrizes poliméricas são mais dúcteis do que as fibras, a ruptura do compósito se inicia quando for atingida a deformação máxima da fibra. No caso de um compósito unidirecional, a medida em que as tensões de tração crescem vão ocorrendo rupturas sucessivas em pontos menos resistentes das fibras. Em seguida, as superfícies de fratura da fibra separam-se, gerando tensões de cisalhamento elevadas nas interface fibra-matriz e na região da matriz próxima as superfícies fraturadas. Então, se a interface for menos resistente ao cisalhamento do que a matriz, ocorrerá a decoesão interfacial, e, caso contrário, se formará uma zona de cedência plástica na matriz, conforme ilustradas na Figura 8.

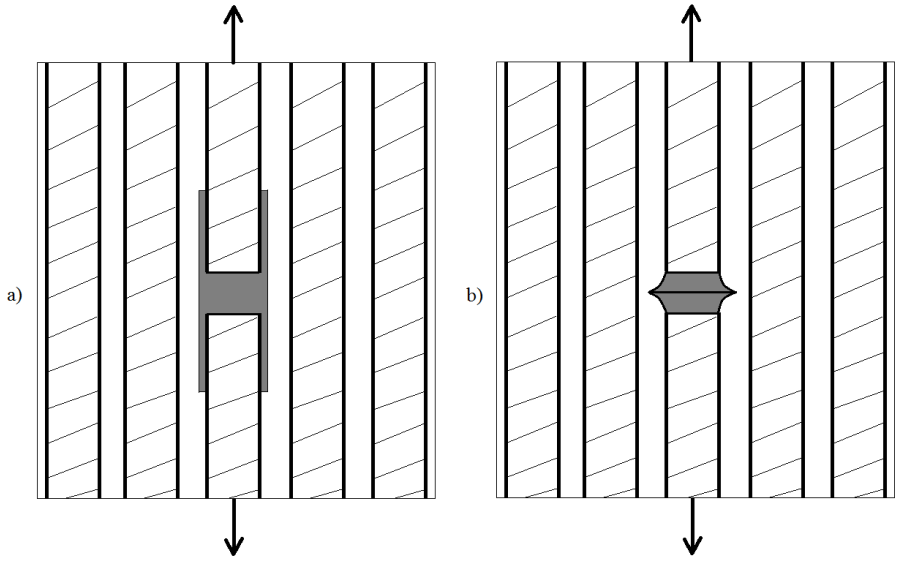


Figura 8: Modos de ruptura à tração: a) decoesão interfacial; b) fissuração da matriz [40].

A partir deste momento, as tensões são redistribuídas através da transferência gradual de carga para a fibra que partiu, até que se recupere o valor da tensão que atua nas outras fibras afastadas do ponto de ruptura. Este efeito condiciona um "comprimento ineficiente" (l_i), que será menor a medida que a transferência de carga for mais eficiente e, portanto, maior será o número de rupturas que cada fibra pode sofrer. A previsão micromecânica de σ_{ut1} ainda é difícil, porém já se mostra clara a importância da boa adesão superficial para minimizar l_i, permitindo uma maior resistência à tração longitudinal do compósito.

Apresentados os modos básicos de solicitação da camada e os modelos para previsão das tensões de ruptura, torna-se necessário estabelecer os critérios de falha em situações gerais, em que uma camada integra um compósito multidirecional, sujeito a solicitações multiaxiais.

Para obtenção das tensões críticas, estabelecidas no referencial principal, admite-se um estado plano de tensão na direção da espessura da camada, e com isso utiliza-se um dos critérios de falha existentes na literatura. Os que têm demostrado ser mais rigorosos são o critério da tensão máxima, o critério de Tsai-Hill, o critério de Tsai-Wu, e o critério de Hashin-Rotem [40]. Estes critérios de falha da camada, ainda que sejam os mais utilizados, apresentam muitas dificuldades no que diz respeito ao rigor dos resultados. Os modos de falha indesejados, as deformações plásticas e não-linearidade

geométrica, o efeito das tensões residuais da fabricação e as dispersões nos resultados experimentais devido à natureza heterogênea dos compósitos são algumas das dificuldades impostas à validação dos resultados tanto a nível de formulação como experimental.

Devido as propriedades mecânicas transversais da camada de compósito serem relativamente baixas, utilizam-se laminados multidirecionais na maioria das aplicações estruturais. Estes laminados são constituídos por camadas com diferentes orientações dispostas em sequencias diversas, de forma que estas orientações e sequências de empilhamento das camadas constituem variáveis adicionais ao projeto, e conferem a estes materiais uma enorme flexibilidade quanto à aplicação. A Figura 19 mostra a configuração de uma placa de compósito laminado. O comportamento mecânico dos laminados multidirecionais pode ser então determinado a partir do comportamento da camada.

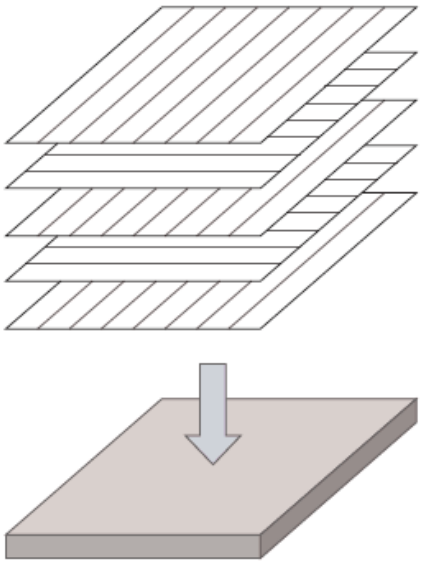


Figura 9: Configuração de uma placa de material compósito laminado [1].

O modelo mais difundido para análise dos laminados chama-se Teoria Clássica dos Laminados, que também é referência para algumas teorias mais avançadas. Trata-se de um modelo aplicado a placas compósitas relativamente finas, com base na Teoria das Placas de Kirchhoff para materiais isotrópicos. Admite-se que o laminado é uma placa retangular relativamente fina, ou seja, de espessura muito inferior as outras dimensões.

Os valores limites dependem do tipo de compósito e da sequência de empilhamento do laminado, e são geralmente superiores aos dos materiais isotrópicos devido à sua menor rigidez ao cisalhamento transversal.

A Teoria das Placas de Kirchhoff estabelece relações entre as deflexões da placa e os momentos fletores e torsores internos, que são normalmente gerados por cargas transversais concentradas ou distribuídas. Utilizando-se a hipótese de pequena espessura, pode-se afirmar que os deslocamentos variam linearmente ao longo da espessura da placa. Portanto, qualquer seção reta da placa, inicialmente paralela o eixo z, permanece reta após a aplicação dos esforços, sofrendo rotações [40]. Vale lembrar que a aplicação dessas hipóteses às placas laminadas pressupõe que existe uma adesão perfeita entre camadas e que se despreza a contribuição da fina camada interlaminar, rica em resina.

Em geral, além dos esforços de flexão, as placas também estão sujeitas aos esforços de membrana, que são provocados por cargas normais e de cisalhamento paralelas ao plano médio. Estes esforços dão origem a deslocamentos independentes de z. Portanto, quando atuam simultaneamente esforços de flexão e esforços de membrana, o campo de deslocamentos, em regime de pequenos deslocamentos, resulta na chamada Teoria Clássica dos Laminados.

Na análise de resistência do laminado, deve-se distinguir duas diferentes situações de falha: a primeira ruptura de camada e a ruptura global do laminado. É sabido que a previsão da primeira ruptura de camada é simples, porém muito conservativa em relação à ruptura global, que por sua vez inclui uma difícil previsão do processo de danificação progressiva.

O progresso na tecnologia dos compósitos e a generalização das suas aplicações têm conduzido à utilização de laminados de maior espessura, aos quais a Teoria Clássica dos Laminados não apresenta resultados satisfatórios. Nestas condições, torna-se importante recorrer a teorias mais elaboradas, que se diferenciam principalmente pelas hipóteses admitidas em relação à variação dos deslocamentos na direção da espessura do laminado. A análise de tensões em compósitos laminados quase sempre exige métodos numéricos.

2.2 Adesão e Adesivos

Para o estudo de uniões adesivas são necessárias algumas definições prévias. Um adesivo pode ser descrito como um material polimérico que, quando aplicado em superfícies, pode ligá-las e resistir à sua separação, e um adesivo estrutural é um adesivo que resiste a forças substanciais e que é responsável pela resistência e rigidez da estrutura. O substrato ou aderente é o material a ser ligado e a interface ou camada limite é o plano de contato entre os dois materiais. Adesão é a atração entre duas substâncias resultante das forças que se estabelecem entre elas e a união dos substratos por meio do adesivo estrutural é conhecida como junta [42].

2.2.1 Teoria da Adesão

O estudo da tecnologia das juntas adesivas estruturais requer o domínio de conceitos fundamentais da ciência da adesão. As forças de interação entre o adesivo e o substrato podem ser medidas como o trabalho necessário para ocorrer uma separação das superfícies, ou energia de superfície (γ). A capacidade do adesivo líquido de se espalhar na superfície sólida do substrato chama-se molhabilidade ou espalhamento, e esta característica é crucial para a obtenção de uma junta satisfatória. O adesivo se espalha melhor em superfícies de elevada energia, geralmente materiais duros de elevado ponto de fusão. A Figura 10 ilustra o espalhamento de um mesmo tipo de adesivo epóxido, de energia γ_L, em materiais com diferentes energias superficiais γ_c. É possível aumentar a energia de superfície de um sólido a partir da realização de tratamentos superficiais, que são abordados mais adiante.

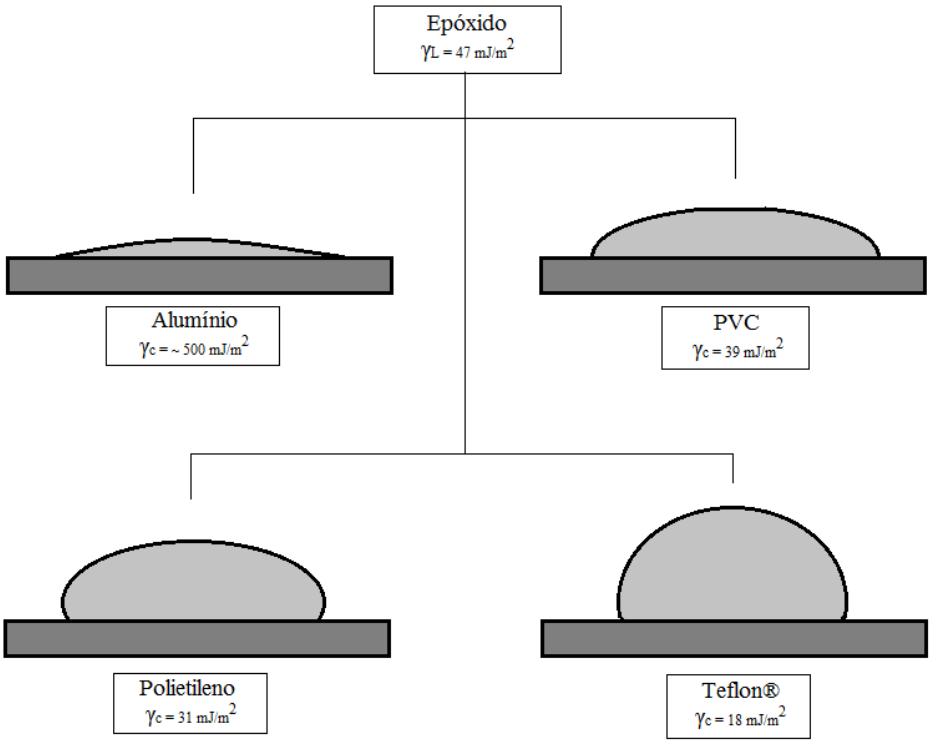


Figura 10: Espalhamento de um adesivo sobre diferentes superfícies [42, modificado].

Apesar de estudos sobre o mecanismo de adesão serem realizados desde muitos anos, não há uma única teoria que, sozinha, seja suficiente para a sua total compreensão. Existem diversas teorias que ajudam a explicar o fenômeno da adesão, sendo as principais a mecânica, adsorção, difusão e eletrostática. A teoria da difusão é válida para adesão entre polímeros e tanto ela quanto a teoria eletrostática não são de interesse neste trabalho e por isso não serão abordados.

Para compreensão da teoria mecânica da adesão é necessário primeiro entender os conceitos de rugosidade de superfícies. Essa rugosidade é expressa pela média das alturas de picos e vales ao longo do comprimento, ou seja, pela rugosidade média. Mesmo o melhor acabamento superficial, ou seja, uma menor rugosidade média, ainda é ordens de grandeza maior do que a escala atômica, sendo a única forma de um material estabelecer um contato íntimo com uma superfície rugosa é estar na forma líquida. É esta técnica que é usada na aplicação dos adesivos na fase líquida. A interação entre o adesivo na forma líquida e a superfície rugosa do substrato é mostrada na Figura 11.

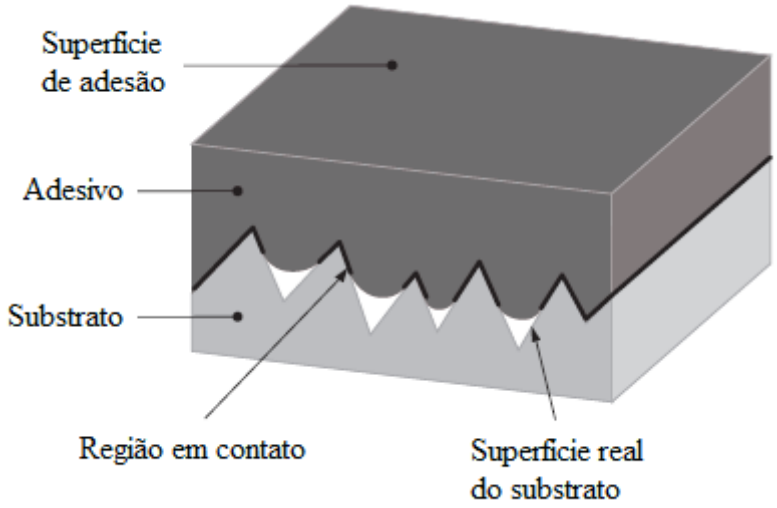


Figura 11: Interação de uma superfície sólida com líquido [43, modificado].

De acordo com a teoria mecânica, a adesão ocorre através da penetração do adesivo nas irregularidades da superfície do substrato, provocando assim uma ancoragem mecânica, como mostrado na Figura 12. O adesivo deve possuir viscosidade suficiente para preencher as aberturas do substrato com eficiência. Tratamentos superficiais e eficiente limpeza da superfície melhoram a resistência e durabilidade da junta. Em contrapartida, uma boa adesão também pode ocorrer entre superfícies lisas, o que mostra que a teoria mecânica da adesão não é aplicável a todos os casos.

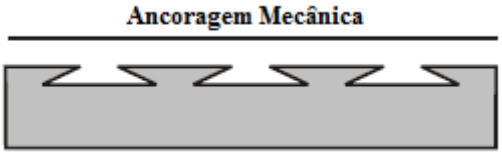


Figura 12: Esquema da teoria mecânica da adesão [43, modificado].

Para compreender os fenômenos envolvidos na teoria da adsorção, é necessário primeiro conhecer as forças atômicas de ligação química. Essas ligações podem ser descritas como primárias ou secundárias, e em cada ligação química existe uma energia que seria necessária para desfazê-la, chamada de energia de ligação.

As ligações primárias se originam da tendência dos átomos em adquirir estruturas eletrônicas estáveis, e são subdivididas em iônicas, covalentes e metálicas.

Ligações iônicas são resultantes da atração eletrostática entre partículas de cargas opostas e possuem energia de ligação entre 600 e 1500kJ/mol, ligações covalentes são geradas pelo compartilhamento de elétrons entre partículas adjacentes, com energia de ligação de 60 até 800kJ/mol, e ligações metálicas advêm do compartilhamento de elétrons livres nas estruturas metálicas, possuindo energia de ligação entre 68 e 850kJ/mol. As ligações secundárias ou ligações de Van der Waals são mais fracas do que as primárias, com energia de ligação da ordem de 10kJ/mol, mas ainda assim podem influenciar as propriedades físicas dos materiais. A ligação de hidrogênio é um tipo especial de ligação secundária [42].

A teoria da adsorção afirma que uma aproximação suficiente entre as moléculas do adesivo e do substrato permite que ocorram interações químicas entre as substâncias, desenvolvendo forças de atração na superfície. Tanto as ligações primárias quanto as secundárias contribuem para a resistência da junta, como mostrado nas Figuras 13 e 14, com intensidades diferentes dependendo do caso.

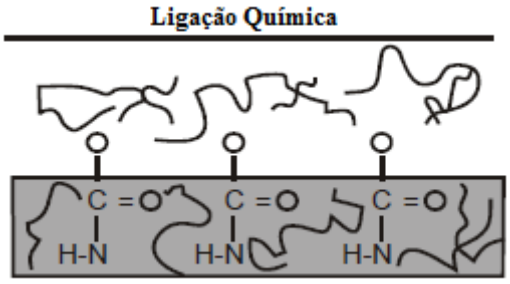


Figura 13: Esquema de ligações primárias da teoria da adsorção [43, modificado].

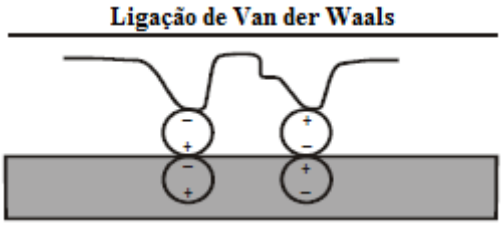


Figura 14: Esquema de ligações secundárias da teoria da adsorção [43, modificado].

As teorias sugerem que existe uma adesão perfeita entre o substrato e o adesivo, porém as juntas reais apresentam discrepâncias de várias ordens de grandeza. Este fato

pode ser justificado pela existência de uma camada fraca, concentrações de tensão na junta e pelas irregularidades na superfície do substrato.

Quando uma falha na junta ocorre próximo a interface do adesivo com o substrato, ela é chamada de falha coesiva, e pode originar-se devido a presença de uma camada de baixa resistência na interface. Esta camada mais fraca pode se formar devido à inclusão de ar, presença de impurezas ou de uma camada de óxido de fraca adesão na superfície do material ligado.

Outra causa da diminuição da resistência está relacionada a geometria da junta, que promove uma distribuição de tensões não uniforme. A partir de determinado comprimento sobreposição, um aumento deste não ocasiona um aumento na resistência da junta devido a presença da concentração de tensões.

Uma terceira causa de menor resistência numa ligação adesiva é justificada pela presença de irregularidades na superfície do substrato, existentes em todos os materiais, que provoca pontos de iniciação de trincas. Essas pequenas irregularidades dão origem a vazios que podem causar concentrações de tensão durante a aplicação do carregamento, levando a abertura de trincas. A mecânica da fratura estabelece que há um comprimento crítico de trinca a partir do qual ela se propaga rapidamente, levando a falha da junta.

2.2.2 Preparação da Superfície

O processo de preparação das superfícies a serem coladas é extremamente importante na produção de uma junta e, como visto na teoria da adesão, sua resistência final depende muito desta operação. Na maior parte das ligações adesivas, o adesivo é o elo mais fraco pois as forças de adesão são superiores às forças de coesão que atuam no interior do adesivo. Porém, quando a interface se torna o elo mais fraco, devido a presença de uma camada superficial fraca, o resultado é uma menor resistência da junta.

O principal objetivo da preparação da superfície é garantir que a falha não ocorra na interface, por meio do aumento da energia de superfície do substrato. Isto pode ser feito pela remoção de substâncias indesejáveis, modificação química da superfície, alteração da topografia da superfície ou pela combinação desses três procedimentos. A seleção do modo de preparação da superfície deve ser feita considerando os fatores de

resistência e durabilidade da junta, tipo e condições iniciais dos substratos e fatores de produção.

Os tratamentos superficiais podem ser mecânicos ou químicos, e passivos ou ativos. Os processos passivos são aqueles em que a natureza química da superfície não é alterada e os processos ativos alteram a sua natureza química, sendo usados quando se deseja a máxima resistência da junta.

Os processos passivos químicos envolvem limpeza com solventes ou detergentes e são usados para remoção de gordura e contaminantes que prejudicam a adesão. Os processos passivos mecânicos incluem processos manuais de abrasão ou preferencialmente por jateamento, e são muito efetivos na remoção de camadas fracas. Este tratamento deve ser sempre precedido de um processo passivo químico para evitar que os contaminantes sejam esfregados sobre a superfície. Existe ainda diversos outros tipos de tratamentos superficiais passivos, para aplicações específicas.

Os processos ativos químicos são usados quando se deseja remover camadas fracas e proteger contra a corrosão substratos metálicos. No caso de polímeros e compósitos esta operação é particularmente importante para aumento da energia de superfície desses materiais. Processos ativos físicos como descarga de Corona, tratamento por chama ou por plasma tem se mostrado eficientes na preparação de superfícies poliméricas.

Em alguns casos de preparação da superfície, são aplicadas substâncias diretamente na superfície dos substratos com o objetivo de melhorar a adesão ou como forma de proteção até a aplicação do adesivo. A essas substâncias dá-se o nome de primário e consistem basicamente numa solução de um reagente disperso num solvente, que é aplicada no substrato com pincel ou pulverizador.

A avaliação da qualidade do tratamento superficial é difícil de ser feita. Um método muito útil para avaliar o estado de superfícies não porosas é o teste da quebra de água, em que se pulveriza água destilada na superfície a testar e, se esta água se espalhar formando um filme uniforme assume-se que a preparação superficial foi bem executada. Também podem ser realizados ensaios destrutivos na junta e, se a falha for coesiva, ou seja, ocorrer no substrato ou no adesivo, pode-se assumir que o tratamento superficial é adequado. Se a falha ocorrer na interface, é necessário rever a preparação. É importante

salientar que o envelhecimento da junta contribui para que ocorra falha na interface, mesmo se a adesão inicial for satisfatória.

Nem sempre a colagem dos substratos é feita imediatamente após a preparação da superfície. O tempo máximo permitido entre o tratamento superficial e a colagem depende do material do substrato, do modo de preparação da superfície e do meio de armazenamento. Para períodos mais longos de armazenamento, faz-se a utilização de atmosfera controlada, proteção por deposição de um filme (geralmente de polietileno) na superfície ou revestimento com um primário.

2.2.3 Tipos de Adesivos

Os adesivos são fabricados a base de polímeros naturais ou sintéticos e podem ser classificados por diversas formas, de acordo com os objetivos da indústria. As classificações mais utilizadas são feitas por função, composição química, forma física ou método de reação.

A classificação funcional define os adesivos como estrutural ou não estrutural. Os adesivos estruturais são os que possuem elevada resistência, geralmente definidas superiores a 7MPa. Os adesivos não estruturais limitam-se a aplicações de cargas leves e por isso não são de interesse neste trabalho.

A classificação quanto a composição química divide os adesivos em termoendurecíveis, termoplásticos, elastômeros ou combinações destes. Os termoendurecíveis curam ou endurecem por reação química irreversível, à temperatura ambiente ou aquecidos, adquirindo uma estrutura reticulada, e não podem ser refundidos ou restaurados. Os adesivos termoplásticos fundem com a exposição ao calor e curam durante o resfriamento, formando estruturas lineares ou ramificadas. Estes adesivos possuem temperatura de serviço mais limitada e menor resistência química que os termoendurecíveis e tendem a deformar sob situação de fluência, por isso não são usados em aplicações estruturais. Os adesivos elastoméricos possuem propriedades reológicas que permitem elevados graus de deformação elástica e elevada tenacidade. Eles podem ser termoendurecíveis ou termoplásticos, sendo apenas os termoendurecíveis usados em aplicações estruturais. Existe ainda os adesivos híbridos,

que são feitos pela combinação de resinas termoendurecíveis, termoplásticas e elastoméricas com o objetivo de aprimorar as suas propriedades.

Outra classificação dos adesivos é dada pela forma física, sendo divididos em adesivos em pasta ou líquidos de duas partes sem solvente, uma parte sem solvente, ou com solvente, e sólidos na forma de filme ou pó. Os adesivos de duas partes curam pela sua mistura, sendo este processo mais acelerado em altas temperaturas. Os adesivos de uma parte curam por aquecimento, por reação com a umidade do ar ou por outros mecanismos, sendo muito populares em aplicações industriais. Os adesivos com solvente curam pela perda do solvente por evaporação. O solvente apenas realiza o transporte das partes sólidas do adesivo e o tipo de solvente utilizado deve ser considerado com cuidado devido a preocupações com saúde, segurança e meio ambiente. As formas sólidas de adesivos são muito populares no meio industrial pela facilidade de aplicação e mínimo desperdício.

Um último modo de classificar os adesivos é feito pelo modo de reação ou cura, que pode ser feito por reação química, perda de solvente ou por resfriamento a partir do estado fundido. O modo de cura do adesivo é um fator muito importante no processo de seleção.

O desenvolvimento de adesivos estruturais com características cada vez satisfatórias contribui para a expansão da tecnologia das ligações adesivas. Pode-se dizer que há cinco grandes famílias de adesivos estruturais: os anaeróbios, os acrílicos reativos, os epóxidos, os cianoacrilatos, e os poliuretanos.

Os adesivos epóxidos são os mais utilizados na colagem estrutural devido às suas propriedades mecânicas, nomeadamente boa resistência mecânica, excelente dureza, alta durabilidade, excelente aderência a diversos materiais. São resinas termofixas fabricadas geralmente de uma parte, que curam a temperaturas a partir de 100°C ou de duas partes, que curam a partir dos 5°C. Os epóxis apresentam ainda resistência a água, ácidos e solventes após a cura.

2.2.4 Carregamento em Juntas Adesivas

As forças aplicadas a uma junta colada produzem uma distribuição de tensões não uniforme, produzindo tensões que podem ser muito superiores à tensão média.

Essas concentrações de tensão podem determinar a resistência máxima da junta. Por isso, é importante identificar os modos de carregamento.

Existem quatro modos fundamentais de carregamento em uma junta colada. São elas: tração, cisalhamento, arrancamento e clivagem (Figura 15). Combinações ou variações destes modos também podem ser encontrados na prática.

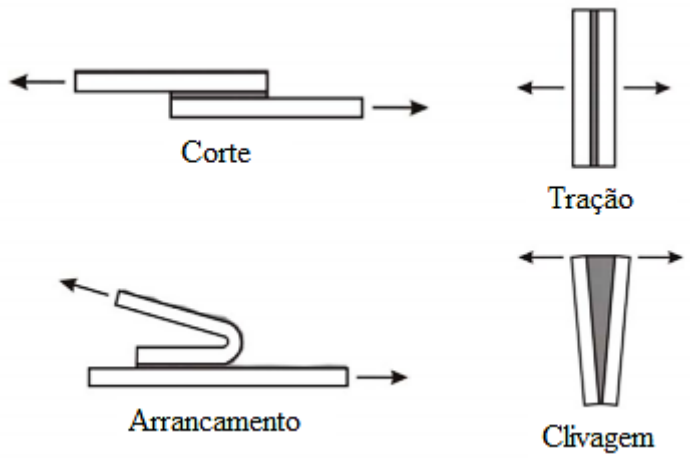


Figura 15: Modos de carregamento de juntas adesivas [42, modificado].

As tensões de tração são desenvolvidas quando forças que atuam perpendicularmente à superfície da junta são distribuídas de maneira uniforma ao longo da área colada. As juntas devem ser projetadas de modo que as superfícies dos substratos sejam paralelas e as forças normais. Na prática, tensões indesejáveis de clivagem e arrancamento se originam devido a pequenas variações na espessura do adesivo, deformação dos substratos ou presença de forças não axiais.

As tensões de cisalhamento aparecem quando forças atuantes no plano do adesivo tendem a separar os substratos. As juntas são geralmente mais resistentes à solicitações de cisalhamento. As juntas de sobreposição simples (*single lap joints*) representam o tipo mais comum. É importante notar que, neste tipo de junta, a maior parte da tensão está localizada próxima as extremidades da sobreposição, enquanto a região central pouco contribui para a resistência.

A tensão de clivagem é a tensão que ocorre quando as forças que atuam na extremidade da junta tendem a separar os substratos. A tensão de arrancamento age de modo semelhante, mas ocorre no caso de pelo menos um dos substratos ser flexível.

Desta forma, o ângulo de separação pode ser muito maior no arrancamento do que na clivagem. Juntas adesivas sob estes tipos de tensões são muito menos resistentes do que nos casos de tração ou cisalhamento, pois o carregamento está concentrado numa extremidade da junta, enquanto o outro lado pouco contribui para a resistência da junta. Os adesivos mais dúcteis são mais adequados ao arrancamento, pois reduzem a concentração de tensões e permitem maior resistência.

Os métodos para se determinar as tensões em juntas de sobreposição foram desenvolvidos ao longo de várias décadas. Métodos analíticos mais simples e limitados foram inicialmente introduzidos, considerando apenas o comportamento elástico da junta. Análises mais sofisticadas foram desenvolvidas então, considerando o comportamento plástico dos adesivos e substratos, além de outras limitações presentes nos métodos clássicos. À medida que esta análise foi se tornando mais completa e refinada, a solução analítica se tornou inviável, sendo substituída por métodos numéricos. A escolha do modelo a ser utilizado numa análise deve ser baseada no nível de precisão exigido e por outro lado na facilidade de se obter a solução.

2.2.5 Falha em Juntas Adesivas

A finalidade de uma ligação eficiente é a transmissão de carga entre os dois componentes ligados, mantendo a sua integridade estrutural sob solicitações estáticas e dinâmicas, além de condições ambientais (umidade e temperatura) adversas. Torna-se assim fundamental a correta avaliação da distribuição do perfil de tensões e, consequentemente, dos modos de falha induzidos nas juntas adesivas. De um modo geral, podem-se distinguir três modos de falha diferentes em juntas coladas: coesiva no interior do adesivo, adesiva na interface entre o substrato e o adesivo e falha de um dos substratos. A Figura 16 mostra os três tipos básicos de falha possíveis numa junta colada.

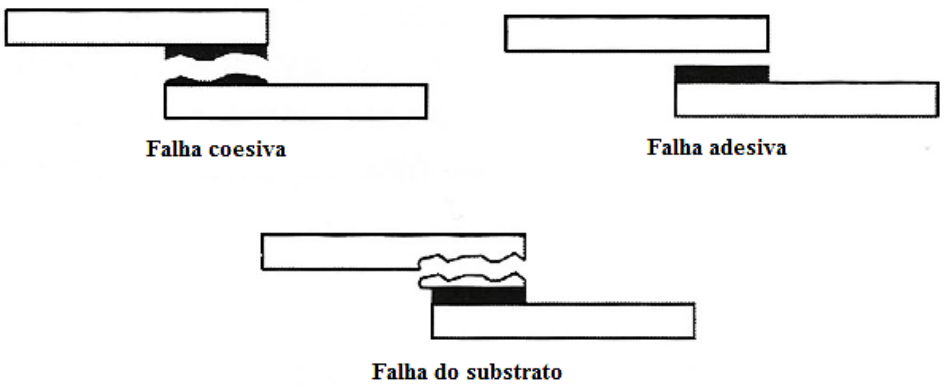


Figura 16: Tipos de falha em juntas coladas [42, modificado].

A falha coesiva ocorre quando os substratos e a ligação entre o adesivo e o substrato são mais fortes do que a resistência interna do próprio adesivo. É geralmente aceito que a fratura adesiva se deve a uma má preparação das superfícies. Por outro lado, assume-se que uma junta deve ser projetada de modo a que a falha nunca ocorra pelo adesivo. Portanto, uma junta corretamente projetada será aquela onde ocorra falha do substrato.

A Mecânica da Fratura assume que a estrutura não é um meio contínuo, podendo conter defeitos causados pelo processo de fabricação ou pela utilização. A previsão da falha do material é então realizada a partir de uma trinca inicial. Assim, ao invés de uma análise de tensões, é avaliada a susceptibilidade da estrutura à falha. A falha pode então ocorrer de três modos distintos: Modo I ou modo normal, Modo II ou modo cisalhante no plano, Modo III ou modo cisalhante fora do plano. Os três modos de propagação de trinca são mostrados na Figura 17.

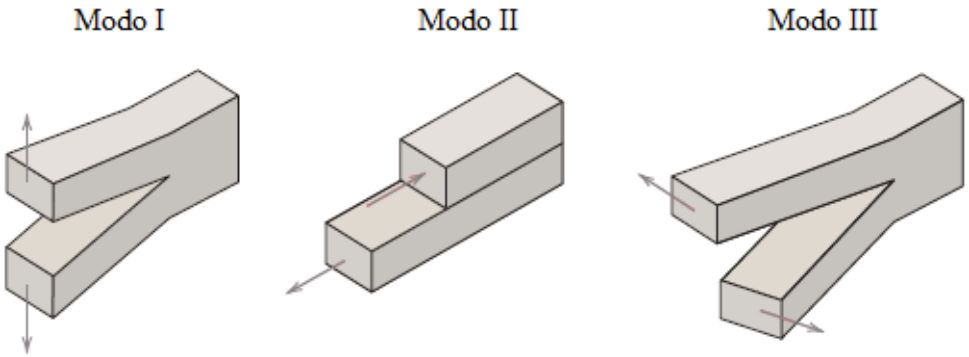


Figura 17: Modos de propagação de trinca [1, modificado].

No caso de juntas coladas, a direção de propagação de um defeito está restringida pelos substratos, ou seja, a fratura se propaga sempre ao longo da junta. Nestas circunstâncias, uma propagação de modo misto (I e II combinados) é a mais esperada.

Uma junta adesiva pode apresentar três tipos básicos de defeitos. O primeiro se trata da fraca adesão entre o adesivo e o substrato, e resultam de uma má preparação da superfície ou pela presença de contaminantes no substrato. O segundo defeito é a fraca resistência coesiva, resultante de um erro na formulação, mistura ou cura do adesivo. O outro tipo de defeito possível são os vazios, decoesões e porosidades. Estes são os mais facilmente detectáveis e apresentam diversas causas, entre elas estão a presença de bolhas de ar, liberação de voláteis ou contração térmica do adesivo.

A necessidade de se assumir a existência de uma fenda inicial e a presença de uma zona plastificada na extremidade da fenda dificultam a aplicação da Mecânica da Fratura. Desta forma, foram desenvolvidos recentemente métodos numéricos para propagação de dano em estruturas. Um dos métodos mais relevantes é o de Elementos Finitos de Interface. Estes elementos finitos promovem a ligação entre dois elementos sólidos quaisquer susceptíveis a separação, como no caso de juntas coladas.

Capítulo 3

Materiais e Métodos

Neste capítulo são abordados os materiais e métodos utilizados na análise deste trabalho. Primeiro, são especificados os diferentes tipos de corpos de prova utilizados e sua confecção. Em seguida, são mostrados detalhes sobre o método de envelhecimento utilizado, que consiste na imersão dos corpos de prova numa solução de água salgada. Por fim, o ensaio de arrancamento, procedimento experimental utilizado para a análise de adesão de juntas coladas, é abordado.

3.1 Materiais Utilizados

Para investigar as propriedades de adesão entre partes coladas, foram produzidas amostras para ensaios de arrancamento. Os corpos de prova consistem na ligação adesiva entre CFRP como substrato rígido e aço carbono como substrato flexível.

Foram fabricados 15 corpos de prova na configuração CFRP-aço para ensaio de arrancamento, com 550 mm de comprimento do substrato flexível, 500 mm de comprimento no substrato rígido e 25 mm de largura. O substrato rígido é feito de compósito laminado de fibra de carbono e matriz epóxi, e o substrato flexível é feito de aço carbono, como mostrado na Figura 18.

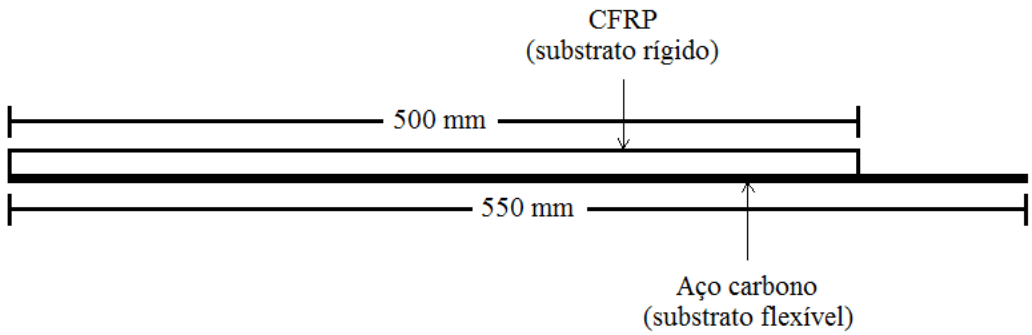


Figura 18: Configuração dos corpos de prova CFRP-aço.

A colagem entre os substratos dissimilares foi realizada pela resina epóxi NVT201E® (Novatec Ltd., Rio de janeiro, Brasil). Fibras de carbono em forma de tecido com massa específica de 430 g/m^2 foram utilizadas para confecção do compósito. Cada camada de tecido é composta de duas camadas de fibras orientadas perpendicularmente. A resina epóxi PIPEFIX® (Novatec Ltd., Rio de janeiro, Brasil) foi usada na impregnação do CFRP. Uma chapa de aço carbono ASTM A36 de 0,4 mm de espessura foi usada como substrato flexível.

Primeiro, foi realizado um processo de preparação da superfície da chapa de aço através de jateamento de granalha de aço G-40 e em seguida limpeza com acetona. Os dados de rugosidade superficial foram aferidos após a preparação, resultando em 12,26 μm de desvio médio quadrático (Rq) e 76,12 μm de altura total do perfil de rugosidade (Rt).

A fabricação dos corpos de prova foi realizada por laminação manual, de forma que o empilhamento das camadas do compósito e a impregnação da resina foram feitas manualmente sobre a superfície tratada da chapa metálica, como mostrado na Figura 19. O processo de cura foi realizado a temperatura ambiente durante duas horas.



Figura 19: Fabricação dos corpos de prova CFRP-aço.

O substrato compósito apresenta um total de seis camadas de tecido de fibra orientadas a 0/90°, ou seja, nas direções longitudinal e transversal ao comprimento do corpo de prova.

3.2 Métodos Experimentais

Os métodos experimentais utilizados consistem em envelhecimento por imersão em água salgada e ensaios de arrancamento (*peel tests*). O envelhecimento foi usado para simular o as condições ambientais agressivas à qual os reparos de compósitos são submetidos quando realizados em embarcações. Os ensaios de arrancamento são usados para avaliar a adesão de uma junta colada nas diferentes condições impostas aos corpos de prova. Ambos os procedimentos são detalhados a seguir.

3.2.1 Envelhecimento em Água Salgada

A água é a substância que impõe os maiores problemas à durabilidade de juntas adesivas. Isso se deve a alta permeabilidade da maioria dos materiais poliméricos. A presença de água pode influenciar tanto o adesivo quanto a interface de uma junta, e, nos casos em que o substrato é permeável, alterar as propriedades do próprio substrato. A água que penetra na junta degrada as propriedades mecânicas do adesivo e a adesão da interface, causa alterações dimensionais, como o inchamento, cria tensões que podem provocar fissuração, reduz a temperatura de transição vítrea do adesivo e pode levar a hidrólise do próprio adesivo [44].

Existem basicamente quatro mecanismos pelos quais a água pode entrar na ligação adesiva. São eles: difusão através do adesivo; difusão através do substrato (se este for permeável); transporte ao longo da interface; e capilaridade através de defeitos pré-existentes no adesivo. Alguns dos processos de degradação que podem ocorrer são reversíveis e acompanhados pela recuperação da resistência quando a água é retirada. Porém, outros são irreversíveis e a recuperação da resistência é impossível. A água aumenta a tenacidade de alguns adesivos epóxi por períodos curtos de carregamento, mas a capacidade de transferência de carga a logo prazo decresce com a presença de água.

Os substratos metálicos também podem sofrer ataque, mas neste caso por fenômenos de corrosão. Existem diversos mecanismos físicos que explicam a degradação de juntas com substratos metálicos em consequência da umidade. São eles a ruptura de ligações secundárias na interface que causam deslocamento do adesivo

provocado pela presença de água, diminuição da resistência mecânica devido à alteração da estrutura dos óxidos presentes no substrato e hidrólise na interface. Soma-se a esses efeitos a taxa de difusão e alteração das propriedades mecânicas devido à umidade e inchamento do adesivo. A escolha do tratamento superficial no metal antes da colagem tem papel importante no efeito da umidade na interface e, portanto, na resistência da junta.

O procedimento experimental consiste na imersão dos corpos de prova em um recipiente contendo água salgada durante diferentes períodos de tempo, como mostrado na Figura 20. A temperatura utilizada no procedimento é a mesma do laboratório (aproximadamente 22°C). O nível da água no recipiente foi controlado de modo não se alterar a concentração salina ou a faixa submersa dos corpos de prova parcialmente imersos, devido a evaporação da água durante o processo.



Figura 20: Corpos de prova sob envelhecimento em água salgada.

A solução de água e sal foi obtida através da mistura de 5% do peso de sal (NaCl) em água, mesma condição utilizada em estudos da durabilidade de juntas coladas em ambiente agressivo. Em termos práticos, foram adicionados 50g de sal por litro de água presente no recipiente e em seguida misturados para se produzir uma solução homogênea. Essas condições foram adotadas de modo a simular o ambiente agressivo ao qual são expostos os reparos com compósito realizados em embarcações.

A fim de se estudar a durabilidade de longo prazo da junta, seis corpos de prova foram totalmente imersos na água salgada e outros seis foram parcialmente imersos, de modo a se manter imerso metade do comprimento da superfície colada. Foram então tomadas periodicamente medidas da massa de uma amostra em cada situação, como mostram as Figuras 21 e 22. Os corpos de prova foram pesados diariamente ao longo dos primeiros dias, e semanalmente a partir da segunda semana.

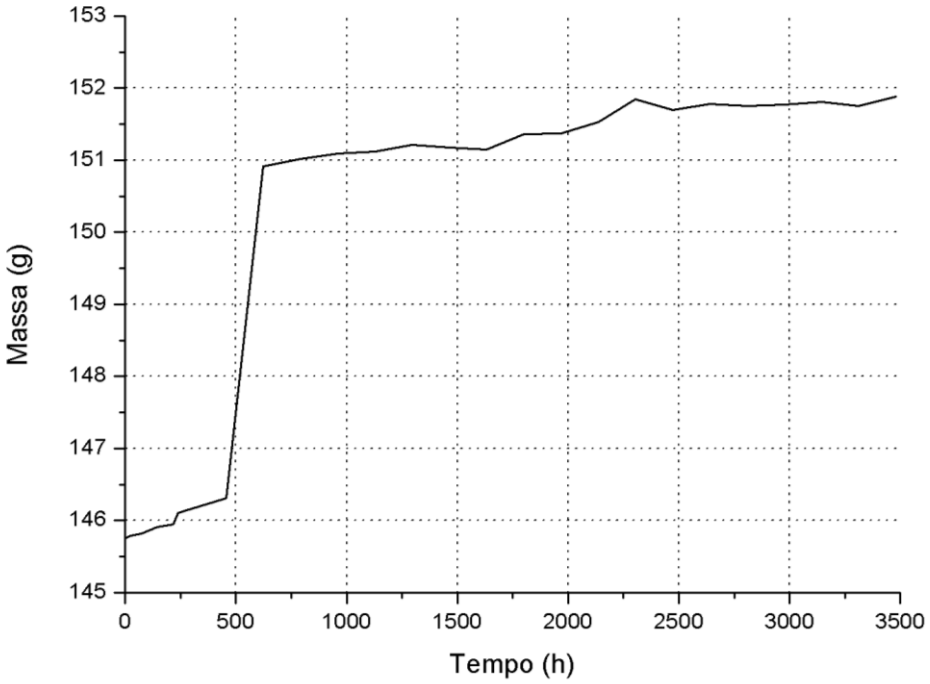


Figura 21: Curva de ganho de massa de um corpo de prova CFRP-aço totalmente imerso.

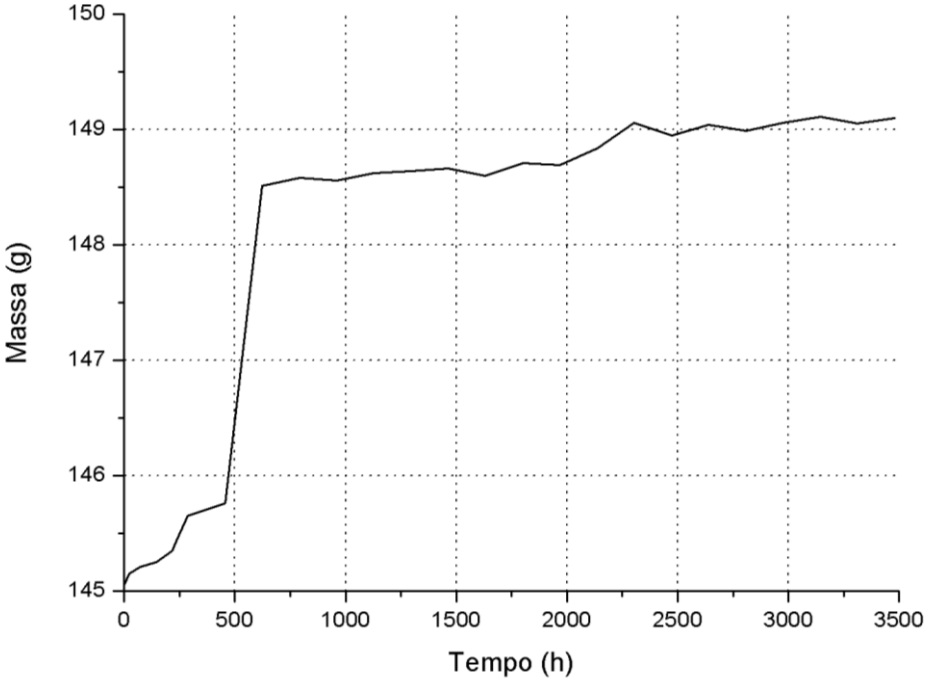


Figura 22: Curva de ganho de massa de um corpo de prova CFRP-aço parcialmente imerso.

Pode-se identificar um ganho massa de aproximadamente 5,34 g no corpo de prova totalmente imerso após 40 dias (960 horas) de envelhecimento, quando parte das amostras foi retirada para ensaio, e 6,13 g ao final de 150 dias (3600 horas), quando a parte restante das amostras foi retirada. No caso do corpo de prova parcialmente imerso, este apresentou ganho de massa de 3,51 g após os mesmos 40 dias e 4,05 g ao final dos 150 dias. A Tabela 1 mostra os valores percentuais de ganho de massa nas duas configurações de corpo de prova e nos dois períodos de tempo mantidos em envelhecimento.

Tabela 1: Ganho de massa dos corpos de prova durante envelhecimento.

Tempo	**Ganho de Massa**	
	Totalmente imerso	**Parcialmente imerso**
40 dias	3,7%	2,4%
150 dias	4,2%	2,8%

As curvas de ganho de massa obtidas mostram um comportamento semelhante entre o corpo de prova parcialmente imerso e totalmente imerso ao longo do mesmo período de tempo. As curvas de ganho de massa mostram ainda que a maior parte da absorção de umidade ocorreu no intervalo de medição entre 480 e 648 horas (20 e 27 dias). Este valor coincide também com ensaios realizados em corpos de prova CFRP-CFRP apresentados no Apêndice A.

O ganho de massa por absorção de água dos corpos de prova CFRP-aço é relativamente inferior ao ganho em corpos de prova CFRP-CFRP (Apêndice A). Este comportamento ocorre devido ao fato do aço representar a maior parcela da massa em relação ao compósito e o adesivo. De fato, o substrato compósito é responsável pela maior parte da absorção de umidade.

A Figura 23 mostra as superfícies externas de um corpo de prova antes e depois de 150 dias de envelhecimento em água salgada. É mostrado o substrato compósito antes da imersão (Figura 23a) e após o período de exposição (Figura 23b). É possível notar a presença de uma camada de sal na superfície do compósito em consequência do envelhecimento. Em relação ao aço carbono, é mostrada a superfície externa do substrato antes da imersão (Figura 23c) e após 150 dias (Figura 23d). Pode-se visualizar o efeito da corrosão ao longo da superfície.

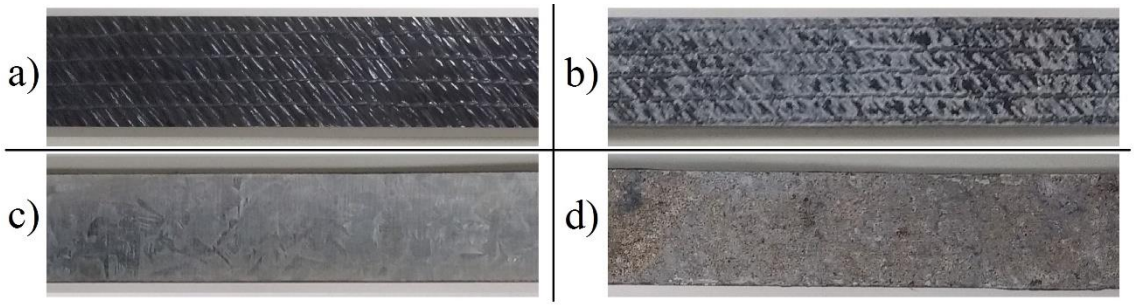


Figura 23: Efeito do envelhecimento no corpo de prova antes e depois de 150 dias de envelhecimento.

O efeito do cloreto de sódio (NaCl) na corrosão deve-se ao fato de este ser um sal eletrólito forte, ocasionando, portanto, aumento da condutividade, que é fundamental no mecanismo eletroquímico de corrosão [45]. Este resultado exemplifica uma das

principais vantagens na utilização de materiais compósitos em relação aos metais em aplicações submetidas a condições ambientais severas.

3.2.2 Ensaio de Arrancamento

O procedimento experimental dos ensaios de arrancamento de rolete flutuante permite determinar a resistência ao arrancamento numa ligação entre um substrato rígido e um substrato flexível. O ensaio é normatizado pela ASTM D 3167 [35] para colagem entre substratos metálicos, como mostrado na Figura 24. Este procedimento foi adaptado para o uso de substratos compósitos [36-37]. Durante o teste, o substrato flexível é descolado do substrato rígido, que deve ter espessura suficiente para não fletir durante o ensaio.

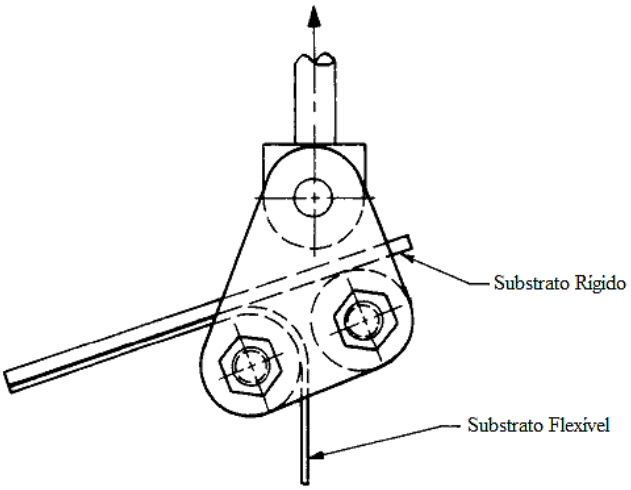


Figura 24: Esquema do ensaio de arrancamento de rolete flutuante [35, modificado].

Os ensaios de arrancamento foram realizados nos corpos de prova CFRP-aço de 500 mm de comprimento nas diferentes configurações de envelhecimento e também sem envelhecimento. Foi utilizado uma máquina eletromecânica INSTRON acoplada a uma célula de carga de 1kN. A velocidade utilizada nos testes foi de 152mm/min. A Figura 25 mostra uma fotografia tirada durante a realização de um ensaio de arrancamento em corpo de prova CFRP-aço de 500 mm.

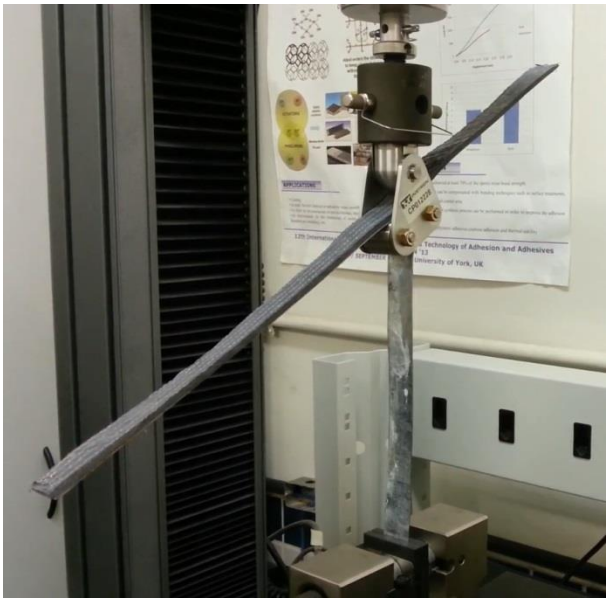


Figura 25: Ensaio de arrancamento.

A carga e o deslocamento da máquina são gravados ao longo o ensaio. Desta forma, o resultado mostra a força necessária para que ocorra o arrancamento ao longo da interface adesiva. É importante saber que as forças de arrancamento obtidas resultam da soma da resistência ao arrancamento do adesivo e resistência mecânica à deformação do substrato flexível. Por isso, as cargas de arrancamento só podem ser usadas como medida do desempenho de adesão se um mesmo aderente flexível for utilizado.

A adesão é uma propriedade importante para se garantir a integridade de juntas coladas. Os ensaios de arrancamento são adequados para avaliar esse parâmetro, pelo fato da fratura se propagar preferencialmente em modo I. Essa configuração é a mais severa para a interface.

A natureza heterogênea dos materiais em análise contribui naturalmente para o aumento das dispersões nos resultados. Desta forma, diversos corpos de prova devem ser testados em cada condição, de forma a se obter uma amostragem suficiente para análise dos resultados. Por isso, foram utilizados uma amostragem de três ensaios para cada condição de envelhecimento dos corpos de prova.

Capitulo 4

Resultados e Discussão

Neste capítulo são mostrados os resultados obtidos através dos ensaios de arrancamento nos corpos de prova CFRP-aço. Inicialmente são expostos os gráficos de carga-deslocamento obtidos durante os ensaios e as cargas médias de arrancamento. Em seguida, são mostradas as superfícies de fratura produzidas após o ensaio nos diferentes períodos de envelhecimento. Por último, são discutidos os principais pontos de interesse verificados através dos resultados experimentais.

4.1 Gráficos dos Ensaios

Os resultados dos ensaios de arrancamento fornecem curvas da carga de arrancamento ao longo do comprimento de camada adesiva descolada entre os substratos. Nesta etapa são então expostos os resultados gráficos dos ensaios nas juntas CFRP-aço realizados após diferentes condições de envelhecimento.

4.1.1 Juntas sem Envelhecimento

Nesta seção são mostrados os resultados dos ensaios de arrancamento nos corpos de prova de configuração CFRP-aço sem envelhecimento. Ensaios em três corpos de prova CFRP-aço de tamanho usual (250 mm) foram realizados previamente a este trabalho (Ensaios 1, 2 e 3) e os resultados são mostrados na Figura 26. Estes dados são usados para validação da nova geometria de corpos de prova empregada neste trabalho.

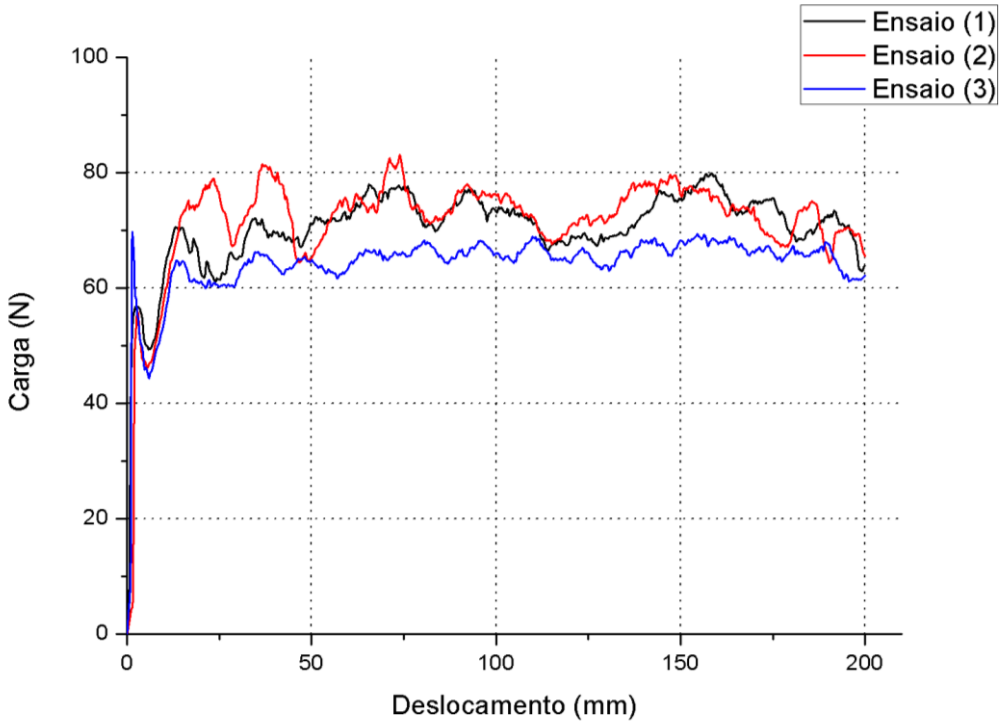


Figura 26: Resultados dos ensaios de arrancamento nas juntas CFRP-aço (250 mm) sem envelhecimento.

Três corpos de prova CFRP-aço de 500 mm foram testados na condição sem envelhecimento (Ensaios 4, 5 e 6). Os resultados dos ensaios de arrancamento são mostrados na Figura 27. Nota-se uma dispersão nas curvas superior às obtidas nos corpos de prova menores.

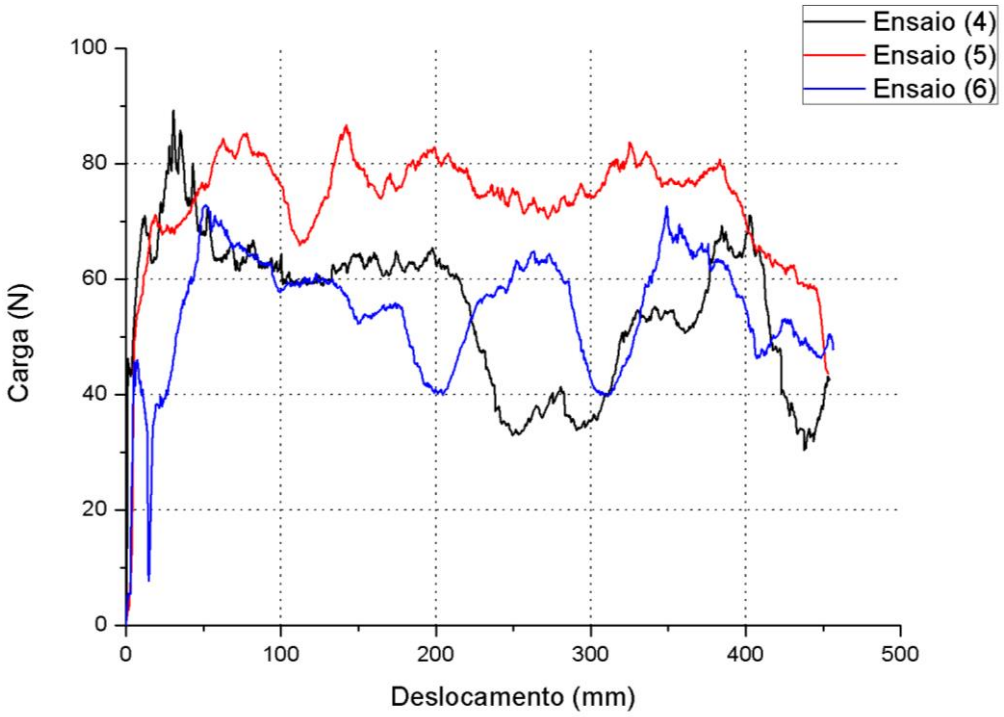


Figura 27: Resultados dos ensaios de arrancamento nas juntas CFRP-aço (500 mm) sem envelhecimento.

A comparação entre os resultados dos ensaios sem envelhecimento mostra que houve maior irregularidade maior nas curvas obtidas nos corpos de prova de 500 mm comprimento, em relação aos de 250 mm.

4.1.2 Juntas com Envelhecimento Durante 40 Dias

Nesta seção são mostrados os resultados dos ensaios de arrancamento nos corpos de prova de configuração CFRP-aço com envelhecimento durante 40 dias. Foram realizados ensaios em amostras totalmente imersas (Ensaios 7, 8 e 9) e parcialmente imersas (Ensaios 10, 11 e 12), mostrados nas Figuras 28 e 29, respectivamente. No caso das amostras parcialmente imersas, a região entre zero e aproximadamente 250 mm de deslocamento corresponde à parte imersa do corpo de prova, e a parte subsequente permaneceu sem envelhecimento.

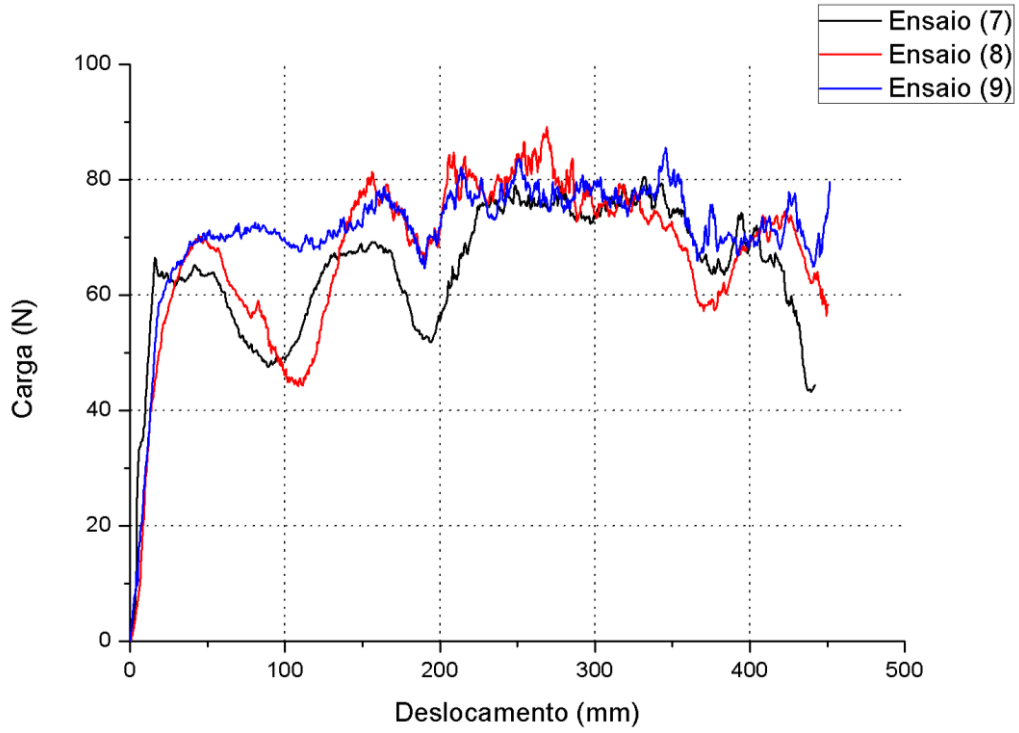


Figura 28: Resultado dos ensaios de arrancamento nas juntas CFRP-aço (500 mm) totalmente imersos durante 40 dias.

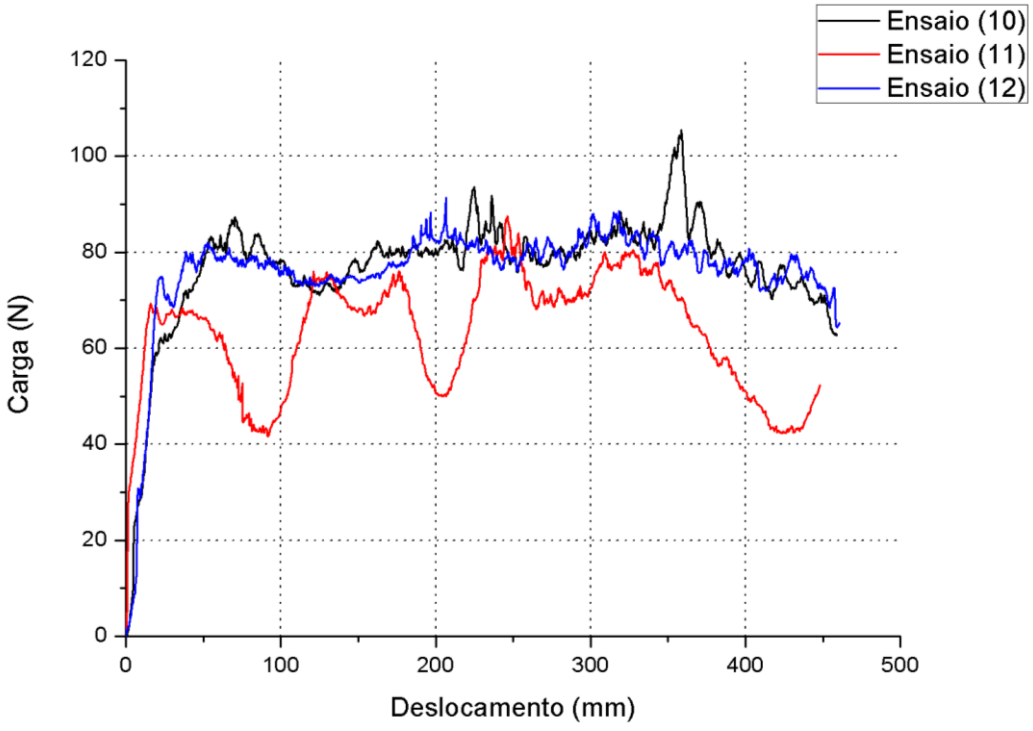


Figura 29: Resultado dos ensaios de arrancamento nas juntas CFRP-aço (500 mm) parcialmente imersos durante 40 dias.

4.1.3 Juntas com Envelhecimento Durante 150 Dias

Nesta seção são mostrados os resultados dos ensaios de arrancamento nos corpos de prova de configuração CFRP-aço com envelhecimento durante 150 dias. Foram realizados ensaios em amostras totalmente imersas (Ensaios 13, 14 e 15) e parcialmente imersas (Ensaios 16, 17 e 18), mostrados nas Figuras 30 e 31, respectivamente.

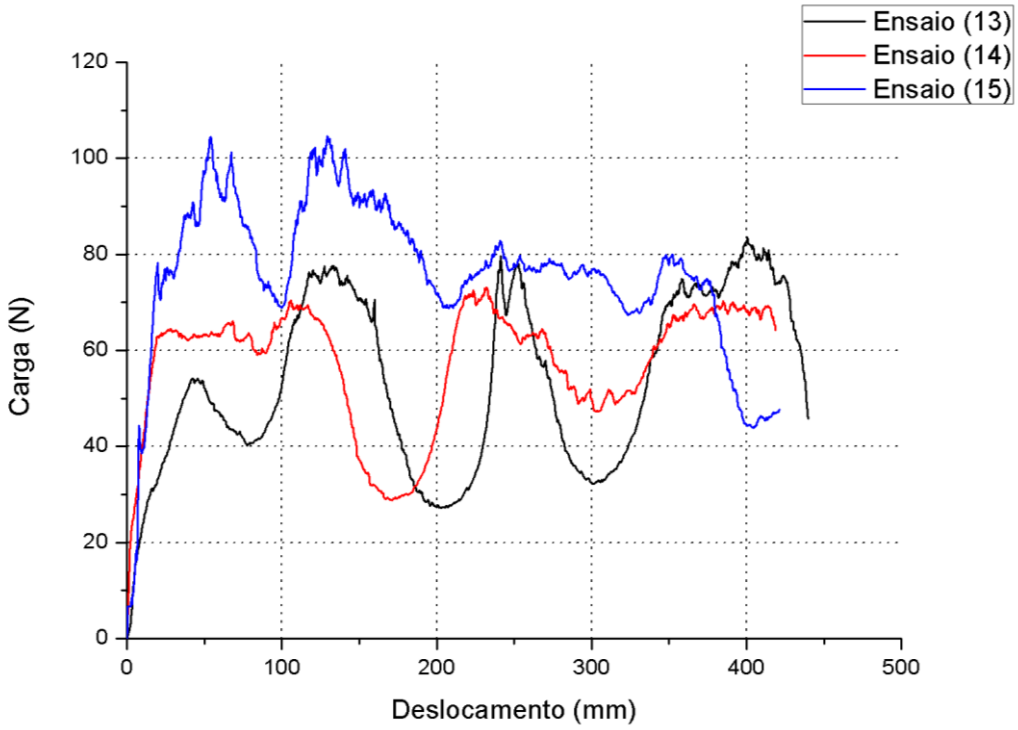


Figura 30: Resultados dos ensaios de arrancamento nas juntas CFRP-aço (500 mm) totalmente imersos durante 150 dias.

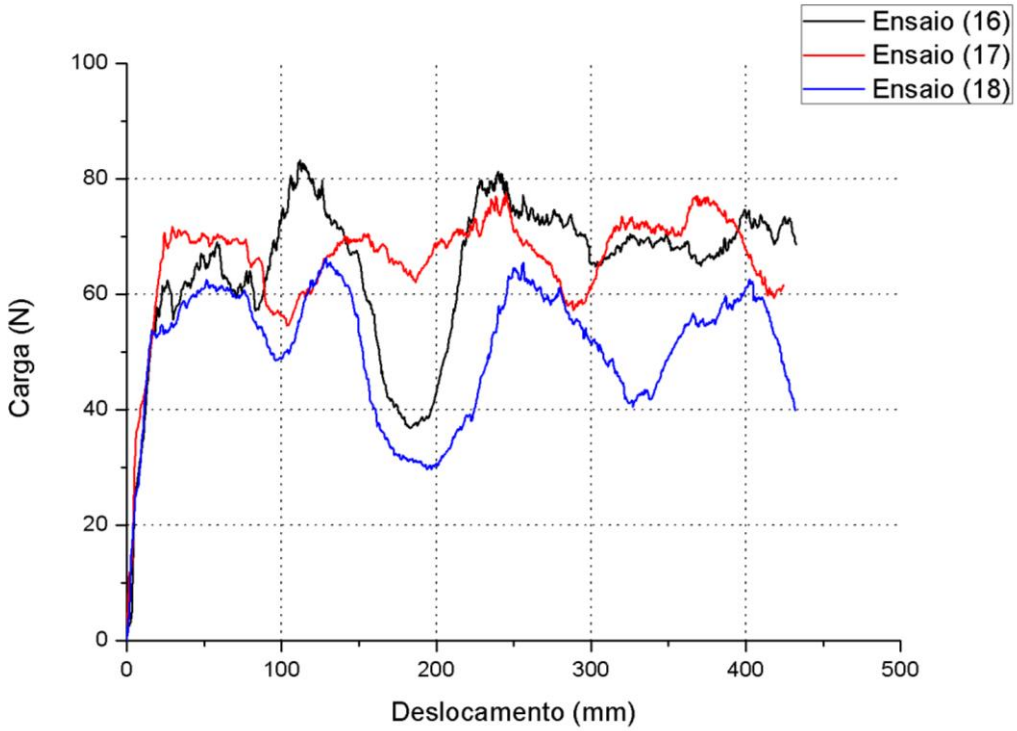


Figura 31: Resultado dos ensaios de arrancamento nas juntas CFRP-aço (500 mm) parcialmente imersos durante 150 dias.

Os ensaios em corpos de prova com 150 dias de envelhecimento mostraram um comportamento diferente dos apresentados anteriormente. Houve decréscimo acentuado de até 40 N na carga de arrancamento em algumas regiões dos Ensaio 13, 14, 16 e 18. Nas amostras que foram totalmente imersas essas regiões podem ser vistas em qualquer intervalo ao longo do deslocamento testado, enquanto nas amostras parcialmente imersas este comportamento é verificado apenas na região envelhecida dos corpos de prova (0 a aproximadamente 250 mm de deslocamento). Isso mostra um possível efeito do envelhecimento nos corpos de prova nos gráficos obtidos pelo ensaio.

4.2 Cargas de Arrancamento Média

Para analisar os resultados dos ensaios com maior clareza, é necessário determinar as médias dos valores de carga obtidos ao longo de um mesmo intervalo de comprimento da camada adesiva. Este intervalo é escolhido de forma que não seja

incluída a parte inicial da aplicação da carga, quando há acomodação do corpo de prova e então início do arrancamento.

Primeiro, foram comparados os resultados entre corpos de prova sem envelhecimento. A norma ASTM D 3167 [35] especifica que a carga de arrancamento média ($F_{méd}$) deve ser medida em comprimento mínimo de 76,2 mm (3 in), descartando-se os primeiros 25,4 mm (1 in) do ensaio. Neste trabalho, foram utilizados dois parâmetros diferentes para comparação entre os corpos de prova com comprimentos distintos. Os valores das cargas de arrancamento média foram determinados ao longo de 150 mm de comprimento para ambas as configurações, descartando-se os primeiros 25 mm. Foi medido também o intervalo de 25 a 400 mm para os corpos de prova de 500 mm, com o objetivo de incluir o maior comprimento de arrancamento viável no resultado. Todos os valores são apresentados na Tabela 2. Os valores mostrados são a média e desvio padrão dos três ensaios realizados em cada condição.

Tabela 2: Cargas de arrancamento média nos ensaios CFRP-aço sem envelhecimento.

Corpo de Prova	**$F_{méd}$ (N)**	
	25-175 mm	**25-400 mm**
250 mm	70,7±4,4	-
500 mm	67,0±8,7	63,2±11,8

Nota-se que os valores de cargas médias dos dois diferentes tamanhos de corpo de prova usados apresentaram valores próximos para o mesmo intervalo (25-175 mm), o que não foi possível visualizar graficamente. Esse resultado é esperado pelo fato das juntas usadas possuírem configurações similares. Entretanto, os resultados nos corpos de prova de 500 mm mostraram uma dispersão maior.

Para analisar os resultados de envelhecimento, as cargas de arrancamento média ($F_{méd}$) dos ensaios realizados em corpos de prova CFRP-aço de 500 mm totalmente imersos foram determinadas ao longo do intervalo de 25 a 400 mm de comprimento. Os valores são mostrados na Tabela 3, como média e desvio padrão dos três ensaios realizados em cada condição. Também são mostrados os valores da carga de arrancamento média nos ensaios em corpos de prova sem envelhecimento.

Tabela 3: Cargas de arrancamento média nos ensaios CFRP-aço totalmente imersos.

Corpo de Prova	$F_{méd}$ (N)
sem envelhecimento	63,2±11,8
40 dias totalmente imersos	69,9±3,5
150 dias totalmente imersos	63,6±14,1

A grande dispersão nos resultados, mostrada pelo alto valor de desvio padrão, dificulta a análise do envelhecimento em juntas com 500 mm de comprimento. Contudo, é possível visualizar o efeito do envelhecimento através da comparação entre os resultados para 40 e 150 dias.

As cargas de arrancamento média ($F_{méd}$) dos ensaios realizados em corpos de prova CFRP-aço de 500 mm parcialmente imersos foram determinadas ao longo de 150 mm de comprimento em dois diferentes intervalos: 25 a 175 mm e 250 a 400 mm. Estes intervalos foram escolhidos de modo a analisar separadamente as regiões com envelhecimento e sem envelhecimento testadas no mesmo corpo de prova. Os resultados são mostrados na Tabela 4, como média e desvio padrão dos três ensaios realizados em cada condição.

Tabela 4: Cargas de arrancamento média nos ensaios CFRP-aço parcialmente imersos.

Corpo de Prova	$F_{méd}$ (N)	
	c/ envelhecimento	s/ envelhecimento
40 dias parcialmente imersos	71,6±8,1	78,0±6,9
150 dias parcialmente imersos	62,0±6,1	64,0±9,2

No caso dos corpos de prova parcialmente imersos, os valores das cargas de arrancamento média obtidas são inferiores na parte envelhecida para um mesmo corpo de prova. Além disso, a dispersão dos resultados se manteve em um nível aceitável. Isso sinaliza para a existência de uma relação entre as cargas de arrancamento e o envelhecimento em um mesmo corpo de prova. No entanto, uma análise mais detalhada das superfícies de fratura se faz necessária.

4.3 Superfícies de Fratura

A qualidade da colagem envolve a qualidade da coesão da camada adesiva e a qualidade da adesão entre o adesivo e o substrato. A inspeção visual das superfícies fraturadas dos substratos pode fornecer informações valiosas sobre a natureza de falha da junta colada. Desta forma, esta seção apresenta a inspeção visual das superfícies de fratura dos corpos de prova utilizados nos ensaios de arrancamento dos substratos com diferentes condições de envelhecimento.

A Figura 32 mostra as superfícies de fratura de uma junta sem envelhecimento. São mostradas as superfícies do substrato compósito (esquerda) e do substrato aço (direita) de um mesmo corpo de prova e na mesma posição. A falha coesiva foi identificada como modo dominante de falha nessa condição. Isto indica uma boa qualidade da adesão entre os substratos. Foi observado, ainda, que a falha ocorre próximo à interface entre o aço (substrato flexível) e o adesivo, sugerindo a presença de falha interfacial.

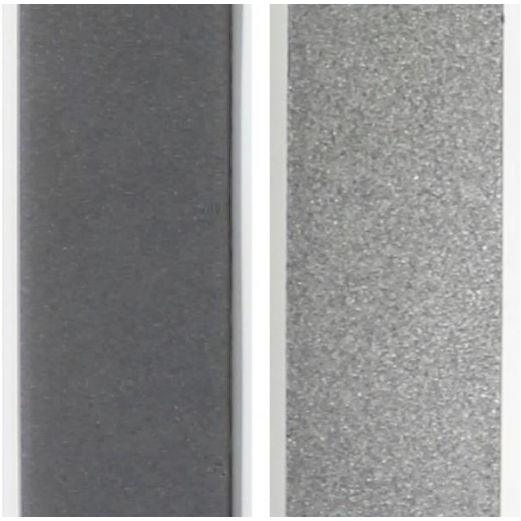


Figura 32: Superfícies de fratura em corpo de prova sem envelhecimento.

A Figura 33 mostra as superfícies de fratura de uma junta com envelhecimento durante 40 dias. Também são mostradas as superfícies do substrato compósito (esquerda) e do substrato aço (direita) de um mesmo corpo de prova e na mesma posição. Nesse caso, a falha coesiva também foi identificada como principal modo de

falha, com uma influência quase imperceptível da umidade no contorno das superfícies (menor que 5% da superfície imersa). Isso indica que com 40 dias de envelhecimento em água salgada a interface adesiva não é afetada significativamente.

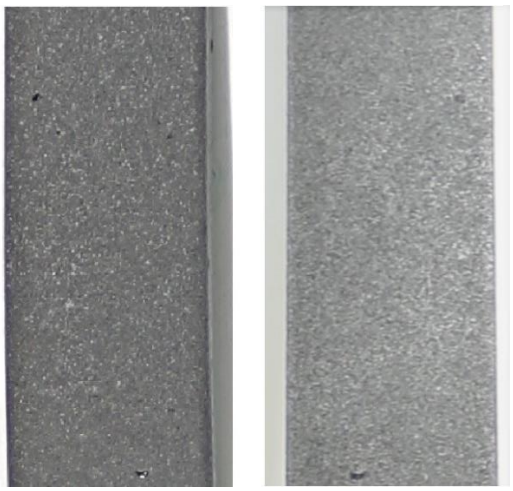


Figura 33: Superfícies de fratura em corpo de prova com envelhecimento durante 40 dias.

Ao identificar o ponto correspondente a 40 dias (960 horas) nas curvas de ganho de massa das juntas compósito-aço (Figuras 21 e 22) e apenas no compósito (Figura 37, Apêndice A) durante envelhecimento, nota-se que até este momento houve ganho considerável de massa em ambos os corpos de prova. Isso mostra que a umidade foi absorvida majoritariamente pelo substrato compósito. A camada adesiva foi pouco afetada pelo ganho de massa até este momento.

A Figura 34 mostra as superfícies de fratura de uma junta com envelhecimento durante 150 dias. São mostradas as superfícies do substrato compósito (esquerda) e do substrato aço (direita) de um mesmo corpo de prova e na mesma posição. Pode-se notar que após 150 dias de exposição a interface sofreu influência significativa da umidade (cerca de 20% da superfície imersa). O padrão de exposição permanece apenas nas bordas da superfície de fratura, sendo que a maior parte da superfície se mantém inalterada.



Figura 34: Superfícies de fratura em corpo de prova com envelhecimento durante 150 dias.

Ao comparar o ponto correspondente a 150 dias (3600 horas) com o de 40 dias (960 horas) nas curvas de ganho de massa (Figuras 21 e 22) durante envelhecimento nota-se que, no período entre 40 a 150 dias, o ganho de massa foi de 0,96 g no corpo de prova totalmente imerso e 0,54 g no corpo de prova parcialmente imerso. Durante o envelhecimento, houve um aumento considerável na região da superfície de fratura afetada pela presença de umidade. Isso mostra que parte considerável da umidade foi absorvida pela camada adesiva ao longo deste período.

O padrão das superfícies de fratura nos diferentes tempos de envelhecimento mostra que a umidade penetra na interface a partir das bordas em direção ao centro da amostra. A coloração branca apresentada em áreas da superfície de fratura afetadas pela umidade sugere que houve deposição de sal na interface durante esse período. Um maior período de envelhecimento aumenta a região afetada.

4.4 Análise dos Resultados

Para se obter maior compreensão dos efeitos do envelhecimento na performance da adesão, as cargas de arrancamento foram relacionadas com as superfícies de fratura. Foram analisadas juntas submetidas a envelhecimento durante 150 dias, pois estas apresentaram influência significativa da umidade na interface adesiva. A Figura 35

mostra a comparação do gráfico carga-deslocamento com a superfície do substrato flexível de um corpo de prova parcialmente envelhecido.

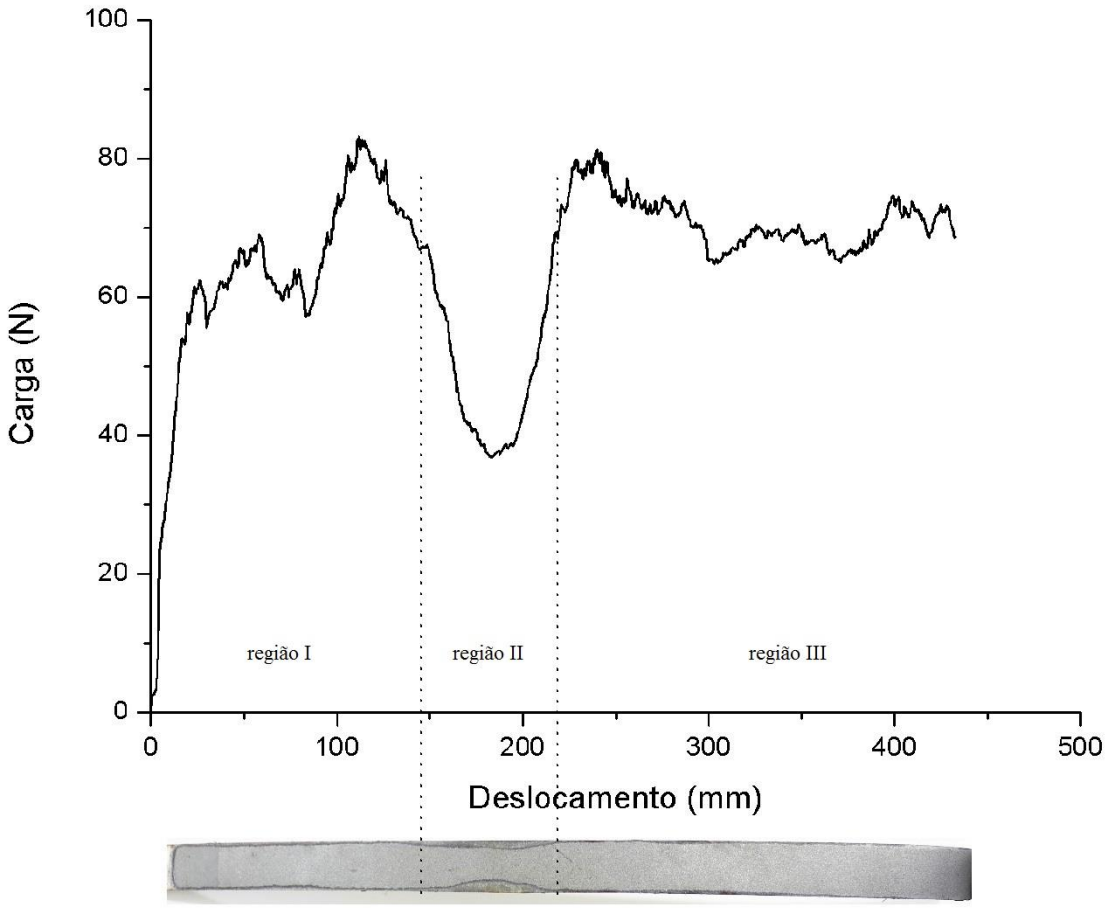


Figura 35: Curva carga-deslocamento de um corpo de prova parcialmente envelhecido durante 150 dias e sua respectiva superfície de fratura do substrato flexível.

Por inspeção visual, pode-se identificar três diferentes regiões ao longo da curva: I, II e III. As regiões I e II correspondem as partes que foram submetidas ao envelhecimento em água salgada enquanto a região III permaneceu fora d'água. A penetração da umidade na superfície de fratura é pequena e razoavelmente uniforme na região I, que corresponde a uma carga média de arrancamento de 62,6±12,1 N (entre 25 e 145 mm de deslocamento). Este valor é próximo ao encontrado pela média das cargas de arrancamento nos corpos de prova envelhecidos durante 150 dias (Tabela 3). Na região II é verificado um aumento considerável na penetração da umidade, que é acompanhado de uma queda acentuada na carga de arrancamento até o valor mínimo de

36,8 N. A região III corresponde a parte do corpo de prova que não sofreu envelhecimento. Esta região apresenta carga média de 71,1±3,8 N (de 220 mm até o final do deslocamento). Este valor é próximo ao obtido pela média das cargas de arrancamento nos corpos de prova sem envelhecimento (Tabela 2).

Comparando-se as médias das regiões I e III, percebe-se que houve redução de 12% na carga de arrancamento em consequência do envelhecimento. Esta porcentagem é proporcional ao percentual da largura da superfície de fratura atingida pela umidade ao longo da região I. Além disso, o valor mínimo da carga de arrancamento encontrado na região II é cerca de 48% menor que a média da região não envelhecida, que é um valor próximo do percentual de penetração máximo da umidade na largura da superfície de fratura, verificado por análise visual na região II. Isso evidencia a relação direta entre a área afetada e a redução da aderência.

Capítulo 5

Conclusão

Ensaios de arrancamento foram realizados em corpos de prova com o objetivo de verificar o efeito da degradação causado pela água salgada na adesão em juntas coladas híbridas compósito-aço. Uma adaptação da norma ASTM para testes de arrancamento com substrato metálico foi utilizada. Conclusões foram obtidas a partir das análises das curvas carga-deslocamento obtidas nos ensaios e da inspeção visual das superfícies de fraturas.

Não há efeito significativo da umidade na adesão das juntas após 40 dias de exposição à água salgada. Os resultados das juntas apresentaram falha coesiva, mesmo resultado observado nos corpos de prova sem envelhecimento. Neste período, a absorção de umidade pela interface adesiva é mínima.

Entre 40 e 150 dias de envelhecimento ocorre ganho considerável de umidade na interface. Um período de exposição similar ou superior a 150 dias é recomendado para se obter resultados significativos.

A penetração da umidade na interface adesiva ocorre sempre a partir das bordas em direção ao centro da interface, apresentando um padrão irregular característico da heterogeneidade do material. Um maior tempo de envelhecimento das amostras produz uma maior área da superfície afetada pela umidade.

Regiões da superfície de fratura mais afetadas pela umidade produzem uma menor resistência ao arrancamento. Esta relação mostrou certa proporcionalidade.

Amostras parcialmente imersas em água salgada foram utilizadas com sucesso para análise comparativa do efeito de envelhecimento em um mesmo corpo de prova. No entanto, é necessário maior estudo dos parâmetros de ensaios de arrancamento em corpos de prova de 500 mm para garantir a utilização adequada deste método.

Estudos devem ser realizados para se avaliar os parâmetros geométricos dos ensaios de arrancamento em corpos de prova de 500 mm. A simulação numérica do efeito do envelhecimento em juntas compósito-metal pode revelar informações valiosas.

A necessidade de maiores estudos dos efeitos do envelhecimento no compósito também se mostra importante para garantir a integridade estrutural da junta colada.

Referências Bibliográficas

[1] CALLISTER JR., W. D.; RETHWISCH, D. G.: *Materials Science and Engineering - an Introduction*, 8 ed., United States of America, Wiley, 2009.

[2] DE FREITAS, S. T.; SINKE, J.: "Failure analysis of adhesively-bonded skin-to-stiffener joints: Metal–metal vs. composite-metal". Engineering Failure Analysis, 56:2-13, 2015.

[3] BANEA, M. D.; DA SILVA, L. F. M.: "Adhesively bonded joints in composite materials - An Overview". Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers Part L: Journal of Materials: Design and Applications, 223(1):1-18, 2009.

[4] ARENAS, J. M.; ALÍA, C.; NARBÓN, J. J.; OCAÑA, R.; GONZÁLEZ C.: "Considerations for the industrial application of structural adhesive joints in the aluminium-composite material bonding". Composites Part B: Engineering, 44, 417-423, 2013.

[5] RUDAWSKA A.: "Adhesive joint strength of hybrid assemblies: Titanium sheet-composites and aluminium sheet-composites - Experimental and numerical verification". International Journal of Adhesion and Adhesives, 30, 574-582, 2010.

[6] HESHMATI, M.; HAGHANI, R.; AL-EMRANI, M.: "Effects of moisture on the long-term performance of adhesively bonded FRP/steel joints used in bridges". Composites Part B: Engineering, 92:447-62, 2016.

[7] BOER, P.; HOLLIDAY, L.; KANG, T. H. K.: "Interaction of environmental factors on fiber reinforced polymer composites and their inspection and maintenance: a review". Construction and Building Materials, 50:209-218, 2014.

[8] KARBHARI, V. M.: *Rehabilitation of metallic civil infrastructure using fiber reinforced polymer (FRP) composites: a materials and systems overview at the adhesive bond level*, England, Woodhead Publishing, 2014.

[9] BOER, P.; HOLLIDAY, L. KANG, T. H-K.: "Independent environmental effects on durability of fiber reinforced polymer wraps in civil applications: a review". Construction and Building Materials, 48:360-370, 2013.

[10] KARBHARI, V. M.: *Durability of composites for civil structural applications*, England, Woodhead Publishing, 2007.

[11] KARBHARI, V. M.; CHIN, J. W.; HUNSTON, D.; BENMOKRANE, B.; JUSKA, T.; MORGAN, R.; LESKO, J. J.; SORATHIA, U.; REYNAUD, D.: "Durability Gap analysis for fiber-reinforced polymer composites in civil infrastructure". Journal of Composites for Construction, 7:238:247, 2003.

[12] DE BARROS, S.; BANEA, 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, 93:147-158, 2016.

[13] ROHEM, N. R. F.; PACHECO, L. J.; BUDHE, S.; BANEA, M. D.; SAMPAIO, E. M.; DE BARROS, S.: "Development and qualification of a new polymeric matrix laminated composite for pipe repair". Composite Structures, 152:737-745, 2016.

[14] 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.

[15] MENICONI, L. C. M.; PORCIÚNCULA, I. N.; MCGEORGE, D.; PEDERSEN, A.: "Structural Repair at a Production Platform by Means of a Composite Material

Patch". Offshore Technology Conference, OTC 20657, Houston, Texas, USA, 3-6 May 2010.

[16] MCGEORGE D.; ECHTERMEYER, A. T.; LEONG, K. H.; MELVE, B.; ROBINSON, M.; FISCHER, K. P.: "Repair of floating offshore units using bonded fibre composite materials". Elsevier, Composites: Part A, 40:1364-1380, 2009.

[17] FERNANDES, R. L.; DE MOURA, M.; MOREIRA, R. D. F.: "Effect of moisture on puremode I and II fracture behaviour of composite bonded joints". International Journal of Adhesion and Adhesives, 68:30-38, 2016.

[18] OWENS, J.; LEE-SULLIVAN, P.: "Stiffness behaviour due to fracture in adhesively bonded composite-to-aluminum joints II. Experimental". International Journal of Adhesion and Adhesives, 20(1):47-58, 2000.

[19] HALLIDAY, S. T.; BANKS, W. M.; PETRICK, R. A.: "Influence of humidity on the durability of adhesively bonded aluminium composite structures". Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part L: Journal of Materials: Design and Applications, 213, p.27-35, 1999.

[20] HESHMATI, M.; HAGHANI, R.; AL-EMRANI, M.: "Effects of moisture on the long-term performance of adhesively bonded FRP/steel joints used in bridges". Composites Part B, 92, p. 447-462, 2016.

[21] PAPANICOLAOU, G. C.; CHARITIDIS, P.; MOUZAKIS, D. E.; KARACHALIOS, E.; JIGA, G.; PORTAN, D. V.: "Experimental and numerical investigation of balanced Boron/Epoxy single lap joints subjected to salt spray aging". International Journal of Adhesion and Adhesives, 68, p. 9–18, 2016.

[22] LIU, S. F.; CHENG, X. Q.; ZHANG, Q.; ZHANG, J.; BAO, J. W.; GUO, X.: "An investigation of hygrothermal effects on adhesive materials and double lap shear joints of CFRP composite laminates". Composites Part B: Engineering, 91:431-440, 2016.

[23] HAN, X.; CROCOMBE, A. D.; ANWAR, S. N. R.; HU, P.: “The strength prediction of adhesive single lap joints exposed to long term loading in a hostile environment”. International Journal of Adhesion and Adhesives, 55:1-11, 2014.

[24] ZHANG, F.; WANG, H. P.; HICKS, C.; YANG, X.; CARLSON, B. E.; ZHOU, Q.: “Experimental study of initial strengths and hygrothermal degradation of adhesive joints between thin aluminum and steel substrates”. International Journal of Adhesion and Adhesives, 43:14-25, 2013.

[25] NGUYEN, T.; BAI, Y.; ZHAO, X.; AL-MAHAIDI, R.: “Durability of steel/CFRP double strap joints exposed to sea water, cyclic temperature and humidity”. Composite Structures, 94, p. 1834-1845, 2012.

[26] MUKHOPADHYAYAU, P.; SWAMY, R. N.; LYNSDALE, C. J.: “Influence of aggressive exposure conditions on the behavior of adhesive bonded concrete GFRP joints”. Construction and Building Materials, 12, p. 427-446, 1998.

[27] KAWASHITA, L. F.; KINLOCH, A. J.; MOORE, D. R.; WILLIAMS, J. G.: “A critical investigation of the use of a mandrel peel method for the determination of adhesive fracture toughness of metal-polymer laminates”. Engineering Fracture Mechanics, 73:2304-2323, 2006.

[28] KAWASHITA, L. F.; MOORE, D. R.; WILLIAMS, J. G.: “Comparison of Peel Tests for Metal–Polymer Laminates for Aerospace Applications”. The Journal of Adhesion, 81:561-586, 2005.

[29] SARGENT, J. P.: “Durability studies for aerospace applications using peel and wedge tests”. International Journal of Adhesion and Adhesives, 25:247-256, 2005.

[30] KAWASHITA, L. F.; MOORE, D. R.; WILLIAMS, J. G.: “The development of a mandrel peel test for the measurement of adhesive fracture toughness of epoxy–metal laminates”. The Journal of Adhesives, 80:147-167, 2004.

[31] HART-SMITH, L.J.: “A peel-type durability test coupon to assess interfaces in bonded, cobonded, and co-cured composite structures”. International Journal of Adhesion and Adhesives, 19:181-191, 1999.

[32] WEI, Y.; HUTCHINSON, J.: “Interface strength, work of adhesion and plasticity in the peel test”. International Journal of Fracture, 93(1–4):315–333, 1998.

[33] KIM, J.; KIM, K. S.; KIM, Y. H.: “Mechanical effects in peel adhesion test”. Journal of Adhesion Science and Technology, 3(1):175–187, 1989.

[34] CROCOMBE, A. D.; ADAMS, R. D.: “An Elasto-Plastic Investigation of the Peel Test”. The Journal of Adhesion, 13:3–4, 241–267, 1982.

[35] ASTM D 3167: “Standard Test Method for Floating Roller Peel Resistance of Adhesives”.

[36] DE FREITAS, S.; SINKE, J.: “Adhesion Properties of Bonded Composite-to-Aluminium Joints Using Peel Tests”. The Journal of Adhesion, 90:5-6, 511-525, 2014.

[37] DE FREITAS, S. T.; SINKE, J.: “Test method to assess interface adhesion in composite bonding”. Applied Adhesion Science, 3:9, 2015.

[38] DE BARROS, S.; TEIXEIRA DE FREITAS, S.; BANEA, M. D.; BUDHE, S.; AROUCHE, M. M.; DOS SANTOS, B. L.: “Adhesion Quality of Steel-CFRP Interface Bonding”. 3rd Brazilian Conference of Composite Materials, Gramado/RS, Brazil, 2016.

[39] MARINUCCI, G.: *Materiais Compósitos Poliméricos*, São Paulo, Artliber, 2011.

[40] DE MOURA, M. S. F. S.; DE MORAIS, A. B.; DE MAGALHÃES, A. G.: *Materiais Compósitos – Materiais, Fabrico e Comportamento Mecânico*, 2 ed, Porto, Publindústria, 2011.

[41] HIBBELER, R. C.: *Resistência dos Materiais*, 7ed, São Paulo, Pearson, 2010.

[42] DA SILVA, L. F. M.; MAGALHÃES, A. G.; MOURA, M. F. S. F.: *Juntas Adesivas Estruturais*, Porto, Publindústria, 2007.

[43] GOLDSCHIMIDT, A.; STREITBEGER, H.: *BASF Handbook on Basics of Coating Technology*, 2ed, Hannover, Vincentz, 2007.

[44] FRANTZIS, P.: "Environmental Attack on Adhesive Joints. Part III: Mechanisms of Failure". JSME International Journal, Series A, 41(3), 405-415, 1998.

[45] GENTIL, V.: *Corrosão*, 6ed, Rio de Janeiro, LTC, 2011.

APÊNDICE A - Ensaios em Juntas CFRP-CFRP

Neste Apêndice é mostrado o estudo feito em corpos de prova na configuração CFRP-CFRP. O objetivo é avaliar a adesão interlaminar no compósito submetido ao envelhecimento. Este estudo é realizado por meio de ensaios de arrancamento e envelhecimento em água salgada, métodos semelhantes aos utilizados para análise da junta CFRP-aço neste trabalho.

Foram utilizados seis corpos de prova para ensaio de arrancamento na configuração CFRP-CFRP, como mostra a Figura A.1. Essas amostras foram fabricadas com materiais e procedimentos semelhantes aos usados na fabricação dos substratos compósitos utilizados na análise da junta CFRP-aço. As medidas são de 250 mm de comprimento em ambos os substratos e 25 mm de largura.

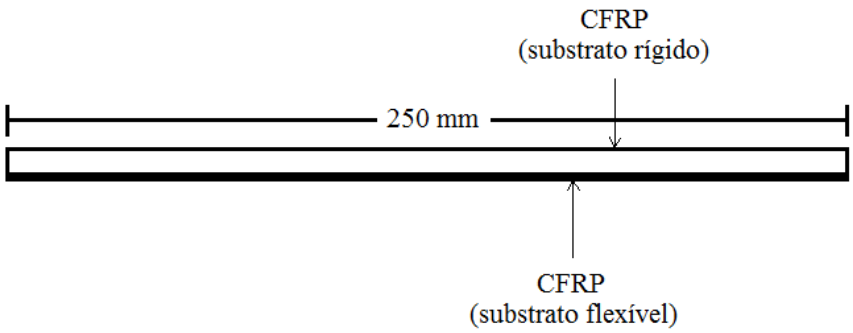


Figura A.1: Configuração dos corpos de prova CFRP-CFRP.

Três corpos de prova CFRP-CFRP foram colocados no tanque com água salgada, mesmo processo de envelhecimento utilizado na análise das juntas CFRP-aço. O envelhecimento dos corpos de prova foi acompanhado por medições do peso, de forma a se analisar a absorção de umidade da amostra ao longo do tempo. As amostras ficaram imersas durante 60 dias. A Figura A.2 mostra a curva de absorção de umidade de um corpo de prova CFRP-CFRP durante o tempo de envelhecimento em água salgada.

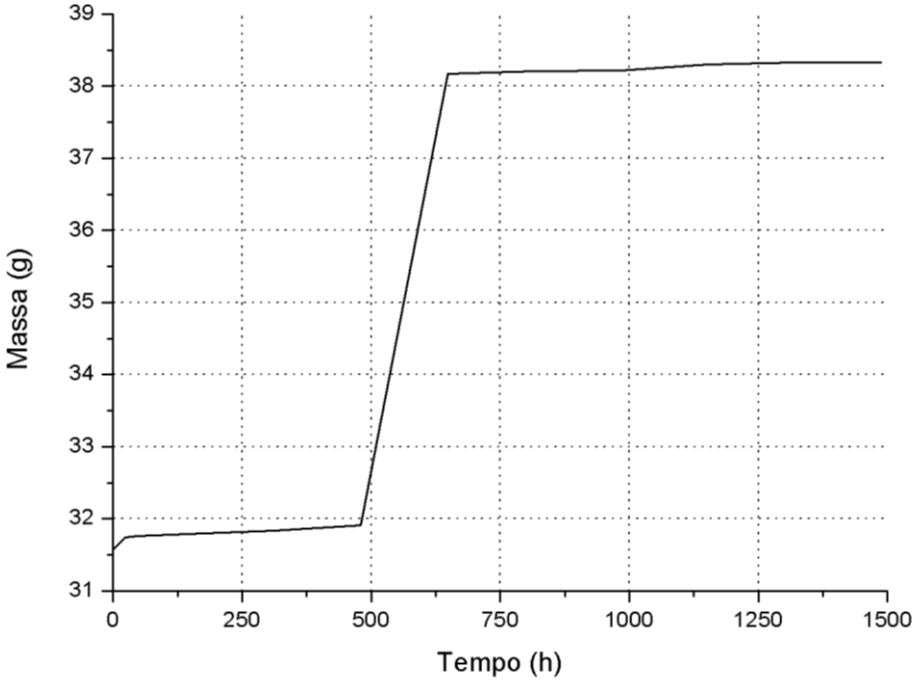


Figura A.2: Curva de ganho de massa de um corpo de prova CFRP-CFRP.

Pode-se observar um ganho de aproximadamente 21,4% (ou 6,76 g) de massa nos corpos de prova CFRP-CFRP após 60 dias de imersão em água salgada. A maior parte do crescimento foi notado no intervalo de medição entre 480 e 648 horas (20 e 27 dias).

Os resultados dos ensaios de arrancamento nos corpos de prova CFRP-CFRP (C-c) sem envelhecimento e após 60 dias são mostrados nas Figuras A.3 e A.4, respectivamente.

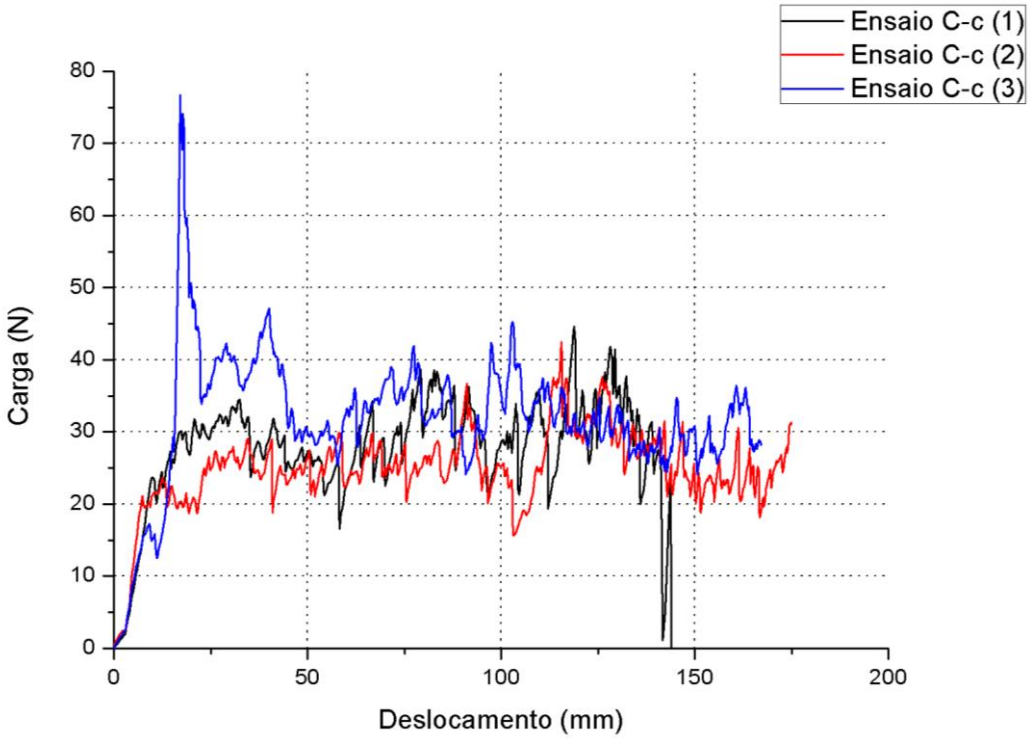


Figura A.3: Resultado dos ensaios de arrancamento nas juntas CFRP-CFRP sem envelhecimento.

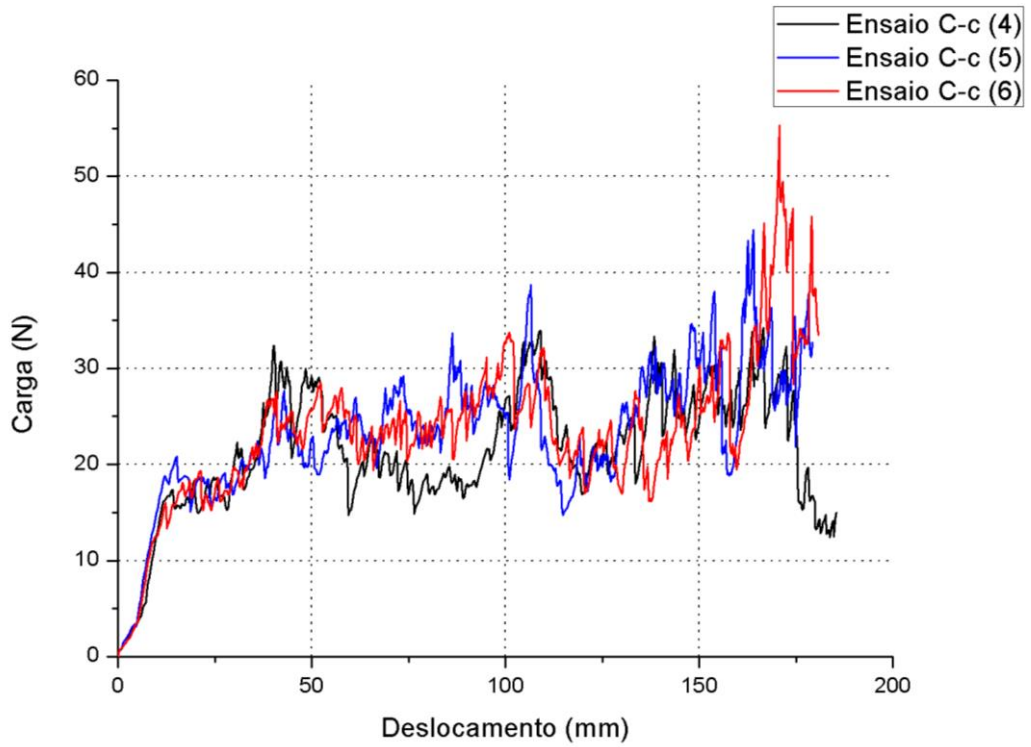


Figura A.4: Resultado dos ensaios de arrancamento nas juntas CFRP-CFRP com envelhecimento durante 60 dias.

Para visualizar os resultados dos ensaios com maior clareza, foram determinadas as cargas de arrancamento média ($F_{méd}$) ao longo de 125 mm de comprimento para ambas configurações, descartando-se os primeiros 25 mm para acomodação do corpo de prova e início de aplicação da carga. Os valores são apresentados na Tabela A.1, como a média e desvio padrão dos três ensaios realizados em cada condição.

Tabela A.1: Cargas de arrancamento média nos ensaios CFRP-CFRP.

Corpo de Prova	**$F_{méd}$ (N)**
sem envelhecimento	29,9±4,1
60 dias	23,2±0,9

Foi observada uma redução de 22,4% (6,7 N) na carga média de arrancamento após a junta compósita ser submetida a envelhecimento durante 60 dias. Este valor mostra a perda de adesão entre as camadas do compósito. Ao comparar os valores obtidos nos corpos de prova sem envelhecimento com os resultados das juntas CFRP-aço (Tabela 2), tem-se valores de carga de arrancamento inferiores para o compósito.

A Figura A.5 mostra as superfícies de fratura dos substratos em um corpo de prova CFRP-CFRP após ensaio de arrancamento. Quando usados testes de arrancamento nos substratos compósitos, aparece um novo tipo de falha: a falha interlaminar. Este tipo de falha indica uma boa adesão entre as camadas do laminado e mostra que a força intralaminar do substrato compósito é menor que a força de coesão na resina de laminação.

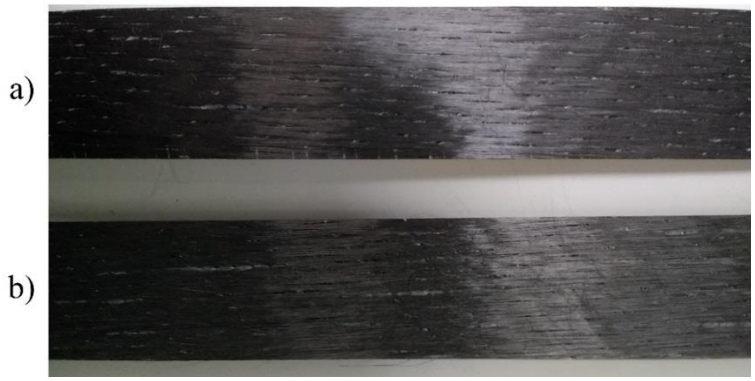


Figura A.5: Superfícies de fratura em corpo de prova CFRP-CFRP no substrato: a) rígido; b) flexível.

Esses resultados mostram que a adesão interlaminar é mais afetada pelo processo de envelhecimento do que a adesão na interface entre compósito e substrato metálico estudada nesse trabalho. A maior redução na carga de arrancamento obtida nas juntas CFRP-Aço foi de 7,5%, para os corpos de prova parcialmente imersos após 150 dias de envelhecimento (Tabela 4) em relação ao valor obtido pela amostra sem envelhecimento (Tabela 2) na mesma região. Enquanto que no compósito a redução foi de 22,4% já nos 60 primeiros dias e envelhecimento. Isso aponta para a necessidade de se aprofundar os estudos dos efeitos do envelhecimento no compósito, sendo que, dependendo das condições de aplicação, a integridade do substrato compósito pode ser mais importante do que a da interface colada.