

NATÁLIA DE OLIVEIRA E CUNHA

Avaliação dos parâmetros de influência no deslocamento de compósitos aeronáuticos

Natália de Oliveira e Cunha

Avaliação dos parâmetros de influência no deslocamento de compósitos aeronáuticos

Trabalho de Graduação apresentado ao Conselho de Curso de Graduação em Engenharia de Materiais da Faculdade de Engenharia do Campus de Guaratinguetá, Universidade Estadual Paulista, como parte dos requisitos para obtenção do diploma de Graduação em Engenharia de Materiais.

Orientador: Prof. Dr. Edson Cocchieri Botelho

Guaratinguetá - SP
2019

C972a	Cunha, Natália de Oliveira e Avaliação dos parâmetros de influência no deslocamento de compósitos aeronáuticos / Natália de Oliveira e Cunha – Guaratinguetá, 2019. 57 f. : il. Bibliografia: f. 55-57 Trabalho de Graduação em Engenharia de Materiais – Universidade Estadual Paulista, Faculdade de Engenharia de Guaratinguetá, 2019. Orientador: Prof. Dr. Edson Cocchieri Botelho 1. Materiais compostos. 2. Resinas compostas. 3. Corrosão. I.Título.
-------	----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------

CDU 620.1


Luciana Máximo

Bibliotecária CRB-8/3595


NATÁLIA DE OLIVEIRA E CUNHA

ESTE TRABALHO DE GRADUAÇÃO FOI JULGADO ADEQUADO COMO
PARTE DO REQUISITO PARA A OBTENÇÃO DO DIPLOMA DE
"GRADUADO EM ENGENHARIA DE MATERIAIS"

APROVADO EM SUA FORMA FINAL PELO CONSELHO DE CURSO DE
GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE MATERIAIS


Prof. Dr. Miguel Ángel Ramírez Gil
Coordenador

BANCA EXAMINADORA:


Prof. Dr. Edson Coechieri Botelho
Orientador/UNESP-FEG


Me. Juliana Bovi de Oliveira
UNESP-FEG


Me. Luis Felipe de Paula Santos
UNESP-FEG

DADOS CURRICULARES

NATÁLIA DE OLIVEIRA E CUNHA

NASCIMENTO 10.11.1994 – Jacareí / SP

FILIAÇÃO Emerson Luiz da Cunha
Angelita Maria Cintra de Oliveira e Cunha

2014/2019 Curso de Graduação em Engenharia de Materiais
Faculdade de Engenharia do Campus de Guaratinguetá (UNESP-FEG)

dedico este trabalho à minha família, que sempre acreditou em mim e sempre foi meu refúgio.

AGRADECIMENTOS

Em primeiro lugar agradeço a Deus, por ter me capacitado e me dado forças pra finalizar essa etapa tão importante. Aos meus pais, Emerson e Angelita, e ao meu irmão Rodrigo, que são pessoas essenciais e a base de tudo que tenho e sou. Devo a eles todo o sucesso da caminhada até agora e sou imensamente grata por todo apoio, compreensão e amor durante essa fase.

Ao meu orientador, *Prof. Dr. Edson Cocchieri Botelho* que jamais deixou de me incentivar e acreditar no meu potencial. Sem a sua orientação, dedicação e conselhos, a finalização deste trabalho seria, com certeza, mais penosa;

Aos meus amigos de curso e pelo companheirismo, pelos dias e noites de estudo, por terem marcado essa jornada e terem deixado esse processo mais leve e divertido.

Aos meus colegas de trabalho pela convivência, conselhos e por sempre estarem dispostos a me ajudar e sanar dúvidas referentes à área de pintura de compósitos aeronáuticos.

Aos professores que foram peças fundamentais nessa caminhada universitária, por transmitirem conhecimento e ensinamentos essenciais à vida profissional e acadêmica.

“Todas as vitórias ocultam uma renúncia”
Simone de Beauvoir

RESUMO

A crescente utilização de compósitos estruturais na indústria aeronáutica coloca em evidência a necessidade de estudar e analisar as variáveis relacionadas a seu uso. A pintura de compósitos, além de contribuir esteticamente, possui funções relacionadas à resistência à corrosão, à resistência ao desgaste da estrutura e resistência à agressividade do ambiente externo. No entanto, o fenômeno de deslocamento pode ocorrer em algumas peças, prejudicando o desempenho estrutural e colocando em risco a integridade do componente. Dessa forma, este trabalho tem a finalidade de avaliar os parâmetros de influência no fenômeno de deslocamento de compósitos aeronáuticos, por meio de parâmetros como a rugosidade, o condicionamento higrotérmico, o teste de aderência e espessura de camada. Para o desenvolvimento deste trabalho, configuraram-se esquemas de pintura para estudar a influência da adesão mecânica na delaminação em compósitos aeronáuticos. As amostras foram submetidas a testes de condicionamento ambiental, bem como testes de aderência pré e pós-condicionamento. A partir dos dados coletados dos ensaios realizados, é possível concluir que a rugosidade, temperatura e umidade são fatores fundamentais na adesão entre compósito-revestimento, em concordância com trabalhos disponíveis em literatura científica, e que os parâmetros de processo que foram estabelecidos, mesmo com uma pequena variação, foram julgados efetivos contra o fenômeno de deslocamento.

PALAVRAS-CHAVE: Deslocamento. Compósito. Pintura. Adesão. Rugosidade. Umidade.

ABSTRACT

The increasing use of structural composites in the aeronautics industry highlights the need to study and analyze the variables related to their use. Composite painting, besides contributing aesthetically, has functions related to corrosion resistance, wear resistance of the structure and resistance to aggressiveness of the external environment. However, the phenomenon of peeling off may occur in some parts, damaging structural performance and component integrity. This work aims to evaluate the parameters of influence on the peeling off of aeronautical composites through parameters such as roughness, hygrothermal conditioning, adhesion test and layer thickness. To develop this work, painting schemes were configured to study the influence of mechanical adhesion on delamination in aeronautical composites, the samples were submitted to environmental conditioning tests, as well as pre and post-conditioning adhesion tests. From the data collected from the tests performed, it is possible to conclude that roughness, temperature and humidity are fundamental factors in the bonding between composite-coating, as shown in the literature and that the process parameters that were established, even with a slight variation, were effective against the phenomenon of peeling off.

KEYWORDS: Peeling off. Composite. Painting. Adhesion. Roughness. Humidity.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 – Comparação entre aeronaves da Boeing, Airbus e Embraer na utilização de materiais diversos	14
Figura 2 – Utilização de materiais em um Boeing 787	14
Figura 3 – Esquema dos três grupos de classificação dos compósitos	16
Figura 4 – Defeitos de superfície comuns em compósitos: (a) encolhimento da resina e (b) porosidade	20
Figura 5 – Geometria de interações de superfícies entre um revestimento e um substrato: (A) uma interface suave entre revestimento e substrato; (B) superfície áspera em escala microscópica; (C) superfície rugosa com penetração incompleta do revestimento	22
Figura 6 – Ângulo de contato entre líquido e a superfície do substrato.....	24
Figura 7 – (a) incisão do padrão sobre a superfície e (b) fita adesiva sobre o padrão desenhado.....	25
Figura 8 – Gabarito comparativo de resultados do teste de adesão	25
Figura 9 – Fluxograma das etapas práticas.....	27
Figura 10 – Compósito de fibra de carbono e resina epóxi usado na carenagem asa-fuselagem	28
Figura 11 – Corpos de prova preparados com configuração do padrão A	29
Figura 12 – Corpos de prova preparados com configuração do padrão B	30
Figura 13 – Corpos de prova preparados com configuração do padrão C.....	30
Figura 14 – Corpos de prova pintados	31
Figura 15 – Sequência de preparação das amostras: a) corte dos corpos de prova; b) embutimento das amostras; c) amostras prontas para metalografia	32
Figura 16 – Imagem da amostra B com primer	33
Figura 17 – Esquemas de preparação para Teste de Aderência a seco de acordo com a MEP 10-068	34
Figura 18 – Retas paralelas com uma polegada de distância para Teste de Aderência.....	34
Figura 19 – Reta diagonal fazendo ângulo de 45 graus com retas paralelas.....	35
Figura 20 – Retas para Teste de Adesão.....	35
Figura 21 – Corpo de prova com fita preparado para Teste de Adesão	36
Figura 22 – Câmara climática Marconi MA 835/UR.....	37
Figura 23 – Corpos de prova no interior câmara climática Marconi MA 835/UR.....	37
Figura 24 – Corpos de prova que sofreu maior retirada de revestimento	40

Figura 25 – Ganho de massa das amostras A em função do tempo (dias)	42
Figura 26 – Ganho de Massa da Amostra B em função do tempo (dias).....	43
Figura 27 – Ganho de Massa da Amostra C em função do tempos (dias).	43
Figura 28 – Ganho de Massa das Amostras em função do tempos (dias).....	44
Figura 29 – Amostra com início de deslocamento após 1 semana de condicionamento	45
Figura 30 – Corpos de prova após 8 semanas de condicionamento ambiental	45
Figura 31 – Corpo de prova A com Primer pós condicionamento e pós teste de aderência a seco.....	47
Figura 32 – Corpo de prova A com Massa pós condicionamento e pós teste de aderência a seco	47
Figura 33 – Corpo de prova B com Primer pós condicionamento e pós teste de aderência a seco	48
Figura 34 – Corpo de prova B com Massa pós condicionamento e pós teste de aderência a seco	48
Figura 35 – Corpo de prova C com Primer pós condicionamento e pós teste de aderência a seco	49
Figura 36 – Corpo de prova C com Massa pós condicionamento e pós teste de aderência a seco	49
Figura 37 – Medida da camada da amostra com massa	50
Figura 38 – Medida da camada da amostra com primer	51

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Principais constituintes da tinta e suas funções	18
Tabela 2 – Esquemas de pintura para corpos de prova	29
Tabela 3 – Esquema de pintura para corpos de prova.....	29
Tabela 4 – Massa dos corpos de prova antes de serem colocados na estufa	36
Tabela 5 – Massa dos corpos de prova após serem colocadas na estufa.....	38
Tabela 6 – Massa dos corpos de prova após as 8 semanas de condicionamento.....	38
Tabela 7 – Porcentagem de umidade por semana	41

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	13
1.1	COMPÓSITOS.....	15
1.2	TINTAS E REVESTIMENTOS EM GERAL.....	17
1.3	ADESÃO.....	21
1.4	CONDICIONAMENTO HIGROTÉRMICO.....	26
2	MATERIAIS E MÉTODOS	27
3	RESULTADOS E DISCUSSÕES	39
3.1	TESTE DE ADERÊNCIA A SECO PRÉ-CONDICIONAMENTO	39
3.2	CONDICIONAMENTO HIGROTÉRMICO.....	40
3.3	TESTE DE ADERÊNCIA A SECO PÓS-CONDICIONAMENTO	46
3.4	ESPESSURA DE CAMADA.....	50
4	CONCLUSÃO	52
	REFERÊNCIAS	53

1 INTRODUÇÃO

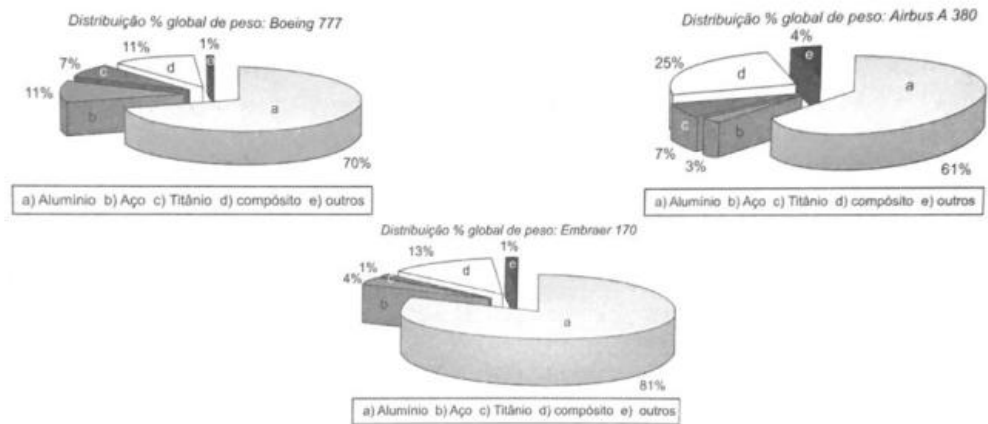
A evolução e conquista tecnológicas trilham caminhos paralelos ao desenvolvimento de novos materiais, especialmente com o advento dos materiais compósitos estruturais. Com destaque à aplicação na área aeronáutica, os compósitos revolucionaram as propriedades estruturais improváveis aos materiais metálicos e, a partir da década de 60, foram incorporados nessa indústria promissora. Isto é, criaram-se novas possibilidades para projetos de alto desempenho, assim como requeridos pela engenharia (REZENDE; BOTELHO, 2000).

As investigações acerca dos materiais compósitos são justificadas, basicamente, pelas propriedades e pelas combinações possíveis em um único material, uma vez que os materiais poliméricos, cerâmicos e/ou metálicos não são designados para uso isolado estruturalmente, devido ao baixo desempenho estrutural em um ou mais aspectos que os compõem (LEVY NETO, 2006). Além disso, corroborando o fato citado, os metais perdem a resistência a altas temperaturas; os polímeros suportam, geralmente, baixas temperaturas; as cerâmicas superam os metais e os polímeros em relação à habilidade de suportar altas temperaturas e propriedade de expansão térmica, porém, devido à sua fragilidade não são empregados estruturalmente (NAYAK, 2014).

Desta forma, a utilização de compósitos na aviação tem crescido e evidencia extrapolar a porcentagem de uso em relação aos materiais tradicionais, principalmente os metálicos. A era do uso de monomateriais é algo que tende a ser encoberto e alcançado pela era dos materiais multiconstituídos e multifuncionais.

As vantagens do uso de compósitos são significativas, de forma que as desvantagens são atenuadas num contexto geral. Além disso, os programas aeroespaciais utilizam em larga escala esse material, visto que a substituição do alumínio por compósitos poliméricos estruturais apresentam vantagens financeiras, pela redução de 25% do custo final das peças, bem como a redução de peso que varia de 20 a 30% (REZENDE; BOTELHO, 2011). De maneira geral, pode-se ilustrar essa substituição de forma mais lúdica, por meio da Figura 1, a qual mostra a porcentagem dos materiais usados na manufatura de diversas aeronaves.

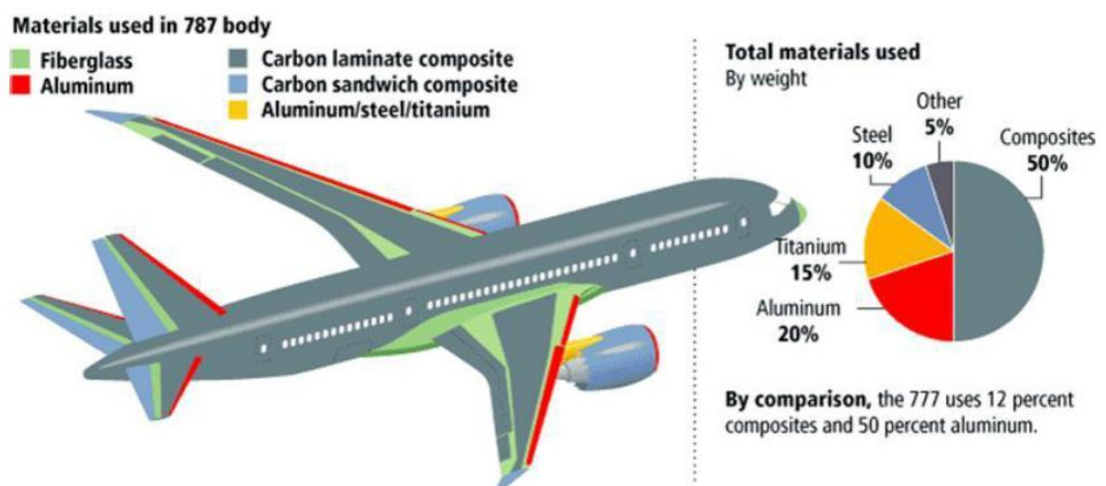
Figura 1 – Comparação entre aeronaves da Boeing, Airbus e Embraer na de utilização de materiais diversos.



Fonte: Rezende; Botelho (2011).

Certamente, os compósitos estruturais de alta resistência passaram por um processo tecnológico que possibilitou aumentar ainda mais o percentual de uso em relação aos materiais tradicionais, neste caso, os materiais metálicos. Um exemplo clássico é a aeronave Boeing 787, a qual é manufaturada com cerca de 50% de compósitos, contra 45% de materiais metálicos e 5% de outros materiais não especificados.

Figura 2 – Utilização de materiais em um Boeing 787.



Fonte: Composite Materials in Aerospace Applications (2008).

Esse fato se aplica também à indústria aeronáutica brasileira, cuja evolução no uso de compósitos estruturais é evidente, se a porcentagem de utilização em uma aeronave Tucano for comparada à usada em uma aeronave EMB 145.

A circunstância, que justifica com mais solidez o uso em larga escala de materiais compósitos, é fundamentada no desenvolvimento de diversos programas espaciais, militares, transporte aeronáuticos (de pequeno e grande porte), helicópteros, satélites e mísseis.

Além disso, a vantagem de se projetar materiais compósitos é obter propriedades sinérgicas considerando dois ou mais materiais constituintes, como por exemplo: resistência, rigidez, expansão térmica, resistência à fadiga, peso etc. Neste conceito, é possível, inclusive, comparar o desempenho de outros materiais a partir das mesmas propriedades. Obviamente, deve-se criar um material com o intuito de atender às solicitações de desempenho à que é submetido (JONES, 1999).

1.1 COMPÓSITOS

Os materiais compósitos consistem de dois ou mais materiais combinados macroscopicamente, a partir da junção sinérgica de duas fases física e mecanicamente distintas com o intuito de formar um terceiro material. Esses dois componentes podem ser associados de uma forma controlada a fim de conseguir propriedades ideais a este terceiro material, o qual apresenta características superiores aos seus componentes de forma isolada (LEVY NETO, 2006; LI, 2000).

Esses constituintes principais são: um material base, denominado matriz, e um reforço. Entre estes existe uma interface que promove elevada adesão (CUPERTINO, 2009).

A matriz é conhecida como fase contínua, responsável por envolver e proteger a superfície das fibras da abrasão mecânica, proteger o reforço do contato com o ambiente externo (meios corrosivos e ácidos). Também é sua função transferir os esforços mecânicos recebidos ao reforço (CUPERTINO, 2009; GALLI, 2016; SCHWARTZ, 1996).

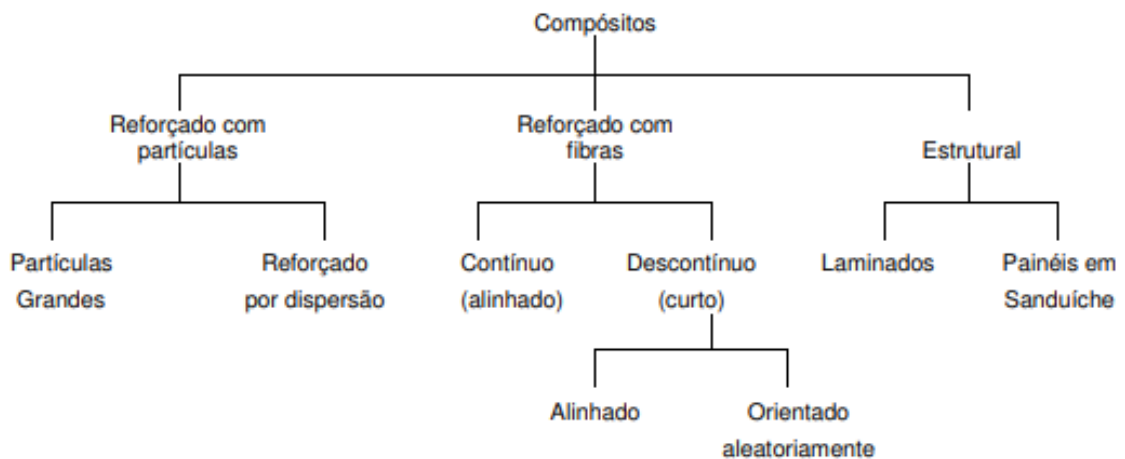
Os compósitos podem apresentar matrizes metálicas, cerâmicas e, sendo as mais comuns e versáteis, as poliméricas. O motivo pelo qual as resinas poliméricas são as mais utilizadas na indústria aeronáutica é validado pela alta rigidez e resistência, resistência à fluência, resistência química e boa adesão a muitos substratos, além da estabilidade térmica, devido à densidade de ligações cruzadas no processo de cura. (GONÇALEZ; BARCIA; SOARES, 2006).

Ainda que a matriz epóxi seja mais tradicionalmente aplicada, gerações mais modernas de resinas termorrígidas modificadas com termoplásticos, bem como as resinas bismaleimidas, têm sido introduzidas no mercado e empregadas para finalidades de alto desempenho (em aeronaves como A380 e EMB-190) (REZENDE; BOTELHO, 2011).

Há, inclusive, estudos no sentido de incluir partículas de borracha na matriz epóxi com o intuito de melhorar as propriedades mecânicas do sistema epoxídico modificado com fibras de carbono. O melhor desempenho mecânico é evidenciado em termos de propriedades de tensão e flexão, devido à melhor interação matriz-reforço, justificada pela distribuição homogênea das partículas na matriz (GONÇALEZ; BARCIA; SOARES, 2006).

Já o reforço é a fase dispersa, da qual provém a resistência e rigidez do compósito, e basicamente, contribui positivamente com as propriedades que dependem da direção das fibras (GALLI, 2016). Não há uma dependência somente da disposição das fibras, mas também do tipo utilizado para melhorar o desempenho estrutural do compósito (REZENDE; COSTA; BOTELHO, 2011). A fase dispersa (reforço com fibras) pode ser classificada por meio da razão entre comprimento/diâmetro, ou seja, o coeficiente de forma. Para o caso de fibras curtas, esse valor deve ser inferior a 100. A Figura 3 apresenta os três principais grupos no quais os compósitos são classificados.

Figura 3 - Esquema dos três grupos de classificação dos compósitos.



Fonte: Callister (2006).

Pretende-se com esse trabalho entender de forma mais aprofundada e fundamentada o fenômeno de deslocamento em estruturas aeronáuticas constituídas de compósito. Além disso, esta pesquisa objetiva avaliar os parâmetros que influenciam neste fato recorrente na

indústria aeronáutica, por meio de experimentos práticos (condicionamento ambiental e teste de aderência a seco) e diferentes esquemas de pintura, além do padrão estabelecido.

Entender os requisitos básicos para uma adesão adequada também faz parte do escopo deste trabalho, bem como pontuar os principais defeitos de adesão e propor uma solução a esse problema, já que em determinadas aplicações, a adesão inadequada da interface compósito/pintura, pode acarretar em defeitos como o deslocamento/delaminação.

Nesse contexto, por meio de uma revisão bibliográfica e de análises experimentais (aderência, umidade, condicionamento ambiental), esse trabalho visa analisar os principais parâmetros de influência, bem como identificá-los e estabelecer um cenário e condição ideais, ou seja, visa determinar a melhor condição, por meio de correlação de dados e solicitação a que o material é submetido.

1.2 TINTAS E REVESTIMENTOS EM GERAL

Pode-se definir tinta (ou revestimento orgânico) como uma mistura complexa de substâncias químicas, as quais podem ser agrupadas em quatro categorias: ligantes, voláteis, pigmentos e aditivos. Os ligantes, classificados como polímeros orgânicos, são responsáveis pela formação de um filme contínuo e uniforme, que se adere ao substrato a que a tinta é aplicada e também age como “conector” das outras substâncias formadoras. Normalmente, os ligantes e seus precursores são chamados de resinas, que governam/são responsáveis pelas características e propriedades do filme (WICKS, 2007).

Os componentes voláteis, por sua vez, estão presentes em grande parte das tintas, já que sua principal função é oferecer fluência, isto é, tornar o líquido fluido o suficiente para facilitar o processo de aplicação. A evaporação do composto volátil ocorre durante e após a aplicação na superfície desejada (WICKS, 2007).

Os pigmentos são caracterizados como partículas sólidas finas e insolúveis que se dispersam e permanecem suspensas no ligante após a formação do filme. A proposta inicial é dar cor e opacidade ao filme do revestimento, porém há efeitos fundamentais na característica de aplicação e na propriedade dos filmes (WICKS, 2007).

Os aditivos, por sua vez, são inseridos em pequena quantidade para modificar alguma propriedade da tinta. Os exemplos mais comuns são: catalisadores para reações de polimerização, estabilizadores e modificadores de fluxo (WICKS, 2007).

Tabela 1 – Principais constituintes da tinta e suas funções.

	Componentes	Função Típica
Veículos (fase contínua)	Polímero ou resina (ligante)	Proporciona uma base contínua do filme, selando ou protegendo a superfície, na qual a tinta é aplicada. Há variações na composição química a depender do uso final.
	Solvente ou diluidor	O meio pelo qual a tinta é aplicada. Evita-se em algumas composições como: pintura de alto teor sólido e em sistemas 100% polimerizantes.
Pigmentos (fase descontínua)	Aditivo	Componentes menores, porém com variedade e efeito vastos. Por exemplo: catalisadores, agentes secativos, agentes de fluidez
	Pigmento primário (partícula fina orgânica ou inorgânica)	Provê opacidade, cor e outros efeitos visual e ópticos, mais comumente utilizado em aplicações estéticas. Em <i>primers</i> é um anti-corrosivo.
	Extensor (partícula áspera inorgânica)	Usado com diversas finalidades, incluindo opacidade e complemento para pigmento primário, auxilia o lixamento na superfície de <i>primers</i> , por exemplo.

Fonte: Adaptado de Wicks (2007).

Outro termo bastante utilizado é o “*vehicle*”, o qual constitui da mistura de componentes ligantes e componentes voláteis da tinta. Apesar da maioria das tintas apresentarem alguma porcentagem de solvente em sua composição, quantitativamente, grande parte dos solventes das tintas foi substituída por tecnologias como “*high solid paint*” e “*waterborne paint*” (WICKS, 2007).

As tintas à base de água (“*waterborne paint*”) baseiam-se normalmente em soluções de água ou em resinas dispersas em água, que geralmente estão em três formas diferentes: em emulsão de água, solúveis em água e dispersos em água. Além de ser possível reduzir as emissões de compostos orgânicos voláteis, apresenta benefícios em relação ao brilho, à retenção de cor, durabilidade, resistência química e à corrosão (WANG et al., 2019).

As tintas “*high solid*” são materiais reformulados, uma vez que aumentar a porcentagem de sólidos em uma solução de tinta é a forma mais acessível disponível de reduzir a quantidade de solvente orgânico nessa mistura. Essa tendência acompanha todas as áreas a que a pintura é aplicada, sendo esta uma tecnologia que é empregada de forma difusa. Logo, com o desenvolvimento desse sistema, pode-se inferir que com menor teor de solvente na composição da tinta, há uma redução de energia utilizada para evaporação do conteúdo volátil, visto que o teor é menor. No entanto, as técnicas de formulação são, geralmente, especiais e a matéria-prima requerida também possui valor agregado maior (LAMBOURNE; STRIVENS, 1999).

Os revestimentos são, geralmente, materiais no estado líquido, que após a secagem ou o processo de cura, formam um filme sob o substrato aplicado. Seu uso é universal, em razão da proposta principal de decorar, proteger e ter aplicações funcionais. Como exemplos de aplicações funcionais, mencionam-se as funções: anticorrosivas, hidrofóbicas, lipofóbicas, retardamento de chamas etc. (FÉAT et al., 2019).

O intuito da pintura não é somente estético, a finalidade da aplicação também engloba proteção, bem como as duas funções atuando em conjunto, já que o ambiente ao redor das peças pintadas é agressivo, bem como facilitar a limpeza e manutenção, já que uma superfície não recoberta é menos resistente à corrosão, sujeira e óleos. Internamente, as partes que não são visíveis são pintadas para evitar desgastes e danos à estrutura em questão, ou seja, possuem um propósito de preservar a estrutura. As partes em evidência recebem uma pintura de aparência, ou seja, para imprimir a um avião, por exemplo, como um todo um valor compatível com o produto. Para tanto, os dois critérios citados são fundamentais quando se trata de pintura no ramo aeronáutico que devem ser tratados com a mesma importância. Certamente, a relação entre a tinta e o substrato é extremamente importante, além de ser específica, uma vez que os requisitos para um substrato de madeira são diferentes daqueles exigidos para uma pintura em substrato metálico (LAMBOURNE; STRIVENS, 1999).

Por falar em requisitos, atingir a qualidade de processos de pintura com uma camada única é desafiador, devido à lista de exigências solicitadas: opacidade, cor, brilho, textura, adesão ao substrato, propriedades mecânicas ou físicas, resistência química, proteção contra corrosão e durabilidade. Para atingir tais condições, o número de camadas que compõem todo o revestimento depende do tipo do substrato e do contexto em que a peça pintada é empregada (LAMBOURNE; STRIVENS, 1999).

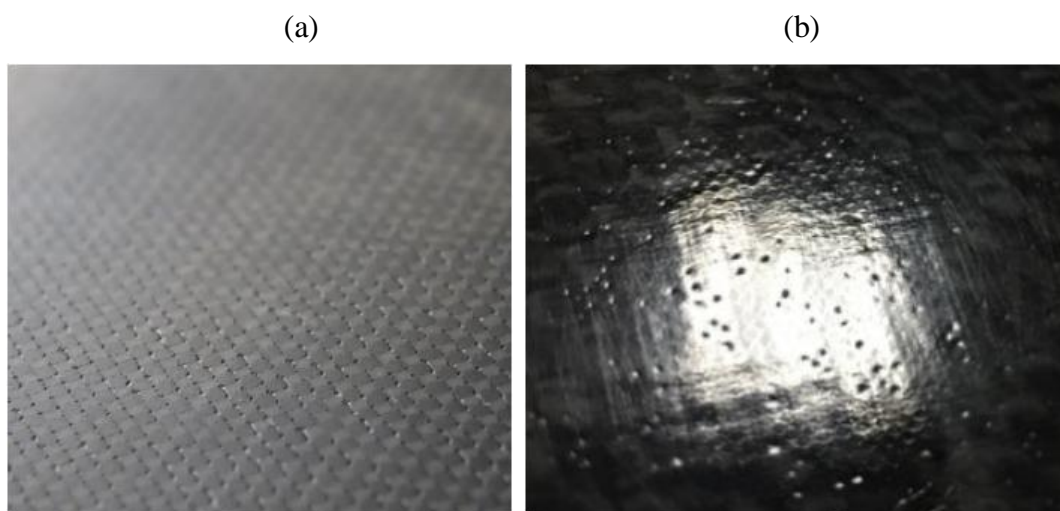
Dessa forma, um esquema típico de pintura consiste em: primer, pintura base e revestimento final, cada qual com uma função e, obviamente, composição específicas. O

primer é produzido com o intuito de selar a superfície do substrato e de criar um meio propício à adesão do substrato à pintura base, além de auxiliar na proteção contra corrosão.

A pintura base possui, basicamente, duas funções: contribuir para encobrir as características do substrato e criar uma superfície lisa sobre a qual será aplicada a camada final do *topcoat*, isto é, a pintura final. Já a pintura final complementa a camuflagem da superfície e viabiliza um efeito estético apropriado, além de fornecer a proteção necessária ao material submetido ao processo de pintura. Sem dúvida, a inter-relação entre as camadas citadas é relevante o bastante para ser considerada (LAMBOURNE; STRIVENS, 1999).

Entretanto, independentemente da vertente a que a peça será destinada, a qualidade da pintura de partes manufaturas de compósito está estritamente relacionada à aparência original após o desmolde, sendo um resultado combinado dos métodos de laminação, as propriedades da fibra e da resina utilizadas, bem como os parâmetros do processo e a influência do molde/gabarito para a confecção da peça. Geralmente, os defeitos encontrados nas superfícies originais são: porosidade, redução ou contração da resina (gerando regiões secas em resina). Dessa forma, o mau acabamento e a baixa qualidade da superfície das peças prejudica o processo subsequente de pintura, visto que introduz uma etapa de preparação da superfície, a qual afeta negativamente o andamento da produção em massa (ZIYU, 2017).

Figura 4 – Defeitos de superfície comuns em compósito: (a) contração da resina e (b) porosidade.



Fonte: Ziyu (2017).

Por consequência, o lixamento é o método mecânico mais difundido para preparar a superfície, com a finalidade de atenuar as imperfeições da fabricação e eliminar o agente desmoldante, já que é um fator que influencia no fenômeno do deslocamento. Com isso, a rugosidade da superfície aumenta e, conseqüentemente, melhora a adesão da tinta. O lixamento para aumento da rugosidade não somente é o método mais usado como também o mais eficiente se comparado às técnicas de exposição ao ozônio e ao laser YAG (SUZUKI, 2013; ZIYU, 2017).

1.3 ADESÃO

A adesão é uma característica fundamental de muitos revestimentos. Entretanto, há uma base científica inconsistente acerca das variáveis que afetam esta propriedade. Em termos de significado, é plausível considerar a dificuldade em remover o revestimento ou pintura em questão ou ainda na dificuldade em separar duas interfaces que estão em contato e, teoricamente, aderidas uma à outra.

De forma lúdica (como apresentado na Figura 4), pode-se pensar em uma superfície lisa que possui forças interfaciais que conectam o substrato e a pintura ou revestimento, basicamente aderidos por forças atrativas por unidade de área em contato. Com uma superfície rugosa no nível microscópico, há ressaltos na superfície que aderem o substrato à pintura e para separá-los seria necessário quebrar o substrato ou o revestimento, o que corrobora o fato de maior adesão.

Figura 5 – Geometrias de interações de superfície entre um revestimento e um substrato: (A) uma interface suave entre revestimento e substrato; (B) superfície áspera em escala microscópica; (C) superfície rugosa com penetração incompleta do revestimento.



A



B



C

Fonte: Lambourne; Strivens (1999).

Uma melhor adesão pode ser obtida por meio do aumento da rugosidade superficial antes de receber o revestimento, todavia pode apresentar desvantagens como mostra a Figura 5 (C), em que a tinta ou outra substância de revestimento não penetra completamente nos poros de escala microscópica. Deste modo, vale citar a importância da viscosidade da tinta nesse tipo de problemática, pois quanto menor a viscosidade, mais rápida e eficiente é a penetração da tinta nos poros causados pela preparação mecânica da superfície.

Uma influência não óbvia que deve ser considerada é a existência de defeitos e imperfeições no filme do revestimento, causada por uma cura não uniforme. Isto resulta em estresse localizado e exerce um efeito adverso na adesão. Essas imperfeições localizadas, portanto, resultam na probabilidade de formar e propagar trincas. Se esta se propaga pela interface tinta-substrato, a concentração do estresse pode causar delaminação do filme. Algumas partículas de pigmentos e bolhas de ar são exemplos potenciais de concentração de

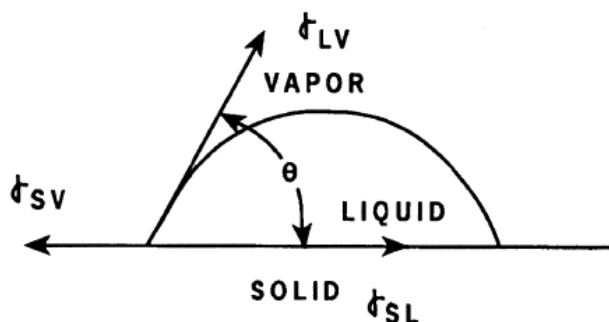
estresse, porém a incorporação de partículas de borracha pode levar à sua dissipação. Logo, presume-se que a dissipação do estresse reduz a probabilidade de fratura por falha de adesão (LAMBOURNE; STRIVENS, 1999).

Outra correlação que se pode apresentar a favor da adesão é a baixa viscosidade da tinta, a evaporação lenta dos solventes, bem como a reticulação lenta, ou seja, uma cura mais longa. Essa última condição torna a prática industrial inexequível, uma vez que se busca maior produtividade e eficiência nos processos de fabricação (LAMBOURNE; STRIVENS, 1999).

É fundamental e também parte deste trabalho revelar os problemas geralmente encontrados nas pinturas, especialmente o fenômeno de deslocamento da pintura de compósitos aeronáuticos. E as diversas condições ambientais às quais uma aeronave é submetida no seu tempo em serviço afetam as características não somente do compósito em si, mas também do revestimento orgânico, isto é, a pintura. Para diversas aplicações, não somente no ramo aeronáutico, os compósitos são expostos a ambientes adversos e ao envelhecimento climático ao sofrer mudanças de temperatura e umidade. Similarmente, as variações ambientais também estão atreladas aos esforços mecânicos e múltiplos tipos de carregamentos, facilitando, portanto, o surgimento e o crescimento de trincas ou delaminações (REIS, 2016).

Umidade é o maior fator limitante da adesão. Se a tinta não se espalha espontaneamente sobre o substrato para que haja um contato intermolecular entre a superfície do substrato e a tinta, pode haver interações e não há boa adesão. Para que o líquido espalhe instantaneamente pela superfície, a tensão superficial do líquido deve ser menor que a energia livre da superfície do substrato. Do contrário, se a energia superficial do líquido for muito alta, uma gota do líquido, neste caso a tinta, permanece nesse formato, resultando em um ângulo de contato de 180° e para uma adesão máxima é necessário um ângulo de contato de 0° (LAMBOURNE; STRIVENS, 1999).

Figura 6 – Ângulo de contato entre o líquido e a superfície do substrato.



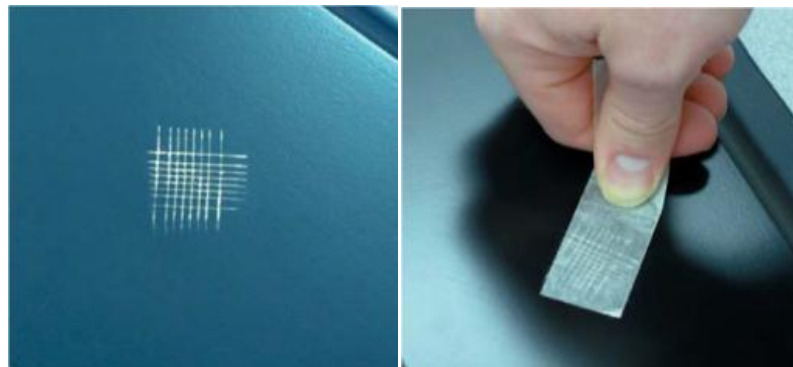
Fonte: Lambourne; Strivens (1999).

Ainda, as áreas que recebem desmoldante tendem a ter a adesão prejudicada. O ideal é remover qualquer traço desta substância e, em alguns casos, a energia livre superficial continua menor que a tensão superficial do revestimento, o que resulta em um ângulo maior que 0° (LAMBOURNE; STRIVENS, 1999).

Compreendendo a complexidade do fenômeno de adesão, não é surpresa que há uma dificuldade em determinar testes que sejam viáveis no estudo desse parâmetro. O único modo de determinar algo conclusivo em relação à adesão de uma tinta é utilizando o produto a fim de comprovar se o revestimento adere satisfatoriamente durante sua vida em serviço. Isto é, não há uma maneira de gerar resultados quantitativos ou numéricos, a análise é subjetiva. Alguns métodos têm sido desenvolvidos, porém somente alguns são aplicáveis à revestimentos. A título de pesquisa científica, a técnica mais adequada é o teste de aderência (“*direct pull test*”) (LAMBOURNE; STRIVENS, 1999).

Provavelmente, o teste de especificação mais difundido para avaliação da qualidade da adesão de revestimentos é o “*cross hatch adhesion test*”. Neste com a utilização de 6 a 11 lâminas afiadas, um padrão de riscos é feito na amostra, seguido de uma passada perpendicular à primeira. Uma fita adesiva é aplicada sobre o padrão deixado na superfície e é puxada. A adesão, portanto, é classificada de forma qualitativa numa escala de 0 a 5 comparando fotos e o quanto foi removido das incisões padronizadas feitas com o instrumento. Esse teste é útil em distinguir amostras com boa adesão de amostras que tenham adesão ruim, mas não representa o resultado em níveis de adesão e, apesar de bastante difundido, é uma fonte de erros a depender da forma que é realizado. As variáveis que são importantes a considerar como possíveis fontes de erro são: a pressão que a fita é aplicada, o ângulo e a taxa a que a fita é puxada da superfície (LAMBOURNE; STRIVENS, 1999).

Figura 7 – (a) incisão do padrão sobre a superfície e (b) fita adesiva sobre o padrão desenhado.



Fonte: Finish (2019).

Figura 8 – Gabarito comparativo de resultados do teste de adesão.

<p>Classe ISO: 0/ASTM Classe 5B Os cantos estão completamente lisos e nenhum dos quadrados está destacado.</p>	
<p>Classe ISO: 1/ASTM Classe 4B Destacou-se pequenas lâminas do revestimento nas intersecções. A área afetada não é maior que 5%.</p>	
<p>Classe ISO: 2/ASTM Classe 3B O revestimento possui lâminas destacadas ao longo das bordas. Área afetada de 5 a 15%.</p>	
<p>Classe ISO: 3/ASTM Classe 2B O revestimento deslocou parcialmente ou totalmente em grande quantidade. Área afetada de 15 a 35%.</p>	
<p>Classe ISO: 4/ASTM Classe 1B O revestimento deslocou parcialmente ou totalmente em grande quantidade. Área afetada de 35 a 65%.</p>	
<p>Classe ISO: 5/ASTM Classe 0B Grau avançado de deslocamento. Não pode ser classificado como classe 4.</p>	

Fonte: Adaptado de ASTM D 3359-97 (2019).

1.4 CONDICIONAMENTO HIGROTÉRMICO

O condicionamento higrotérmico consiste em um teste baseado na norma ASTM D 5229, o qual controla o ganho de umidade de acordo com o tempo de exposição a valores de temperatura e umidade pré-definidos. Esse controle ocorre por meio do acompanhamento do ganho de massa ao longo do teste até que ocorra a saturação, aproximadamente entre três e quatro semanas de exposição (FARIA; CIOFFI; BOTELHO, 2012; CUNHA; COSTA; REZENDE, 2006).

De acordo com a literatura, o ganho de massa ocorre de forma intensa nos primeiros dias de condicionamento, atingindo um estado de pseudo-equilíbrio, mantendo a quantidade de água praticamente a mesma após um tempo, propondo um comportamento Fickiano. A água livre tende a penetrar aos poucos na matriz polimérica e a absorção de umidade se torna mais lenta com o tempo, devido ao preenchimento dos vazios e à relaxação da matriz polimérica (FARIA; CIOFFI; BOTELHO, 2012; CUNHA; COSTA; REZENDE, 2006).

A umidade absorvida pelo compósito pode diminuir o desempenho mecânico e a rigidez do laminado, uma vez que a absorção de água promove o enfraquecimento da interface e a degradação da estrutura. Portanto, a umidade é um fator categórico quando se trata de *performance* estrutural (REIS, 2016). Não somente o quesito mecânico, mas é fundamental considerar os efeitos do condicionamento ambiental no produto final como um todo, ou seja, há de se investigar a influência dos parâmetros de ensaio no revestimento de componentes aeronáuticos de compósitos. A averiguação pode ser realizada por meio de testes de *performance* de propriedades como a adesão (por meio do teste de aderência à seco), a resistência à umidade e à temperatura (por meio do condicionamento climático) (LAMBOURNE; STRIVENS, 1999).

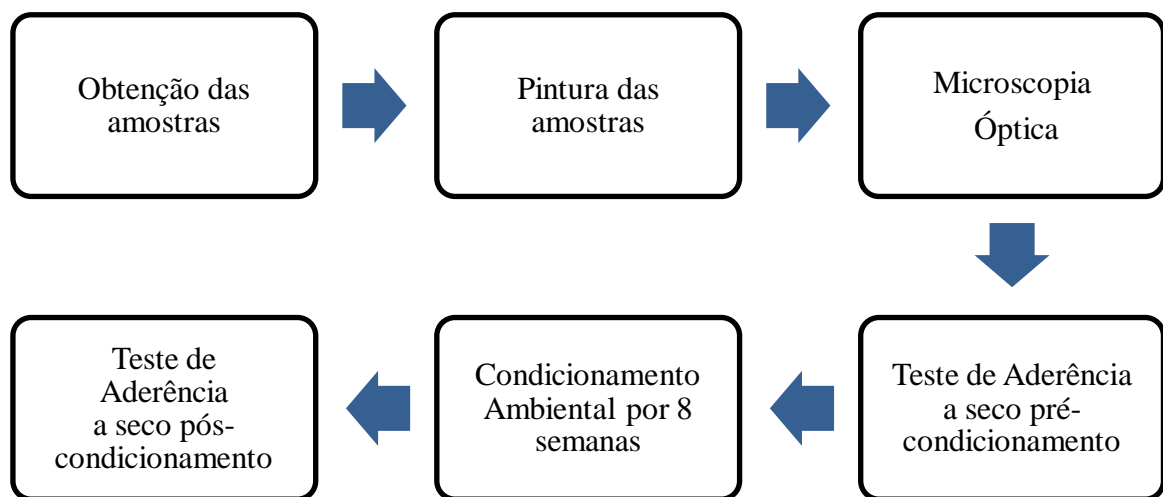
Diversos autores já estudaram e relataram os efeitos da umidade e temperatura nos compósitos, porém há uma quantia escassa de estudos sobre a influência desses fatores no fenômeno de deslocamento da pintura de compósitos aeronáuticos. Essa análise é importante, já que o processo de pintura é garantido por meio do controle desses parâmetros citados: temperatura e umidade. Além disso, as estruturas aeronáuticas estão sujeitas a condições ambientais semelhantes durante sua vida em serviço e conhecer seus efeitos e eventuais problemas é fundamental para manter os níveis de segurança e de qualidade da aeronave.

2 MATERIAIS E MÉTODOS

Para realização deste trabalho e atingir os objetivos propostos a partir do tema, foram realizadas pesquisas bibliográficas a fim de aprofundar os conhecimentos básicos sobre compósitos de fibra de carbono e o fenômeno de deslocamento em compósitos aeronáuticos.

E para fundamentar as hipóteses acerca desse problema, foram realizados experimentos para comprovar com fatos e dados.

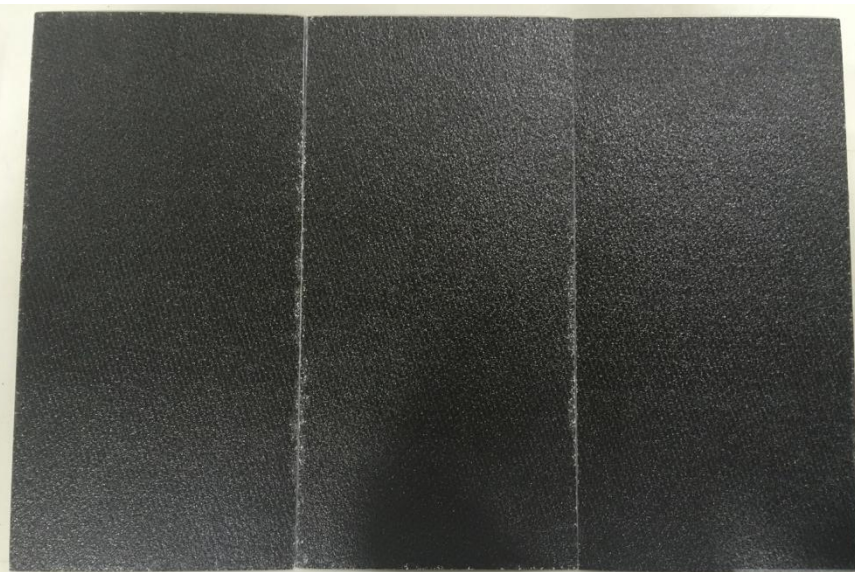
Figura 9 – Fluxograma das etapas práticas.



Fonte: Autor.

Os corpos-de-prova usados foram fornecidos em placas de fibra de carbono e epóxi, como apresentado na Figura 10.

Figura 10 – Compósito de fibra de carbono e resina epóxi usado na carenagem asa-fuselagem.



Fonte: Autor.

Foram configurados esquemas de pintura para estudar a influência da adesão mecânica na delaminação da pintura de compósitos aeronáuticos. Os corpos de prova foram submetidos ao processo especial de pintura em um ambiente industrial, seguindo, portanto, todos os parâmetros estabelecidos para uma pintura de qualidade. Os parâmetros mais importantes são listados a seguir (MEP 10-068):

- Temperatura (Pintura e Cura);
- Umidade;
- Tamanho de partícula;
- Luminosidade.

A temperatura e umidade são fundamentais, uma vez que são parâmetros críticos e que devem ser controlados (WOOD et al., 2018). Considera-se que os requisitos previstos em normas sejam de $(15 - 35^{\circ}\text{C}) \pm 1^{\circ}\text{C}$ para temperatura e $(35\% - 85\%) \pm 1\%$ para umidade. Já para a cura do revestimento das peças submetidas a esse processo considera-se de $(50 - 65^{\circ}\text{C}) \pm 1^{\circ}\text{C}$ (MEP 10-068).

Para realização deste trabalho, foram propostos dois tipos diferentes de pintura: a primeira recebe primeiramente o primer e a segunda recebe primeiramente a massa. As Tabelas 2 e 3 exemplificam a forma com que as configurações foram estabelecidas.

Tabela 2 – Esquemas de pintura para corpos de prova.

cdp	lixa	primer	massa	lixa	primer	massa	lixa	tinta
A	#180	epóxi	poliéster/hsh	#180	filler	poliéster/hsh	#320	branca
B	#180	epóxi	poliéster/hsh	#180	filler	poliéster/hsh	#420	branca
C	#220	epóxi	poliéster/hsh	#220	filler	poliéster/hsh	#420	branca

Fonte: Autor.

Tabela 3 – Esquema de pintura para corpos de prova.

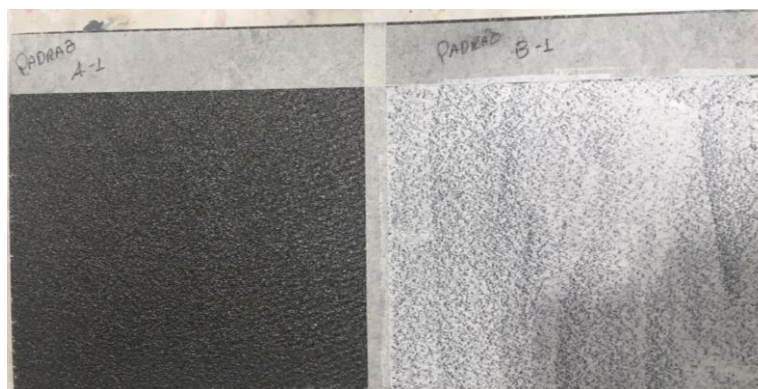
cdp	lixa	massa	lixa	primer	lixa	tinta
A	#180	poliéster/hsh	#320	epóxi	#320	branca
B	#180	poliéster/hsh	#320	epóxi	#420	branca
C	#220	poliéster/hsh	#420	epóxi	#420	branca

Fonte: Autor.

A lógica usada para chegar nessas configurações foi de que a adesão é beneficiada pela maior ancoragem mecânica, neste caso, conseguida por meio do lixamento das superfícies por lixas de granulometria menores e, portanto, mais grossas. Este método aumenta a rugosidade superficial, o que possibilita maior ancoragem mecânica entre as camadas em questão.

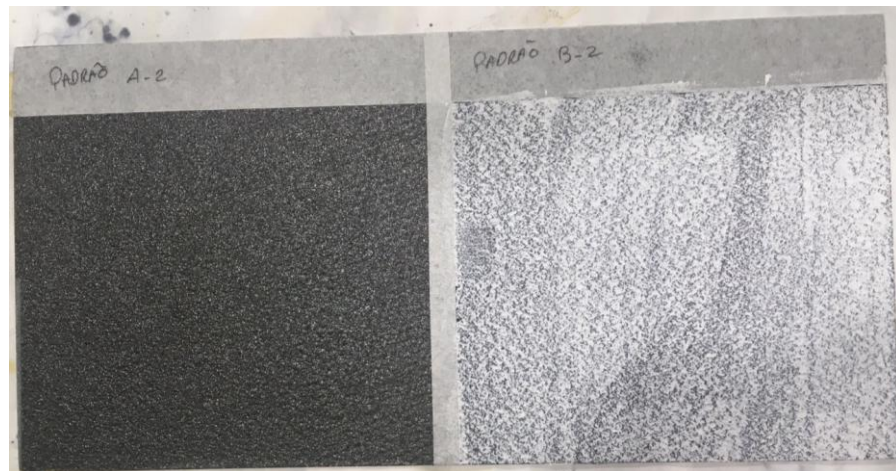
Certamente, ao modificar a rugosidade de preparo entre as camadas, há influência no nivelamento da peça. Dependendo da agressividade de lixamento, o preparo das superfícies pode afetar a qualidade final do produto, uma vez que aumentam as chances da obtenção de um aspecto de casca de laranja e menor brilho em decorrência do nivelamento ruim da superfície (WICKS, 2017).

Figura 11 – Corpos de prova preparados com configuração do padrão A.



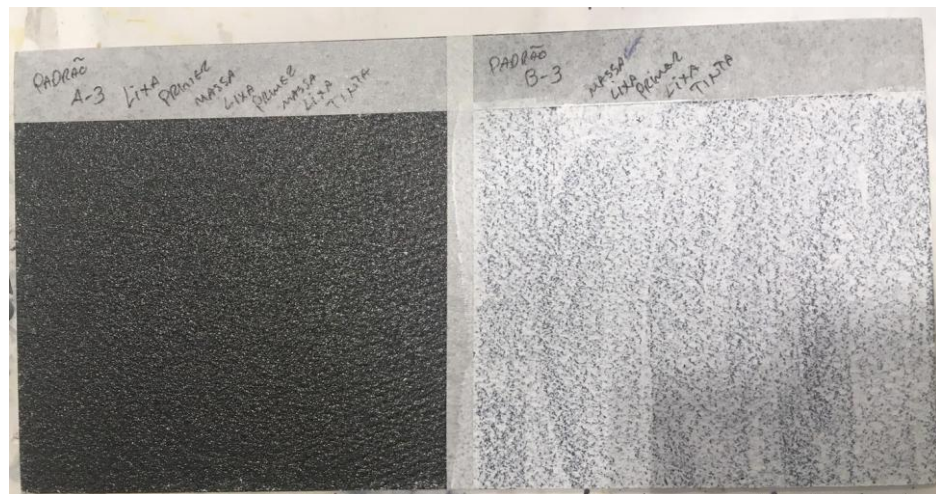
Fonte: Autor.

Figura 12 – Corpo de prova preparado com a configuração do padrão B.



Fonte: Autor.

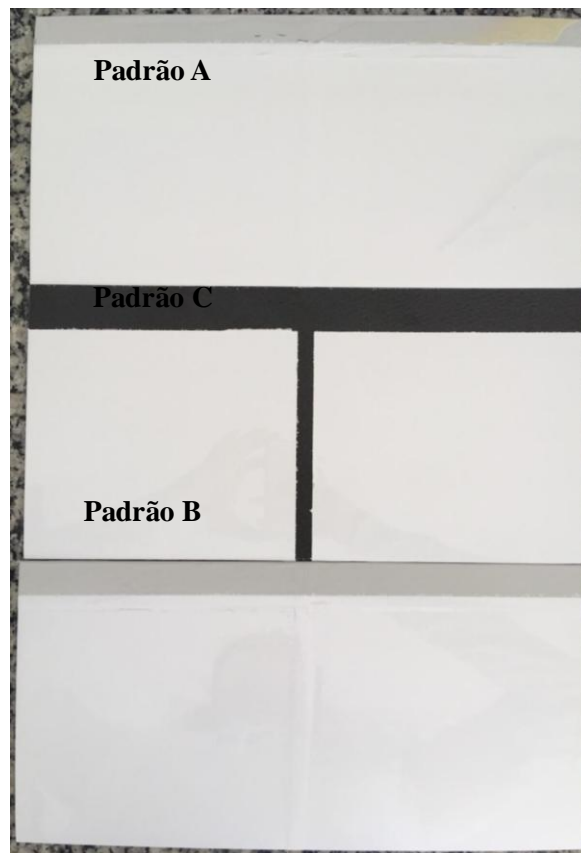
Figura 13 – Corpos de prova preparados com a configuração do padrão C.



Fonte: Autor.

Fica evidente que os corpos de prova à direita (Figuras 11, 12 e 13), receberam primeiramente uma massa, a qual possui o intuito de uniformizar a superfície da amostra e nivelar sua topografia. Após cada segmento receber sua respectiva configuração (Tabela 1 e Tabela 2), o resultado final é ilustrado a seguir.

Figura 14 – Corpos de prova pintados.



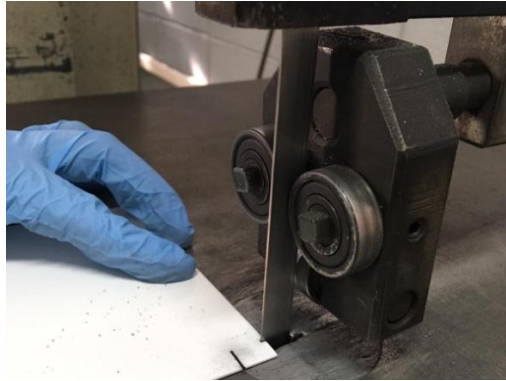
Fonte: Autor.

Primeiramente, todos os corpos de provas foram cortados na serra de fita para a confecção de amostras, assim como o embutimento com resina acrílica e líquido autopolimerizante (foi usada a proporção de 2 volumes de resina para 1 volume de líquidos autopolimerizante) para facilitar o processo de metalografia e estudá-las microscopicamente.

Uma placa de vidro foi usada como acessório da técnica de embutimento. Foi aplicado desmoldante na superfície da placa, bem como no molde com o intuito de facilitar a remoção após a cura da resina.

Figura 15 – Sequência de preparação das amostras: a) corte dos corpos de prova; b) embutimento das amostras; c) amostras prontas para metalografia.

(a)



(b)



(c)



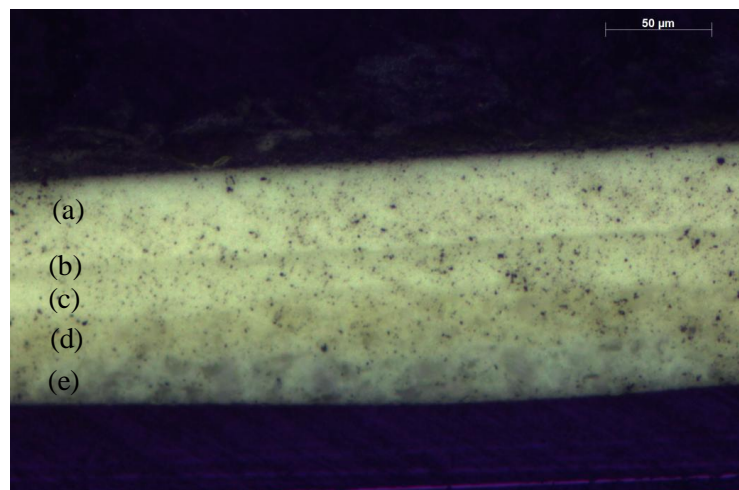
Fonte: Autor.

Concluído o procedimento de preparação, como mostra a Figura 15 (c), as amostras passaram por um processo de metalografia. Lixaram-se todas as amostras com lixas d'água de

diferentes granulometrias: 150, 220, 320, 400, 600 e 1200. Essa etapa é fundamental para tratar a superfície do compósito a ser estudada por meio de técnicas de microscopia. Neste caso, a região alvo da investigação é o revestimento do compósito segmentado de (a) a (e) na Figura 16.

Para tanto, utilizou-se a Microscopia Óptica para revelar as interfaces entre as camadas das diversas fases presentes. A configuração usada no Microscópio Óptico Zeiss Axio Imager 2 para distinguir os componentes do revestimento foi: ampliação de 20x, campo claro e polarização. A objetiva usada para tal foi a EC Epiplan de ampliação 20x, com abertura numérica de 0,4 e distância de trabalho de 3,2mm. A Figura 16 revela todas as camadas do revestimento para uma amostra do padrão B com *primer*, sendo: (a) tinta, (b) massa poliéster, (c) *primer* filler, (d) massa poliéster, (e) *primer* epóxi.

Figura 16 – Imagem da amostra B com *primer*.

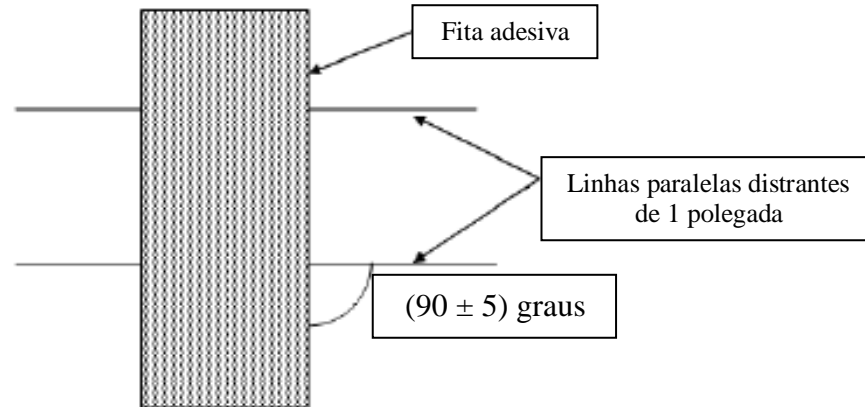


Fonte: Autor.

Outra investigação usada no estudo do fenômeno do deslocamento é o teste de aderência a seco, que ocorreu após o tempo de cura da tinta aplicada. Cada segmento da placa de compósito foi preparado com duas retas paralelas com distância de 1 (uma) polegada e uma reta diagonal que ao encontrar com as retas paralelas faz um ângulo de 45 graus.

Aplicou-se a fita de número 250 (MEP 18-012) à superfície testada e pressionou-se com firmeza para que houvesse total adesão da fita ao revestimento. A remoção da fita ocorreu com um movimento de forma abrupta perpendicularmente ao corpo de prova testado.

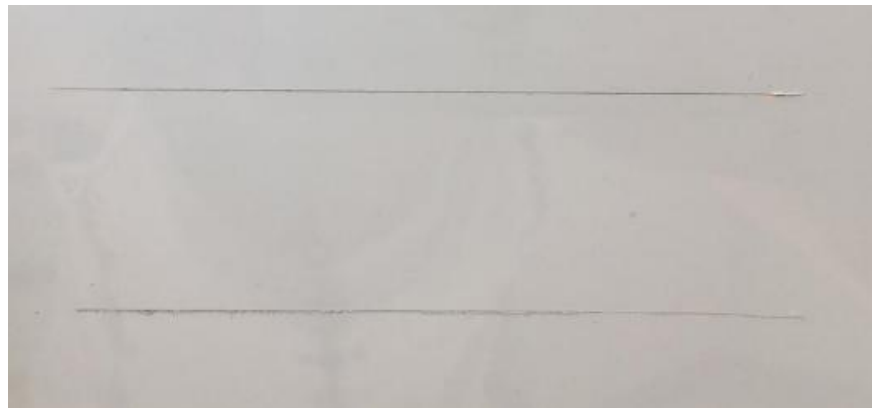
Figura 17 – Esquema de preparação para Teste de Aderência a seco de acordo com a MEP 10-068.



Fonte: Adaptado de MEP 10-068 (2019).

As etapas do processo da realização do Teste de Aderência são ilustradas a seguir.

Figura 18 – Retas paralelas com uma polegada de distância para Teste de Aderência.



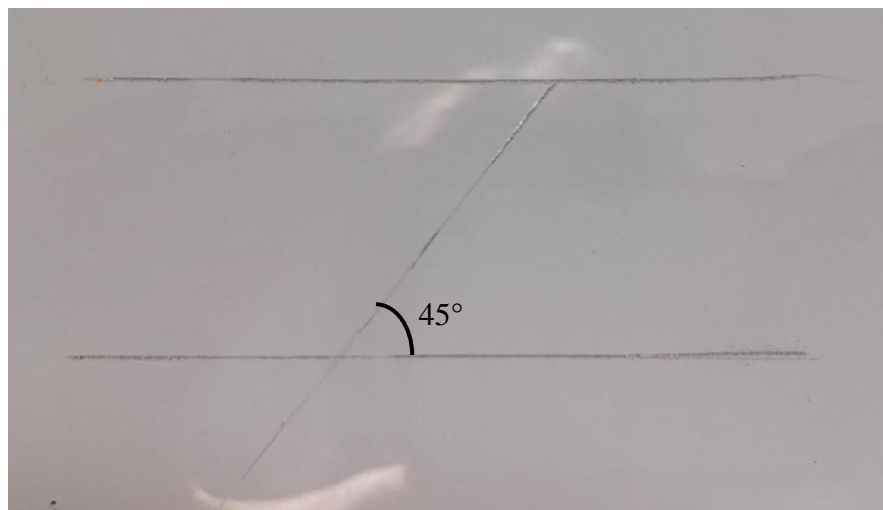
Fonte: Autor.

Figura 19 – Reta diagonal fazendo ângulo de 45 graus com retas paralelas.



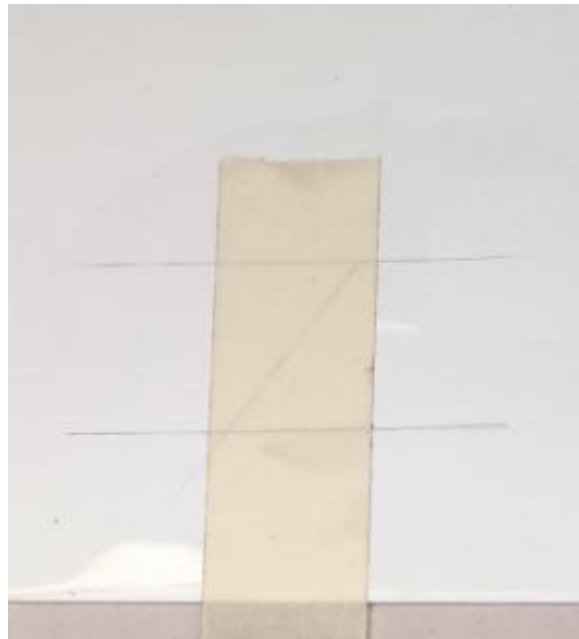
Fonte: Autor.

Figura 20 – Retas para Teste de Adesão.



Fonte: Autor.

Figura 21 – Corpo de prova com fita preparado para Teste de Adesão.



Fonte: Autor.

Após realizar o Teste de Aderência, os corpos de prova foram pesados em uma balança analítica antes de serem colocados na estufa por, aproximadamente, 48 horas a 90 graus Celsius. Essa etapa é fundamental para retirar a umidade residual dos corpos de prova.

Tabela 4 – Massa dos corpos de prova antes de serem colocados na estufa.

	Amostras	M_A (g)	M_B (g)	M_C (g)
13.08.2019	Com massa	69,1202	59,5495	66,3300
	Sem massa	75,1160	74,3883	70,9256

Fonte: Autor.

O condicionamento higrotérmico foi realizado a 80 ± 1 °C com teor de umidade relativa de $90 \pm 3\%$ em uma câmara climática Marconi MA 835/UR disponível no Departamento de Materiais e Tecnologia– UNESP.

Figura 22 – Câmara climática Marconi MA 835/UR.



Fonte: Autor.

Figura 23 – Corpos de prova no interior da câmara climática Maroni MA 835/UR.



Fonte: Autor.

Os corpos de prova submetidos a essa operação foram retirados semanalmente para averiguar o ganho de massa ao longo das oito semanas.

Tabela 5 – Massa dos corpos de prova após serem colocadas na estufa.

14.08.2019	Amostras	$M_A(g)$	$M_B(g)$	$M_C(g)$
	Com massa	68,7949	59,2789	66,0205
	Com primer	74,7559	74,0709	70,5986

Fonte: Autor.

Tabela 6 – Massa dos corpos de prova após as 8 semanas de condicionamento.

Dias	1	2	3	4	5	7	8	15	22	29	36	45	52	59
A C/M	69,1	68,8	69,0	69,6	69,2	69,4	69,4	69,4	69,4	69,4	69,4	69,4	69,4	69,4
A C/P	75,1	74,7	74,9	75,1	75,1	75,4	75,4	75,4	75,4	75,4	75,4	75,4	75,4	75,4
B C/M	59,5	59,3	59,5	59,6	59,6	59,7	59,6	59,5	59,5	59,5	59,5	59,6	59,6	59,6
B C/P	74,4	74,1	74,3	74,4	74,5	74,7	74,7	74,7	74,7	74,7	74,7	74,7	74,7	74,7
C C/M	66,3	66,0	66,2	66,3	66,4	66,4	66,4	66,4	66,4	66,3	66,4	66,3	66,4	66,4
C C/P	70,9	70,6	70,8	70,9	70,9	70,9	70,9	70,9	70,9	70,9	70,9	70,9	70,9	70,9

Fonte: Autor.

Após o condicionamento higrotérmico ter completado oito semanas, as amostras foram submetidas, novamente, a um teste de aderência a seco. O processo realizado foi idêntico ao utilizado no teste pré-condicionamento. Usou-se a mesma fita adesiva, com os mesmos parâmetros requeridos por norma. Este teste foi comparado, posteriormente, aos resultados obtidos no ensaio de pré-condicionamento.

3 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Os resultados da avaliação dos parâmetros de influência do deslocamento de compósitos aeronáuticos são apresentados nesse capítulo. Foram realizados ensaios de natureza qualitativa para análise da interface compósito-revestimento, assim como ensaios de condicionamento para trazer aos resultados uma referência das condições de serviço dos componentes.

3.1 TESTE DE ADERÊNCIA A SECO PRÉ-CONDICIONAMENTO

O primeiro teste realizado, referente à aderência, tem como princípio avaliar a adesão dos corpos de prova e o revestimento de cada uma das configurações. Uma dificuldade quando se trata de adesão é entender o que ela realmente significa e ainda quantificar os resultados obtidos dos testes realizados. Parte da composição da tinta, os pigmentos, promove adesão ao substrato, assim como o *primer* também possui esta função.

Porém, o parâmetro estudado neste caso, foi a rugosidade variada em cada uma das configurações. Teoricamente, a preparação do substrato com lixas de menor granulometria possibilita maior rugosidade à superfície, cuja importância é largamente reconhecida.

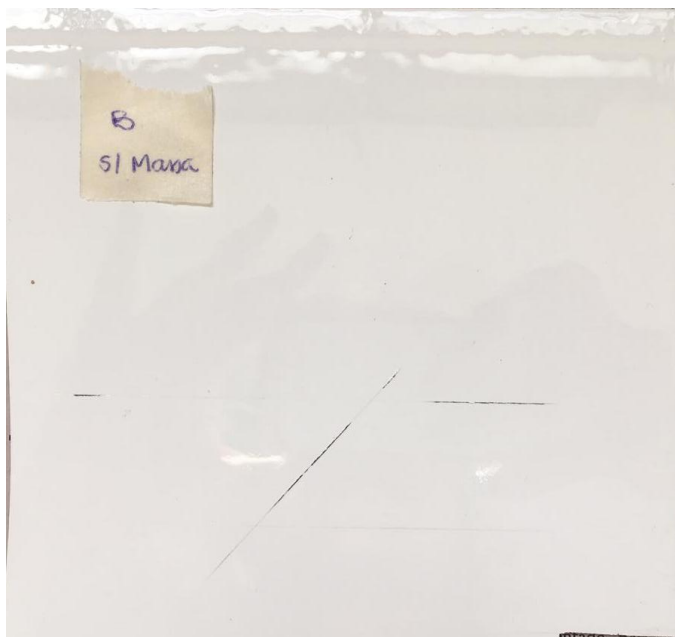
Desta forma, como maneira de quantificar e dar mais uma evidência a esse teste, a medida de rugosidade juntamente aos resultados do teste, mostram que todos os corpos de prova foram aprovados nesse teste. Porém, essas amostras foram produzidas e não sofreram nenhum tipo de exposição às condições de serviço. Isto é, já se esperava que o deslocamento precoce não ocorresse, devido à recente pintura das amostras ensaiadas.

Uma das vias teóricas que justificam essa hipótese é que a água age como um agente plastificante quando é absorvida pelo revestimento, nesse caso, a tinta. Embora isso aumente a extensibilidade da pintura, isso irá influenciar também no fenômeno de deslocamento do compósito, isto é, na remoção de tinta por descamação. Como os corpos de prova testados tinham a condição de pré-condicionamento, não houve influência desse fator nessa etapa dos ensaios, concordando com outros trabalhos disponíveis em literatura científica (LAMBOURNE; STRIVENS, 1999).

De acordo com a MEP-1068, norma que rege este teste, as amostras foram aprovadas e o exemplar que apresentar maior deslocamento é decorrente do instrumento usado para fazer a inscrição no corpo de prova. Isto significa que no processo de manufatura dessas peças, o

teste realizado após a etapa de pintura, teria um resultado positivo, já que atende às exigências previstas em norma, não sendo necessário nenhum tipo de retrabalho.

Figura 24 – Corpo de prova que sofreu maior retirada de revestimento.



Fonte: Autor.

3.2 CONDICIONAMENTO HIGROTÉRMICO

Os efeitos da temperatura e umidade são de fundamental relevância nos resultados do deslocamento das amostras. Muitos estudos mostram as consequências negativas da absorção de umidade à estrutura do compósito e às propriedades de forma geral, por isso devem ser sempre considerados nos projetos de laminados estruturais. (SILVA, 2011; COSTA; BOTE-LHO; PARDINI, 2011).

Os efeitos provocados por essa condição são reversíveis quando a exposição é caracterizada por curtos períodos de tempo. Entretanto, quando ocorre em ciclos de maior duração, há alterações destrutivas na interface do compósito, visto que a água possui afinidade com certos grupos funcionais presentes nas matrizes poliméricas de origem polar (FARIA et al., 2007).

Os resultados de estudos são praticamente unânimes em relação à dinâmica da difusão da água do ambiente condicionado para dentro das amostras. A concentração de umidade aumenta nas amostras nas primeiras semanas e, após 3 ou 4 semanas, atingem o pseudo-

equilíbrio por meio de um comportamento fickiano. Em 40 dias (ou 960 horas) de condicionamento ocorreu uma absorção média de 0,04% da massa inicial das amostras, isto é, antes de serem submetidas às condições de 80°C e 90% de umidade. E após os 50 dias (ou 1200 horas), a quantidade absorvida de água permanece constante. Houveram, obviamente, pequenas oscilações durante esse experimento, por se tratar de um sistema complexo e pelo ambiente estar com saturação de umidade. Após 59 dias de condicionamento, a média de absorção é de 0,03%. (SILVA, 2011).

O controle de ganho de massa foi realizado por meio de pesagens semanais das amostras condicionadas e por meio da equação a seguir. Os resultados negativos mostram que, ao invés de ganho de massa por umidade, houve perda de massa em decorrência do calor da câmara.

$$\% \textit{ umidade} = \frac{M_u - M_s}{M_s} \times 100\% \quad (1)$$

Onde:

M_u – Massa da amostra úmida

M_s – Massa da amostra seca

Tabela 7 – Porcentagem de umidade por semana.

cdp	Semana 1	Semana 2	Semana 3	Semana 4	Semana 5	Semana 6	Semana 7	Semana 8
A C/M	0,504	-0,084	0,000	0,014	0,001	0,001	0,001	0,002
A S/M	0,507	-0,107	-0,035	0,001	0,012	0,003	0,001	0,001
B C/M	0,253	-0,255	-0,052	0,005	0,001	0,136	0,000	0,000
B S/M	0,501	-0,099	0,034	0,001	0,001	0,001	0,001	0,000
C C/M	0,110	-0,004	-0,069	0,000	0,000	0,000	-0,014	0,000
C S/M	0,074	-0,046	0,019	0,000	0,001	0,000	0,000	-0,002

Fonte: Autor.

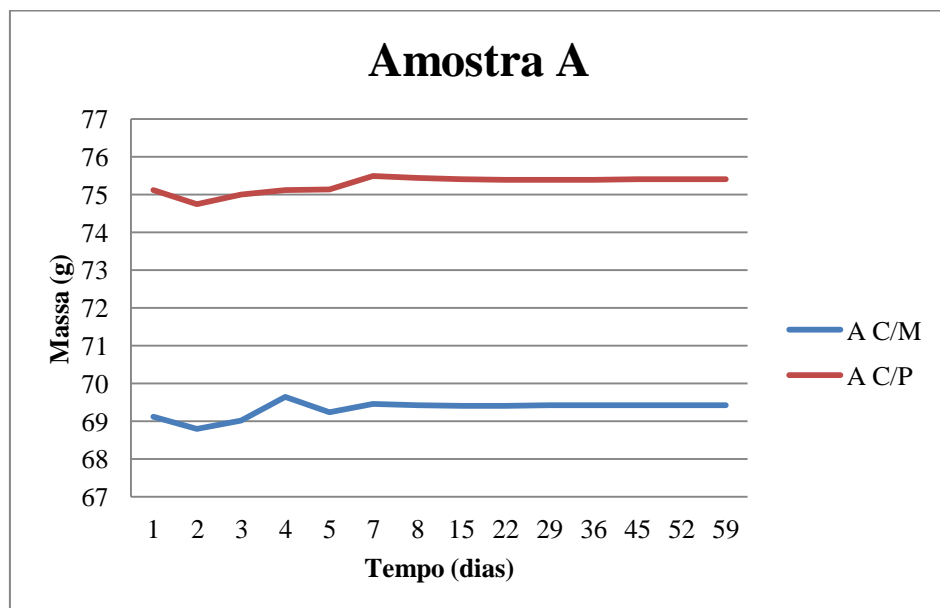
No entanto, o experimento realizado nesse trabalho conta com um revestimento orgânico que, aparentemente, influencia na dinâmica de absorção de água pelos corpos de prova. A pintura atua como uma barreira à entrada de umidade. De fato, a absorção de água pelo compósito provoca uma diminuição das propriedades mecânicas do compósito, consequência da degradação da interface fibra/matriz (BOTELHO; PARDINI; REZENDE,

2005). Além disso, a interface compósito-revestimento também sofre com os efeitos da absorção de água devido ao condicionamento ambiental.

Porém, qualquer redução na absorção de água ou oxigênio melhora a questão da corrosão e também o desempenho da aderência, a qual sofre degradação na presença de umidade (LAMBOURNE; STRIVENS, 1999).

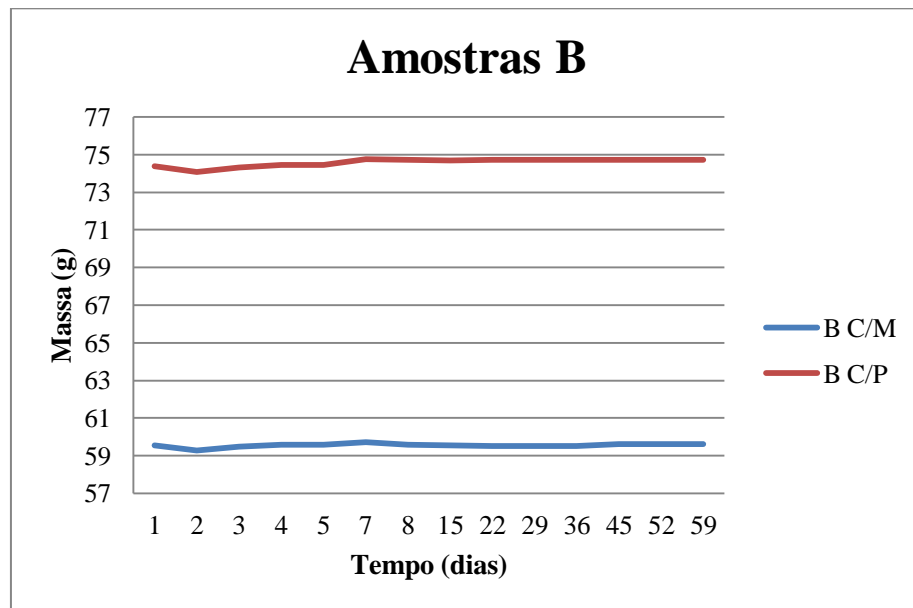
Todos os gráficos das amostras A, B e C (Figuras 25, 26 e 27) apresentam uma diminuição de massa mais significativa entre o primeiro e segundo dia, o que sugere uma perda de massa provocada pela ação da temperatura. Porém, logo volta a recuperá-la pois há absorção de umidade por capilaridade. O gráfico de ganho de massa (Figura 28) também corrobora a teoria de que há um ganho de massa mais significativo nos primeiros dias e, em seguida, sofrem saturação.

Figura 25 – Ganho de Massa das Amostras A em função do tempo (dias).



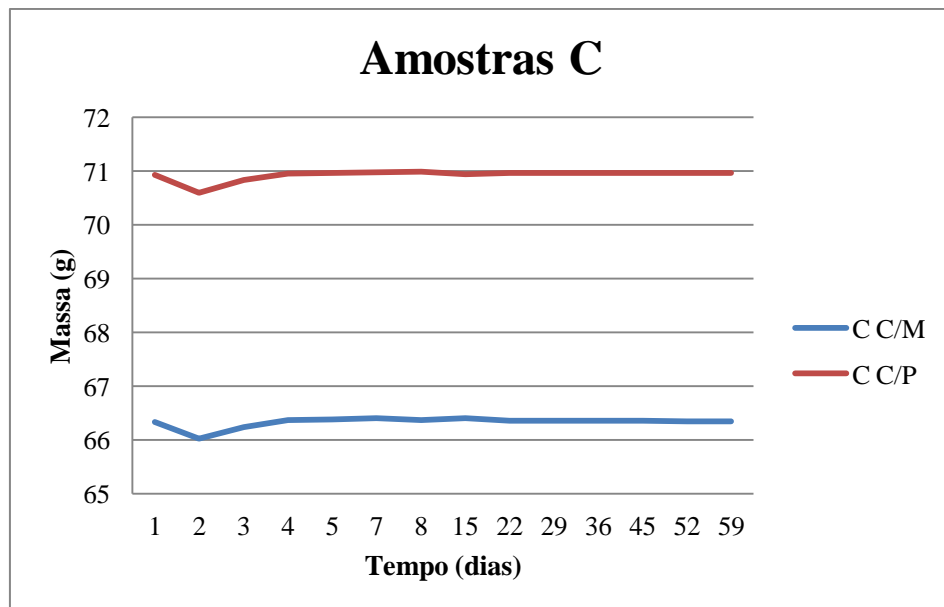
Fonte: Autor.

Figura 26 – Ganho de Massa da Amostra B em função do tempo (dias).



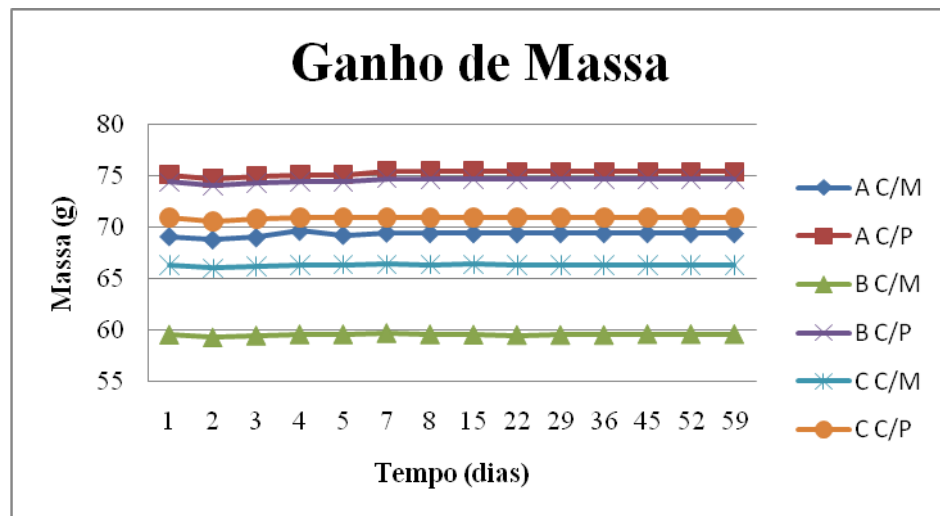
Fonte: Autor.

Figura 27 – Ganho de Massa da Amostra C em função do tempo (dias).



Fonte: Autor.

Figura 28 – Ganho de Massa das Amostras em função do tempo (dias).

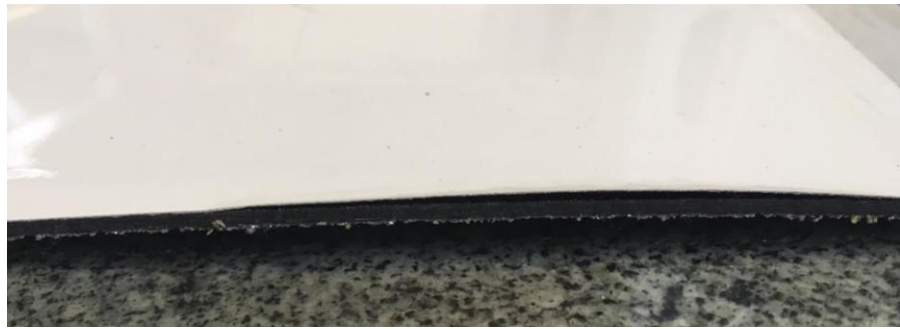


Fonte: Autor.

Observou-se também que após 1 semana de exposição à temperatura e umidade, algumas amostras começaram a deslocar na face em que os corpos de prova foram cortados ao meio. Obviamente, criou-se com o corte, uma via facilitada para a absorção de umidade e para que a temperatura intensificasse estes efeitos. As amostras que apresentaram comportamento semelhante foram: A com Massa, A com *Primer* e B com *Primer*.

A partir dessas informações, a incidência de deslocamento é maior em amostras com *Primer*, o que indica que a adesão do compósito ao primer é menos eficaz se comparada à adesão do compósito à massa, apesar do primer ter uma função de melhorar a colagem da interface. Porém, este corte realizado expõe a estrutura da amostra de modo a induzir este comportamento e não necessariamente o resultado deste ocorrido corresponde ao esperado na literatura, já que as amostras que sofreram deslocamento precoce foram submetidas à lixa de menor granulometria e, portanto, possuem a maior rugosidade superficial entre compósito-massa ou compósito/*primer*. Para evitar que esse fato tivesse influência nos resultados, foi colocada uma fita adesiva nessa região das três amostras que apresentaram esse descolamento. A seguir, a Figura 29 exemplifica o ocorrido.

Figura 29 – Amostra com início de deslocamento após 1 semana de condicionamento.

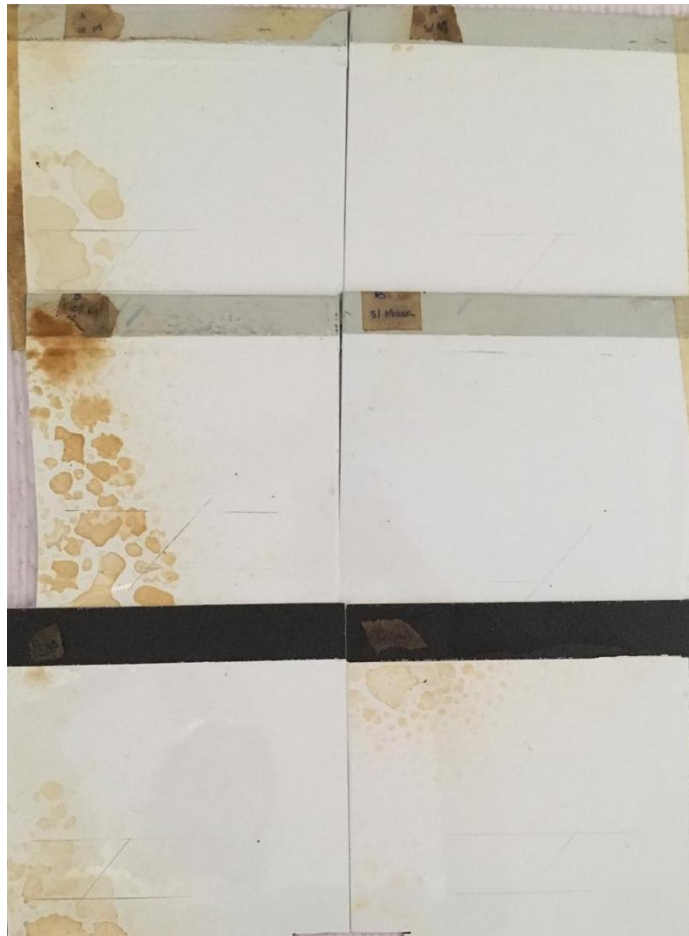


Fonte: Autor.

A seguir estão os resultados obtidos após 8 semanas de condicionamento.

Os gráficos corroboram a teoria de que há um ganho de massa mais significativo nos primeiros dias e, em seguida, sofrem saturação.

Figura 30 – Corpos de prova após 8 semanas de condicionamento ambiental.



Fonte: Autor.

Após as 8 semanas de condicionamento, o que observa-se é uma mudança na aparência da tinta branca de algumas amostras (A, B e C com massa e C com primer), que apresentam algumas manchas alaranjadas em decorrência do efeito do calor e da umidade que se depositou na superfície das amostras, não sendo, portanto, um item relevante para avaliação.

3.3 TESTE DE ADERÊNCIA A SECO PÓS CONDICIONAMENTO

Após 8 semanas de condicionamento ambiental (1.344 horas ou 59 dias), foi realizado novamente o teste de aderência a seco. Desta vez, o ensaio teve como objetivo analisar a influência de dois fatores: a temperatura e a umidade, ambas no deslocamento.

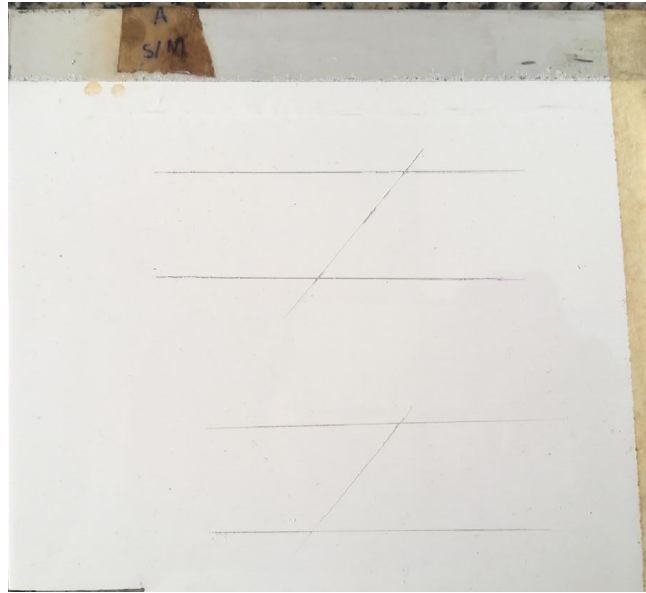
Da mesma forma que foi realizado no pré-condicionamento, realizou-se o teste no pós-condicionamento.

A comparação entre as duas condições em que os testes foram realizados é totalmente qualitativa, por inspeção visual da superfície do corpo de prova após a retirada da fita adesiva. Não há, para este tipo de avaliação um teste direto e de caráter quantitativo para análise e verificação da adesão.

A partir das imagens obtidas, fica explícito que não houve nenhuma retirada de material que divergisse do resultado teste de aderência a seco pré-condicionamento. Isso significa que, para os parâmetros testados, o processo é robusto e não apresenta falhas que prejudiquem a performance das peças em sua funções, apesar de haver uma variação na rugosidade promovida pelo lixamento da superfície da interface compósito/*primer* e compósito/massa.

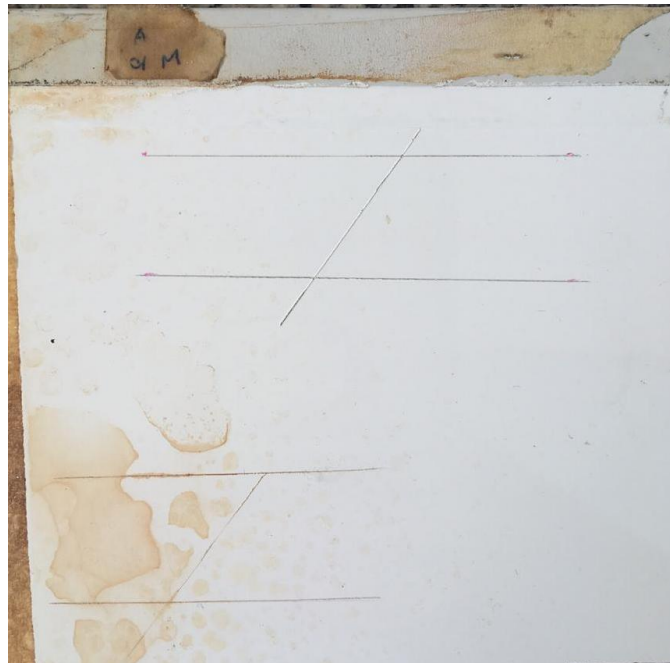
Na literatura, a influência da rugosidade na aderência de revestimentos é unanimidade. Portanto, neste caso, a variação da granulometria das lixas 180 e 220 não foi suficientemente grande para mostrar essa influência.

Figura 31 - Corpo de prova A com Primer pós condicionamento e pós teste de aderência a seco.



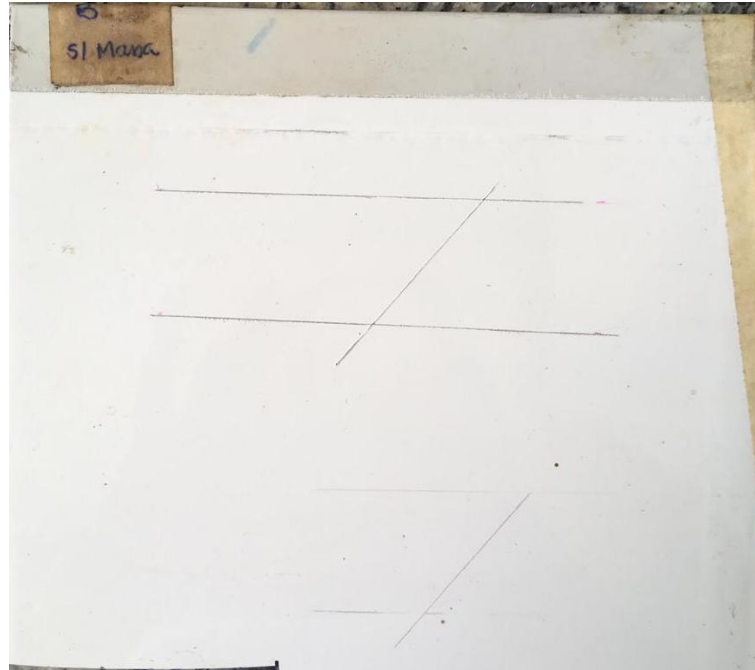
Fonte: Autor.

Figura 32 - Corpo de prova A com Massa pós condicionamento e pós teste de aderência a seco.



Fonte: Autor.

Figura 33 - Corpo de prova B com Primer pós condicionamento e pós teste de aderência a seco.



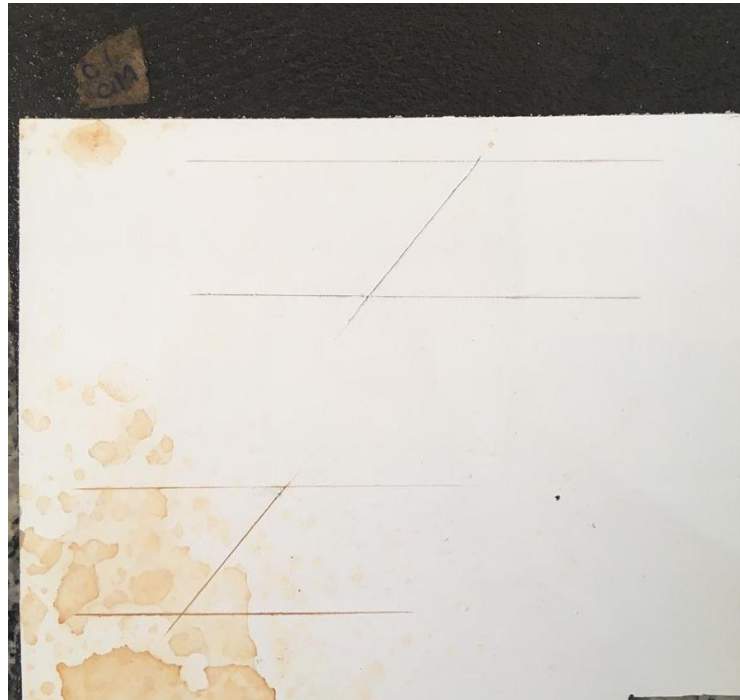
Fonte: Autor.

Figura 34 - Corpo de prova B com Massa pós condicionamento e pós teste de aderência a seco.



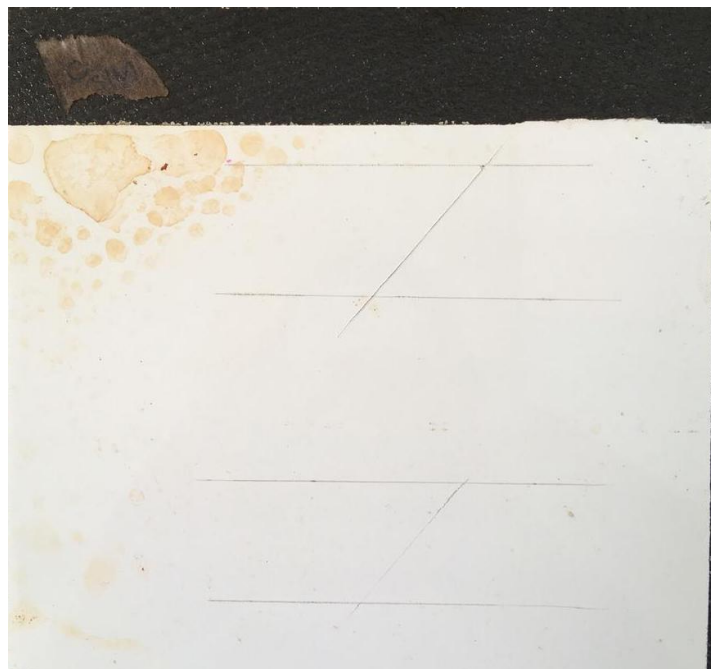
Fonte: Autor.

Figura 35 - Corpo de prova C com Massa pós condicionamento e pós teste de aderência a seco.



Fonte: Autor.

Figura 36 - Corpo de prova C com *Primer* pós condicionamento e pós teste de aderência a seco.



Fonte: Autor.

3.4 ESPESSURA DE CAMADA

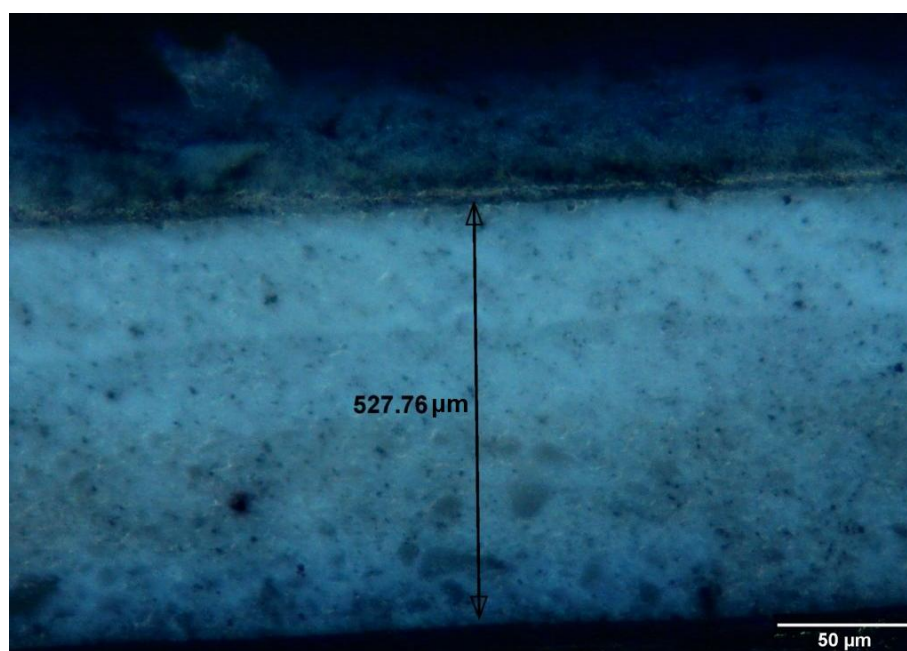
A partir da análise das imagens por microscopia óptica foi possível medir a espessura de camada com o auxílio do software ImageJ. Conhecer a espessura de camada é de extrema importância pois uma camada espessa facilita o aparecimento de descolamento entre os revestimentos (*primer*, massa e tinta), levando ao deslocamento da peça. Cada esquema de pintura possui um limite permitido de espessura. Para as amostras com massa, o limite é de 450-500 micrometros e para as amostras com primer, o limite é de 150 micrometros.

De acordo com Funke, se a espessura é espessa o suficiente, alguns defeitos que possam aparecer não atingem o substrato e reduz-se significativamente a passagem de água e oxigênio, preservando a estrutura de danos relacionados a esses fatores.

Além disso, uma camada que atinge valores maiores que o limite não significa somente desperdício de tinta e outros materiais, mas também pode levar ao aparecimento de uma camada flácida (WICKS, 2007).

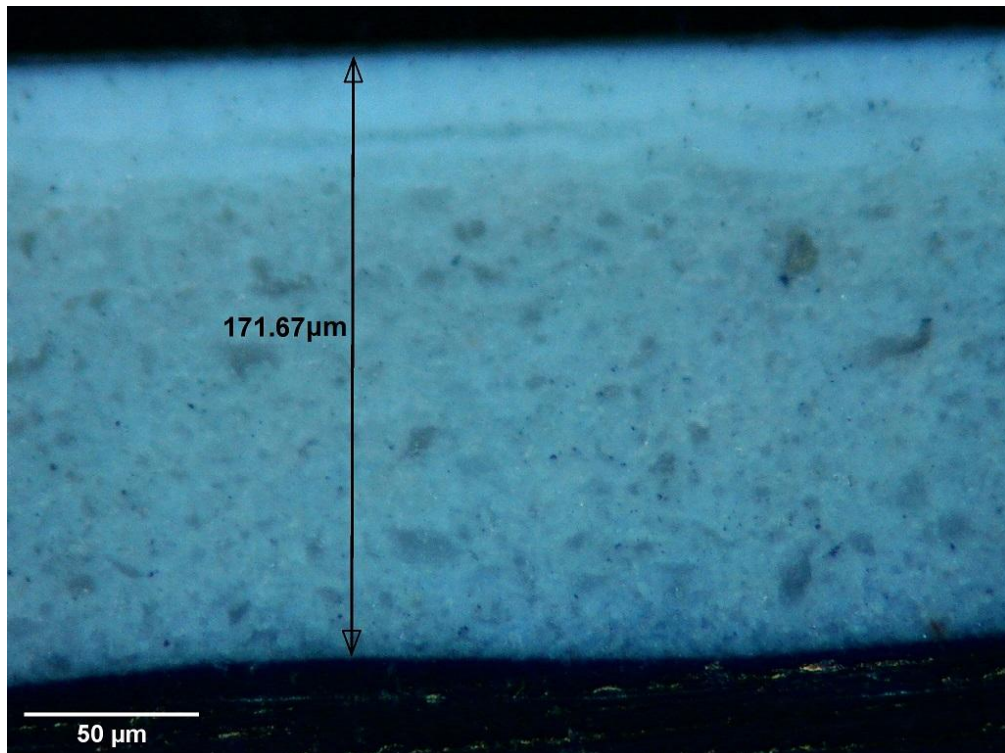
Dessa forma, a espessura das camadas foram medidas para avaliar uma possível influência no deslocamento. Porém, com os valores apresentados a seguir, pode-se dizer que a espessura do revestimento não foi uma causa de um possível deslocamento, já que estes valores estão dentro dos limites estabelecidos.

Figura 37 – Medida da camada da amostra com massa.



Fonte: Autor.

Figura 38 – Medida da camada da amostra com primer.



Fonte: Autor.

4 CONCLUSÃO

Neste trabalho foi abordada a problemática referente à delaminação de peças de compósitos aeronáuticos e, por meio de estudo da literatura e ensaios em laboratório, foi possível entender os parâmetros de influência. O fenômeno da delaminação apresenta dificuldades para ser avaliado e estudado quantitativamente, já que os métodos mais conhecidos são de ordem qualitativa e não possuem, no entanto, bagagem científica consistente. Dessa forma, este trabalho reúne informações, dados e fatos importantes que se somam a pouca literatura existente quando se refere à pintura de compósitos e as suas adversidades. Portanto, pode-se concluir que rugosidade, temperatura e umidade são fatores fundamentais na adesão entre compósito/revestimento de componentes de compósito aeronáutico.

Os testes de aderência a seco pré e pós-condicionamento não ratificaram, entretanto, a influência da rugosidade na adesão da pintura nas amostras ensaiadas. Para fundamentar esta circunstância, vale-se das seguintes hipóteses:

- A variação de rugosidade promovida não foi discrepante o suficiente para validar essa interdependência relatada na literatura;
- O condicionamento ambiental, que as amostras foram submetidas, apesar de intenso, não representou com fidelidade às condições que os componentes são expostos em serviço, fazendo com que o fenômeno de deslocamento não ocorresse como esperado;
- O processo de pintura estabelecido para essas peças dispõe de parâmetros otimizados para evitar retrabalhos, portanto, não houveram problemas relacionados à delaminação precoce das amostras.

Por fim, sugere-se, para a continuação dos estudos relacionados ao deslocamento de compósitos, uma maior variedade de configurações de pintura, bem como uma variação mais significativa da rugosidade promovida pelo lixamento de menor granulometria. A análise do alcance do condicionamento no compósito em si também seria uma alternativa interessante, ao comparar com a influência das condições ambientais no compósito sem o revestimento (*primer*, massa e tinta). Não somente o substrato que recebe o revestimento deve ser alvo de estudos, mas a tinta e todos os outros materiais também podem ser submetidos a um controle mais rigoroso de viscosidade, cujo fator tem influência na penetração de cavidades menores causadas pelo lixamento e podem ser causa de deslocamento.

REFERÊNCIAS

- ASTM D5229 / D5229M-14e1, **Standard test method for moisture absorption properties and equilibrium conditioning of polymer matrix composite materials**, ASTM International, West Conshohocken, PA, 2014. Disponível em: <https://www.astm.org/Standards/D5229.htm>. Acesso em: 15 set. 2019.
- ASTM. **3359**: Standard test methods for measuring adhesion by tape test. S.I: S.e, 1997. Disponível em: <https://www.astm.org/Standards/D3359.htm>. Acesso em: 15 set. 2019.
- BOTELHO, E. C., PARDINI, L.C., REZENDE, M.C. Hygrothermal effects on damping behavior of metal-glass fiber/epoxy hybrid composites, **Materials Science & Engineering**, v. 339, p. 190-198, 2005.
- CALLISTER, W. **Ciência e engenharia de materiais: uma introdução**. Rio de Janeiro: LTC, 2006. 705 p.
- COSTA, Anahi P.; BOTELHO, Edson C.; PARDINI, Luiz C.. Efeito da degradação ambiental nas propriedades de cisalhamento de compósitos PPS/fibra de carbono. **Polímeros**, [s.l.], v. 21, n. 3, p. 161-167, 17 jun. 2011. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1590/s0104-14282011005000042>. Acesso em: 10 jun. 2019.
- CUNHA, José Antônio P.; COSTA, Michelle L.; REZENDE, Mirabel C.. Influência de diferentes condições higrotérmicas na resistência à tração de compósitos de fibra de carbono/epóxi modificada. **Polímeros**, São Carlos, v. 16, n. 3, p. 193-201, 2006. Disponível em: http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0104-14282006000300008&lng=en&nrm=iso. Acesso em 14 ago. 2019.
- CUPERTINO, Leandro Fontoura; Pacheco, Marco Aurélio Cavalcanti; d'Almeida, José Roberto Moraes. **Modelagem do módulo de Young em nanocompósitos através de inteligência computacional**. Rio de Janeiro, 2009. 82 f.. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) - Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2009.
- FARIA, Maria C. M. de; CIOFFI, Maria O. H.; BOTELHO, Edson C. Análise do efeito higrotérmico no comportamento em fadiga de compósitos de PPS/fibras de carbono. **Polímeros**, São Carlos, v. 22, n. 1, p. 7-12, 2012. Disponível em: http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0104-14282012000100004&lng=en&nrm=iso. Acesso em 14 ago. 2019.
- FARIA, Maria Cândida Magalhães de, *et al.* Estudo da influência do condicionamento higrotérmico nas propriedades viscoelásticas de compósitos termoplásticos. **Polímeros**, [s.l.], v. 27, n. , p.77-83, 26 jan. 2017. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1590/0104-1428.2281>. Acesso em: 19 jun. 2019.
- FÉAT, Aurélie *et al.* Coatings preventing insect adhesion: an overview. **Progress in Organic Coatings**. Estocolmo, p. 349-359. 10 jun. 2019. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S030094401930325X?via%3Dihub>. Acesso em: 12 jul. 2019.

FINISH Coatings System Adhesion and Test Methods. Disponível em: <https://www.defelsko.com/resources/finish-coatings-system-adhesion-and-test-method>. Acesso em: 15 maio 2019.

GALLI, Cecília Antunes. **Caracterização das propriedades mecânicas de compósitos de matriz de epóxi com fibras de carbono unidirecionais**. 2016. 49 f. Trabalho de Graduação (Graduação em Engenharia de Materiais) - Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2016. Disponível em: <http://monografias.poli.ufrj.br/monografias/monopoli10016041.pdf>. Acesso em: 17 mar. 2019.

GONÇALEZ, Viviane; BARCIA, Fábio L.; SOARES, Bluma G.. Composite materials based on modified epoxy resin and carbon fiber. **Journal of the Brazilian Chemistry Society**. Rio de Janeiro, p. 1117-11123. jan. 2006. Disponível em: <http://www.scielo.br/pdf/jbchs/v17n6/a08v17n6.pdf>. Acesso em: 14 jul. 2019.

JONES, R. (1999). **Mechanics of composite materials**. Boca Raton: CRC Press. Disponível em: <https://doi.org/10.1201/9781498711067>. Acesso em: 10 maio 2019.

LEVY NETO, Flaminio; PARDINI, Luiz Claudio. Considerações gerais e estado-da-arte. *In*: PARDINI, Luiz Claudio *et al.* **Compósitos Estruturais: ciência e tecnologia**. São Paulo: Edgard Blücher Ltda, 2006. cap. 1, p. 2.

LI, Mei. **Temperature and moisture effects on composite materials for wind turbine blades**. 2000. 128 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química) - Montana State University, Bozeman, 2000. Disponível em: <http://naturefilm.montana.edu/composites/documents/Mei%20Li%20thesis.pdf>. Acesso em: 12 ago. 2019.

NAYAK, Nikhil V. Composite materials in aerospace applications. **International Journal of Scientific and Research Publications**, Hubli, v. 4, n. 9, p.1-10, set. 2014. Mensal. Disponível em: <https://pdfs.semanticscholar.org/3a73/9ca726a88cf833ba89708a4944c46457e42d.pdf>. Acesso em: 23 jun. 2019.

REIS, Jonas Frank. **Influência do condicionamento higrotérmico no comportamento mecânico de compósitos soldados de PEI/fibras de carbono**. 2016. 125 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Materiais) – Faculdade de Engenharia de Guaratinguetá, Universidade Estadual Paulista, Guaratinguetá, 2016. Disponível em: https://repositorio.unesp.br/bitstream/handle/11449/143086/reis_jf_me_guara_int.pdf?sequence=4&isAllowed=y. Acesso em: 13 ago. 2019.

REZENDE, Mirabel C.; BOTELHO, Edson C.. O Uso de compósitos estruturais na indústria aeroespacial. **Polímeros: Ciência e Tecnologia**, São José dos Campos, v. 10, n. 2, p.4-10, jan. 2000. Disponível em: <http://www.scielo.br/pdf/po/v10n2/3106.pdf>. Acesso em: 09 jun. 2019.

SCHWARTZ, Mel M. **Composite materials: processing, fabrication and applications**. Upper Saddle River: Prentice-hall do Brasil, 1996. 572 p.

SILVA, D. F. **Avaliação do efeito ambiental nas propriedades mecânicas e viscoelásticas de compósitos híbridos de titânio/fibra de carbono/resina epóxi**. 2011. 107 f. Trabalho de

Graduação (Graduação em Engenharia de Materiais) – Faculdade de Engenharia de Guaratinguetá, Universidade Estadual Paulista, Guaratinguetá, 2011. Disponível em: https://repositorio.unesp.br/bitstream/handle/11449/121185/silva_df_tcc_guara.pdf?sequence=1. Acesso em: 13 ago. 2019.

SUZUKI, T. Study on new surface pretreatment of painting to CFRP laminates. *In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON COMPOSITE MATERIALS*, 19., 2013, Montreal. The 19th International Conference On Composite Materials. **Anais [...]**. Montreal: ICCM, 2013. p. 1 - 8. Disponível em: <http://confsys.encs.concordia.ca/ICCM19/AllPapers/FinalVersion/SUZ80756.pdf>. Acesso em: 03 ago. 2019.

WANG, Xumeng *et al.* Synthesis of high-solid, low-viscosity hydroxy acrylic resin modified with TBCHA. **Journal Of Saudi Chemical Society**. Xangai, p. 1-7. 11 maio 2019. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S131961031930047X>. Acesso em: 05 ago. 2019.

WOOD, Joseph D. *et al.* Cracking in paintings due to relative humidity cycles. **Procedia Structural Integrity**, [s.l.], v. 13, p. 379-384, 2018. Elsevier BV. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.prostr.2018.12.063>. Acesso em: 12 abr. 2019.

ZIYU, Huang. Study of Painting Pretreatment of Carbon Fiber Composites for Automotive Applications. *In: THE 21TH INTERNATIONAL CONFERENCE ON COMPOSITE MATERIALS*, 21., 2017, Xi'an. The 21th International Conference On Composite Materials. **Anais [...]**. Pequim: Chinese Society For Composite Materials, 2017. v. 37, p. 1 - 12. Disponível em: <http://www.iccm-central.org/Proceedings/ICCM21proceedings/>. Acesso em: 12 abr. 2019.