

CAROLINA CAVALCANTE LARANJEIRA

**Processamento e caracterização de compósito híbrido fibra de carbono/vidro/epóxi via
RTM: análise da formação de vazios e resistência interlaminar**

Carolina Cavalcante Laranjeira

**Processamento e caracterização de compósito híbrido fibra de carbono/vidro/epóxi via
RTM: análise da formação de vazios e resistência interlaminar**


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: Francisco Maciel Monticeli
Coorientadora: Prof^a. Dr^a. Maria Odila H. Cioffi

L318p	<p>Laranjeira, Carolina Cavalcante</p> <p>Processamento e caracterização de compósito híbrido fibra de carbono/vidro/epóxi via RTM: análise da formação de vazios e resistência interlaminar / Carolina Cavalcante Laranjeira – Guaratinguetá, 2021.</p> <p>51 f. : il.</p> <p>Bibliografia : f. 47-51</p> <p>Trabalho de graduação em Engenharia Materiais – Universidade Estadual Paulista, Faculdade de Engenharia de Guaratinguetá, 2021.</p> <p>Orientador: Francisco Maciel Monticeli</p> <p>Coorientadora: Prof^a Dr^a Maria Odila H. Cioffi</p> <p>1. Materiais compostos. 2. Compósitos poliméricos. 3. Fibras de vidro. I. Título.</p>
	CDU 620.1

Luciana Máximo

Bibliotecária-CRB-8/3595

unesp  UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA
"JÚLIO DE MESQUITA FILHO"
CAMPUS DE GUARATINGUETÁ

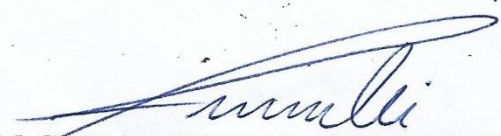
CAROLINA CAVALCANTE LARANJEIRA


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


APROVADO EM SUA FORMA FINAL PELO CONSELHO DE CURSO DE
GRADUAÇÃO EM NOME DO CURSO


Prof. Dr. MIGUEL ANGEL RAMIREZ GIL
Coordenador

BANCA EXAMINADORA:


MsC. FRANCISCO MACIEL MONTICELI
Orientador/UNESP-FEG


MsC. LUIS FELIPE DE PAULA SANTOS
UNESP-FEG


Eng. ROBERTO MOTTA
UNESP-FEG

Novembro 2019

AGRADECIMENTOS

A todas as pessoas que direta ou indiretamente contribuíram para a realização deste trabalho,

Ao meu orientador, *Francisco Maciel Monticeli* por todo o apoio e incentivo. Toda sua dedicação e paciência foram essenciais para a execução deste trabalho.

À minha coorientadora, *Maria Odila Hilário Cioffi* pela oportunidade, ensinamentos e pelo apoio durante o desenvolvimento do trabalho.

Aos meus pais *Roseli e Luis* e minha irmã *Amanda*, que sempre me apoiaram e estiveram ao meu lado na busca dos meus sonhos com muita persistência e dedicação.

À República TPD, por todo companheirismo, amizade, conselhos e apoio emocional.

Aos professores, técnicos e funcionários da Faculdade de Engenharia do Campus de Guaratinguetá por todo aprendizado que me proporcionaram e por todo suporte técnico que precisei.

RESUMO

No setor aeronáutico, os compósitos apresentam grande atratividade devido a sua baixa massa específica e propriedades mecânicas apropriadas para aplicação estrutural. Dentro dos estudos de compósitos tem-se os compósitos híbridos, os quais têm o benefício de combinar as vantagens das diferentes fibras e reduzir, simultaneamente, os seus atributos menos desejáveis. Um fator de grande preocupação na obtenção desses materiais é a formação de vazios ou, poros, por serem concentradores de tensão que fragilizam o material. Dessa forma, materiais com elevada quantidade de vazios são inadequados para a aplicação estrutural primária. Portanto, esse trabalho teve como objetivo avaliar a influência da formação de vazios em compósitos híbridos processados por RTM (Moldagem por Transferência de Resina) e avaliação do cisalhamento interlaminar. Para isso, foram obtidos 4 compósitos, utilizando-se fibras de vidro e de carbono com arquiteturas diferentes. A porosidade foi analisada por meio das técnicas de digestão ácida e microscopia óptica de superfície e o ensaio mecânico por meio do cisalhamento interlaminar. Analisando os resultados, observou-se que a presença de fibra de vidro nos compósitos facilita o fluxo de resina, gerando uma melhor impregnação e, portanto, menor fração volumétrica de vazios. Notou-se também que o tipo de tecido e a mudança de ordem de empilhamento não tem influência significativa na formação do diâmetro de poro. Com a realização do ensaio de resistência ao cisalhamento interlaminar foi possível observar a verificação do efeito híbrido positivo, pois os compósitos híbridos apresentaram resistências intermediárias entre os valores dos compósitos de um só reforço. Conclui-se que o laminado Híbrido 2 apresenta fração volumétrica de poro dentro dos requisitos para aplicação aeronáutica com menor perda na tensão de cisalhamento interlaminar, comparado ao laminado Híbrido 1.

PALAVRAS-CHAVE: Compósitos híbridos. Vazios. Porosidade. Resistência interlaminar.

ABSTRACT

The composites are desirable in the aeronautical sector due to their low specific mass and appropriated mechanical behavior for structural application. Among the composites, there are the hybrid composites (formed by combining two reinforcements in the same matrix), which exhibit the benefit of advantages combination of different fibers, and also the reduction of their respective disadvantages. A significant concern is the control of void formation, which is imperfection that acts as stress concentrators, damaging the mechanical proprieties of the materials. Thus, materials with large amounts of voids are unsuitable for primary structural application. This work aimed to evaluate the influence of void formation in hybrid composites processed by RTM and interlaminar shear evaluation. For this, four composites were processed using glass and carbon fibers with different architectures and stacking sequence. Acid digestion techniques and optical microscopy measured porosity. Meanwhile, the mechanical behavior was analyzed by interlaminar shear. As a result, it was noticed that the presence of glass fiber in the composites facilitate the resin flow, providing a better impregnation and a smaller fraction of voids. In addition, fabric type has no significant influence on pore diameter formation. The results of the interlaminar shear strength test showed a positive hybrid effect, concerning that hybrid laminates presented intermediate shear stress compared with non-hybrid composites. Finally, the results evidenced Hybrid 2 laminate with void content within the aeronautical application requirements and exhibited less interlaminar shear stress loss compared to laminate Hybrid 1.

KEYWORDS: Hybrid composite. Void. Pore morphology. Interlaminar shear.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Materiais utilizados na fabricação da aeronave Boeing 787.	9
Figura 2- Ilustração das propriedades mecânicas de um compósito.	14
Figura 3 - Classificação de matrizes utilizadas em compósitos.	15
Figura 4 - Esquema de classificação de tipos de reforços.	17
Figura 5 - Esquema processo RTM.	20
Figura 6 - Ilustração de tipos poros.	22
Figura 7- Empilhamento dos compósitos laminados: (a) compósito de fibra de carbono; (b) Híbrido 1; (c) Híbrido 2; (d) compósito de fibra de vidro.	25
Figura 8 - Fluxograma dos processos realizados.	26
Figura 9 - Esquema do processamento via RTM.	27
Figura 10 - Esquematização do corpo de prova e suportes utilizados no ensaio ILSS...	30
Figura 11 - Microscopia da fibra resultante da análise por digestão ácida.	33
Figura 12 - Ilustração do laminado CFC ao longo de sua espessura.	34
Figura 13 - Visualização da porosidade no laminado CFC.	35
Figura 14 - Ilustração da porosidade no laminado CFV.	36
Figura 15 - Tratamento de imagens no software ImageJ para medição de porosidade. .	37
Figura 16 - Representação da Figura 8d ampliado.	37
Figura 17 - Histograma de frequência de diâmetro de poro.	39
Figura 18- Gráfico de tensão de cisalhamento versus material.	42

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Resultados da digestão ácida	31
Tabela 2 - Resultados de diâmetro de poro	38
Tabela 3- Dados de variação da porosidade pela espessura do compósito	40
Tabela 4- Resultados de tensão de cisalhamento para os compósitos	41

SUMÁRIO

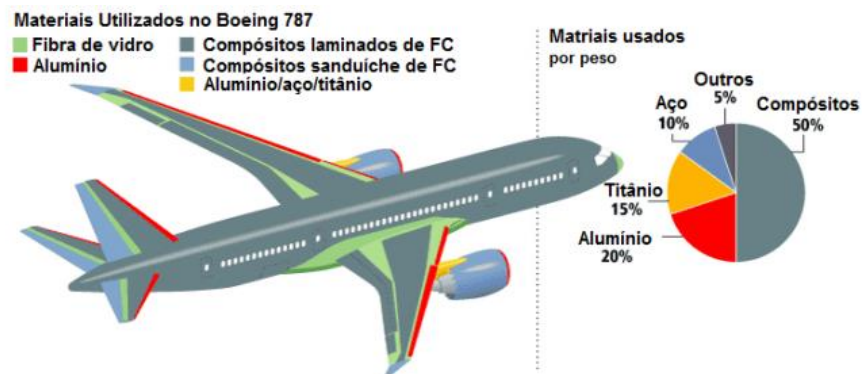
1	INTRODUÇÃO	9
1.1	CONSIDERAÇÕES INICIAIS	9
2	MOTIVAÇÃO	12
3	OBJETIVO	13
4	REVISÃO DA LITERATURA	14
4.1	COMPÓSITOS	14
4.2	MATRIZ	15
4.3	REFORÇO	16
4.4	INTERFACE	18
4.5	COMPÓSITOS HÍBRIDOS	18
4.6	PROCESSAMENTO DE MATERIAIS COMPÓSITOS	19
4.6.1	Moldagem por transferência de resina	20
4.7	VAZIOS.....	21
4.8	COMPORTAMENTO MECÂNICO.....	23
4.8.1	Resistência ao cisalhamento interlaminar	23
5	MATERIAIS E MÉTODOS	23
5.1	MATERIAIS UTILIZADOS	25
5.2	PROCESSAMENTO DOS COMPÓSITOS	26
5.3	ANÁLISE DE FRAÇÃO VOLUMÉTRICA DE VAZIOS.....	27
5.3.1	Digestão ácida	27
5.3.2	Análise microscópica da fibra resultante da digestão ácida	28
5.3.3	Microscopia óptica de superfície	29
5.4	ENSAIO MECÂNICO.....	29
6	RESULTADOS E DISCUSSÕES	31
6.1	DIGESTÃO ÁCIDA.....	31
6.2	MICROSCOPIA ÓPTICA DE SUPERFÍCIE	34
6.2.1	Análise qualitativa	34
6.2.2	Análise quantitativa	36
6.3	ENSAIO DE CISALHAMENTO INTERLAMINAR (ILSS)	41
7	CONCLUSÕES	44
	REFERÊNCIAS	45

1 INTRODUÇÃO

1.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS

Os compósitos vêm se destacando e conquistando cada vez mais espaço no mercado em diversas áreas por apresentarem propriedades interessantes como resistência mecânica associada a baixa massa específica, tornando-os atraente para aplicações estruturais. Nos últimos anos, os compósitos conquistaram espaço nas indústrias civil, automobilística e, principalmente, na aeronáutica (SILVA, 2017). A aplicação de compósitos poliméricos como alternativa para aplicação estrutural primária garante a integridade estrutural adequada, além da baixa massa específica possibilitar a economia de combustível. Atualmente, muitos componentes estruturais de aeronaves, que anteriormente eram fabricados utilizando-se materiais como ligas de alumínio, titânio e aços especiais, estão sendo fabricados utilizando-se estruturas laminadas de compósitos poliméricos com fibras contínuas (REZENDE, 2000; BOTELHO, 2011). Um exemplo a ser citado sobre a utilização de materiais compósitos na fabricação de aeronaves é o Boeing 787 *Dreamliner*, a primeira aeronave comercial a ser fabricada com mais de 50% de material compósito em sua estrutura (Figura1). Com isso, a utilização de compósitos estruturais é vital na aeronáutica pois estes correlacionam as propriedades interessante dos materiais e o processamento com redução de custo (SIQUEIRA,2016; ABRAHAO,2015; MACHADO et al., 2019).

Figura 1 - Materiais utilizados na fabricação da aeronave Boeing 787.



Fonte: Hale (2006).

A escolha dos materiais a serem utilizados em um projeto de uma aeronave é uma etapa de extrema importância, pois é necessário levar em consideração diversos fatores como durabilidade, parâmetros de carga, peso, tolerância ao dano, entre outros. Os compósitos poliméricos são os mais atrativos dentre os materiais compósitos utilizados na indústria para a fabricação de componentes estruturais. (SILVA, 2017).

A fibra de vidro e a fibra de carbono são dois tipos de reforços muito utilizados na indústria aeronáutica. O uso da fibra de carbono se justifica, pois esta possui excelentes propriedades mecânicas, tais como, elevada resistência mecânica e rigidez em relação ao seu peso, resistência à corrosão, estabilidade térmica e elevadas condutividades elétrica e térmica. Porém, possui uma baixa resistência à falha, quando solicitada em compressão, o que limita a aplicação desse compósito, além de apresentar um elevado custo. A fibra de vidro, quando comparada com a de carbono, apresenta maior resistência à falha em compressão e menor resistência à tração. Além disso, apresenta maior ductilidade e possui uma excelente resistência química. A fibra de vidro se destaca por apresentar um custo cerca de 15 vezes mais barato do que a fibra de carbono. Sendo assim, fabricar compósitos híbridos, de forma a combinar as vantagens e diminuir as desvantagens de ambos os reforços se torna muito atrativo para setores industriais, incluindo o setor aeronáutico (DONG et. al, 2015).

O aumento da utilização de materiais compósitos híbridos teve início a partir da necessidade de diminuir o uso de materiais com elevado custo na fabricação de componentes. Os compósitos híbridos são formados por dois ou mais tipos de reforço diferentes unidos em uma mesma matriz, esta combinação de diferentes materiais permite que seja feita uma adaptação das propriedades às necessidades da estrutura em consideração. Na maioria dos casos, o objetivo da hibridização é obter um novo material que contenha as vantagens de seus constituintes e, se possível, que supere algumas das suas desvantagens (SANTOS, 2018).

Ultimamente, muitos avanços tecnológicos no desenvolvimento de novos materiais vêm ocorrendo devido a crescente necessidade de se obter materiais que combinem melhor qualidade, menor custo e maior rendimento com um menor consumo de energia e apresentem maior aplicabilidade. Esses avanços têm como principal objetivo a obtenção de materiais que apresentem propriedades otimizadas para aplicações específicas (MOTA, 2010).

Um dos principais objetivos a serem alcançados no projeto de uma aeronave é a economia de peso dos componentes estruturais. Portanto, a utilização de compósitos avançados nesses projetos é uma das possíveis formas de se atingir o objetivo de redução de peso. Uma das maiores dificuldades na utilização de compósitos é a tendência que esses materiais têm à formação de vazios, ou poros, durante o processamento. A formação de porosidade no material

pode resultar em trincas no interior e na superfície dos componentes. A necessidade da produção de um compósito com baixa fração de vazios é evidenciada devido ao fato de que a porosidade em um compósito causa perda na resistência mecânica do material, já que os poros são concentradores de tensões (YAMANE, 2016).

O processo de moldagem por transferência de resina (RTM) está entre os processos mais baratos que apresentam um bom controle das propriedades e qualidade do material, principalmente nos aspectos condizentes ao controle da formação de poros durante o processamento do material. O RTM tem sido bastante empregado para a obtenção de compósitos poliméricos, principalmente quando a fração volumétrica de fibras deve ser elevada (superior a 50%), visando aplicações estruturais (BROCKS, 2011).

Com relação a aplicação estrutural primária, a utilização de materiais que apresentem um bom comportamento mecânico é essencial. Portanto, para a produção de peças utilizadas na indústria aeronáutica, por exemplo, o conhecimento e estabelecimento da influência da porosidade na resistência de compósitos poliméricos são parâmetros de grande importância (CANDIDO, ALMEIRA, REZENDE, 2000).

Ensaio de tração, compressão e cisalhamento vêm sendo utilizados para a caracterização mecânica dos compósitos poliméricos, a fim de se avaliar o desempenho estrutural e a aplicabilidade desses materiais na área aeronáutica. A resistência ao cisalhamento interlaminar é um parâmetro importante a ser determinado na utilização de compósitos poliméricos na fabricação de componentes estruturais, pois este ensaio permite analisar a adesão interfacial. Além do mais, o aumento do volume de vazios tem como efeito reduzir ainda mais a resistência dos compósitos a alguns tipos de esforços, como o cisalhamento interlaminar. Por isto, é de extrema importância o controle da presença de vazios em estruturas utilizadas para a aplicação aeronáutica (REZENDE, 2002).

Dessa forma, o presente trabalho visa analisar a formação de vazios e o comportamento mecânico de compósitos híbridos, a fim de se avaliar a aplicabilidade desses materiais na indústria aeronáutica.

2 MOTIVAÇÃO

Os compósitos híbridos apresentam uma importante possibilidade de aplicação industrial, considerando a economia de combustível fóssil (baixa massa específica), o equilíbrio de propriedades mecânicas e térmicas, somando principalmente na redução de custo com a substituição da fibra de carbono por tecidos de fibra de vidro, que é aproximadamente 15 vezes mais barata. Portanto, torna-se importante a caracterização da formação de vazios durante o processamento de compósitos híbridos e sua respectiva influência no comportamento mecânico durante cisalhamento interlaminar para que se possa avaliar a viabilidade da aplicação de compósitos híbridos carbono/vidro/epóxi no setor aeronáutico. Este trabalho também visa contribuir com a área de compósitos híbridos, uma vez que não foram encontrados trabalhos na literatura focados na análise de porosidade e na análise cisalhamento interlaminar de compósitos híbridos vidro/carbono considerando a influência da ordem de empilhamento das camadas de cada tecido na formação de porosidade e, conseqüentemente, nas propriedades do compósito híbrido.

3 OBJETIVO

O presente trabalho tem como principal objetivo a análise e comparação da formação de vazios e analisar sua influência na resistência interlaminar de compósitos híbridos com diferentes ordens de empilhamento. A análise da porosidade será feita utilizando a técnica de digestão ácida e pela técnica de microscopia óptica de superfície para qualificação e quantificação dos vazios. Enquanto a análise do comportamento mecânico será realizada por meio da realização do ensaio *interlaminar shear strength* (ILSS).

Levando em consideração as necessidades das investigações do presente trabalho, os objetivos específicos incluem:

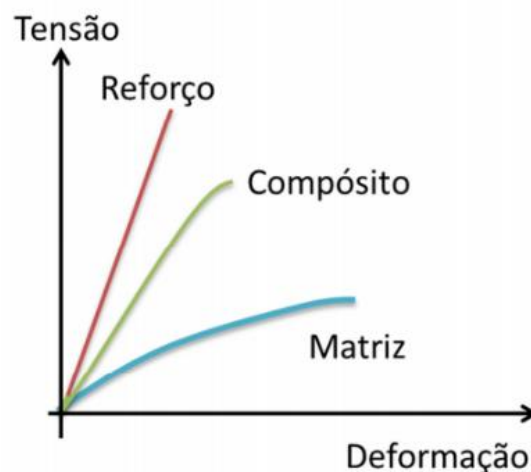
- Obtenção de 4 compósitos poliméricos reforçados com fibras, sendo 1 laminado reforçado apenas com fibra de vidro e 1 apenas com fibra de carbono e 2 laminados híbridos com 50 % (v/v) de proporção fibra de carbono/vidro com diferentes ordens de empilhamento;
- Análise da formação de vazios nos compósitos Híbrido 1, Híbrido 2, Fibra de Carbono e Fibra de Vidro, comparando a fração de poros e o diâmetro de poros;
- Análise da influência de porosidade na resistência interlaminar dos materiais estudados;
- Comparar o desempenho mecânico dos compósitos híbridos obtidos com o desempenho do compósito de fibra de carbono e do compósito de fibra de vidro.
- Analisar a viabilidade da utilização dos compósitos híbridos estudados na aeronáutica;

4 REVISÃO DA LITERATURA

4.1 COMPÓSITOS

Os compósitos são materiais multifásicos formados pela união de dois ou mais materiais, denominados como reforço e matriz e estes são separados por interfaces distintas. A união de dois ou mais materiais para a obtenção de um compósito é realizada visando a obtenção de um novo material com propriedades únicas e/ou intermediárias aos materiais que o compõe, como ilustrado na Figura 2, podendo apresentar uma combinação das melhores propriedades de suas fases constituintes. Assim, o compósito apresenta um desempenho estrutural apropriado para aplicações específicas (MOTA, 2010; MONTICELI et al, 2017).

Figura 2- Ilustração das propriedades mecânicas de um compósito.



Fonte: Monticeli et al. (2017).

Como pode ser observado na Figura 2, as propriedades dos compósitos são dependentes de seus constituintes, matriz e reforço, e da interface formada entre eles que está diretamente relacionado com a transferência de tensão fibra/matriz. Essas propriedades dependem também da geometria do reforço, da fração volumétrica e da interação físico-química entre as fases, contínua e dispersa (LEITE, MIRANDA, CESAR, 2017). Uma vantagem da utilização dos compósitos é a possibilidade de se obter ou se ajustar uma propriedade específica desejada para determinada aplicação, através da escolha dos materiais envolvidos (GUIMARAES, 2018).

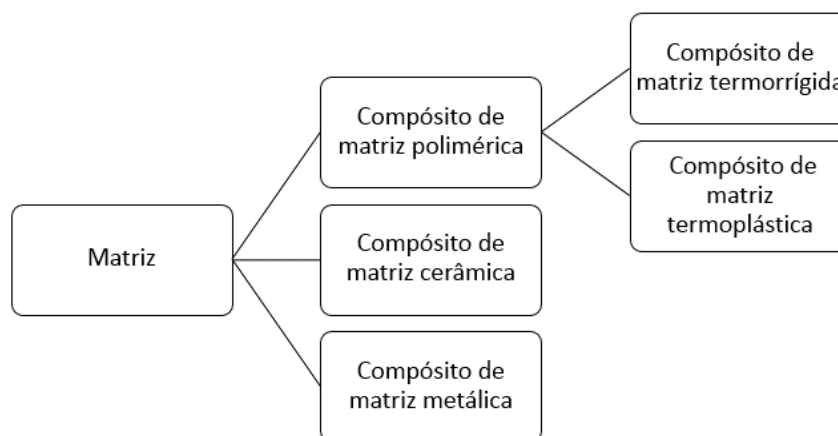
Os materiais compósitos podem ser classificados pelo tipo de matriz que pode ser metálica, polimérica ou cerâmica ou pelo tipo de reforço que pode ser particulado ou fibroso (NOHARA, 2007).

4.2 MATRIZ

A matriz é a fase contínua, responsável pela união do reforço, pela transferência de carga para os reforços e pelo acabamento do material (CALLISTER, 2002; TARGA, 2011). A matriz tem como função exercer a proteção a abrasão, proteção a danos de degradação de natureza física ou química e envolver o reforço e, conseqüentemente, dar formato à peça. Rezende *et al.* (2011) afirmaram que a matriz é a parte que proporciona as características de ductilidade e tenacidade ao compósito. O material utilizado como matriz pode ser de natureza polimérica, metálica ou cerâmica. Dentre as possibilidades de matrizes, as poliméricas se destacam por apresentarem uma maior afinidade aos reforços fibrosos. Além disso, os materiais compósitos de matriz polimérica, no geral, são mais leves que os materiais compósitos de matriz metálica, portanto, são uma excelente alternativa para diversas aplicações (REZENDE et al., 2011).

As matrizes poliméricas são formadas por macromoléculas que são constituídas por unidades repetitivas chamadas de monômeros. Esses monômeros são unidos por ligações fortes e as ligações entre as moléculas são mais fracas. Estas matrizes podem ser divididas em duas categorias principais: as matrizes termoplásticas e as termorrígidas (BATISTA, 2015; MOTA, 2017). A Figura 3 representa uma possível classificação de matrizes.

Figura 3 - Classificação de matrizes utilizadas em compósitos.



Fonte: Autor.

As matrizes termorrígidas são as mais utilizadas no processamento de compósitos para as mais variadas aplicações, devido a facilidade de processamento, permitindo uma boa

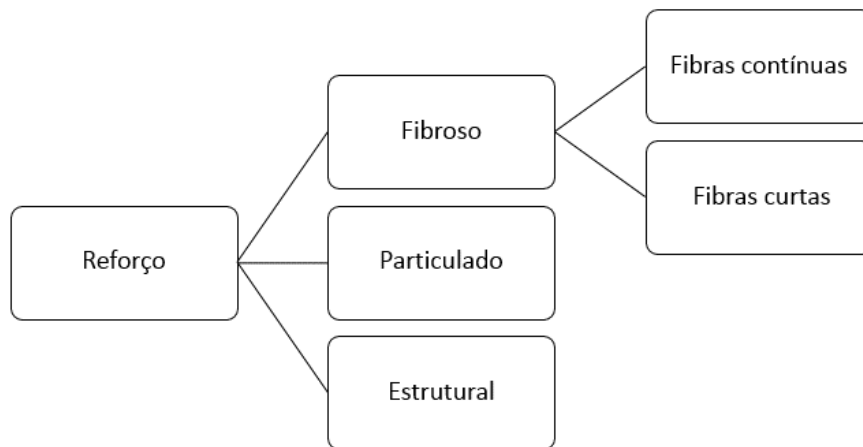
molhabilidade dos reforços durante o processamento do compósito. Além disto, essas matrizes apresentam uma boa combinação de propriedades como baixo peso específico, elevada rigidez e resistência mecânica. Estas matrizes apresentam alta disponibilidade em uma ampla variedade de tipos e custos, tornando-se atrativa para a fabricação de compósitos (MOTA, 2017).

Dentre as matrizes termorrígidas, a resina epóxi é a mais utilizada na fabricação de compósitos avançados, pois ela apresenta melhores propriedades mecânicas e térmicas quando comparada com outras resinas poliméricas. De acordo com Brocks (2011), a resina epóxi apresenta características interessantes como baixa viscosidade e uma melhor tenacidade, quando comparada com outras matrizes termorrígidas. A baixa viscosidade é uma característica necessária para o processamento por infusão, pois facilita a impregnação de todo o reforço, garantindo uma boa adesão matriz/reforço. E uma boa tenacidade é essencial para que a carga aplicada na matriz seja redistribuída constantemente (BROCKS, 2011; BATISTA, 2015).

4.3 REFORÇO

O reforço é a fase dispersa do compósito e apresenta a responsabilidade estrutural, ou seja, é a fase que suporta os esforços dos quais o compósito está sujeito. Dessa forma, a fase dispersa dos compósitos deve apresentar elevada resistência mecânica, deve elevar a resistência térmica e condutividade do compósito. Os reforços de compósitos poliméricos podem ser formados por partículas ou por diferentes tipos de fibras. As primeiras fibras utilizadas para reforçar compósitos avançados foram as de vidro. Porém, o resultado esperado para a aplicação na indústria aeronáutica só foi obtido com o desenvolvimento das fibras de carbono que apresentam elevada rigidez e resistência mecânica (VIDAL, 2017). A Figura 4 mostra um esquema de classificação de reforços.

Figura 4 - Esquema de classificação de tipos de reforços.



Fonte: Autor.

Como mostrado na Figura 4, os reforços podem ser fibrosos, particulados ou estruturais, dentre eles o mais utilizado na fabricação de compósitos poliméricos reforçados é o fibroso. Uma maneira de se classificar os reforços fibrosos é de acordo com o comprimento da fibra, portanto, dividindo-se em fibras contínuas e descontínuas. Essa classificação é importante, pois a interface entre a fibra e a matriz é um fator de grande importância para a transmissão da carga aplicada no compósito. Em geral, compósitos de fibras contínuas apresentam uma melhor interface e são mais aplicadas no setor industrial aeronáutico (CALLISTER, 2002; BROCKS, 2011; Monticeli et al., 2019b).

Existem diversos fatores que podem influenciar as propriedades mecânicas dos materiais compósitos fibrosos, dentre eles, pode-se destacar a orientação da fibra com relação à direção da carga aplicada, a quantidade de poros no material e a fração volumétrica de reforço no compósito. Esse último fator é de extrema importância pois, no geral, o aumento da quantidade de reforço promove um aumento das propriedades mecânicas; por outro lado, uma quantidade exagerada de reforço permite que as fibras se aglomerem com maior facilidade. Dessa forma, ocorre uma falha na dispersão de fibra na matriz, gerando um material não homogêneo, aumentando a fragilidade do material nas áreas em que há pouca quantidade de fibra (SANTOS, 2018).

4.4 INTERFACE

A interface é a fronteira formada entre a matriz e o reforço no processamento do compósito. Portanto, a interface é uma região resultante da interação física e química entre esses dois componentes. Assim como a fibra e a matriz, a interface também é um parâmetro de grande importância no desempenho do material. O esforço aplicado sobre o material compósito é transferido da matriz para as fibras, ou reforço, através da interface. Sendo assim, uma boa adesão interfacial entre a fibra e a matriz é essencial para se obter elevadas propriedades mecânicas (SANTOS, 2015). Tal interface pode ocorrer naturalmente, como entre as fibras de vidro e matrizes poliméricas, ou por algum tipo de tratamento superficial, como as fibras de carbono por exemplo (NOHARA, 2007).

De acordo com Nohara e Rezende (2002), a interface pode ainda ser definida como uma superfície limitante entre a matriz e o reforço ou um plano hipotético com espessura não significativa que une a matriz e o reforço por um mecanismo de adesão (NOHARA, REZENDE, 2002).

4.5 COMPÓSITOS HÍBRIDOS

Compósito híbrido é um compósito que utiliza mais de um tipo de reforço em uma mesma matriz visando a obtenção de um novo material que apresente propriedades únicas, conceito similar ao de compósitos. Em outras palavras, pode-se dizer que um compósito híbrido é formado pela união de dois compósitos em uma mesma matriz. A obtenção de compósitos híbridos visa a sinergia das vantagens de cada material e, também, diminuir as desvantagens de cada um deles (MONTICELI, 2019). O chamado efeito híbrido positivo acontece quando o material obtido apresenta propriedades intermediárias aos compósitos que o compõem, enquanto o efeito híbrido negativo ocorre quando o compósito híbrido apresenta propriedades inferiores aos materiais não híbridos. Em muitos casos, é possível obter efeitos sinérgicos na obtenção do novo material que apresenta propriedades especiais que nenhum de seus constituintes possui isoladamente (SWOLFS et al., 2014; Ornaghi et al, 2020).

Santos (2018) afirmou que o compósito híbrido, por combinar mais de um tipo de reforço, apresenta uma melhor combinação de propriedades do que os compósitos que são formados por somente um tipo de fibra. Dessa forma, é possível esquematizar/elaborar um material compósito híbrido para determinada aplicação, combinando propriedades de diferentes materiais. Utilizando-se mais de um tipo de fibra, as propriedades de um material podem complementar o

outro, de forma a obter o resultado desejado (SANTOS, 2018; SWOLFS, 2014).

De acordo com o trabalho desenvolvido por Monticeli et al. (2019), os laminados híbridos de fibra de carbono/vidro apresentam uma sinergia quanto a impregnação, na qual uma pré-forma híbrida apresenta velocidade de fluxo aproximadamente 4 vezes maior, mantendo a qualidade da impregnação, quando comparadas as pré-formas somente de fibra de carbono, fator que seria uma importante vantagem para produção em alta escala (MONTICELI et al., 2019c).

Por outro lado, Zhang et al. (2012) apresentaram uma perda de apenas 11% na resistência a flexão para compósitos híbridos com 50 % (v/v) entre fibra de carbono/vidro. Ainda, Guermazi et al. (2014) apresentaram uma redução de 25% na resistência a tração dos compósitos híbridos com os mesmos 50 % (v/v) entre fibras de carbono/vidro. Esta perda na resistência mecânica já era esperada, considerando o menor módulo de elasticidade atribuído a fibra de vidro. Entretanto, a relação interfacial pode apresentar um comportamento diferenciado, que necessita de ensaios prévios a aplicação (ZHANG et al., 2012; GUERMAZI et al., 2014).

4.6 PROCESSAMENTO DE MATERIAIS COMPÓSITOS

Os processos utilizados para a obtenção de materiais compósitos podem ser generalizados em dois diferentes tipos: processo que utiliza um molde aberto ou molde fechado. Os processos de molde aberto apresentam como resultado apenas uma das superfícies com bom acabamento, porém, como vantagem, apresentam a possibilidade de fabricação de componentes de grandes dimensões e de geometrias complexas. Isso é possível pois a pressão exercida é reduzida ou inexistente. Já os processos de molde fechado apresentam um bom acabamento nas duas superfícies e uma ótima reprodutibilidade. Além disso, esse tipo de processo apresenta como vantagem a menor inibição de produtos voláteis, que são prejudiciais à saúde (CANDIDO, ALMEIRA, REZENDE, 2000).

Para a escolha do processo a ser utilizado na obtenção de um material compósito, deve-se considerar alguns fatores, como a geometria desejada, o tamanho da peça a ser obtida, o tipo de reforço/matriz, reprodutibilidade, o acabamento e desempenho mecânico do material. Além da classificação por tipo de molde, pode-se classificar o processamento de compósitos de outras duas formas: pelo tipo de matriz utilizada ou pelo tipo de processo utilizado na obtenção do compósito, ou seja, processamento via fase líquida, gasosa ou pelo uso de partículas sólidas (MAZUR, 2010).

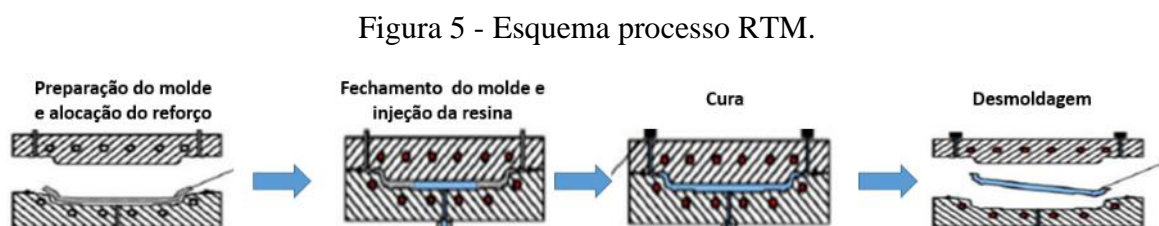
4.6.1 Moldagem por transferência de resina

Um dos métodos mais utilizado na fabricação de compósitos termorrígidos é a moldagem por transferência de resina (RTM). Esse processo destaca-se por fornecer uma maior repetitividade a um menor custo, quando comparado com outros processos utilizados para a obtenção de compósitos avançados. Sendo assim, é um processo ideal para a produção em larga escala. O sistema via RTM é operado em um sistema fechado, no qual a pressão, o vácuo e a temperatura são controlados, sem contaminação do ambiente (YAMANE, 2016).

Para que possam ser aplicados na indústria aeronáutica, os materiais compósitos devem apresentar algumas características específicas. Um dos fatores importantes a se analisar nas características desses materiais é a exposição à contaminantes durante sua fabricação. Essa exposição é prejudicial, pois impurezas podem interferir nas propriedades dos materiais. Em virtude disso, o processo por RTM se tornou muito atrativo, pois é realizado em um sistema, garantindo melhores resultados (BROCKS,2013; VIDAL, 2017).

Para a obtenção de compósitos de elevado desempenho mecânico que utilizam pré-formas secas, deve-se utilizar as resinas termorrígidas que apresentem baixa viscosidade para infusão. A razão de se utilizar uma resina de baixa viscosidade é para que ocorra uma melhor impregnação do reforço durante a injeção. Esse processo necessita de uma alta pressão de injeção, vácuo e um molde rígido, que determinará a geometria final da peça (BROCKS *et al.*, 2013; MONTICELI *et al.*, 2019; VIDAL *et al.*, 2019).

O processo RTM consiste na injeção da resina dentro de um molde fechado, no qual o material de reforço pré-formado já foi posicionado. Para facilitar a remoção de ar aprisionado no reforço e acelerar a impregnação da resina, o molde é mantido fechado e sob vácuo (MONTORO, 2011). Esse processo é esquematizado na Figura 5.



Fonte: Adaptado de Montoro (2011).

Como mostrado na Figura 5, na primeira etapa, os tecidos são cortados e colocados no

molde. Na segunda etapa acontece o fechamento do molde e a transferência de resina, com a temperatura elevada. Durante o processo de injeção, a resina flui dentro do molde. O preenchimento do molde é uma etapa importante, pois é responsável pela impregnação das fibras. Se a impregnação ocorre de forma não homogênea, a formação de vazios é facilitada, o que reduz as propriedades mecânicas dos compósitos. Na terceira etapa, a resina é curada e, por fim, o molde é resfriado e a peça de compósito é extraída (VIDAL, 2017).

O processo de injeção apresenta algumas variáveis que devem ser controladas como: temperatura de injeção, pressão de injeção e pressão de vácuo. O controle desses parâmetros apresenta grande influência na qualidade final do compósito, tendo grande impacto nas propriedades mecânicas do material. A determinação desses parâmetros depende da geometria da peça a ser fabricada e do tipo de resina utilizada. Defeitos podem ocorrer no material fabricado quando esses parâmetros não são devidamente estabelecidos e controlados. Alguns exemplos de defeitos que podem ser formados são: dobramento do tecido durante a injeção, formação de poros e formação de pontos secos em locais imprevisíveis, desalinhamento da fibras e regiões com acúmulo de resina (BROCKS et al., 2013; MONTICELI et al., 2019; MONTE VIDAL et al., 2019).

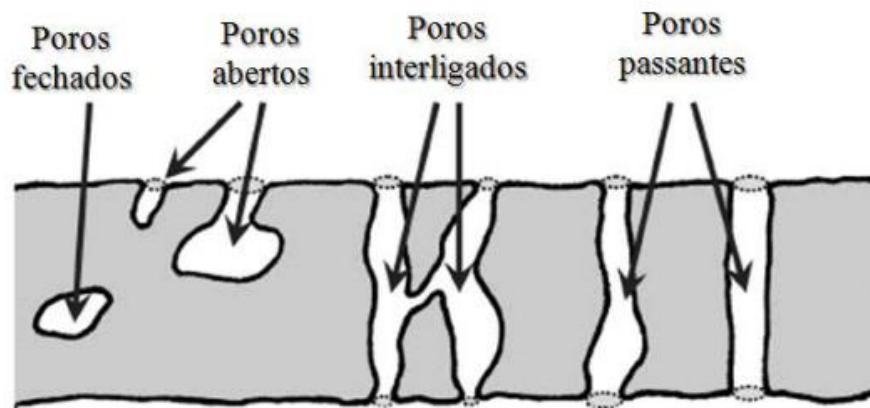
Esse processo ainda apresenta produtos com um bom acabamento e com boas características superficiais em ambas as superfícies. Por fim, é um processo mais econômico quando comparados aos métodos como autoclave, por isso cria tantos interesses nos setores industriais (SHIINO, 2015). É um processo muito utilizado principalmente quando deve-se ter uma elevada fração volumétrica de fibras (maior que 50%), pois garante impregnação adequada (BROCKS et al., 2013).

4.7 VAZIOS

Um dos maiores objetivos ao se utilizar compósitos avançados na fabricação de componentes estruturais de aeronaves é alcançar a máxima economia de peso. Porém, uma grande dificuldade encontrada no processo de obtenção desses compósitos é a formação de vazios e imperfeições que podem se formar no interior ou na superfície do material durante o seu processamento. É exigida uma excelente qualidade de fabricação na obtenção laminados estruturais aeronáuticos, sendo assim, se faz necessário o controle do teor adequado de resina e a mínima presença possível de vazios (VIDAL, 2017). A formação de vazios, ou poros, em compósitos avançados pode ocorrer devido alguns fatores como o aprisionamento de bolhas durante a impregnação de resina no processo de injeção, formação de bolsas de resina nas fibras,

pela molhabilidade incompleta da resina sobre as fibras e pela absorção de umidade do reforço durante o seu armazenamento (COSTA, ALMEIDA, REZENDE, 2001; GIESCHE, 2006). A Figura 6 representa os diferentes tipos de vazios que podem ser formados.

Figura 6 - Ilustração de tipos poros.



Fonte: Montoro (2014).

Como mostrado na Figura 6, existem diferentes tipos de poros que podem ser formados nos materiais. Os poros podem ser abertos ou fechados, interligados e passantes. Além de apresentarem diferentes formas, diversos são os fatores que podem influenciar na formação de vazios. Esses fatores podem estar relacionados com parâmetros utilizados no processamento, como também com as propriedades dos materiais utilizados (matriz e reforço) (BROCKS et al., 2013; Monticeli et al. 2020).

A viscosidade da resina é um parâmetro de extrema importância no processamento via RTM para a obtenção de uma boa impregnação. Para garantir uma boa adesão, é necessário que a resina apresente uma viscosidade baixa por tempo suficiente para promover a impregnação de toda a peça, considerando suas dimensões. Para se atingir essa baixa viscosidade, uma temperatura relativamente alta é necessária. O processamento adequado ocorre quando a resina atinge a baixa viscosidade e a mantém até o final do processo de injeção (BROCKS et al., 2013; YAMANE, 2016).

Outro fator que pode influenciar na formação de vazios no processamento de compósitos é o reforço utilizado. Tratando-se de um reforço fibroso, o volume de fibra e a arquitetura do tecido são fatores que geram resistência ao fluxo de resina. Sendo assim, os parâmetros de processamentos devem ser adequados para vencer a resistência ao fluxo de resina e garantir que ocorra a impregnação completa. Um controle não adequado dos parâmetros utilizados pode

causar um acúmulo de resina ou o aprisionamento de bolhas no processamento. Esses fatores favorecem a formação de porosidade do material e, por consequência, afetam a resistência mecânica (KEDARI et al., 2011; PARK et al., 2011; OLIVEIRA et al., 2014).

Dentre os parâmetros controlados no processo RTM, o vácuo tem a importante função de auxiliar a retirada de bolhas formadas durante o processamento que ficam aprisionadas no material (BROCKS, 2011).

A presença de vazios em compósitos estruturais pode ter efeitos significativos, considerando que os vazios são concentradores de tensões, e conseqüentemente, possíveis pontos de nucleação de trincas que durante a vida útil do componente podem se propagar degradando suas propriedades e, possivelmente, levando a fratura do componente. Dessa forma, a presença de poros em compósitos afeta a resistência e a rigidez do material, além de diminuir a vida em fadiga. Para a aplicação aeronáutica, os materiais devem apresentar resistência mecânica elevada assim como vida em fadiga; dessa forma, compósitos com grandes quantidades de vazios são inadequados para esta aplicação (MONTORO, 2011; SIQUEIRA, 2016).

Com isso, fica evidente a importância do conhecimento e estabelecimento da influência da porosidade na resistência de compósitos poliméricos na qualificação das peças aeronáuticas, considerando a elevada solicitação mecânica, existe um limite de fração volumétrica de vazios de 2% para compósitos estruturais utilizados em aeronaves (MONTORO, 2011).

4.8 COMPORTAMENTO MECÂNICO

Os materiais compósitos com aplicação aeronáutica devem apresentar boas propriedades mecânicas para suportarem os esforços pelos quais são submetidos. Dessa forma, antes de se utilizar um material para a fabricação de um componente estrutural de uma aeronave deve-se fazer uma boa análise de algumas propriedades (VIDAL, 2017).

4.8.1 Resistência ao cisalhamento interlaminar

A resistência ao cisalhamento interlaminar é um parâmetro de extrema importância a ser determinado na utilização de compósitos poliméricos na fabricação de componentes estruturais (COSTA, ALMEIDA, REZENDE, 2001).

A influência da porosidade nas propriedades mecânicas dos compósitos é bastante pronunciada na resistência ao cisalhamento interlaminar, em que as propriedades mecânicas da

matriz exercem maior influência sobre o comportamento do compósito. A resistência interlaminar desses materiais diminui com o aumento de volume de vazios. Sendo assim, é de extrema importância analisar a quantidade de vazios e a resistência ao cisalhamento interlaminar do material para verificar a viabilidade da aplicação do compósito estudado na fabricação de estruturas do setor aeronáutico (VIDAL, 2017).

O ensaio de cisalhamento interlaminar (ILSS) tem como finalidade determinar a tensão de cisalhamento interlaminar de compósitos reforçados. Esse ensaio também é adequado para avaliar a adesão entre as camadas de um compósito e detectar problemas na interface formada pela interação dos constituintes (BOTELHO, REZENDE, 2002).

5 MATERIAIS E MÉTODOS

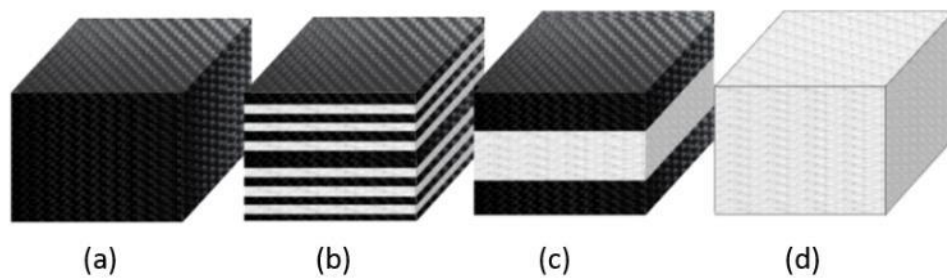
5.1 MATERIAIS UTILIZADOS

Os materiais processados, analisados e ensaiados foram:

- Compósito de fibra de carbono (CFC) e resina epóxi;
- Compósito de fibra de vidro (CFV) e resina epóxi;
- Híbrido 1: Compósito híbrido formado com tecidos intercalados de fibra de carbono e fibra de vidro (50% v/v) com resina epóxi;
- Híbrido 2: Compósito híbrido de fibra de carbono e fibra de vidro (50% v/v) com resina epóxi com os tecidos distribuídos da seguinte maneira: 4 camadas de fibra de carbono, 6 camadas de fibra de vidro, 4 camadas de fibra de carbono.

A Figura 7 ilustra a composição de cada um dos compósitos, principalmente os laminados híbridos intercalado (Híbrido 1) e em bloco (Híbrido 2). Os tecidos de fibra de vidro utilizados foram *non-crimp fabric* (NCF) biaxial (0/90) da *Barracuda*[®] e os tecidos de fibra de carbono fora do tipo *plain weave* tramado (1 x 1) da *Hexcel*[®]. A Resina epóxi utilizada para todos os laminados foi a PRISM EP 2400 da *Solvay*[®].

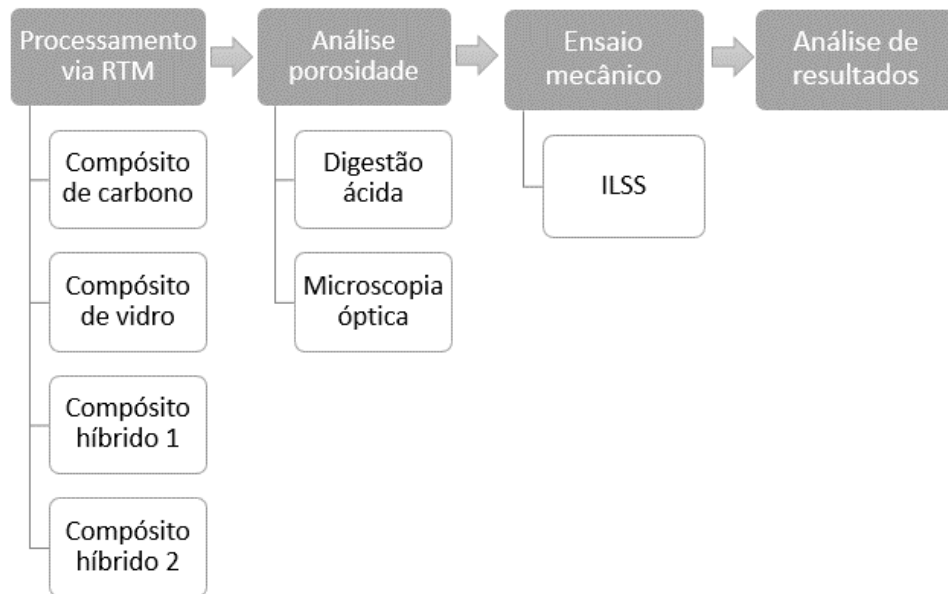
Figura 7- Empilhamento dos compósitos laminados: (a) compósito de fibra de carbono; (b) Híbrido 1; (c) Híbrido 2; (d) compósito de fibra de vidro.



Fonte: Autor.

As arquiteturas dos compósitos híbridos foram escolhidas mantendo a simetria dos laminados, sendo o Híbrido 1 com o máximo de interface híbrida e o Híbrido 2 com o mínimo, de forma que será possível avaliar a influência da interface híbrida. A Figura 8 representa o fluxograma das etapas e processos realizados para o desenvolvimento desse trabalho.

Figura 8 - Fluxograma dos processos realizados.



Fonte: Autor.

5.2 PROCESSAMENTO DOS COMPÓSITOS

Os 4 compósitos estudados foram processados por RTM, sendo CFC – compósito de fibra de carbono, CFV – compósito de fibra de vidro, Híbrido 1 – compósito híbrido 1 e Híbrido 2 – compósito híbrido 2. Os parâmetros utilizados para a obtenção dos compósitos foram: pressão de injeção de 2,5 bar, vácuo de 500 mbar, temperatura de injeção de 120°C e temperatura de cura de 180°C por 120 minutos. O primeiro passo para a realização do processo RTM foi a preparação do molde com a pré-forma. Posteriormente, o molde foi fechado e os gases do seu interior foram removidos utilizando uma bomba de vácuo, só então a resina foi injetada utilizando a injetora com os parâmetros de pressão, vácuo e temperatura controlados. Após a impregnação do reforço, passa pelo *trap* de armazenamento de resina restante do processo. Por fim, é feita a desmoldagem. O equipamento utilizado se encontra no laboratório de processamento de compósitos da FEG/UNESP. A Figura 9 esquematiza o maquinário utilizado e as etapas do processo RTM.

Figura 9 - Esquema do processamento via RTM.



Fonte: Brocks et al. 2013.

Todas as análises térmicas (termogravimetria, calorimetria exploratória diferencial dinâmica e isotérmica) e de viscosidade para determinação dos parâmetros do processo foram determinadas de acordo com trabalhos anteriores (MONTE VIDAL et al., 2019; MONTICELI et al., 2019c).

5.3 ANÁLISE DE FRAÇÃO VOLUMÉTRICA DE VAZIOS

5.3.1 Digestão ácida

A fração de vazios foi determinado pela técnica de digestão ácida da matriz polimérica em ácido sulfúrico, segundo a norma ASTM D 3171. A partir desse método, a matriz é digerida, restando somente o reforço (fibra).

Nesse processo, as amostras foram mantidas submersas em ácido sulfúrico a 150°C por 3 horas, com uma posterior adição de solução com 50% de água oxigenada e 50% de água destilada. Após ocorrer o processo de digestão, a solução obtida é filtrada a vácuo e a fibra é lavada com água destilada e acetona. O resultado da digestão ácida é a obtenção da fibra separada, uma vez que a matriz é a parte digerida. Esse resíduo da digestão ácida, contendo o

reforço em fibra não dissolvido, foi filtrado, lavado, seco e pesado. Realizando a pesagem do compósito antes do processo e a pesagem do material obtido após o processo, pode-se obter a massa inicial (compósito) e a massa final (fibra). A densidade da resina (matriz) já é conhecida, portanto, com a obtenção das massas iniciais e finais, pode-se calcular o volume percentual de fibra (reforço) e o volume percentual de matriz. E, assim, é possível calcular a fração volumétrica pela diferença do somatório da fração de reforço e matriz e 100 %. As Eq. (1), (2) e (3) descrevem os métodos numéricos utilizados.

$$Vr = \frac{m_f}{m_i} \cdot \frac{\rho_c}{\rho_r} \cdot 100 \quad (1)$$

$$Vm = \frac{m_i - m_f}{m_i} \cdot \frac{\rho_c}{\rho_m} \cdot 100 \quad (2)$$

$$Vv = 100 - (Vm + Vr) \quad (3)$$

Onde:

Vr = volume percentual de reforço (%);

Vm = volume percentual de matriz (%);

Vv = volume percentual de vazios (%);

ρ_c = massa específica do compósito (g/cm^3);

ρ_r = massa específica do reforço (g/cm^3);

m_i = massa inicial da amostra de compósito (g);

m_f = massa final do reforço depois da digestão (g);

ρ_m = massa específica da matriz (g/cm^3);

5.3.2 Análise microscópica da fibra resultante da digestão ácida

Após a realização do processo da digestão ácida, foi feita uma análise qualitativa das fibras no microscópio Zeiss Stemi 2000. O material analisado foi o resultante do processo de digestão ácida, ou seja, apenas a fibra, uma vez que a matriz foi digerida no processo. Essa análise microscópica foi realizada para avaliar a qualidade da digestão e procurar possíveis defeitos da aplicação da técnica. A análise foi realizada no laboratório de microscopia ótica da FEG/UNESP.

5.3.3 Microscopia óptica de superfície

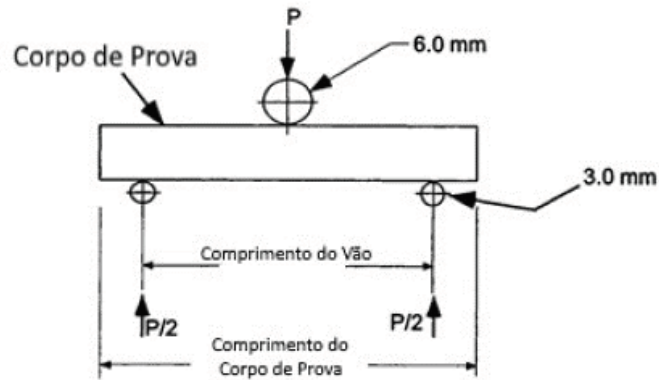
A microscopia óptica de superfície é uma técnica de análise de porosidade que tem como objetivo estudar a porosidade ao longo da espessura dos compósitos. Primeiramente foi realizado o preparo da amostra a ser analisada. O preparo da amostra teve início com a realização do embutimento em baquelite. Os parâmetros utilizados para o embutimento foram: temperatura de cura de 170°C (menor do que a temperatura de degradação dos compósitos = 300°C) e tempo de processamento de 7,5 min. Após o embutimento, foi realizada uma sequência de lixamento utilizando as lixas d'água de 400 até 2000 *mesh*, sendo utilizado água como lubrificante. A cada lixamento, a peça foi medida com um micrômetro e projetor de superfície para observar se o nivelamento estava correto. Em seguida, o polimento das amostras foi realizado para retirar os riscos gerados pelo lixamento, de modo a permitir a análise no microscópio óptico da Zeiss Axio imager 72.m (localizada no Laboratório de imagens de materiais LAIMat/FEG/UNESP). A sequência de polimento foi: pano de polimento DIAMAT com suspensão de diamante de 6 µm e depois de 1 µm; e pano de polimento CHEM-POL com suspensão de 0,05 µm de alumina. O polimento foi realizado a fim de se obter um seccionamento de 10 microns de espessura, de modo a permitir a análise no microscópio. As seções de polimento e lixamento foram realizadas na politriz da ALLIED MetPREP 3TM PH-3TM (localizada no LAIMat/FEG/UNESP).

Após o preparo das amostras, estas foram analisadas no microscópio óptico e submetidas a uma sequência de fotos da superfície (ao longo da espessura). O microscópio utilizado apresenta uma base locomotora, que permite a movimentação da peça sem necessidade do manuseio do operador, evitando erros e permitindo que a peça seja fotografada por completo. Feito o sequenciamento de fotos, utilizou-se o *software ImageJ* para tratar as imagens. O *software* apresenta diversas ferramentas de análise e foram escolhidas duas para a análise da porosidade, sendo: a medição de fração de poros em cada superfície e diâmetro de poro.

5.4 ENSAIO MECÂNICO

O ensaio de cisalhamento interlaminar (ILSS) determina a tensão máxima de cisalhamento interlaminar e foi conduzido com base na norma ASTM D2344. A Figura 10 representa o corpo de prova, o suporte e a aplicação da carga no ensaio ILSS.

Figura 10 - Esquematização do corpo de prova e suportes utilizados no ensaio ILSS.



Fonte: ASTM 2344 (2006).

O ensaio ILSS foi realizado utilizando-se os seguintes parâmetros: velocidade de 0,5 mm/min e célula de carga de 5kN. Os corpos-de-prova apresentara a seguinte dimensão: 18 mm x 6 mm x 3 mm, seguindo a norma ASTM 2344. Foram ensaiados 5 corpos de prova para cada um dos 4 compósitos. O equipamento utilizado foi a máquina universal de ensaios Shimadzu AG-X localizada no laboratório de ensaios mecânicos DMT/FEG/UNESP.

6 RESULTADOS E DISCUSSÕES

6.1 DIGESTÃO ÁCIDA

O ensaio de digestão ácida foi realizado com o intuito de determinar a fração volumétrica do reforço e da matriz nos laminados processados para então, calcular a fração volumétrica de vazios nos compósitos. As fibras resultantes deste processo foram novamente pesadas e a massa foi convertida em porcentagem volumétrica do compósito de acordo com as Eqs. (1), (2) e (3). Foram feitas 3 medidas de porosidade para cada compósito e depois foi calculada a média entre os 3 valores obtidos. Os resultados de fração volumétrica de vazios estão apresentados na Tabela 1.

Tabela 1 - Resultados da digestão ácida

Compósito	Porosidade 1 [%]	Porosidade 2 [%]	Porosidade 3 [%]	Média [%]	Desvio Padrão
CFC	2,35	5,31	2,15	3,27	1,77
CFV	0,64	0,59	0,46	0,56	0,09
Híbrido 1	3,64	2,44	3,02	3,03	0,60
Híbrido 2	2,03	2,06	2,18	2,09	0,08

Fonte: autor.

Os resultados da Tabela 1 mostram que o compósito de fibra de carbono (CFC) foi o laminado que apresentou maior fração de vazios, enquanto o compósito de fibra de vidro (CFV) resultou na menor fração volumétrica de vazios, evidenciando a facilidade de impregnação na fibra de vidro. Isso pode ser justificado pelo fato de a fibra de carbono apresentar uma maior resistência ao fluxo de resina e o menor diâmetro das fibras de carbono resulta em um maior densificação de fibras e, ao mesmo tempo, menor espaçamento entre os filamentos para impregnação, dificultando o fluxo de impregnação (Monticeli et al., 2019c).

Pode-se perceber o quanto a presença do vidro favorece a diminuição de vazios, especialmente para o compósito Híbrido 2. Como visto na literatura, a fibra de carbono apresenta maior dificuldade de obter uma boa impregnação, ou seja, o laminado formado com fibra de vidro tende a formar menor fração de vazios. No laminado Híbrido 1, o reforço ainda apresentou certa resistência ao fluxo de impregnação, considerando o resultado de média de poros próximos ao CFC. Portanto, a ordem de empilhamento escolhida para o Híbrido 2 favorece a impregnação da resina, pois a maior concentração de fibra de vidro no meio do laminado gera um caminho facilitado de impregnação quando comparada com a empilhamento

intercalada do Híbrido 1, resultando na concentração de uma região com maior facilidade de impregnação e, por consequência, menor diminuição na formação de poros comparados ao CFC. Segundo Calado *et al.* (1996), em um fluxo de injeção de tecidos com características de impregnação diferentes, o tecido com menor resistência ao fluxo (fibra de vidro) gera um segundo eixo de impregnação na vertical, fator que aumenta a qualidade de impregnação no tecido de menor permeabilidade (fibra de carbono). Esse comportamento foi confirmado experimentalmente pelas análises do compósito Híbrido 2.

O cálculo do desvio padrão para as amostras analisadas é um parâmetro de extrema importância na análise estatística, pois ele mede a homogeneidade da distribuição dos dados, portanto, quando maior o desvio padrão maior é a dispersão em torno da média. Tratando-se da média de vazios, é importante que os resultados obtidos para um mesmo compósito sejam homogêneos (desvio padrão baixo) que significa mesma característica de impregnação em todo o laminado.

Analisando os resultados da Tabela 1, fica evidente que o CFC, além de apresentar um elevado valor de fração volumétrica de vazios, também apresentou um elevado valor do desvio padrão. Em outras palavras, além de apresentar uma quantidade elevada de poros, essa quantidade apresenta elevada variação de uma amostra para outra, indicando uma heterogeneidade elevada de impregnação. Já o CFV apresentou os menores valores de desvio padrão, assim como os menores valores de fração de vazios, indicando a homogeneidade de impregnação na pré-forma de vidro.

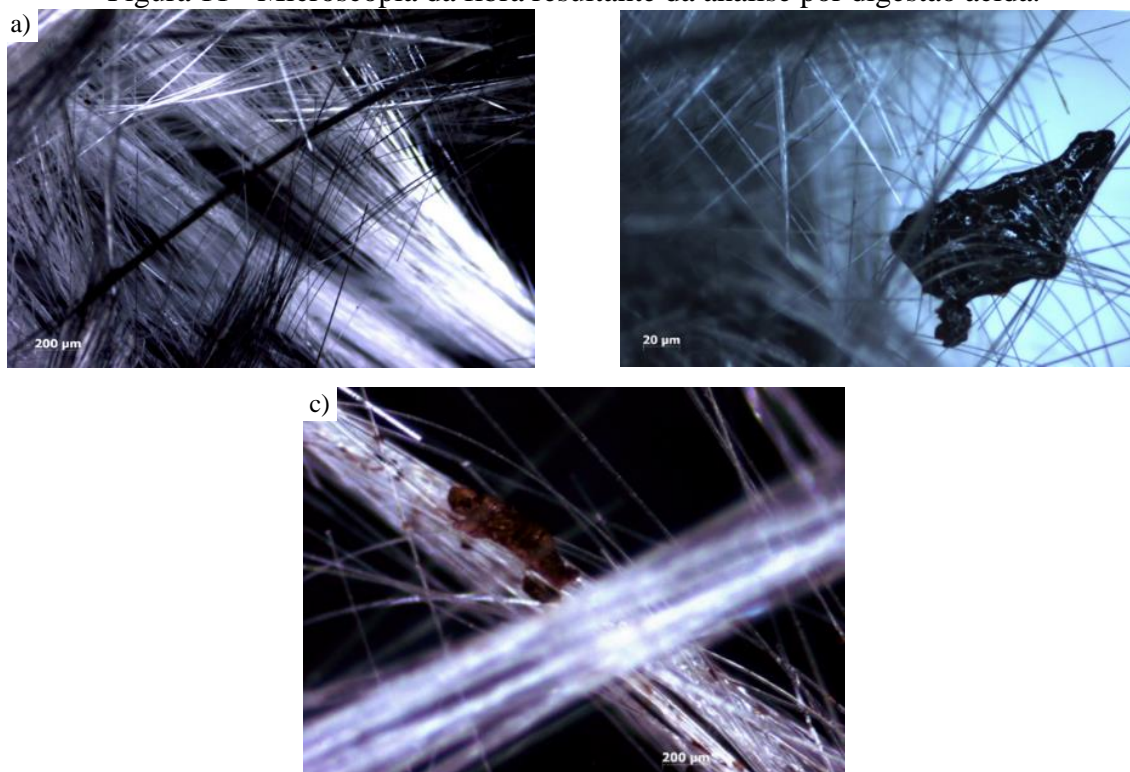
O laminado Híbrido 1 apresentou insignificante diminuição na fração volumétrica de poros, porém diminuiu a heterogeneidade de variação de poro ao longo do laminado pela análise do desvio padrão, comparados aos resultados do laminado CFC. Por outro lado, o compósito Híbrido 2 apresentou uma melhora significativa em comparação com o carbono, pois obteve uma diminuição significativa para a fração de vazios, bem como para o valor do desvio padrão. Os resultados indicam uma sinergia quanto a formação de poros para os laminados híbridos de fibra de carbono/vidro, utilizando-se as fibras de vidro no meio do laminado.

A princípio, o laminado Híbrido 2 se destaca para a aplicação aeronáutica, visto que esse material apresentou uma fração próxima ao limite aeronáutico de 2%. O compósito Híbrido 1 com ordem de empilhamento de tecidos intercalada de fibra de carbono/vidro apresentou uma fração de vazios elevada, próxima a do CFC. A diferença entre as frações de ambos os laminados híbridos pode ser explicada pela diferença na ordem de empilhamento, apesar dos dois compósitos terem sido processados com os mesmos materiais (fibra de carbono e vidro) e nas mesmas proporções (50% v/v), a forma com a qual eles estão organizados (empilhados)

interfere no fluxo de impregnação e, conseqüentemente, na formação de porosidade. O Híbrido 1 possui uma distribuição do tecido com melhor característica de impregnação (fibras de vidro) entre os tecidos de fibra carbono, mantendo a formação de vazios do segundo tecido citado. Enquanto o laminado Híbrido 2 possui uma concentração do tecido com melhor impregnação no meio do laminado, gerando uma sinergia de propriedade e um segundo fluxo de impregnação. Sendo assim, dentre os materiais analisados, o laminado Híbrido 2 é uma opção apropriada para a aplicação aeronáutica no quesito de fração de porosidade, devido à combinação das propriedades do reforço de fibra de vidro e carbono e a baixa fração de vazios apresentada.

Após os ensaios de porosidade por digestão ácida, foram feitas análises microscópicas da fibra resultantes da digestão. Nessa análise foram encontrados resíduos de resina dificilmente observados a olho nu, como pode ser observado na Figura 11. Tais resíduos de resina podem gerar erro na medição de vazios, pois ao contabilizar a massa final da fibra (somada com a resina residual) gera valores alterados de volume de fibra, resultando na alteração final de volume de poro. É importante ressaltar que os tecidos com presença de resíduo de resina foram descartados, por apresentarem elevado erro no resultado.

Figura 11 - Microscopia da fibra resultante da análise por digestão ácida.



Fonte: Autor.

A partir desse resultado, foi notada a necessidade de uma técnica diferente de análise de porosidade, devido à possibilidade de resíduo de resina na fibra mesmo após a digestão ácida, além da necessidade de caracterização de porosidade com maior número de informações, como tamanho de poro e localização ao longo do laminado. Optou-se então pela técnica de microscopia óptica de superfície para análise de vazios nos laminados.

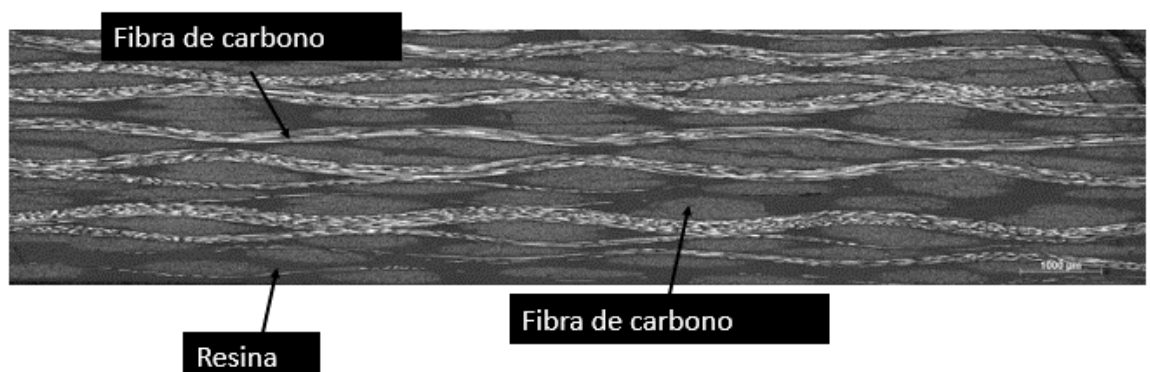
6.2 MICROSCOPIA ÓPTICA DE SUPERFÍCIE

Neste procedimento, foram realizados dois tipos de análise, uma qualitativa e uma quantitativa. Na análise qualitativa foram registradas imagens de poros encontrados nos compósitos de forma ilustrativa, enquanto na análise quantitativa utilizou-se o *software* ImageJ para processar as imagens e obter dados analíticos de porosidade (fração, tamanho e posição).

6.2.1 Análise qualitativa

Na técnica de microscopia óptica de superfície, para cada amostra foram tiradas 30 fotos (mosaico 3 x 10), de forma que, a união dessas 30 imagens representa a superfície da espessura de cada amostra por completo. A Figura 12 foi obtida a partir da união das 30 fotos tiradas para uma amostra do laminado CFC, onde é possível observar a resina, com coloração cinza mais escuro e as fibras tramadas nas direções perpendicular e paralelo ao plano de observação.

Figura 12 - Ilustração do laminado CFC ao longo de sua espessura.

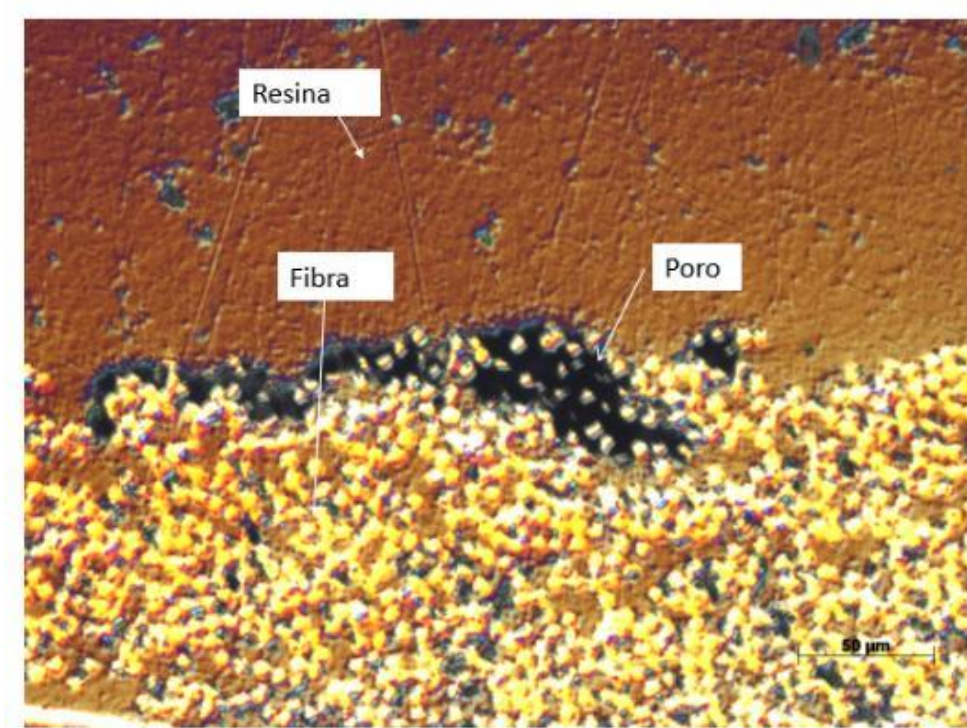


Fonte: Autor.

A Figura 13 é uma das 30 fotos que foram tiradas da amostra CFC, destacando as fibras de carbono que se encontram perpendicularmente ao plano de observação. A parte alaranjada

representa a resina epóxi e a parte mais escura foi evidenciado a presença de porosidade.

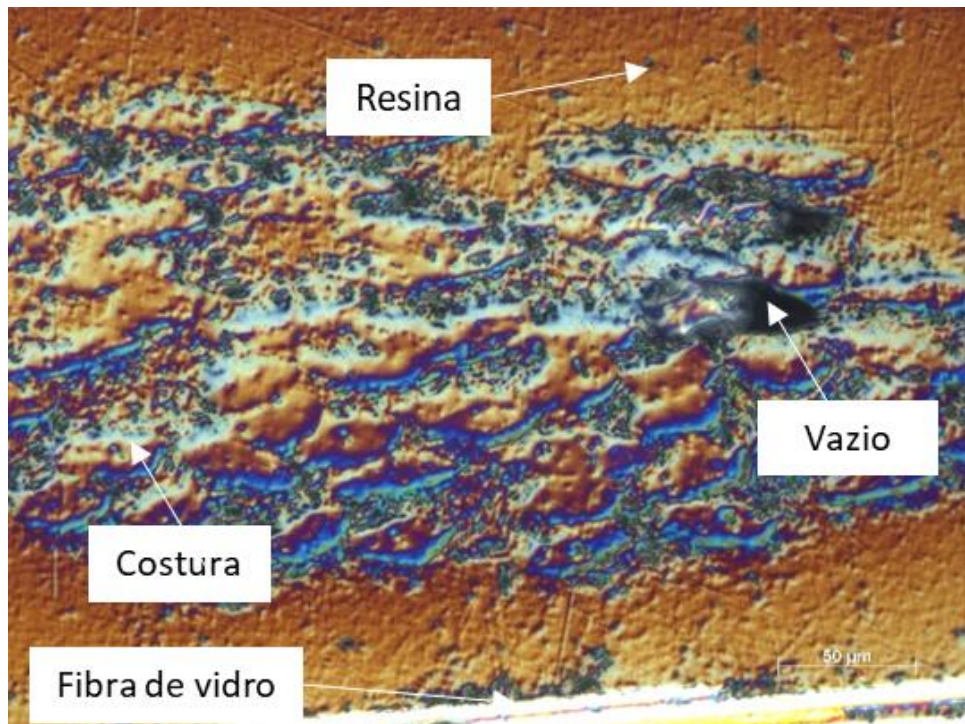
Figura 13 - Visualização da porosidade no laminado CFC.



Fonte: Autor.

A Figura 14 representa outra das 30 imagens selecionada do laminado CFV, também de caráter apenas ilustrativo e qualitativo. Nesta imagem pode-se notar um poro, a resina e as fibras de vidro na parte inferior. A maior concentração de poros nos tecidos de vidro foi encontrada na costura de poliestireno (PS), considerando a falta de interação entre o PS e a resina epóxi (SHIINO et al., 2017).

Figura 14 - Ilustração da porosidade no laminado CFV.

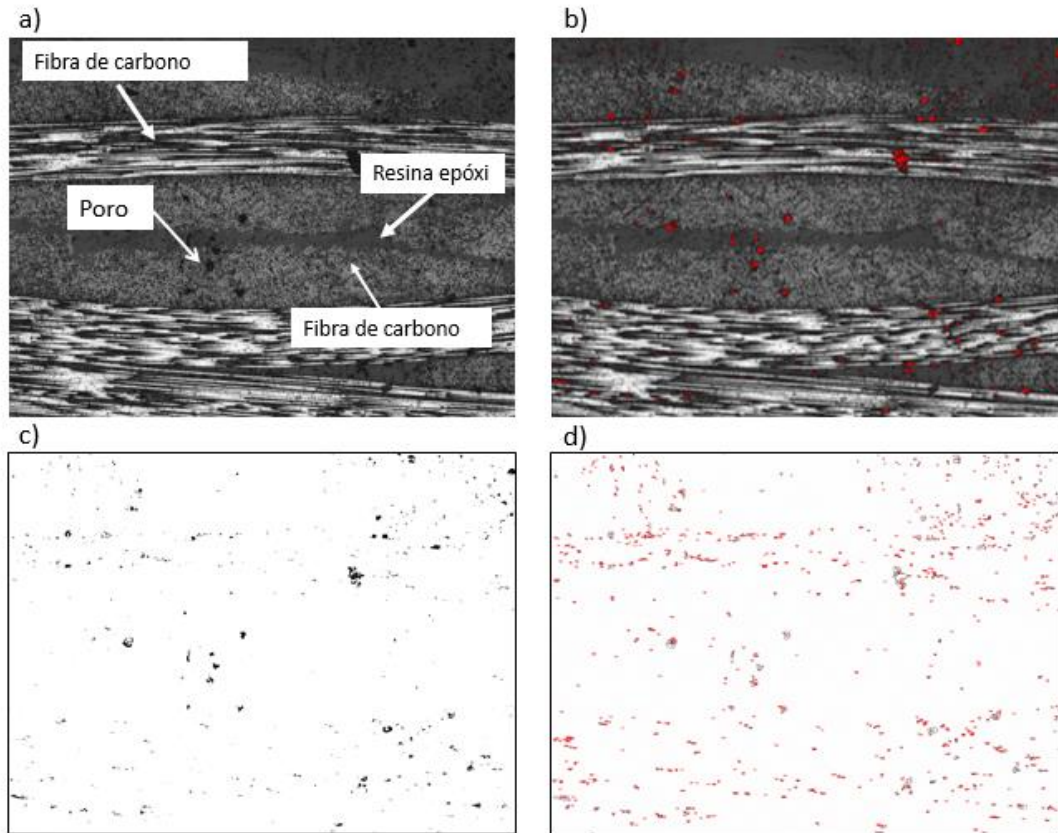


Fonte: Autor.

6.2.2 Análise quantitativa

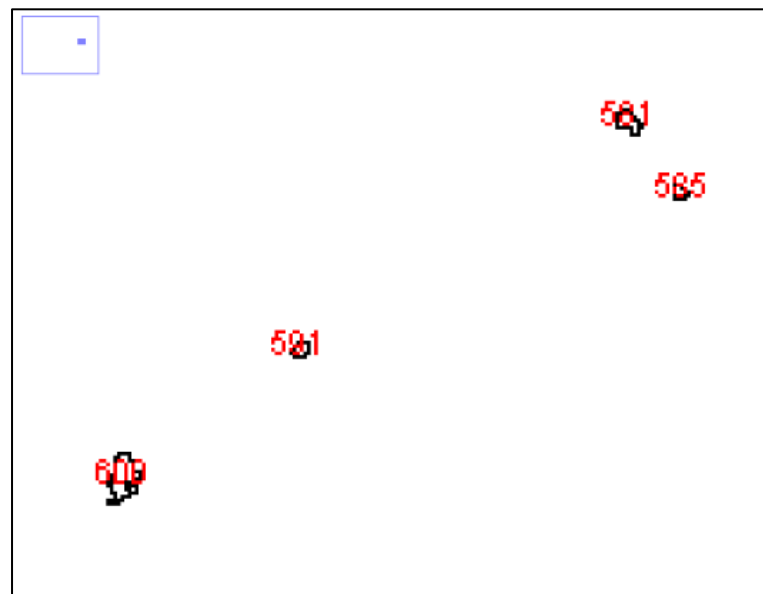
A Figura 15 representa o tratamento das imagens utilizando o *software ImageJ*. Nesse tratamento de imagens é possível destacar os poros da imagem e contabilizá-los. A Figura 15a) demonstra uma seção do compósito visto na espessura, a Fig. 15b) apresenta os poros destacados através do *threshold*, aplicado no *ImageJ*. A Figura 15c) representa os poros destacados, onde a matriz e reforço foram removidos da imagem. Finalmente, o programa associa um número para cada poro, pelo qual ele é contabilizado quanto a fração e tamanho (Fig. 15d). A Figura 16 é uma ampliação da Fig. 15d), que representa os poros enumerados. Essa numeração dos poros é realizada para identificar os dados como área e diâmetro extraídos do *software*, resultando uma tabela com dados referentes a cada poro.

Figura 15 - Tratamento de imagens no *software ImageJ* para medição de porosidade.



Fonte: Autor.

Figura 16 - Representação da Figura 8d ampliado.



Fonte: Autor.

A partir da análise feita no *ImageJ*, extraiu-se os valores de diâmetro de poro. A Tabela

2 mostra o maior e menor valor de diâmetro para cada compósito e, também, a média calculada a partir dos dados obtidos.

Tabela 2 - Resultados de diâmetro de poro

Compósito	Maior diâmetro (μm)	Menor diâmetro (μm)	Média dos diâmetros (μm)
Carbono	250	1.4	22
Vidro	224	1.9	25
Híbrido 1	143	1.5	24
Híbrido 2	220	1.7	20

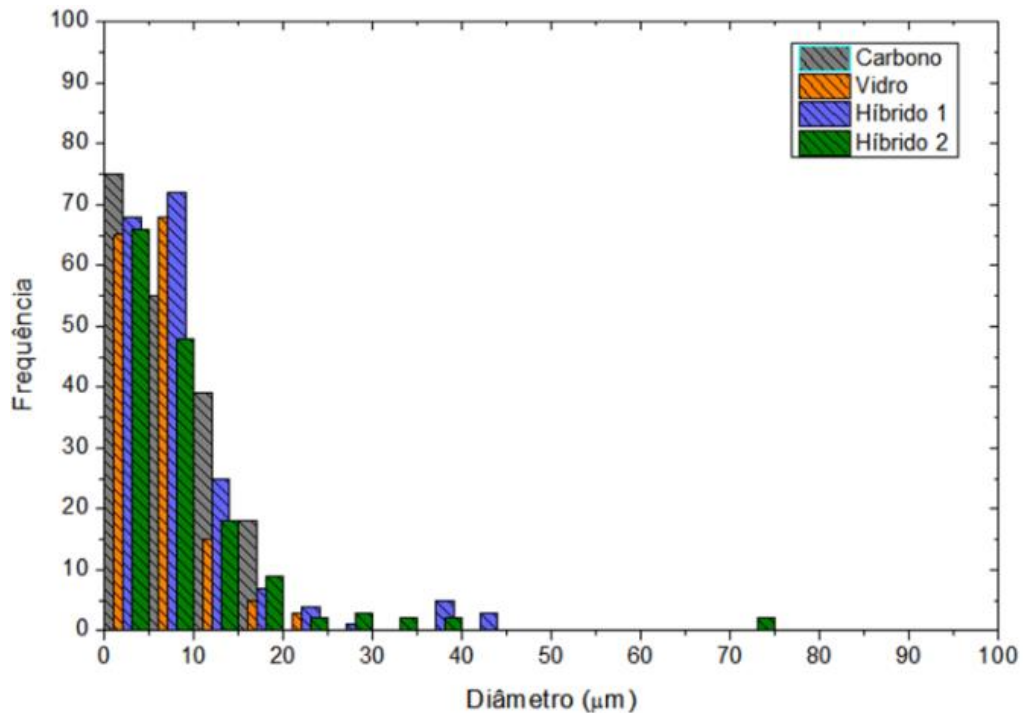
Fonte: Autor

De forma geral, os valores encontrados na Tabela 2 foram semelhantes para todos os laminados. Os valores de menor diâmetro encontrados pode ser uma limitação do método empregado, entretanto os resultados apresentados foram semelhantes aos da literatura (Hamidi et al., 2005). A única diferença encontra foi para o laminado Híbrido 1 que apresentou um menor valor do maior diâmetro de poro, comparado aos demais laminados. Os diâmetros maiores são normalmente encontrados no final do laminado, devido a diferença de pressão aplicada no sistema, fator que faz com que os poros menores coalesçam em poros maiores (Hamidi et al., 2005). Entretanto para o laminado Híbrido 1 isso não ocorreu, possivelmente devido à resistência apresentada pelo tecido que não favoreceu a movimentação da porosidade.

A partir dos dados obtidos para diâmetro de poro foi construído um histograma comparativo de distribuição de poros, apresentado na Figura 17, onde a frequência de poros foi calculada de forma relativa à fração volumétrica de poros encontrada em cada laminado.

Analisando o histograma, pode-se perceber uma alta frequência de poros com diâmetro inferior a 10 micrometros. Nota-se uma certa homogeneidade nos valores obtidos para os diâmetros dos poros formados nos 4 compósitos estudados. A partir dos valores de maior diâmetro, por exemplo, foram encontrados valores próximos para os 4 compósitos. Isso indica que a mudança de arquitetura, tipo de tecido e ordem de empilhamento dos laminados híbridos não influenciam no diâmetro dos poros formados no material. O diâmetro sofre mais influência pelo tipo de processamento e pelas propriedades da resina utilizada, como viscosidade, comparado a variação de diferentes tecidos. Por outro lado, o tipo do tecido e ordem de empilhamento afetam a fração volumétrica total de poros formada.

Figura 17 - Histograma de frequência de diâmetro de poro.



Fonte: Autor.

Utilizando-se o *software ImageJ* também foi possível obter valores de variação de porosidade na espessura de cada camada. A partir dessa análise pode-se determinar em qual região do material apresenta uma maior concentração de vazios. Os dados obtidos estão representados na Tabela 3. Para os laminados híbridos, as camadas em negrito representam os tecidos de fibra de carbono.

Analisando os resultados obtidos para a fração de vazios existente em cada camada do compósito, pode-se notar que o compósito de carbono foi aquele que apresentou maiores frações de vazios por camada, e o compósito de vidro, o que apresentou menor. Esses resultados estão de acordo com os obtidos para a digestão ácida.

Os resultados obtidos para os compósitos híbridos também confirmam as conclusões obtidas anteriormente, visto que o Híbrido 2 apresentou uma fração de vazios por camada mais baixa que o Híbrido 1 e mais próxima do compósito de vidro. Já o Híbrido 1 apresentou uma alta fração de vazios, mesmo para as partes de fibra de vidro, confirmando a presença da elevada resistência a impregnação.

Tabela 3- Dados de variação da porosidade pela espessura do compósito

Compósito de fibra de Carbono										
Camadas	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Espessura (mm)	0.3	0.3	0.3	0.3	0.3	0.3	0.3	0.3	0.3	0.3
Vazios (%)	3.6	3.3	3.9	2.3	2.0	2.3	3.5	3.9	4.2	3.9
Compósito de fibra de Vidro										
Camadas	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Espessura (mm)	0.3	0.3	0.3	0.3	0.3	0.3	0.3	0.3	0.3	0.3
Vazios (%)	1	0.6	0.6	0.7	0.7	0.6	0.6	0.8	0.9	1.0
Compósito Híbrido 1										
Camadas	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Espessura (mm)	0.3	0.3	0.3	0.3	0.3	0.3	0.3	0.3	0.3	0.3
Vazios (%)	3.6	1.4	3.3	2.0	3.3	1.5	3.2	2.3	3.8	1.6
Compósito Híbrido 2										
Camadas	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Espessura (mm)	0.3	0.3	0.3	0.3	0.3	0.3	0.3	0.3	0.3	0.3
Vazios (%)	2.5	2.1	2.2	0.6	0.6	0.4	1.1	2.0	2.6	2.3

Fonte: Autor.

Analisando os dados obtidos para os híbridos, é possível notar a diferença entre a fração de porosidade encontrada nas camadas de tecido de fibra de vidro e fibra de carbono. No Híbrido 1, as camadas de número ímpares (em negrito) representam os tecidos de fibra de carbono e resultaram nos maiores valores de fração de vazios do que as camadas de número par, tecidos de fibra de vidro. Essa diferença também é notada nos resultados obtidos para o híbrido 2, pois as camadas de 4 a 7, que representam a concentração de fibra de vidro no meio do material, apresentaram valores de fração de vazios inferiores aos valores encontrados para as camadas de 1 a 3 e 8 a 10, que representam as camadas de fibra de carbono.

Outro resultado que pode ser observado analisando os resultados obtidos para os dois híbridos é que a fração volumétrica de vazios nas camadas de fibra de vidro foram menores no compósito Híbrido 2, que apresenta a concentração de fibra de vidro no meio do material, do que nas camadas de fibra de vidro do compósito Híbrido 1, que apresenta arquitetura intercalada de camadas de fibra de carbono e vidro. Esse resultado confirma que a concentração de fibra de vidro no meio do compósito facilita o fluxo de resina e a impregnação, gerando um menor valor de poros.

Analisando os resultados obtidos para o compósito de carbono, pode-se perceber que nas camadas centrais do material apresentaram uma fração de vazios menor que as camadas mais próximas da superfície do material. Esse resultado indica que o próprio processamento já gera uma facilidade de impregnação no meio do laminado, fator que, somado a concentração da fibra de vidro nesta região, facilita a impregnação no centro do laminado, auxiliando na menor

formação de vazios.

6.3 ENSAIO DE CISALHAMENTO INTERLAMINAR (ILSS)

O ensaio de Cisalhamento Interlaminar (ILSS) foi realizado para determinar a resistência ao cisalhamento dos compósitos estudados. Este ensaio foi utilizado com o intuito de avaliar a adesão interfacial e analisar o efeito híbrido na propriedade de cisalhamento dos laminados. Após os resultados obtidos pela realização do ILSS, foi possível calcular a tensão de cisalhamento do material. A Tabela 3 apresenta os dados obtidos de tensão de cisalhamento para cada material e o respectivo desvio padrão.

Tabela 4- Resultados de tensão de cisalhamento para os compósitos

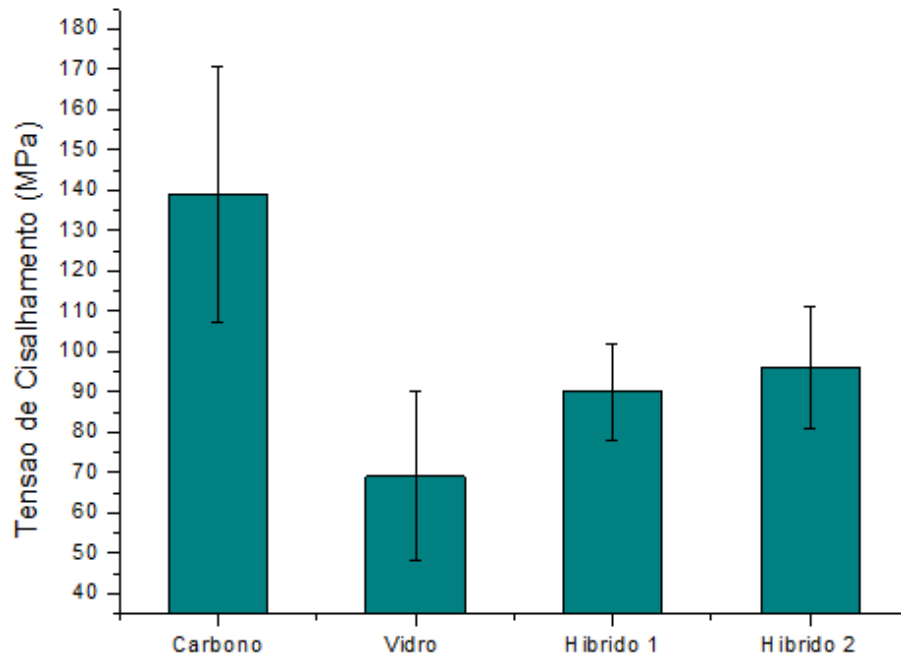
Compósito	Tensão de cisalhamento (MPa)	Desvio Padrão
Fibra de carbono	139	31
Fibra de vidro	69	21
Híbrido 1	90	12
Híbrido 2	96	15

Fonte: Autor.

A Figura 18 representa o gráfico de tensão de cisalhamento versus material, feito com base nos dados obtidos no ILSS, apresentados na tabela 3.

Foi possível notar que a fibra de carbono foi o compósito que apresentou maior resistência ao cisalhamento (139 MPa), considerando a elevada resistência de adesão interfacial entre fibra de carbono e matriz epóxi, enquanto a fibra de vidro apresentou a menor (69 MPa). Notou-se também que os valores de resistência ao cisalhamento obtidos para o Híbrido 1 (90 MPa) e para o Híbrido 2 (96 MPa) estão entre os valores obtidos para o carbono e o vidro. Esse resultado mostra a obtenção do efeito híbrido positivo, pois os compósitos híbridos apresentaram resistências intermediárias entre os valores dos compósitos de um só reforço (compósito de fibra de carbono e compósito de fibra de vidro).

Figura 18- Gráfico de tensão de cisalhamento versus material.



Fonte: Autor.

Comparando-se os resultados obtidos para os dois compósitos híbridos, nota-se que o Híbrido 2, quando comparado com o Híbrido 1, apresentou valor de resistência média maior. Essa diferença pode ser explicada pela quantidade de vazios apresentada pelos dois compósitos e pela quantidade de interfaces híbridas, visto que o Híbrido 2 apresentou uma menor fração volumétrica de vazios e que sua arquitetura consiste em uma concentração de fibra de vidro do meio do material, apresentando um número de menor de interfaces híbridas e maior número de interface de carbono (interface com maior resistência). Porém, pode-se perceber valores de resistência muito próximos para os dois híbridos, considerando o desvio padrão. Isso indica que a ordem de empilhamento de ambos os compósitos não apresenta grande influência na resistência ao cisalhamento interlaminar.

Analisando os dados de desvio padrão, pode-se perceber que o compósito CFC foi o que apresentou maior desvio, ou seja, uma maior heterogeneidade entre os resultados de resistência interlaminar obtidos entre as amostras ensaiadas. Esse resultado está diretamente relacionado com o maior volume de vazios apresentado por esse compósito, gerando uma maior flutuação dos resultados de propriedade mecânica. Entretanto, percebe-se um efeito diferenciado, pois os laminados híbridos apresentaram maior homogeneidade (menor desvio padrão) comparados aos laminados não-híbridos. Esse fato indica uma sinergia na interface híbrida que aumenta a

homogeneidade do comportamento de cisalhamento interlaminar, e é capaz de suprimir a diferença gerada pela porosidade, somente para os laminados híbridos.

Considerando as proporções de fibra de vidro e de carbono de 50 % (v/v), os laminados híbridos apresentaram uma melhoria da fração volumétrica de vazios (principalmente para o laminado Híbrido 2), comparadas ao compósito de carbono. Entretanto, a adição da fibra de vidro gerou uma queda na propriedade mecânica de cisalhamento de 35,25 % para o laminado Híbrido 1 e de 30,90 % para o Híbrido 2.

7 CONCLUSÕES

Baseado nos resultados apresentado neste trabalho, foi possível obter os laminados híbridos com diferentes ordens de empilhamento a partir do processamento via RTM e analisá-los utilizando-se as técnicas de digestão ácida, microscopia óptica de superfície e o ensaio ILSS.

O resultado da técnica de digestão ácida evidenciou que a presença de fibra de vidro nos compósitos facilita o fluxo de resina, gerando uma melhor impregnação e, portanto, menor fração volumétrica de vazios somado com uma distribuição mais homogênea. Esse fato pode ser percebido quando se compara os resultados obtidos para a fibra de vidro com os obtidos para a fibra de carbono.

No laminado Híbrido 2, notou-se a ação positiva da presença da fibra de vidro, visto que esse compósito apresentou uma baixa fração de vazios. Dessa forma, pode-se afirmar que a concentração da fibra de vidro no meio do material e a fibra de carbono nas extremidades, dentre os compósitos híbridos analisados, apresentou uma melhoria nos resultados de fração volumétrica de vazios. Entretanto, os resultados obtidos para diâmetro de poro mostram que o tipo de tecido não tem influência significativa na distribuição de diâmetro de poro, o que indica que a mudança da arquitetura e tipo de tecido não alteram a morfologia do poro e sim o tipo de processamento e resina utilizados.

Quanto aos resultados obtidos no ensaio de ILSS, obteve-se o efeito híbrido positivo, pois os compósitos híbridos apresentaram resistências intermediárias entre os valores dos compósitos de um só reforço (compósito de fibra de carbono e compósito de fibra de vidro). Em especial, o laminado Híbrido 2 apresentou uma diminuição significativa de porosidade, maior homogeneidade de distribuição de poros e menor perda em propriedade mecânica, sendo o material mais viável para aplicação aeronáutica, considerando o limite aeronáutico de fração volumétrica de vazios de 2%.

REFERÊNCIAS

ABRAHAO, A. B. R. M. *et al.* Avaliação dos parâmetros tempo, corrente e pressão na soldagem por resistência elétrica de compósitos PEI/fibras contínuas: influência na resistência mecânica. **Matéria**, Rio de Janeiro, v. 20, n. 2, p. 530-543, 2015. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/rmat/a/Z7hqMN45S73qJJcjpucsN3G/?lang=pt&format=html>. Acesso em: 06 jun. 2019.

BATISTA, N. L. **Estudo do efeito da cristalinidade nas propriedades mecânicas de compósitos termoplásticos com aplicações aeronáuticas**. 2015. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica) – Faculdade de Engenharia de Guaratinguetá, Universidade Estadual Paulista, Guaratinguetá, 2015. Disponível em: <https://repositorio.unesp.br/handle/11449/132187>. Acesso em: 28 maio 2019.

BOTELHO, E. C.; REZENDE, M. C. Caracterização mecânica de compósitos de poliamida/fibra de carbono via ensaios de cisalhamento interlaminar e de mecânica da fratura. **Polímeros**, São Carlos, v. 12, n. 3, p. 153-163, 2002. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/po/a/pGDnFTNYqdPJkWKpvT8nFVc/?lang=pt>. Acesso em: 18 jul. 2019.

BROCKS, T. **Compósito estrutural carbon/epóxi via RTM para aplicação aeronáutica: processamento e caracterização**. 2011. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Faculdade de Engenharia de Guaratinguetá, Universidade Estadual Paulista, Guaratinguetá, 2011. Disponível em: <https://repositorio.unesp.br/handle/11449/94458>. Acesso em: 07 maio 2019.

CALADO, V.; ADVANI, S. Effective average permeability of multi-layer preforms in resin transfer molding. **Composites Science and Technology**, Barking, v. 56, p. 519-531, 1996. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/0266353896000371>. Acesso em: 29 jun. 2019.

CALLISTER, W. D. **Ciência e engenharia de materiais: uma introdução**. 5. ed. São Paulo: LTC, 2002.

CAMPOS, M. C. *et al.* Caracterização da degradação superficial da interface reforço: matriz de materiais compósitos poliméricos. **Revista Ciência e Tecnologia**, Campinas, v. 19, n. 34, 2016. Disponível em: <http://www.revista.unisal.br/sj/index.php/123/article/view/458>. Acesso em: 06 jun. 2019.

CANDIDO, G. M.; ALMEIDA, S. F. M.; REZENDE, M. C. Processamento de laminados de compósitos poliméricos avançados com bordas moldadas. **Polímeros**, São Carlos, v. 10, n. 1, p. 31-41, 2000. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/po/a/3Pzt8BDsTHRwxvZQWNDc5Xq/abstract/?lang=pt>. Acesso em: 28 maio 2019.

COSTA, M. L.; ALMEIDA, S. F. M.; REZENDE, M. C. Resistência ao Cisalhamento Interlaminar de Compósitos com Resina Epóxi com Diferentes Arranjos das Fibras na Presença de Vazios. **Polímeros**, São Carlos, v. 11, n. 4, p. 182-189, 2001. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/po/a/pLpmjWyPMVJYyBLw85kfdxm/abstract/?lang=pt&format=htm>

l. Acesso em: 15 abr. 2019.

CROMER, B. M. *et al.* J. In-situ polymerization of isotactic polypropylene-nanographite nanocomposites. **Polymer**, Massachusetts, v. 80, p. 275–281, 2015. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0032386115302792>. Acesso em: 07 maio 2019.

DONG, L. *et al.* Nondestructive evaluation of forced delamination in glass fiber-reinforced composites by terahertz and ultrasonic waves. **Composites Part B: Engineering**, v. 79, p. 667-675, 2015. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1359836815003327>. Acesso em: 29 jun. 2019.

FARIA, M. C. M. *et al.* Estudo da influência do condicionamento higrotérmico nas propriedades viscoelásticas de compósitos termoplásticos. **Polímeros**, São Carlos, v. 27, p. 77-83, 2017. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/po/a/xRRHBxpMhBtLYRHwCrG3CnB/abstract/?lang=pt>. Acesso em: 06/06/2019.

GUERMAZI N.; HADDAR N.; ELLEUCH, K. GUERMAZI, N. *et al.* Investigations on the fabrication and the characterization of glass/epoxy, carbon/epoxy and hybrid composites used in the reinforcement and the repair of aeronautic structures. **Materials & Design**, Surrey, v. 56, p. 714-724, 2014. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0261306913010923>. Acesso em: 18 jul. 2019.

GUIMARÃES, B. S. S. **Estudo do tratamento superficial de fibras de carbono para aplicação no setor aeronáutico**. 2018. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação) - Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Londrina, 2018. Disponível em: <http://riut.utfpr.edu.br/jspui/handle/1/12208>. Acesso em: 07 maio 2019.

HAMIDI, Y. K.; AKTAS, L.; ALTAN, M. C. Three-dimensional features of void morphology in resin transfer molded composites. **Composites Science and Technology**, v. 65, p. 1306-1320, 2005. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0266353805000254>. Acesso em: 15 abr. 2019.

HAN, S. H. *et al.* Study on high-speed RTM to reduce the impregnation time of carbon/epoxy composites. **Composite Structures**, v. 119, p. 50-58, 2015. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0263822314004139>. Acesso em: 18 jul. 2019.

HALE J. Boeing 787 from the Ground UP. **Boeing Aeromagazine**, p- 17-23, 2006.

JALKH, E. B. B. *et al.* Síntese e caracterização das propriedades ópticas de um compósito ZTA sintetizado com Y-TZP translúcida. **Brazilian Oral Research**, São Paulo, 2017. Disponível em: <https://www.google.com/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=&cad=rja&uact=8&ved=2ahUKEwi555CW2ovyAhUGr5UCHZ8zCz0QFjAAegQIBRAD&url=https%3A%2F%2Fpositorio.usp.br%2Fitem%2F002862569&usg=AOvVaw05cpnP-i10BY4McuDIBRvm>.

Acesso em: 28 maio 2019.

MOURA, M. F. S. F. D.; MORAIS, A. B. D.; MAGALHÃES, A. G. D. **Materiais compósitos materiais, fabrico e comportamento mecânico**. 2 ed. Porto: Publínústria, 2009.

MACHADO, H. A. *et al.* Economic viability of thermo-structural integrated system in the SARA sub-orbital platform. **Revista Sul-americana de Engenharia Estrutural**, v. 15, n. 2, p. 22-37, 2019. Disponível em: <http://search.ebscohost.com/login.aspx?direct=true&profile=ehost&scope=site&authtype=crawler&jrnl=18063985&AN=133714918&h=F3QpXe7hYzxVb%2FS7Mmj2AfXJQ2Zbtw1%2FQqEvGyLBJWKqBFu4FjELeTiQf6XKsbBwOirCkekBPJMIwfHKa0dzAw%3D%3D&crl=c>. Acesso em: 18 jul. 2019.

MAJEWSKI, M. **Comparação de compósitos obtidos via RTM de resina epóxi e fibra de carbono com e sem descontinuidade nos tecidos**. 2012. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Materiais) – Faculdade de Engenharia de Guaratinguetá, Universidade Estadual Paulista, Guaratinguetá, 2012. Disponível em: <https://repositorio.unesp.br/handle/11449/119772>. Acesso em: 28 maio 2019.

MARCHINI, L. G. **Estudo da incorporação de nanopartículas de prata na matriz poliméricas de termoplástico elastomérico poliéster (TPE-E) por diferentes técnicas de processamento visando ação bactericida**. 2018. Tese (Doutorado em Tecnologia Nuclear - Materiais) – Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2018. Disponível em: <https://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/85/85134/tde-01112018-105111/en.php>. Acesso em: 28 maio 2019.

MARQUES, L. S.; NARITA, N. E.; COSTA, G. G.; REZENDE, M. C. Avaliação dos comportamentos mecânico e térmico de laminados de PPS/fibra de carbono processados em autoclave sob diferentes ciclos de consolidação. **Polímeros**, São José dos Campos, v. 20, n. 4, p. 309-314, 2010. Disponível em: <https://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/85/85134/tde-01112018-105111/en.php>. Acesso em: 07 maio 2019.

MAZUR, R. L. **Obtenção e caracterização de compósitos de fibras de carbono/pekk com aplicações aeronáuticas**. 2010. Dissertação (Doutorado em Engenharia Mecânica) – Faculdade de Engenharia de Guaratinguetá, Universidade Estadual Paulista, Guaratinguetá, 2010. Disponível em: <https://repositorio.unesp.br/handle/11449/103754>. Acesso em: 06 jun. 2019.

MONTE VIDAL, D. C. S. *et al.* Effect of different stacking sequences on hybrid carbono/glass/epoxy composites laminate: thermal, dynamic mechanical and long-term behavior. **Journal of Composite Materials**, Lancaster, 2019. Disponível em: <https://journals.sagepub.com/doi/abs/10.1177/0021998319868512>. Acesso em: 18 jul. 2019.

MONTICELI, F. M. **Otimização da determinação de vazios em compósitos híbridos processados por RTM**. 2017. Dissertação (Mestrado Engenharia Mecânica) – Faculdade de Engenharia de Guaratinguetá, Universidade Estadual Paulista, Guaratinguetá, 2017. Disponível em: <https://repositorio.unesp.br/handle/11449/151336>. Acesso em: 29 jun. 2019.

MONTICELI, F. M. *et al.* Hybrid-permeability model evaluation through concepts of tortuosity and resistance rate: Properties of manufactured hybrid laminate. **Polymer**

Engineering & Science, Stanford, v. 59, n. 6, p. 1215-1222, 2019. Disponível em: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1002/pen.25104>. Acesso em: 18 jul. 2019.

MONTICELI, F. M *et al.* Mechanical behavior simulation: NCF/epoxy composite processed by RTM. **Polymers and Polymer Composites**, Londres, v. 27, n. 2, p. 66-75, 2019. Disponível em: <https://journals.sagepub.com/doi/abs/10.1177/0967391118817174>. Acesso em: 06 jun. 2019.

MONTICELI, F. M. *et al.* Porosity Characterization of Carbon Fiber / Epoxy Composite Using Hg Porosimetry and Other Techniques. **Polymer Engineering & Science**, Stanford, v. 60, n. 4, p. 841-849, 2020. Disponível em: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1002/pen.25343>. Acesso em: 25 abr. 2020.

MONTICELI, F. M. *et al.* Three-dimensional porosity characterization in carbon/glass fiber epoxy hybrid composites. **Composites Part A: applied science and manufacturing**, 2019. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1359835X19303045>. Acesso em: 28 maio 2019.

MONTORO, S. R. **Influência dos parâmetros de processamento por RTM no volume de vazios em compósitos carbono/epóxi**. 2014. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica) – Faculdade de Engenharia de Guaratinguetá, Universidade Estadual Paulista, Guaratinguetá, 2014. Disponível em: <https://repositorio.unesp.br/handle/11449/103728>. Acesso em: 29 jun. 2019.

MONTORO, S. R. *et al.* Influence of void on the flexural resistance of the NCF/RTM6 composites. **Procedia Engineering**, Amsterdam, v. 10, p. 3220-3225, 2011. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S187770581100720X>. Acesso em: 15 abr. 2019.

MOTA, R. C. S. **Aproveitamento do exocarpo do licuri particulado para produção de um compósito utilizando como matriz um poliéster ortoftálico**. 2017. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica) – Centro de Tecnologia, Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2017. Disponível em: <https://repositorio.ufrn.br/handle/123456789/25446>. Acesso em: 28 maio 2019.

MOTA, R. C. S. **Análise da viabilidade técnica de utilização da fibra de bananeira com resina sintética em compósitos**. 2010. Dissertação (Mestrado em Tecnologia de Materiais, Projetos mecânicos e Termociências) – Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2010. Disponível em: <https://repositorio.ufrn.br/handle/123456789/15617>. Acesso em: 18 jul. 2019.

NOHARA, L. B. *et al.* Otimização da interface/interfase de compósitos termoplásticos de fibra de carbono/PPS pelo uso do poli (ácido âmico) do tipo BTDA/DDS. **Polímeros**, São Carlos, v. 17, n. 3, p. 180-187, 2007. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/po/a/8DQ7Pr7KvRcTdTs4MddsJZz/?lang=pt>. Acesso em: 06 jun. 2019.

OLIVEIRA, J. B. **Processamento do compósito de fibra de capim-sapê/epóxi e avaliação da resistência a flexão por “t” de student**. 2013. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia de Materiais) – Faculdade de Engenharia de Guaratinguetá,

Universidade Estadual Paulista, Guaratinguetá, 2013. Disponível em: <https://repositorio.unesp.br/handle/11449/120286>. Acesso em: 07 maio 2019.

ORNAGHI, H. L. *et al.* Effect of stacking sequence and porosity on creep behavior of glass/epoxy and carbon/epoxy hybrid laminate composites. **Composites Communication**, v. 19, p. 210-219, 2020. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2452213920300632>. Acesso em: 28 jul. 2020.

QUAN, N. D. G. **Análise comparativa da performance de elementos resistivos na soldagem por resistência elétrica em compósitos PEI/fibras de carbono**. 2016. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia de Materiais) – Faculdade de Engenharia de Guaratinguetá, Universidade Estadual Paulista, Guaratinguetá, 2016. Disponível em: <https://repositorio.unesp.br/handle/11449/156828>. Acesso em: 29 jun. 2019.

REZENDE, M. C.; COSTA, M. L.; BOTELHO, E. C. **Compósitos estruturais: tecnologia e prática**. São Paulo: Artliber, 2011.

REZENDE, M.; BOTELHO, E. O uso de compósitos estruturais na indústria aeroespacial. **Polímeros**, v. 10, p. 4-10, 2000. Disponível em: https://www.scielo.br/scielo.php?pid=S0104-14282000000200003&script=sci_arttext&tlng=pt. Acesso em: 29 jun. 2019.

SANTOS, J. K. D. **Resistência residual após impacto em compósitos híbridos de matriz estér vinílica reforçada por fibra de vidro e Kevlar**. 2018. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica) – Centro de Tecnologia, Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2018. Disponível em: <https://repositorio.ufrn.br/handle/123456789/25899>. Acesso em: 15 abr. 2019.

SANTOS, A. L. **Estudo da modificação superficial de fibras de carbono por meio de tratamentos a plasma para o aumento da adesão na interface de compósitos fibra de carbono/PPS**. 2015. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica) – Faculdade de Engenharia de Guaratinguetá, Universidade Estadual Paulista, Guaratinguetá, 2015. Disponível em: <https://repositorio.unesp.br/handle/11449/123292>. Acesso em: 29 jun. 2019.

SHIINO, M. Y. **Fadiga em compósitos 5HS carbon/epóxi processados via RTM: relação entre cargas axiais no plano e modos de delaminação**. 2015. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica) – Faculdade de Engenharia de Guaratinguetá, Universidade Estadual Paulista, Guaratinguetá, 2015. Disponível em: <https://repositorio.unesp.br/handle/11449/123324>. Acesso em: 28 maio 2019.

SHIINO, M. Y. *et al.* The role of stitch yarn on the delamination resistance in non-crimp fabric: chemical and physical interpretation. **Journal of Materials Engineering and Performance**, v. 26, n. 2, p. 978-986, 2017. Disponível em: <https://link.springer.com/content/pdf/10.1007/s11665-016-2460-2.pdf>. Acesso em: 18 jul. 2019.

SIQUEIRA, G. S. M. **Análise do comportamento em fadiga axial do compósito de fibra de carbono NCF/resina epóxi com concentrador de tensão: efeitos higrotérmicos**. 2016. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Mecânica) – Faculdade de Engenharia de Guaratinguetá, Universidade Estadual Paulista, Guaratinguetá, 2016.

Disponível em: <https://repositorio.unesp.br/handle/11449/155399>. Acesso em: 07 maio 2019.

SILVA, F. G. **Estudo da concentração de tensão dos laminados compósitos sanduíches de resina epóxi com fibra de vidro e núcleo de honeycomb carregados à flexão**. 2017. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica) – Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2017. Disponível em: <https://repositorio.ufrn.br/handle/123456789/24647>. Acesso em: 18 jul. 2019.

SONG, Y. *et al.* CAE method for compression molding of carbon fiber reinforced thermoplastic composite using bulk materials. **Composites part A: applied science and manufacturing**, v. 114, p. 388-397, 2018. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1359835X1830352X>. Acesso em: 29 jun. 2019.

SWOLFS, Y.; GORBATIKH, L.; VERPOEST, I. Fibre hybridisation in polymer composites: a review. **Composites**. p. 181-200, 2014. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1359835X14002681>. Acesso em: 07 maio 2019.

TARGA, G. N. **Compósito reforçado por laminado de bambu com matriz de poliuretano e epóxi: desenvolvimento, produção e caracterização mecânica**. 2011. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2011. Disponível em: <https://repositorio.ufsc.br/handle/123456789/94902>. Acesso em: 29 jun. 2019.

TARPANI, J. R. *et al.* Caracterização de danos e resistência residual de um laminado híbrido metal/fibra após impactos repetidos de baixa energia. **Matéria**, v. 16, p. 668-682, 2011. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/rmat/a/jWQQ3fY5n7YR6ds5tL9Jb8K/?format=pdf&lang=pt>. Acesso em: 15 abr. 2019.

VIDAL, D. C. S. M. **Estudo do comportamento térmico em longos períodos de compósitos híbridos processados por RTM**. 2017. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Faculdade de Engenharia de Guaratinguetá, Universidade Estadual Paulista, Guaratinguetá, 2017. Disponível em: <https://repositorio.unesp.br/handle/11449/150865>. Acesso em: 06 jun. 2019.

VIEILLE, B. *et al.* About the influence of stamping on thermoplastic-based composites for aeronautical applications. **Composites: Part B**, v. 45, p. 821–834, 2013. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S135983681200501X>. Acesso em: 07 maio 2019.

YAMANE, F. O. **Fadiga de compósitos de fibra de carbono/epóxi obtidos pelo processo de moldagem por transferência de resina assistida a vácuo**. 2016. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica) – Universidade Federal de Itajubá, Itajubá, 2016. disponível em: <https://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/97/97139/tde-06112019-162112/en.php>. Acesso em: 18 jul. 2019.

ZHANG J.; CHAISOMBAT K.; He S.; WANG CH. Hybrid composite laminates reinforced with glass/carbon woven fabrics for lightweight load bearing structures. **Mater Des**. v. 36, p. 75-80. 2012. Disponível em:

<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0261306911007667>. Acesso em: 07 maio 2019.