

UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA “JÚLIO DE MESQUITA FILHO”
FACULDADE DE ENGENHARIA DE SÃO JOÃO DA BOA VISTA
BACHARELADO EM ENGENHARIA AERONÁUTICA

YAGO GODOY ZAMPOLLI

COMPORTAMENTO DAS DESCARGAS ATMOSFÉRICAS EM ESTRUTURAS DE
MATERIAL COMPÓSITO UTILIZADAS EM AERONAVES.

SÃO JOÃO DA BOA VISTA

2023

YAGO GODOY ZAMPOLLI

COMPORTAMENTO DAS DESCARGAS ATMOSFÉRICAS EM ESTRUTURAS DE
MATERIAL COMPÓSITO UTILIZADAS EM AERONAVES.

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado à
Universidade Estadual Paulista “Júlio de
Mesquita Filho” como requisito para obtenção
de título de Bacharel em Engenharia
Aeronáutica.

Orientador: Prof. Dr. Afonso José do Prado

SÃO JOÃO DA BOA VISTA

2023

Z26c Zampolli, Yago Godoy
Comportamento das descargas atmosféricas em estruturas de
material compósito utilizadas em aeronaves / Yago Godoy Zampolli.
-- São João da Boa Vista, 2023
41 p. : il., tabs.

Trabalho de conclusão de curso (Bacharelado - Engenharia
Aeronáutica) - Universidade Estadual Paulista (Unesp), Faculdade de
Engenharia, São João da Boa Vista
Orientador: Afonso José do Prado

1. Engenharia aeroespacial. 2. Raio. 3. Materiais compostos. 4.
Engenharia elétrica. I. Título.

Sistema de geração automática de fichas catalográficas da Unesp. Biblioteca da Faculdade de
Engenharia, São João da Boa Vista. Dados fornecidos pelo autor(a).

Essa ficha não pode ser modificada.

**UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA “JÚLIO DE MESQUITA FILHO”
FACULDADE DE ENGENHARIA - CÂMPUS DE SÃO JOÃO DA BOA VISTA
GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA AERONÁUTICA**

TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

**COMPORTAMENTO DAS DESCARGAS ATMOSFÉRICAS EM ESTRUTURAS DE
MATERIAL COMPÓSITO UTILIZADAS EM AERONAVES**

Aluno: Yago Godoy Zampolli

Orientador: Prof. Dr. Afonso José do Prado

Banca Examinadora:

- Afonso José do Prado (Orientador)
- Elmer Mateus Gennaro (Examinador)
- Leonardo da Silva Lessa (Examinador)

A ata da defesa com as respectivas assinaturas dos membros encontra-se no prontuário do aluno (Processo nº 059/2023)

AGRADECIMENTOS

A toda equipe do Laboratório de Alta Tensão da UNICAMP (orientados por José Pissolato), em especial ao aluno de mestrado Renan Callegari, juntamente ao orientador deste trabalho Afonso José do Prado, pelos direcionamentos ao longo do trabalho.

A todos da equipe de aerodesign Adelphi que participaram, direta ou indiretamente do desenvolvimento deste trabalho de pesquisa, enriquecendo o meu processo de aprendizado, em especial ao aluno Giuseppe Leopoldo Pinheiro da Silva, diretor de estruturas e ensaios estruturais do grupo.

Aos familiares e amigos que foram, de alguma forma, importantes ao longo de toda a graduação: Rita de Cássia Brandini Godoy Zampolli, Paulo Sergio Zampolli, Beatriz Craveiro de Sá Mazzini, Guilherme Lellis Cuellar, Vinícius Rosolen Altarni, Filipe Estevan Valentim e Lucas Silva Tazitu.

RESUMO

Materiais compósitos de fibra de carbono têm sido utilizados para substituir ligas de alumínio que, por sua vez, durante décadas foram utilizadas na fabricação das diversas estruturas de aeronaves. As vantagens estão relacionadas principalmente ao menor peso da aeronave, significando economia de combustível, e à resistência maior à pressão, possibilitando uma pressão interna menos desconfortável para os passageiros da aviação civil. Por outro lado, enquanto ligas de alumínio constituem uma gaiola de Faraday para fenômenos eletromagnéticos externos à aeronave, os materiais compósitos não têm essa característica qualitativamente semelhante às ligas de alumínio. Assim, estudos, análises e simulações são ferramentas importantes para definir o comportamento dos materiais compósitos quando submetidos direta ou indiretamente a descargas elétricas de alta corrente. Este trabalho está direcionado para estudos dos efeitos de mudanças nas proporções e orientações dos materiais que compõem os corpos de prova, fazendo uso de uma forma de onda simplificada para representar a descarga elétrica que atinge uma aeronave. Foi utilizado o software CST Studio para simular descargas atmosféricas em diferentes corpos de prova, buscando resultados que possibilitem maior capacidade de previsão e melhor compreensão dos efeitos de tais descargas sobre a estrutura da aeronave. Os resultados obtidos mostram diferenças significativas nos níveis de condutividade dos modelos, principalmente devido a forma com que as fibras estão dispostas no material.

Palavras-chave: material composto; descarga atmosférica; estruturas aeronáuticas.

ABSTRACT

Composite carbon fiber materials have been used to replace aluminum alloys that, in turn, have been used for decades in the manufacture of various aircraft structures. The advantages are mainly related to the lower weight of the aircraft, meaning fuel economy, and higher-pressure resistance, allowing less uncomfortable internal pressure for civil aviation passengers. On the other hand, while aluminum alloys are a Faraday cage for electromagnetic phenomena outside the aircraft, composite materials do not have this qualitatively similar characteristic for aluminum alloys. Thus, studies, analyzes and simulations are important tools to define the behavior of composite materials when subjected directly or indirectly to high current electrical discharges. This project is directed to studies of the effects of change in proportions and guidance of materials that make up the models, using a simplified wave form to represent the electric discharge that reaches an aircraft. CST Studio software was used to simulate lightning strikes on different test models, seeking results that enable greater prediction capacity and better understanding of the effects of such discharges on the structure of the aircraft. The results obtained show significant differences in the levels of conductivity of the models, mainly due to the way the fibers are arranged in the material.

Keywords: composite material; lightning; aeronautical structures.

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	7
2 OBJETIVOS	8
3 REVISÃO DE LITERATURA	9
3. 1 DESCARGAS ATMOSFÉRICAS EM AERONAVES	9
3. 2 SOBRE OS COMPÓSITOS E OUTRAS APLICAÇÕES	13
3. 2. 1 ASPECTOS DE FABRICAÇÃO	13
3. 2. 2 ASPECTOS DE CONDUTIVIDADE	16
3. 2. 3 OUTRAS APLICAÇÕES	17
3. 2. 4 POLÍMEROS REFORÇADOS COM FIBRA DE CARBONO	18
4 METODOLOGIA	19
4. 1 SOFTWARE E MÉTODO NUMÉRICO	19
4. 2 FUNÇÃO CORRENTE	20
4. 3 DESENVOLVIMENTO DO PRIMEIRO CORPO DE PROVA	21
4. 4 AJUSTES PRÉVIOS A PRIMEIRA SIMULAÇÃO	24
4. 5 DESENVOLVIMENTO DO SEGUNDO CORPO DE PROVA	28
4. 6 AJUSTES PRÉVIOS A SEGUNDA SIMULAÇÃO	29
4. 7 DESENVOLVIMENTO DO TERCEIRO CORPO DE PROVA	29
4. 8 DESENVOLVIMENTO DO QUARTO CORPO DE PROVA	32
5 RESULTADOS	33
5. 1 RESULTADOS PERTINENTES A PRIMEIRA SIMULAÇÃO	33
5. 2 RESULTADOS PERTINENTES A SEGUNDA SIMULAÇÃO	34
5. 3 RESULTADOS PERTINENTES A TERCEIRA SIMULAÇÃO	35
5. 4 RESULTADOS PERTINENTES A QUARTA SIMULAÇÃO	37
6 CONCLUSÕES	38
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	39

1 INTRODUÇÃO

Análises, estudos e simulações relacionadas a descargas atmosféricas podem ter aplicações em diversas áreas, tais como, desenvolvimento de proteção por meio de para-raios, proteção de sistemas elétricos por meio de aterramento, proteção de linhas de transmissão e distribuição por meio de para-raios de óxido de zinco, projeto de instalações elétricas com baixa sensibilidade a interferência eletromagnética indireta de descargas atmosféricas, etc. Em relação à aeronáutica, o interesse é estudar, analisar e simular o comportamento do material da estrutura de aeronaves expostas a descargas atmosféricas durante o voo.

Após um período de estiagem prolongada, os períodos subsequentes de chuvas podem ser caracterizados por tempestades fortes. De forma geral, essas tempestades são frontais ou convectivas. Independente das características das tempestades, elas levam sempre à ocorrência de descargas elétricas ou descargas atmosféricas. Podem ocorrer entre o solo e as nuvens, bem como, entre nuvens. Quando atingem o solo, podem ser descendentes, partindo das nuvens e atingindo o solo, ou ascendentes, partindo do solo e atingindo as nuvens. Para os ancestrais da humanidade, descargas atmosféricas eram personificadas como deuses ou como instrumentos da ira de deuses.

Tais fenômenos, então, estão entre os primeiros fenômenos elétricos conhecidos e estudados. Impactos e consequências desses fenômenos continuam sendo intensamente explorados, analisados e estudados, pois com o avanço da tecnologia de materiais, novos tipos de materiais ficam expostos a ação direta e indireta de descargas atmosféricas. Nesse caso, os efeitos podem ser desde alterações temporárias nas características dos materiais até o comprometimento de sua estrutura física e química.

Em um projeto aeronáutico, um dos principais objetivos é desenvolver a estrutura e os sistemas internos da aeronave priorizando a segurança da mesma, dos passageiros e tripulantes, bem como, das cargas transportadas em caso de ocorrerem descargas atmosféricas durante o voo, ou ainda, em solo. Assim, é uma área de grande interesse para o desenvolvimento da aviação na questão de aplicação de materiais compósitos de fibra de carbono. Por outro lado, é uma área que apresenta pouco desenvolvimento de simulações e até de ensaios experimentais no Brasil.

Ao longo deste trabalho, então, será feita uma revisão de literatura sobre o tema no capítulo 3, seguida do desenvolvimento de algumas simulações computacionais descritas no capítulo 4, das análises dos resultados contidas no capítulo 5 e das considerações finais abordadas no capítulo 6 deste documento.

2 OBJETIVOS

O objetivo é estudar, via simulação em software, o comportamento de descargas atmosféricas conforme alteram-se características estruturais em corpos de prova constituídos principalmente por resina epóxi e fibra de carbono e, em alguns casos, materiais metálicos como alumínio e cobre.

As alterações envolvem principalmente mudanças nas proporções entre os constituintes do compósito (matriz e preenchimento) e a forma com que as fibras estão dispostas.

3 REVISÃO DE LITERATURA

3.1 DESCARGAS ATMOSFÉRICAS EM AERONAVES

As estruturas metálicas fechadas atuam como gaiolas de Faraday, isto é, isolam seu interior do que acontece em seu exterior. Dessa forma, pessoas e objetos estão protegidos de efeitos eletromagnéticos e descargas elétricas dentro de carros ou aviões fabricados de alumínio aeronáutico (1). Entretanto, aeronaves modernas vêm apresentando, cada vez mais, materiais compósitos em sua estrutura, especialmente a partir da década de 80. Assim, tais materiais se comportam diferentemente de uma estrutura metálica quando percorridos por corrente elétrica. Não é coincidência que o número de patentes relacionadas com o estudo de danos causados em aeronaves por raios e as formas de minimizá-los vem crescendo simultaneamente (2)-(13).

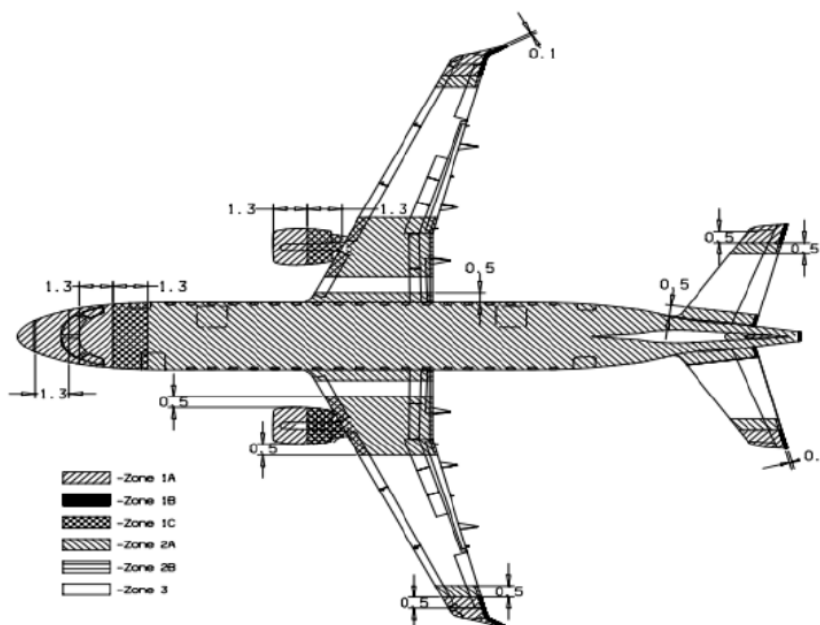
Aeronaves se tornam alvos de descargas atmosféricas quando elas passam a fazer parte do canal do raio, em outras palavras, a descarga elétrica, ao partir de sua origem, se fixa em um ou mais pontos da aeronave e se desprende, também, em um ou mais pontos, seguindo então seu caminho até ser dissipada. Normalmente, os pontos de fixação iniciais estão nas extremidades da aeronave. Em aeronaves militares, por exemplo, esses pontos se localizam no tubo de pitot do nariz ou radome, pontas das asas, pontas do estabilizador horizontal, ponta da nadadeira vertical e apêndices auxiliares. Por causa do movimento do avião, os pontos de reconexão geralmente incluem a fuselagem, asas e bordas de fuga devido ao efeito do movimento de varredura (14).

Os dados sobre os locais de fixação podem ser obtidos a partir da inspeção visual da aeronave. A localização desses pontos também pode ser obtida por testes em laboratório nos quais um modelo em escala da aeronave é submetido a descargas atmosféricas simuladas. Esse método é particularmente útil para novas configurações de projetos de aeronaves (14).

Existem, então, modelos de zoneamento do avião, isto é, a separação das partes de acordo com sua susceptibilidade em relação aos efeitos elétricos e eletromagnéticos. Dessa forma, defini-se (15):

- Zona 1: Superfícies da aeronave em que há alta probabilidade de fixação inicial do raio (pontos de entrada e saída);
- Zona 2: Superfícies da aeronave em que há alta probabilidade de varredura;
- Zona 3: Superfícies da aeronave em que há baixa probabilidade de fixação do raio, porém podem carregar grandes correntes por condução direta do raio de seu ponto de entrada até seu ponto de saída.

Figura 1 – Exemplo de zoneamento.



Fonte: (9).

A figura 1 mostra a vista superior de uma aeronave com a identificação das zonas de susceptibilidade de ocorrência de descargas atmosféricas, bem como, subdivisões dessas zonas (9), (10). As subdivisões 1A, 1B, 1C estão relacionadas com aspectos de fixação, refixação e tempo de permanência das cargas nessas regiões. Ou seja, na seção 1A, o tempo de duração dos efeitos elétricos é muito menor que na seção 1B. A seção 1C, por sua vez, representa uma zona de transição.

Da mesma forma, os efeitos elétricos na subdivisão 2B tem duração muito maior em relação à 2A. Isso porque subdivisões de índice B estão relacionadas a regiões de descarregamento.

Vale ressaltar que, ao substituir o metal por fibra, questiona-se se a redução da condutividade influencia o zoneamento. Para criar um caminho condutor, uma folha condutora é colocada sobre a camada superior de compósito. Um caminho condutor reduz a quantidade de aquecimento por efeito Joule e impede o fluxo de corrente elétrica para dentro do material compósito (16).

Aviões são atingidos por raios uma vez por ano, em média. Geralmente, isso ocorre durante os procedimentos de decolagem e aterrissagem. Durante o voo, as aeronaves costumam ser desviadas do seu curso quando nuvens de tempestades estão presentes na rota, evitando assim, serem atingidas por descargas elétricas (5)-(7). Ainda que pouco recorrentes,

existem situações onde os raios atingem em cheio a estrutura do avião e, se esta é feita de material condutor (metal), como por exemplo, ligas de alumínio, o comportamento resistivo da estrutura é muito baixo, minimizando os danos causados à estrutura. Os danos ficam praticamente concentrados em componentes eletrônicos presentes nessa estrutura (8)-(10).

Apesar disso, compor aeronaves com fibras de carbono propicia vantagens em relação às ligas metálicas. As principais vantagens estão relacionadas com o peso, a resistência à pressão e a resistência à corrosão. Compósitos de carbono são significativamente mais leves que o alumínio, podendo reduzir em até 30% o peso das estruturas. Por serem muito mais resistentes à corrosão, diminuem os gastos com manutenção a longo prazo. Acima de tudo, os compósitos se destacam por possibilitarem a fabricação de estruturas de formas suaves e curvas aerodinâmicas. No cenário aeronáutico, isso contribui muito para a diminuição do arrasto, reduzindo, conseqüentemente, a demanda de combustível. Além disso, por suportar maior pressão, cabines produzidas com materiais compósitos de fibra de carbono suportam maiores diferenças de pressão entre as partes externa e interna da aeronave. Isso significa maior conforto para os passageiros em viagens longas em altitudes de rotas comerciais que usam os maiores aviões a jato, como por exemplo, os principais modelos da Boeing e da Airbus (5).

Existe, entretanto, um fator preocupante nos compósitos: os danos causados por fatores mecânicos não ficam tão visíveis quanto nos metais. Ou seja, impactos de baixa energia mecânica podem, aparentemente, não deixar vestígios significativos, sendo que, a estrutura pode estar significativamente danificada em seu interior. Podem existir laminações extensas espalhadas em uma área em forma de cone a partir do local do impacto. Isso cria a necessidade de constantes inspeções realizadas por especialistas em materiais compósitos para evitar riscos de falhas na estrutura. As descargas elétricas atmosféricas podem ser um fator importante nesse quesito, dando início ou agravando esse tipo de falha estrutural neste material (9), (10).

Diferentemente dos materiais condutores, onde a corrente elétrica flui pelo exterior da estrutura metálica e se dissipa com facilidade, os compósitos de fibra de carbono são dielétricos e apresentam um caráter resistivo aproximadamente 1 milhão de vezes maior do que o alumínio. Além da diferença de resistividade, a natureza anisotrópica desse material faz com que o tempo mais longo de dissipação da descarga elétrica seja suficiente para que a estrutura exterior seja danificada e, o mais preocupante, interiormente (6)-(10). Uma medida frequentemente tomada em relação a esse problema é a adição de malhas condutoras à

estrutura do material compósito. Na maioria das vezes, essas malhas condutoras são compostas de cobre ou bronze (7). De forma geral, durante a ocorrência de uma descarga atmosférica em aeronaves de materiais compósitos, a corrente elétrica se concentra nos componentes metálicos da estrutura, por exemplo, rebites. Isso é especialmente perigoso nas asas, pois ali estão localizados os tanques de combustível da aeronave. Uma corrente que percorre rebites desde a superfície da asa até o interior da estrutura pode gerar uma faísca que, em contato com o vapor de combustível, leva à explosão do tanque (8)-(10).

Muitas alternativas podem ser implementadas para mitigar o arco elétrico nos rebites metálicos (11). A primeira delas, é isolar o rebite com um adesivo dielétrico em sua superfície, prevenindo a ocorrência de um arco elétrico entre a superfície externa e a parte interna da estrutura através desse componente metálico. Rebites dielétricos também podem ser usados, mas isso não é viável devido ao fato que a carga elétrica é muito intensa nas juntas, exigindo maior resistência mecânica desse tipo de conector. Tal característica é o fator decisivo para a opção pelo rebite metálico. Outra possibilidade é o aumento do número ou do tamanho de conectores usados, juntamente com a adição de malhas condutoras mais espessas (denominadas bolt-line), para melhor distribuir a corrente, diminuindo a densidade de corrente nas partes atingidas pela descarga. Há a possibilidade de utilizar rebites envoltos por uma capa isolante. Esse material dielétrico atua como uma luva que minimiza o vão entre rebite e estrutura, diminuindo os arcos elétricos entre o metal e a parede da estrutura. A contenção do arco elétrico pode ser feita, também, por meio da inserção de um selante na região da rosca ou colar do rebite. Essa barreira impede o contato do arco elétrico com o vapor de combustível (8)-(13).

Dentre as técnicas utilizadas para a mitigação, uma das mais bem sucedidas é o uso de rebites protegidos por uma luva de conformidade, que, ao sofrer a ação de descargas elétricas, se deforma e preenche os vãos gerados pela danificação do material. Foi registrado que, nesta situação, os rebites se mantêm livres de arcos se expostos a correntes de até 100 kA (9), (10).

Além das preocupações acerca dos tanques de combustível, a ocorrência de descargas atmosféricas pode trazer complicações em outros sistemas de voo. O campo magnético presente pode penetrar no avião por regiões menos condutoras, podendo gerar problemas nos sistemas sonoros, por exemplo. Outro malefício trazido por um raio é o custo de manutenção gerado, afinal, podem ocorrer queimas ou derretimentos nos pontos de fixação. Mesmo que isso não ocorra, após uma aeronave ser atingida por uma descarga, esta deve obrigatoriamente passar por revisão antes de ser utilizada novamente (1), (19). Ainda que pouco provável, é

possível que um raio cause danos ao parabrisa do avião. As chances são poucas devido ao tamanho do parabrisa em relação ao restante da estrutura. Além disso, em laboratório, foi necessária uma corrente de 235 kA para romper as camadas do vidro (18).

Materiais compósitos, portanto, são atualmente empregados em aeronaves dos mais diversos tamanhos e finalidades. Desde naves espaciais reutilizáveis (Columbia, por exemplo) até os gigantescos A380. É fato que esses materiais serão, por décadas, muito proveitosos para a engenharia (1)-(20).

3. 2 SOBRE OS COMPÓSITOS E OUTRAS APLICAÇÕES

3. 2. 1 ASPECTOS DE FABRICAÇÃO

Os investimentos no desenvolvimento de materiais compósitos partiram da necessidade de um material dispor de propriedades diferenciadas que não estão presentes em ligas convencionais. O termo compósito deriva de composto, isto é, qualquer coisa formada por partes diferentes. Dessa forma, pode ser considerado um material compósito qualquer material cuja estrutura é formada por uma combinação de um ou mais produtos não solúveis entre si. Em escala atômica, algumas ligas metálicas e alguns materiais poliméricos também podem ser considerados compósitos, uma vez que são formados por grupamentos atômicos diferentes (21)-(27).

Nos compósitos, um dos produtos é chamado de fase de carga e outro é a matriz, de modo que cada fase exerce uma função importante para o comportamento resultante do material. A matriz (fase contínua) tem as funções de proteger a carga, ligar as cargas umas às outras, além de distribuir e transferir as tensões para a carga. Materiais compósitos podem apresentar os seguintes tipos de matrizes (21)-(27): cerâmicas, poliméricas e metálicas.

As **matrizes cerâmicas** são compostas por material cerâmico, são inerentemente resilientes à oxidação e à deterioração a temperaturas elevadas, são, entretanto, fortemente suscetíveis a fratura frágil.

As **matrizes poliméricas** são compostas por materiais poliméricos, apresentam baixa densidade e grande facilidade de processamento, suportam qualquer tipo de reforço, assim, absorvem deformações e são resistentes à compressão. Matrizes desse tipo podem ser divididas em 3 grupos de acordo com suas composições e propriedades:

- Matrizes elastômeras: compostas por elastômeros (borrachas), recuperam rapidamente sua forma e dimensões iniciais após cessamento da aplicação de uma tensão. A principal propriedade é a resiliência;

- Matrizes termoendurecíveis: resinas termoendurecíveis são muito utilizadas como matrizes de laminados compósitos, sobretudo, resinas de poliéster e epóxico. As propriedades mecânicas variam com a formulação e com os aditivos, mas de forma geral, a resistência à compressão é maior que a resistência à tração;
- Matrizes termoplásticas: compostas por poliamida, policarbonato, polipropileno, etc., são muito sensíveis ao calor, porém podem ser remoldadas e recicladas.

As **matrizes metálicas** são compostas por materiais metálicos, são matrizes leves que suportam altas temperaturas e possuem bastante resistência.

A fase de carga, por sua vez, é repartida em duas categorias: enchimentos e reforços. Os reforços são amplamente utilizados nas estruturas aeronáuticas. Enquanto os enchimentos modificam as propriedades da matriz, um reforço tem a função de melhorar o desempenho mecânico da matriz em aspectos desejados. O reforço proporciona vantagens quanto à resistência à tração, rigidez, tenacidade, flexão, estabilidade térmica e dimensional, podendo reduzir o encolhimento da peça resfriada após fundição. Em contrapartida, o reforço aumenta o custo e a densidade do material, dificulta o processamento por diminuir o fluxo do material fundido e pode causar distorção na peça.

São muitas as possibilidades de carga. Assim, um compósito pode ser reforçado com partículas ou com fibras. Quando partículas são utilizadas, abrindo espaço para reprocessamento, o material pode ser reforçado com partículas grandes (diâmetro $> 1 \mu\text{m}$), o que faz com que as solicitações mecânicas sejam distribuídas pela matriz e pelo reforço, afinal, as interações entre as partículas e a matriz não são a nível atômico ou molecular. Ou ainda, pode ser reforçado por dispersão (diâmetro entre $0,01$ e $0,1 \mu\text{m}$), dificultando o movimento das discordâncias na estrutura do material. Assim, a deformação plástica é restringida e a resistência à tração e à dureza são melhorados. Quando reforçados com fibras, os compósitos não podem ser reprocessados. Entretanto, apresentam alta rigidez e resistência em relação ao seu peso.

As fibras podem ser contínuas ou descontínuas. Se descontínuas, podem apresentar alinhamento regular ou uma disposição aleatória. Quando descontínuas e alinhadas regularmente, o reforço e o aumento da resistência do material são dados na direção do alinhamento (longitudinal) e são inexistentes na direção perpendicular (transversal). Serão citadas, de maneira sucinta, algumas fibras e suas características (21)-(27).

A **fibra de vidro** possui uma boa capacidade de deformação, boa resistência à tração e à compressão, boa resistência ao fogo e baixo custo. Também traz vantagens quando utilizada

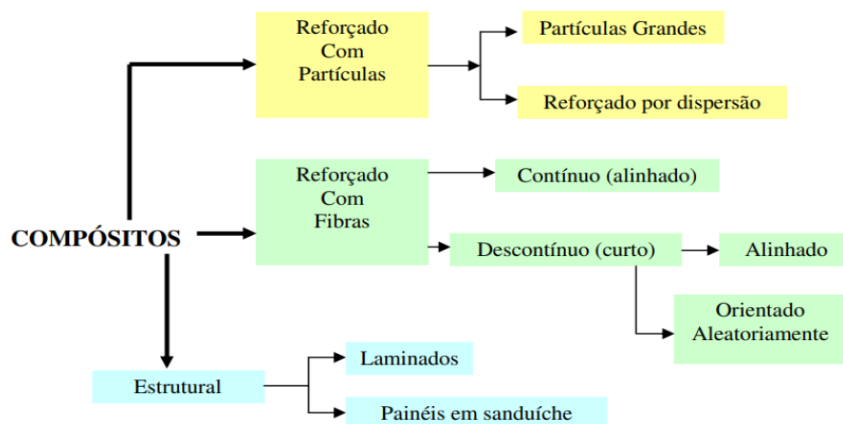
para isolamento acústico. Contudo, apresenta um módulo de elasticidade reduzido, alta densidade específica e baixa resistência à fadiga.

A **fibra de carbono** é uma fibra leve, apresenta elevada rigidez e resistência a todos os tipos de ataques químicos, se comporta bem em relação à fadiga e a variação térmica, além de dispor de boas características de amortecimento estrutural. Em contrapartida, se caracteriza por ter alta condutividade térmica, baixa resistência ao impacto, apresenta uma fratura frágil e baixa deformação antes da fratura e, adicionalmente, o custo para obtenção dessa fibra é elevado.

A **fibra de aramida (Kevlar)** é de origem orgânica e sintética. A resistência a tração e o módulo de elasticidade longitudinal nessa fibra são muito superiores aos valores dessas propriedades em outras fibras orgânicas. Além disso, possui baixa densidade e condutibilidade elétrica, apresenta um excelente comportamento em altas temperaturas e boa resistência ao fogo. Inclusive, tem capacidade de auto-extinção. Por outro lado, essa fibra se degrada sob luz solar, não é uma fibra barata e absorve bastante umidade.

Além de todas as possibilidades citadas anteriormente, os materiais compósitos ainda podem ser reforçados estruturalmente. Nesse caso, uma composição de algum material homogêneo e um compósito é utilizada (figura 2). As propriedades dependem tanto dos constituintes quanto do projeto geométrico.

Figura 2 – Diagrama de possíveis reforços para materiais compósitos.



Fonte: (27).

Os compósitos podem, então, ser reforçados com folhas (laminados) ou formando estruturas de sanduíche. No caso dos laminados de material compósito (em geral de matriz polimérica com fibras longas de alta resistência), as propriedades mecânicas tornam-se

excelentes, principalmente em relação à densidade. Já nas estruturas em sanduíche, a configuração se dá por meio de uma camada externa de folhas resistentes (ligas de alumínio ou polímeros reforçados, por exemplo), uma camada intermediária de fibra de carbono ou aramida e um recheio de material menos denso em formato de colmeia ou alguma forma de espuma expansível. Além de muito utilizado na aviação experimental, esse tipo de material se aplica em telhados, pisos, paredes, etc (21)-(27).

As propriedades resultantes em um compósito dependem dos elementos que o compõem e das proporções ali presentes. Assim, conhecendo as propriedades mecânicas dos constituintes e sabendo a proporção da mistura, é possível estimar o comportamento mecânico do compósito por meio da regra da mistura, descrita na equação (1).

Seja P a propriedade do compósito, P_A e P_B as propriedades dos componentes A e B, respectivamente, e V_A e V_B as frações volumétricas desses componentes. A regra da mistura estabelece que:

$$P = P_A \cdot V_A + P_B \cdot V_B \quad (1)$$

3. 2. 2 ASPECTOS DE CONDUTIVIDADE

As fibras de carbono são produzidas pelo aquecimento de polímeros fibrosos em uma atmosfera inerte para dissociar outros elementos além do carbono. A excelente condutividade elétrica deste material, até 5×10^4 S/m, decorre de sua estrutura de grafite microcristalina. É natural, portanto, imaginar que, em um CFRP (carbon-fiber reinforced polymer), a parcela composta por carbono é a maior responsável pela condutividade elétrica do material, uma vez que a matriz polimérica (resina epóxi, geralmente) apresenta características majoritariamente dielétricas (28).

Em estudos de sistemas de corrente contínua em escala mA , tem sido amplamente aceita a ideia de que, sob estas condições, os CFRP apresentam um perfil de condutividade linear. Acredita-se que a condutividade de um CFRP seja dependente dos contatos diretos entre as fibras, que exibem uma certa resistência constante. Esse modelo de condutividade linear foi estabelecido na suposição de que os portadores de carga são transportados apenas nos caminhos de condução contínuos conectados por contatos diretos de fibra, sem desviar para as fibras que são separadas por uma camada de resina. No entanto, tal suposição é válida apenas para corrente de baixa intensidade e a situação é diferente quando são aplicados impulsos de corrente de alta intensidade (28).

Os compósitos de CFRP não podem ser considerados uma estrutura ideal formada pela simples sobreposição de fibras de enchimento e uma matriz de resina, mas como uma estrutura com um grande número de interfaces fibra-resina que estarão envolvidas na condução elétrica. Em testes AC/DC em escala mA , a rede de condução que consiste em contatos ôhmicos diretos entre as fibras é suficiente para transferir uma quantidade limitada de carga. Os elétrons não podem superar a barreira interfacial na unidade “fibra-resina” (devido à baixa intensidade de campo elétrico), de modo que as unidades fibra-resina-fibra não estão envolvidas no processo de condução (28).

Em contraste, quando um impulso de corrente com uma intensidade muito maior, 50 a 1500 A, é aplicado, o caminho de condução da fibra com capacidade limitada é deficiente para acomodar o aumento substancial na carga. Além disso, a capacidade de condução das unidades fibra-resina-fibra é aprimorada sob o aumento da intensidade do campo elétrico. Assim, sob impulsos de corrente de alta intensidade, um número crescente de caminhos de condução mistos compostos de contatos ôhmicos em unidades fibra-fibra e contatos não ôhmicos em unidades fibra-resina-fibra participam do processo de condução (28).

Contudo, se correntes ainda maiores estiverem presentes, a barreira é rompida e a dependência da resistividade com o campo elétrico volta a ser desprezível (28).

3. 2. 3 OUTRAS APLICAÇÕES

Com tantas inovações trazidas à indústria pelos materiais compósitos, são inúmeras as aplicações nos mais diferentes setores do mercado. Vale, todavia, listar algumas das mais relevantes aplicações fora da indústria aeronáutica. Os compósitos, atualmente, são aplicados em indústrias:

- Petroquímica (tanques e reservatórios de pressão);
- Lazer e esporte (bicicletas de alta performance e raquetes de tênis);
- Aeroespacial, náutica e automotiva;
- De geração de energia;
- Construção civil (especialmente o concreto, considerado um compósito);
- Bélica, militar e defesa;
- De próteses ortopédicas.

3. 2. 4 *POLÍMEROS REFORÇADOS COM FIBRA DE CARBONO*

Os compósitos de fibra de carbono e resina epóxi possuem uma relação excepcionalmente alta entre resistência mecânica e densidade. Eles são significativamente mais leves e mais fortes do que muitos materiais convencionais, como metais. A densidade dos compósitos de fibra de carbono e resina epóxi geralmente varia de 1,4 g/cm³ a 1,8 g/cm³, dependendo da composição específica do material e do processo de fabricação. Em comparação, a densidade do alumínio é cerca de 2,7 g/cm³ (29).

Os PRFC exibem uma resistência excepcional à tração. As fibras de carbono proporcionam uma alta resistência ao longo do comprimento das fibras, enquanto a resina epóxi transfere as cargas entre as fibras, proporcionando uma matriz coesa. A resistência à tração dos compósitos de fibra de carbono e resina epóxi pode variar amplamente, dependendo da orientação das fibras, da proporção de fibras e resina, do tipo de fibra de carbono utilizada e do processo de fabricação. Geralmente, esses compósitos podem ter resistências à tração que variam de 300 MPa a 2.000 MPa (29).

Esses compósitos também apresentam alto módulo de elasticidade. A combinação das fibras de carbono rígidas com a resina epóxi resulta em um material com alta rigidez estrutural, permitindo uma excelente resistência à deformação sob carga. Para os compósitos de fibra de carbono e resina epóxi, o módulo de elasticidade pode variar de 50 GPa a 300 GPa, dependendo das características do compósito (29).

Esses materiais exibem uma excelente resistência à fadiga, o que significa que podem suportar repetidos ciclos de carga sem falha estrutural. Isso os torna adequados para aplicações sujeitas a carregamentos cíclicos, como asas de aviões e componentes de veículos de corrida.

Se analisarmos a resina epóxi de forma isolada, as características são completamente diferentes.

A resistência à tração da resina epóxi pode variar de cerca de 50 MPa a 100 MPa, dependendo da formulação específica, do processo de cura e das condições de teste. O módulo de elasticidade geralmente varia de 2 GPa a 5 GPa (30).

A densidade da resina epóxi pode variar dependendo da formulação específica e do processo de cura. A densidade da resina líquida geralmente varia de cerca de 1,1 g/cm³ a 1,3 g/cm³. Após a cura, a resina epóxi se torna um material sólido. A densidade do material sólido pode variar de aproximadamente 1,2 g/cm³ a 1,4 g/cm³ (30).

4 METODOLOGIA

4.1 SOFTWARE E MÉTODO NUMÉRICO

O CST Studio Suite oferece uma variedade de ferramentas poderosas para modelagem, simulação e análise de fenômenos eletromagnéticos. Ele é frequentemente usado por engenheiros e cientistas em várias áreas, como eletrônica, antenas, microondas, comunicações sem fio, óptica e acústica.

O CST Studio Suite utiliza o método de simulação de campo completo para realizar simulações relacionadas a fenômenos de relâmpagos. Especificamente, o software emprega o Método de Diferenças no Domínio do Tempo para resolver as equações eletromagnéticas envolvidas nessas simulações.

O método FDTD é uma técnica numérica amplamente utilizada para resolver equações de Maxwell no tempo, permitindo a análise de campos eletromagnéticos em uma ampla gama de frequências. Ele divide o domínio de simulação em células discretas e calcula as equações de Maxwell para cada célula em incrementos discretos de tempo. Com isso, é possível simular a propagação e interação de campos eletromagnéticos ao longo do tempo.

No contexto específico de simulações de relâmpagos, o CST Studio Suite utiliza o método FDTD para modelar e analisar a propagação de campos eletromagnéticos gerados durante eventos de descarga elétrica atmosférica. Isso permite investigar e entender a interação entre os campos eletromagnéticos e as estruturas, como linhas de transmissão, equipamentos eletrônicos e sistemas de proteção.

As equações de Maxwell são o conjunto fundamental de equações que descrevem o comportamento dos campos elétricos e magnéticos em um meio, em sua forma diferencial, são dadas por:

1. Lei de Gauss para o campo elétrico

$$\nabla \cdot E = \frac{\rho}{\epsilon_0} \quad (2)$$

2. Lei de Gauss para o campo magnético

$$\nabla \cdot B = 0 \quad (3)$$

3. Lei de Faraday

$$\nabla \times E = -\frac{\partial B}{\partial t} \quad (4)$$

4. Lei de Ampere-Maxwell

$$\nabla \times B = \mu_0 J + \mu_0 \epsilon_0 \frac{\partial E}{\partial t} \quad (5)$$

4.2 FUNÇÃO CORRENTE

Foram realizadas reuniões juntamente com alunos do LAT/DSE/UNICAMP com o intuito de nortear o aprendizado do software CST Studio e de decidir quais seriam os primeiros modelos de simulação e seus parâmetros: formato da amostra, materiais que a compõem e qualidade das simulações levando em consideração o processamento computacional necessário. Nessas reuniões, foi estabelecida a forma de onda utilizada para representar o raio, matematicamente expressa pela dupla-exponencial mostrada em (6):

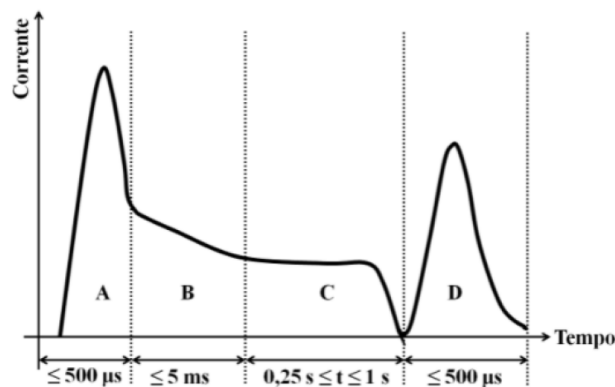
$$i(t) = I_0 (e^{-\alpha t} - e^{-\beta t}) \quad (6)$$

Sendo os parâmetros: $I_0 = 218,810 \text{ kA}$; $\alpha = 11,364 \text{ s}^{-1}$ e $\beta = 647,265 \text{ s}^{-1}$.

Essa representação deve-se ao fato de que a forma de corrente gerada por uma descarga atmosférica que atinge aeronaves apresenta o perfil mostrado na figura 3. Esse perfil é o mais utilizado atualmente em laboratórios, pois representa muito bem uma descarga que pode atingir uma aeronave durante as etapas de decolagem, voo e aterrissagem (6).

Por motivos de simplificação das análises, a dupla-exponencial representa bem a região A do gráfico da figura 3, mas não representa fielmente as regiões B e C. A região A será o foco de todo o estudo, uma vez que, os eventos eletromagnéticos mais relevantes acontecem nessa etapa (o valor de pico da corrente, por exemplo, está contido na região A).

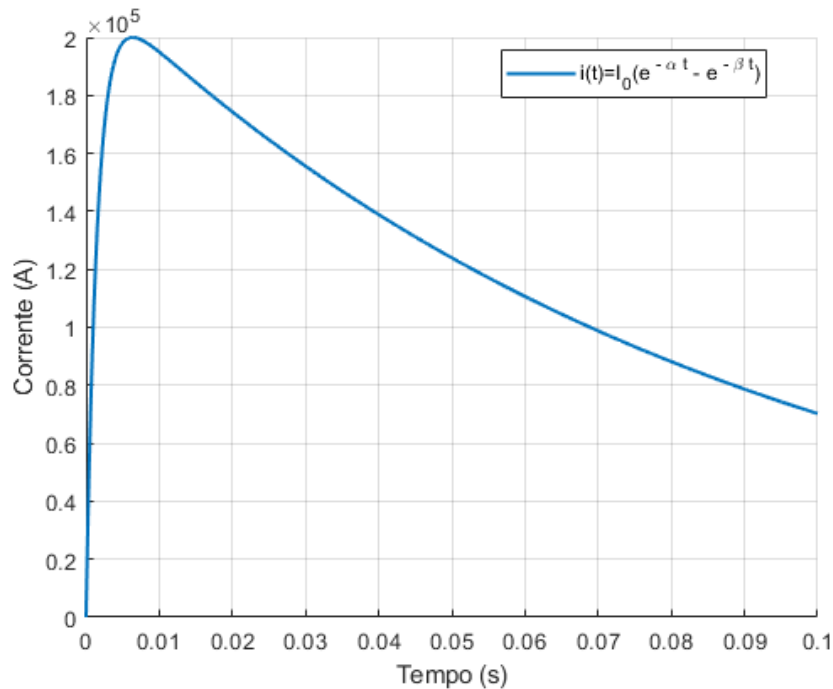
Figura 3 – Forma de onda padrão de corrente gerada por descarga elétrica.



Fonte: (6).

A figura 4 mostra a onda de corrente obtida por (6). É uma onda com um tempo de subida extremamente curto e um tempo de dissipação muito longo quando esses dois parâmetros da onda são comparados.

Figura 4 – Onda de corrente de função dupla exponencial gerada pela equação (6).



Fonte: Elaborada pelo autor.

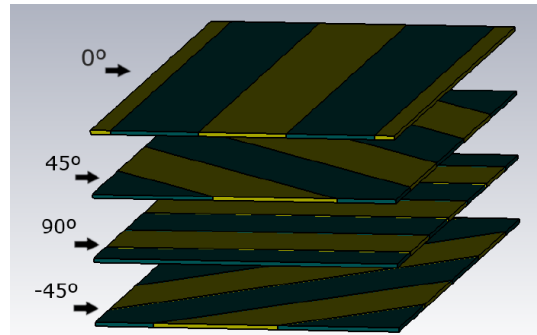
4. 3 DESENVOLVIMENTO DO PRIMEIRO CORPO DE PROVA

O modelo utilizado nas primeiras simulações foi desenvolvido com base em uma versão previamente estudada pelo LAT/DSE/UNICAMP. Esse modelo simula uma porção de material fabricado em matriz de resina epóxi e preenchido com fibra de carbono. A placa é composta por 16 camadas sobrepostas, com orientações equivalentes à 0°, 45°, 90°, -45°, repetindo esta ordem 04 vezes, como ilustra a figura 5.

Cada fração de material, seja resina ou fibra de carbono, tem dimensões de comprimento, largura e espessura, respectivamente, iguais a 50 mm, 2,2 mm e 0,1 mm (figuras 6 e 7).

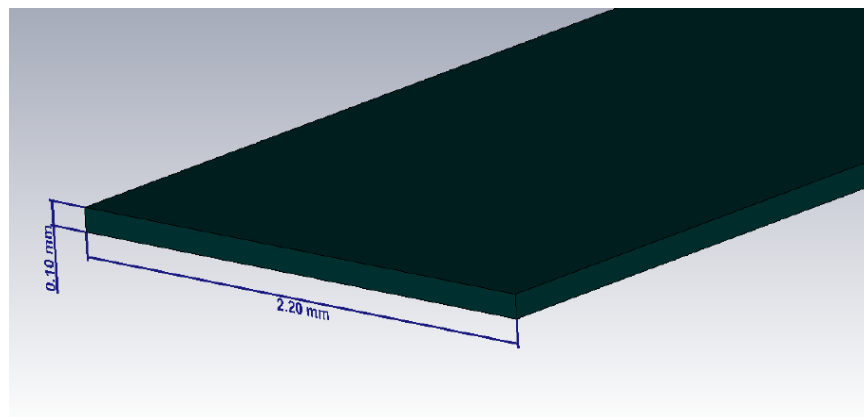
Seguindo o padrão da figura 5, foi desenvolvida uma placa com 1,6 mm de espessura, 50 mm de largura e 50,6 mm de comprimento. Essa placa foi unida à outra placa idêntica por meio de uma junta de mesmo material e utilizando rebites de diâmetro igual a 2 mm como elemento de conexão. O corpo de prova resultante é ilustrado nas figuras 8 e 9.

Figura 5 – Orientações das quatro primeiras camadas.



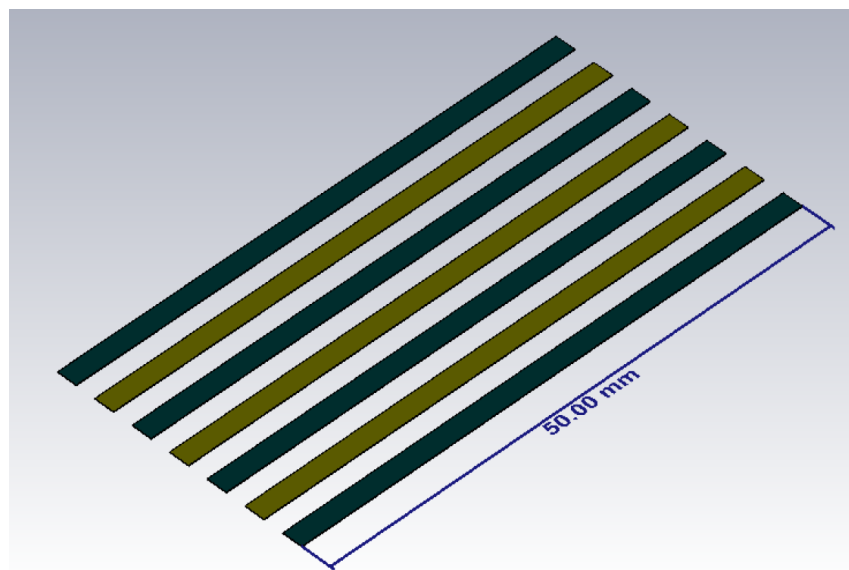
Fonte: Elaborada pelo autor.

Figura 6 – Dimensões de largura e espessura da fibra.



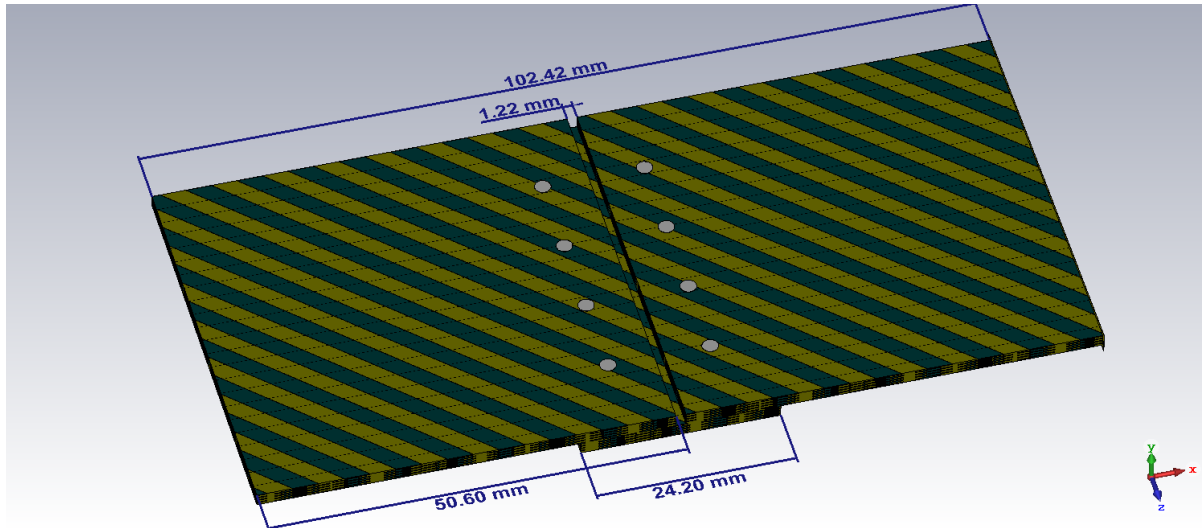
Fonte: Elaborada pelo autor.

Figura 7 – Dimensão longitudinal das frações de fibra e matriz.



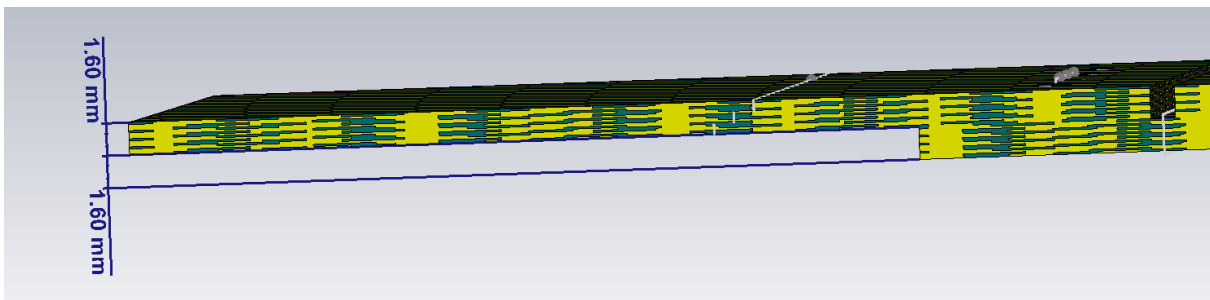
Fonte: Elaborada pelo autor.

Figura 8 – Cotas principais do primeiro corpo de prova.



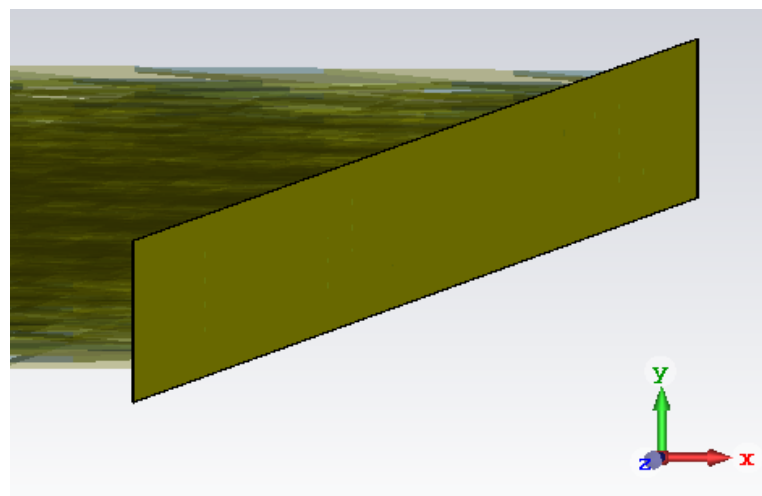
Fonte: Elaborada pelo autor.

Figura 9 – Cotas laterais do primeiro corpo de prova.



Fonte: Elaborada pelo autor.

Figura 10 – Chapa metálica adicionada ao final do modelo.



Fonte: Elaborada pelo autor.

Para evitar que os resultados obtidos ao final da simulação apresentassem um comportamento demasiadamente ruidoso, foi adicionado ao modelo uma chapa metálica para facilitar o aterramento de toda região terminal do modelo. Esse recurso é uma forma de evitar que a corrente e os efeitos magnéticos se refletissem ao atingir o final do corpo de prova. A chapa metálica foi feita de cobre e pode ser visualizada na figura 10.

4. 4 AJUSTES PRÉVIOS A PRIMEIRA SIMULAÇÃO

No CST Studio, uma das formas de controle de qualidade das simulações é o refinamento da malha de células (regiões do material) analisadas pelo software. Quanto mais refinada a malha, menores as células se tornam e mais células são necessárias para descrever o corpo de prova. Consequentemente, quanto maior o número de células, mais detalhada é a simulação e mais fiéis à realidade são os resultados.

Naturalmente, conforme aumenta o refinamento da malha de células, aumentam também, tanto o esforço computacional necessário para a realização da simulação quanto o espaço de memória RAM utilizado para armazenamento temporário dos dados. Quando o desenvolvimento do modelo foi concluído, o software estabeleceu, automaticamente, um refinamento que gerou cerca de 5 milhões de células, representando fielmente a estrutura do material.

Mesmo que o computador utilizado para a pesquisa tivesse memória suficiente, realizar uma simulação com essa precisão, levaria mais de um mês de processamento contínuo. Por isso, alterando as configurações do CST, o número de células foi reduzido para aproximadamente 74,7 mil unidades, de forma que as simulações pudessem ser realizadas levando de 3 a 4 dias e, ainda sim, os resultados fossem satisfatórios. Ou seja, sem diminuições significativas de precisão e confiabilidade.

As principais configurações da máquina utilizada para realizar as simulações estão especificadas na tabela 1.

Para estudar o comportamento da corrente elétrica no material, foram posicionados estrategicamente monitores de corrente (curvas que captam o sentido e a intensidade total das correntes que passam pela região delimitada por elas). Como ilustram as figuras 11 e 12.

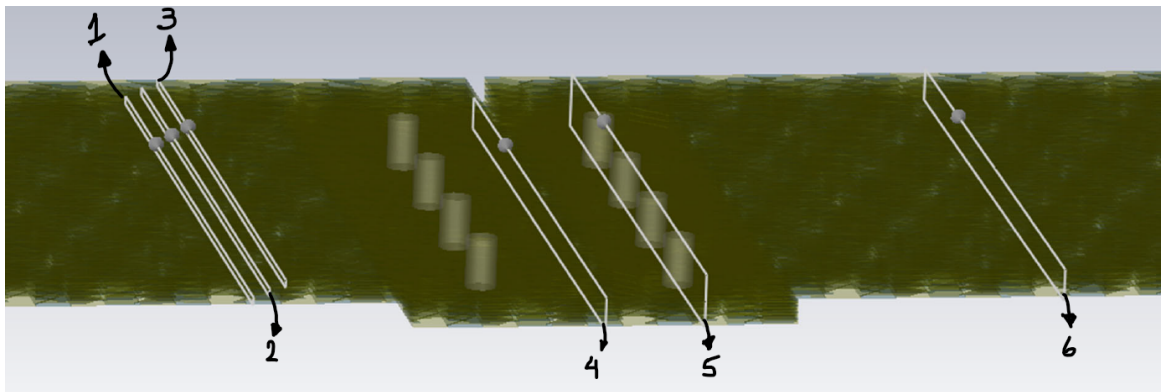
Na figura 11, os maiores monitores (4, 5 e 6) têm a finalidade de medir a corrente total passando pela região do material onde eles se encontram, enquanto os menores (1, 2 e 3) medem os níveis de corrente em cada camada do compósito.

Tabela 1 – Configurações da máquina utilizada.

Componente	Descrição
Processador	Intel(R) Core(TM) i7-9750H
Clock do processador	2.60 GHz
Memória RAM	16,0 GB (utilizável: 15,8 GB)
Disco rígido	1 TB (utilizável: 931 GB)
Placa de vídeo	NVIDIA GeForce GTX 1650
Sistema operacional	Windows 10 Pro - 64 bits

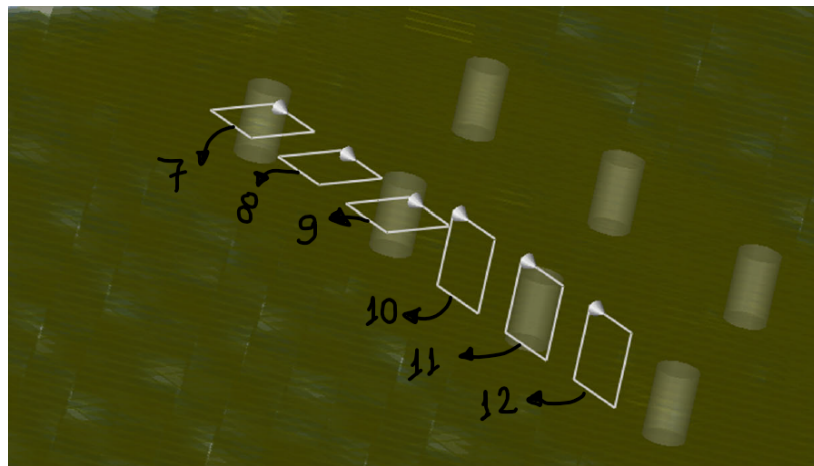
Fonte: Elaborada pelo autor.

Figura 11 – Monitores de correntes no primeiro modelo.



Fonte: Elaborada pelo autor.

Figura 12 – Demais monitores de correntes no primeiro modelo.



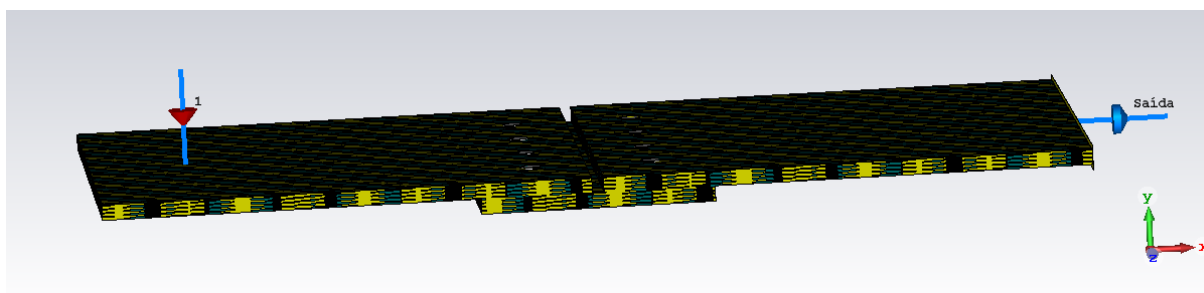
Fonte: Elaborada pelo autor.

Na figura 12, os monitores retangulares possibilitam uma comparação entre os níveis de corrente nos rebites e a corrente que percorre o CFC na região da junta. Ao mesmo tempo, tornam possível analisar se, nesta região, a corrente percorre o material no eixo longitudinal (7, 8 e 9) ou na direção da espessura (10, 11 e 12).

É importante ter em mente que para evitar que os gráficos gerados pelo software mostrando o resultado obtido pelos monitores de corrente fiquem poluídos com muitas curvas sobrepostas, alguns deles foram posicionados no sentido contrário de medição, por isso, em alguns casos, um valor de corrente negativo não significa necessariamente que a corrente flua no sentido oposto à outro monitor que apresentar corrente positiva, mas sim que, por conveniência, os monitores estão posicionados de maneira contrária.

Para definir o caminho a ser percorrido pela corrente, foram utilizados elementos que têm seu funcionamento baseado em diodos. Ou seja, permitem a passagem da corrente em apenas uma direção. O ponto de impacto da descarga elétrica na superfície do modelo foi definido com o uso de um elemento chamado discrete port, que descarrega toda a corrente elétrica no material. O ponto pelo qual a corrente flui para o barramento de terra (condição imposta na fronteira), após percorrer todo o corpo de prova, foi definido, por um elemento chamado lumped element, como mostra a figura 13.

Figura 13 – Pontos de alocação da discret port (elemento em azul e vermelho) e do lumped element (apenas em azul).



Fonte: Elaborada pelo autor.

Ainda, para reduzir um pouco o tempo de simulação, foram realizados ajustes nos parâmetros do sinal que descreve o comportamento da descarga atmosférica para que o processo completo de descarga levasse 100 μ s. A nova configuração dos parâmetros é explicitada na tabela 2 e o sinal resultante na figura 14.

Sobre os parâmetros da tabela 2, vale frisar o significado. Dessa forma:

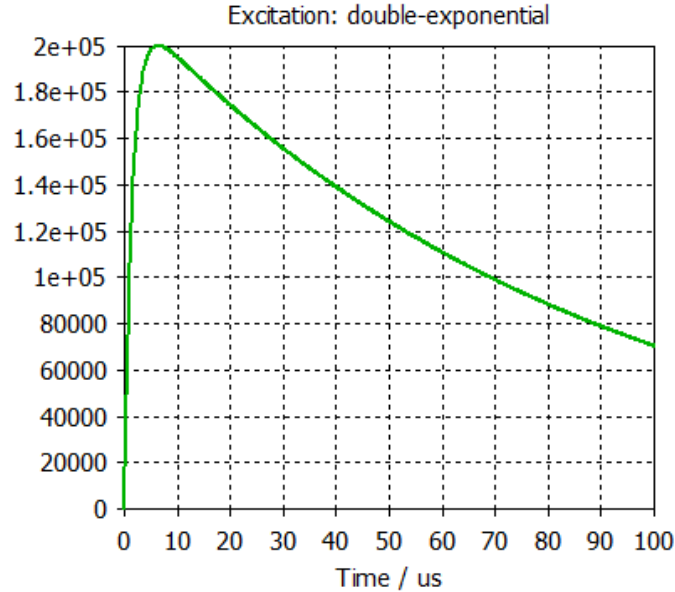
- “t_total” é o tempo do processo de descarga completo;
- “t_amplit” é o valor da amplitude do sinal de dupla-exponencial;
- “t_rise” e “t_fall” são parâmetros de proporção entre o tempo de subida e descida da função. Os valores escolhidos foram os padrões sugeridos pelo software para dar o formato adequado à curva.

Tabela 2 – Parâmetros da curva dupla-exponencial.

Nome	Valor
t_total	100 μ s
t_rise	1,55 μ s
t_fall	88,07 μ s
t_amplit	218810

Fonte: Elaborada pelo autor.

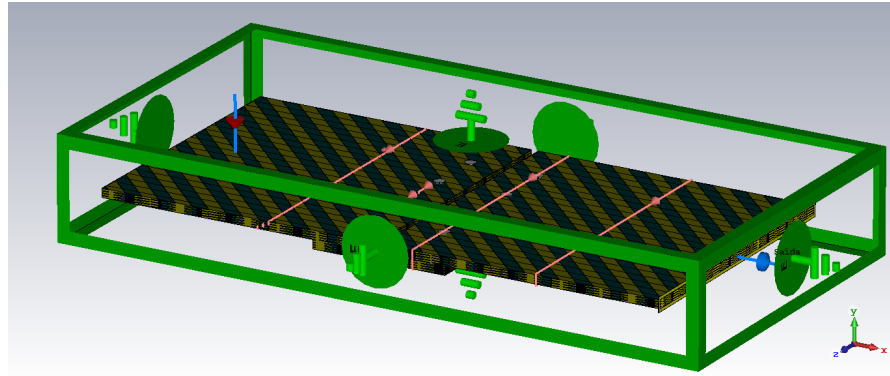
Figura 14 – Sinal a ser conduzido pela “discret port”.



Fonte: Elaborada pelo autor.

Por fim, antes do início da simulação, para que fosse possível resolver as equações de Maxwell de forma adequada, foram adicionadas a simulação condições de contorno que fazem com que todas as fronteiras (ou bounding box) estivessem aterradas. Essa configuração é esquematizada na figura 15.

Figura 15 – Condições de contorno das fronteiras.



Fonte: Elaborada pelo autor.

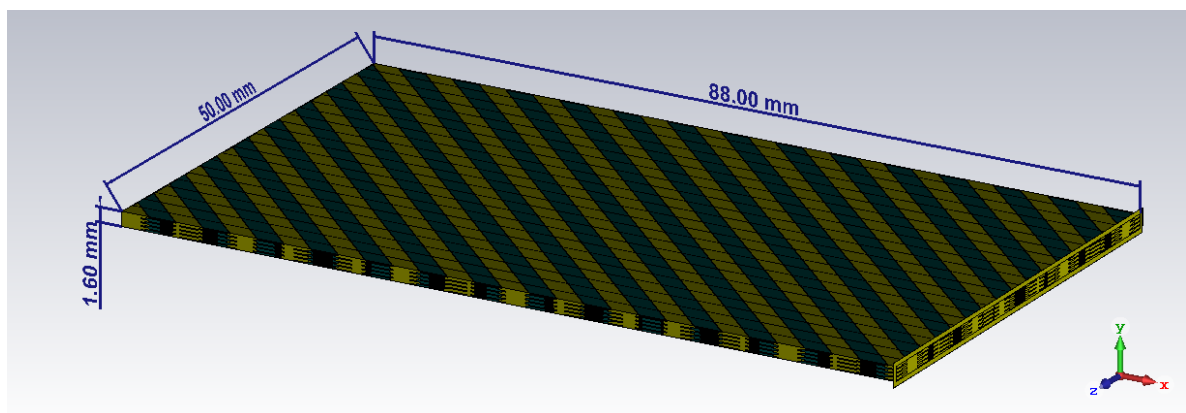
4. 5 DESENVOLVIMENTO DO SEGUNDO CORPO DE PROVA

Uma vez que a seção 5.1 apresenta uma visão geral do comportamento da corrente em uma região complexa da aeronave (onde estão presentes um reforçador e alguns fixadores metálicos), podemos passar a estudar algumas regiões mais simples a fim de entender melhor como as características condutivas variam nas diferentes direções do material (comprimento e espessura, principalmente), conforme a estrutura interna é alterada.

Para isso, inicialmente, foi desenvolvido um modelo muito similar a placa usada na seção 4.3. A forma com que o modelo foi construído foi exatamente a mesma, entretanto, dessa vez, foi feita uma placa única, que representa, por exemplo, a área contida no centro de um painel enquadramento da asa, onde não está presente nenhum elemento de junta.

Foi construído um corpo de prova de dimensões $88\text{ mm} \times 50\text{ mm} \times 1,6\text{ mm}$, como mostra a figura 16.

Figura 16 – Dimensões do segundo corpo de prova.



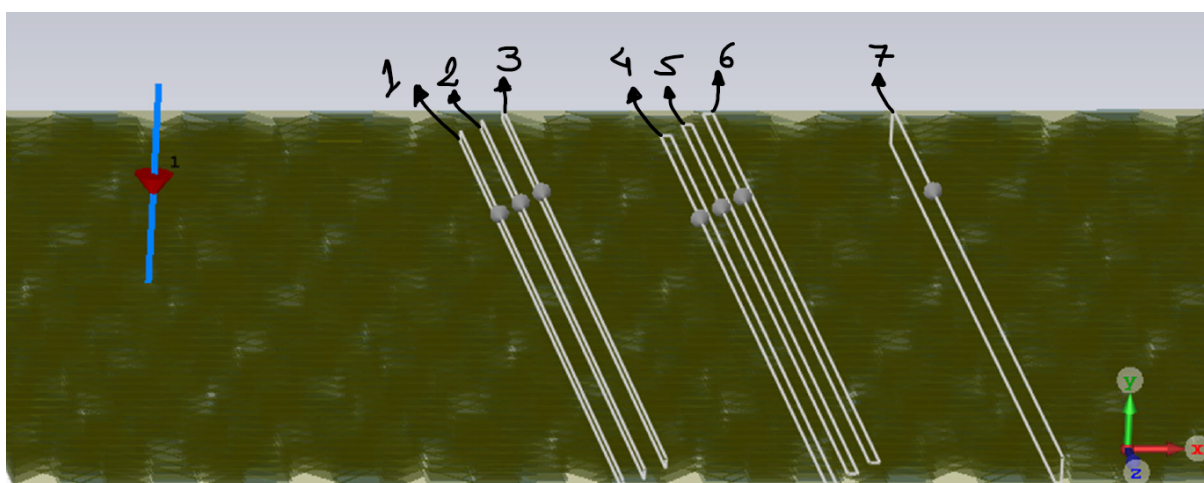
Fonte: Elaborada pelo autor.

4. 6 AJUSTES PRÉVIOS A SEGUNDA SIMULAÇÃO

Para que fosse possível, então, monitorar a condutividade nas direções de interesse, foram posicionados monitores de corrente como mostra a figura 17.

Os monitores 1, 2 e 3 foram posicionados para medir a corrente que passa em diferentes seções da espessura do modelo no sentido do comprimento, enquanto, os monitores 4, 5 e 6 foram posicionados de forma que pudessem medir a corrente que atravessa essas seções do corpo de prova na direção da espessura. O monitor 7, por fim, foi colocado para medir o nível total da corrente que passa por aquela seção da placa.

Figura 17 – Monitores de corrente do segundo corpo de prova.



Fonte: Elaborada pelo autor.

4. 7 DESENVOLVIMENTO DO TERCEIRO CORPO DE PROVA

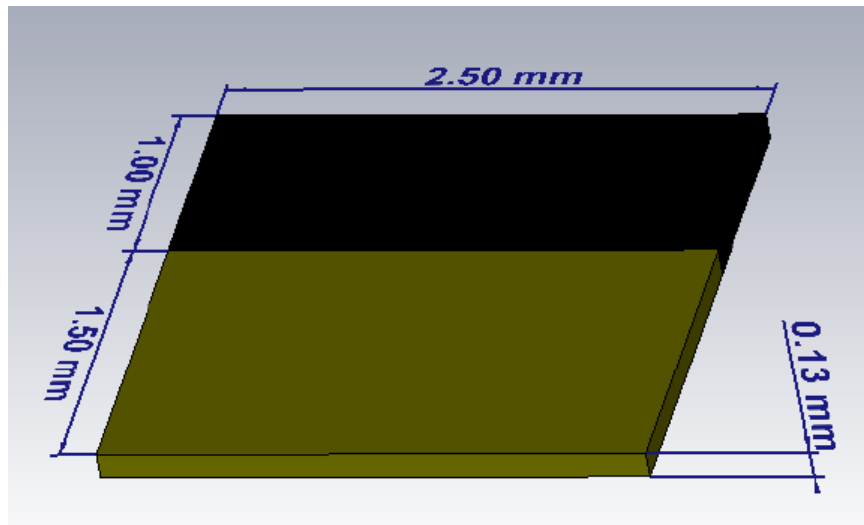
Dando continuidade ao planejamento, com o auxílio do grupo de aerodesign Adelphi - FESJ/UNESP, foi possível desenvolver um modelo que representasse um dos aeromodelos (modelo Netuno) que foram desenvolvidos pelo grupo.

O modelo faz uso de material compósito em grande parte da estrutura da asa. Da mesma forma que na seção 4.5, o modelo é uma placa única composta por matriz polimérica e preenchido com fibras de carbono. Entretanto, a organização das fibras e a proporção fibra-matriz são diferentes.

O corpo de prova foi desenvolvido de forma que a proporção entre as quantidades de fibra e de resina fosse de 50/50 (%) em massa. Isto é, 50% do peso total do modelo é fibra de carbono e 50% é resina epóxi. Além disso, as fibras deviam ser tramadas à 90° umas das outras.

A fim de atender à condição de proporcionalidade entre as massas de carbono e de resina contidas no modelo, adotou-se uma razão de volume de $3/2$. Ou seja, 3 unidades de volume de resina para cada 2 unidades de volume de fibra de carbono (figura 18).

Figura 18 – Dimensões de uma fração do material do terceiro modelo.

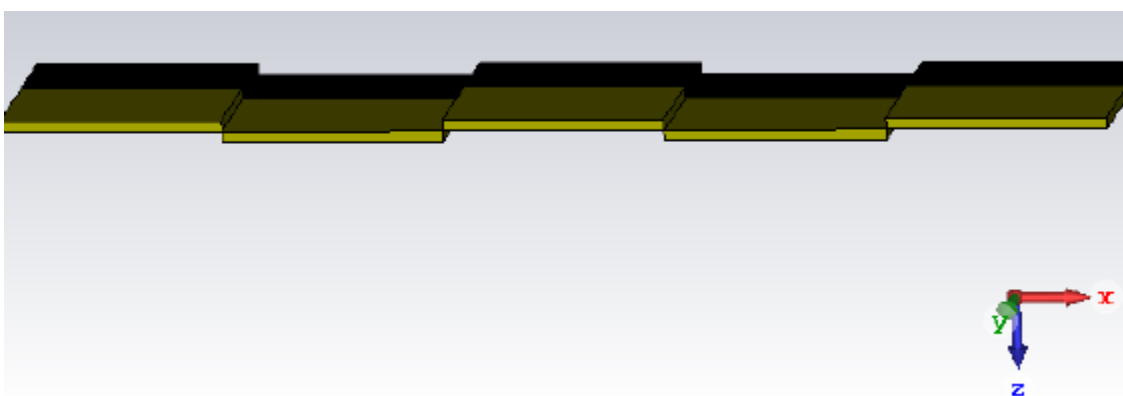


Fonte: Elaborada pelo autor.

Para simular a tramagem, seguiu-se o padrão de construção do modelo mostrado nas figuras 19 a 21.

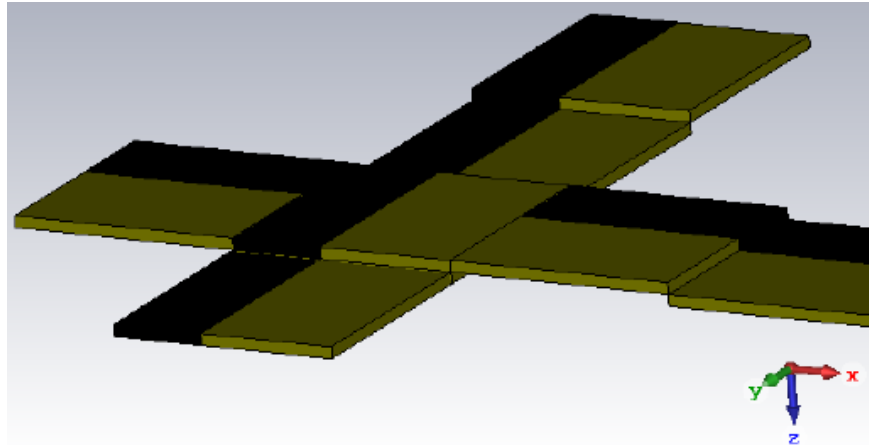
Expandindo esse padrão nas direções x e y (sistema de coordenadas na figura 22) e sobrepondo 5 camadas de material na direção z , formou-se a estrutura principal do corpo de prova, de dimensões $85\text{ mm} \times 50\text{ mm} \times 1,3\text{ mm}$, ilustrado na figura 27.

Figura 19 – Padrão de continuidade das fibras e da matriz do terceiro modelo.



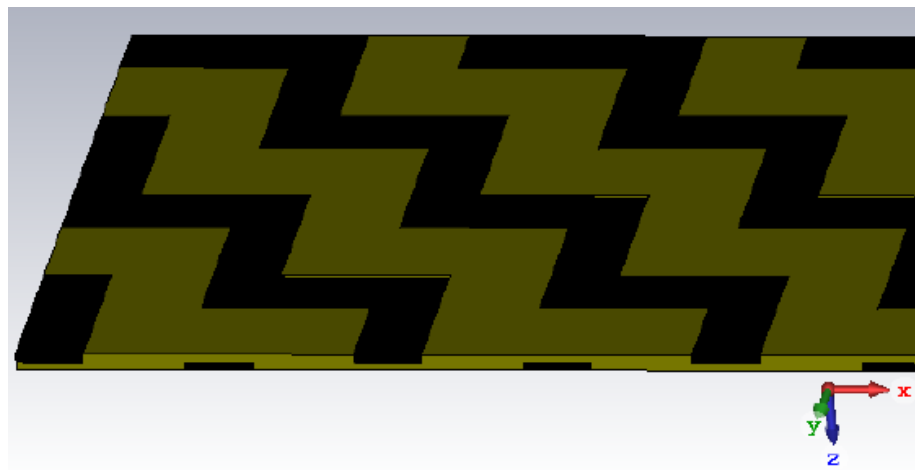
Fonte: Elaborada pelo autor.

Figura 20 – Modo de encaixe para construção da trama do terceiro modelo.



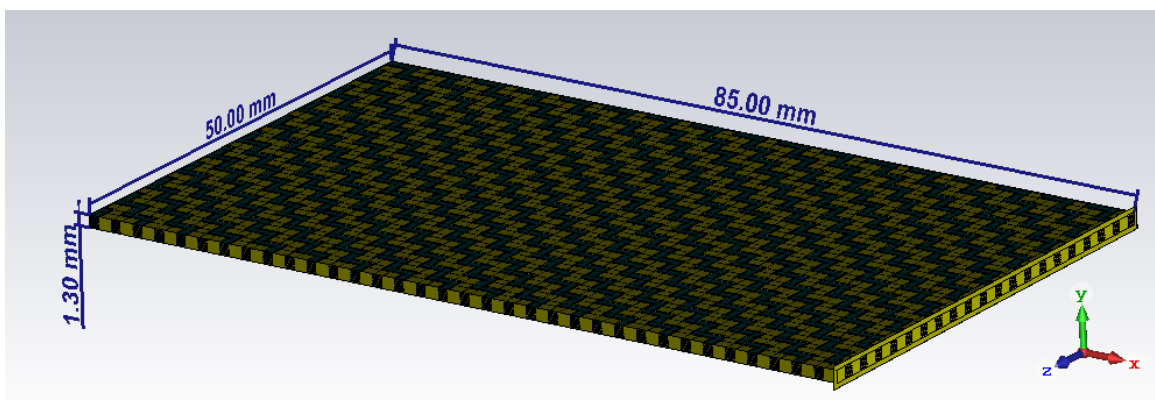
Fonte: Elaborada pelo autor.

Figura 21 – Padrão macroscópico de construção do modelo.



Fonte: Elaborada pelo autor.

Figura 22 – Dimensões do terceiro modelo.



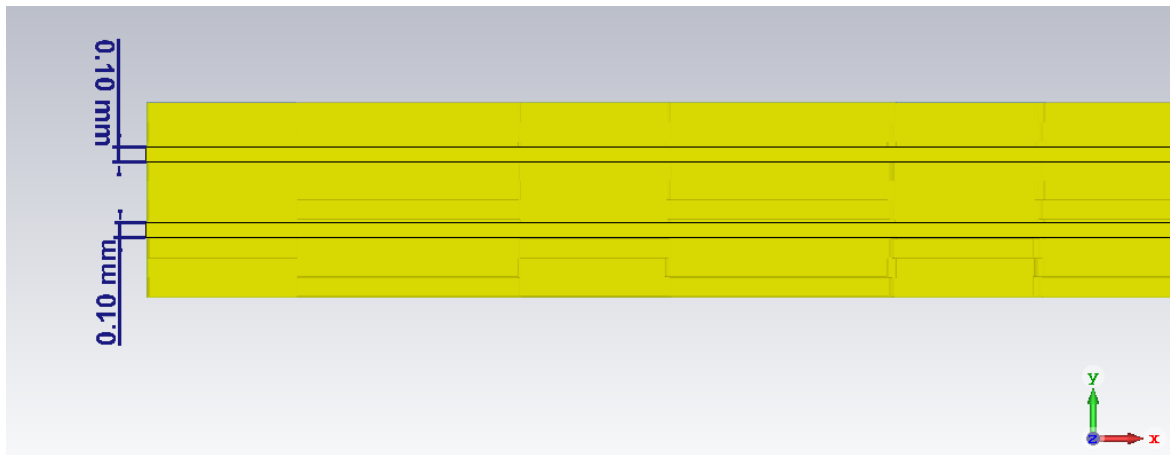
Fonte: Elaborada pelo autor.

4. 8 DESENVOLVIMENTO DO QUARTO CORPO DE PROVA

Para efeito de comparação, foi desenvolvido um modelo hipotético, com os caminhos de condução ôhmica ainda mais limitados que os anteriores. O principal objetivo era isolar as diferentes camadas de fibra de carbono no sentido da espessura, separando cada camada com um preenchimento de resina. O objetivo é registrar como as camadas de resina epoxy iriam se comportar em relação a sua condutividade.

Então, foi construído um modelo baseado no corpo de prova anterior, com a diferença de que, neste caso, foram inseridas duas finas camadas de resina com 0.1 mm de espessura ao longo de toda área do modelo, como ilustra a figura 23.

Figura 23 – Camadas de resina inclusas.



Fonte: Elaborada pelo autor.

5 RESULTADOS

5. 1 RESULTADOS PERTINENTES A PRIMEIRA SIMULAÇÃO

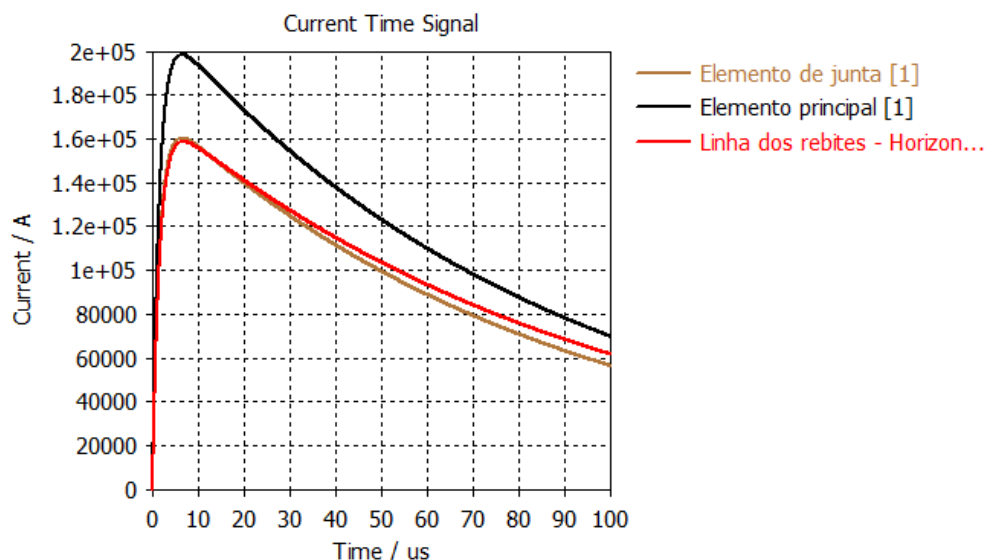
Nos resultados da figura 24, foi possível perceber que os níveis de corrente (na direção do comprimento) dos painéis principais se mantiveram extremamente próximos ao valor da corrente total conduzida pela discret port. Entretanto, as correntes nessa mesma direção na região do reforçador, inclusive ao redor dos rebites, se mostraram cerca de 20% menores em relação às das dos painéis principais.

Pelos registros das figuras 25 e 26 foi possível ter uma idéia do quanto e de como as correntes se infiltraram em direção às camadas mais internas do corpo de prova. Observando a figura 25, fica claro que, na região onde foi colocado o monitor de corrente, os maiores níveis de corrente estavam concentrados nas camadas centrais do modelo.

Quando a corrente atingiu a região do elemento de junta, então, a figura 26 mostrou que a maior infiltração do painel para o reforçador se deu próxima aos rebites. Esse comportamento é esperado, visto que o rebite foi feito de material metálico. Entretanto, as regiões de material compósito não ficaram completamente livres de corrente. Nesse caso, os contatos entre as camadas de fibra podem ter sido responsáveis pela condução na direção da espessura.

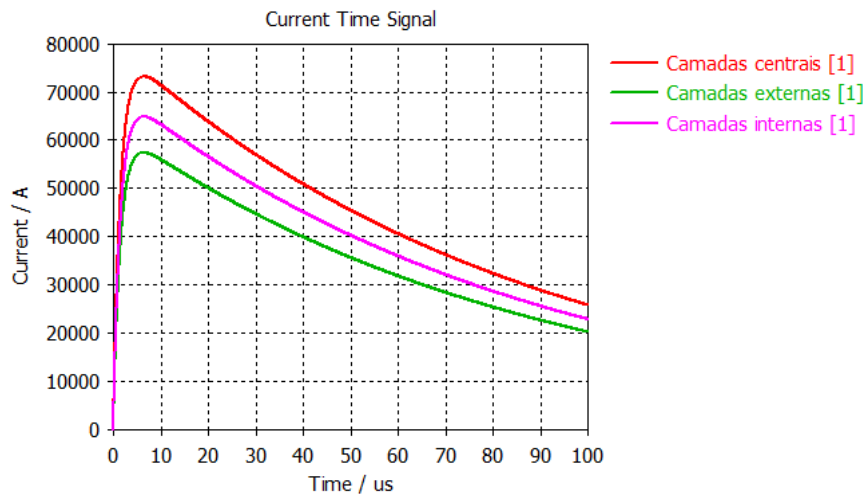
Vale ressaltar que as intensidades reduzidas contidas nos resultados estão ligadas ao fato do valor medido pelo monitor de corrente ser dependente da área abrangida pelo monitor.

Figura 24 – Monitores no sentido do comprimento (maiores).



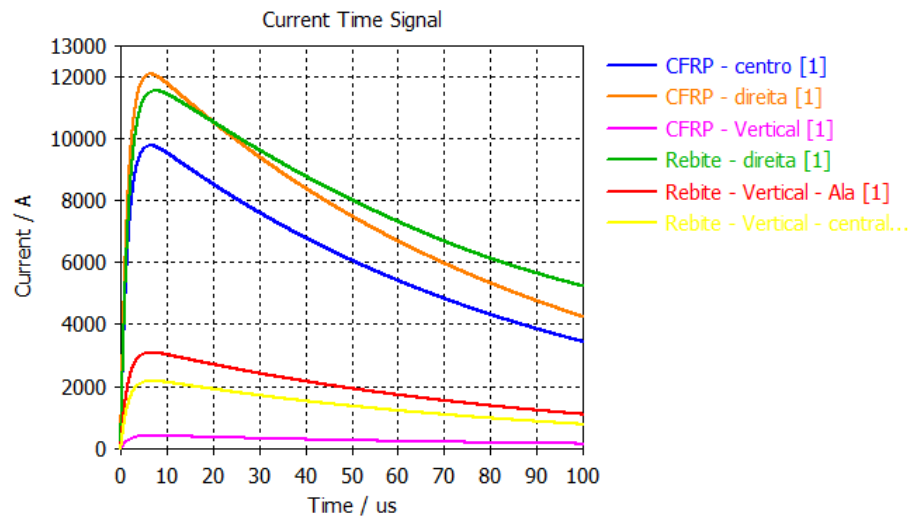
Fonte: Elaborada pelo autor.

Figura 25 – Monitores no sentido do comprimento (menores).



Fonte: Elaborada pelo autor.

Figura 26 – Monitores da figura 12.

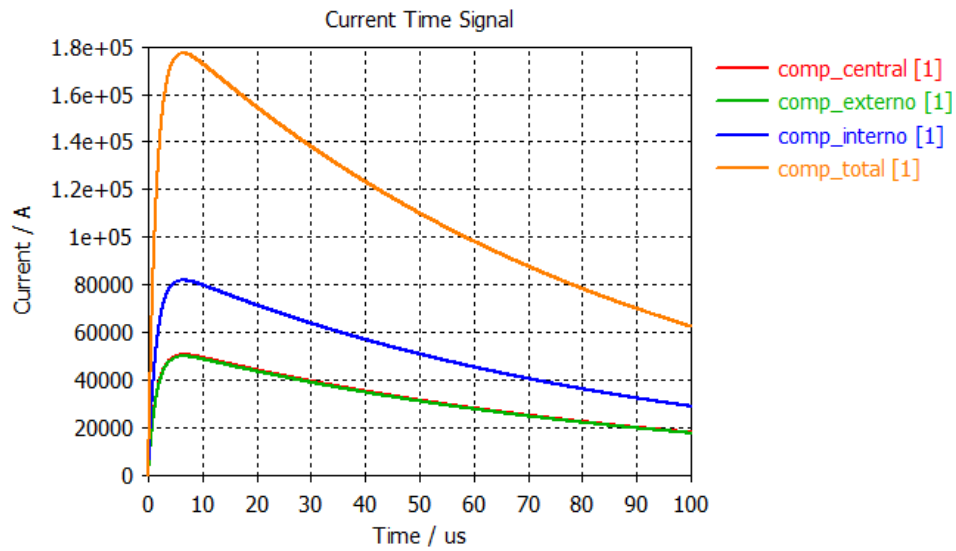


Fonte: Elaborada pelo autor.

5. 2 RESULTADOS PERTINENTES A SEGUNDA SIMULAÇÃO

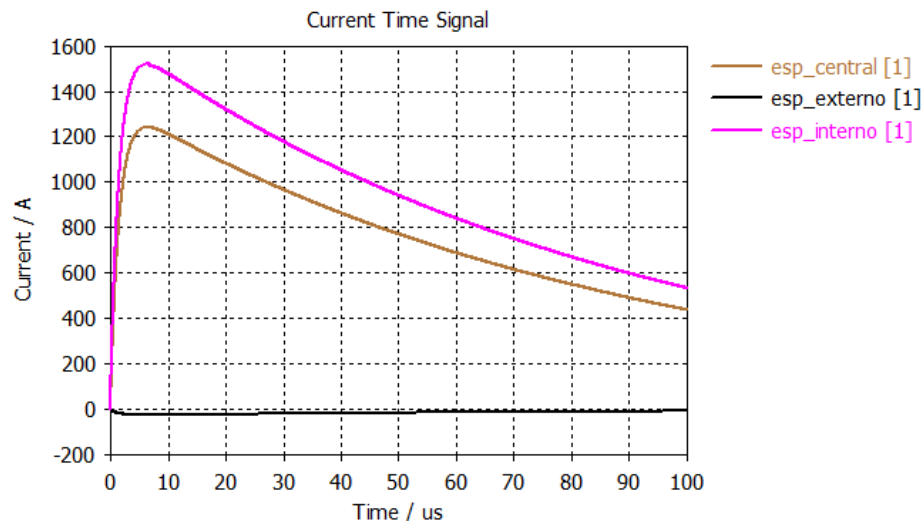
A figura 27 mostra que, a retirada dos elementos metálicos, juntamente com a região do reforçador, teve impacto tanto nos níveis totais das correntes conduzidas ao longo do painel quanto na distribuição dessas correntes ao longo da espessura do modelo. Nessa nova configuração, as correntes se infiltraram ainda mais no corpo de prova. Aproximadamente metade da corrente total conduzida foi medida na região do monitor interno. De forma complementar, os resultados contidos na figura 28 reforçam que os níveis de corrente na região interna do modelo são mais elevados em relação às demais seções.

Figura 27 – Monitores no sentido do comprimento.



Fonte: Elaborada pelo autor.

Figura 28 – Monitores no sentido da espessura.



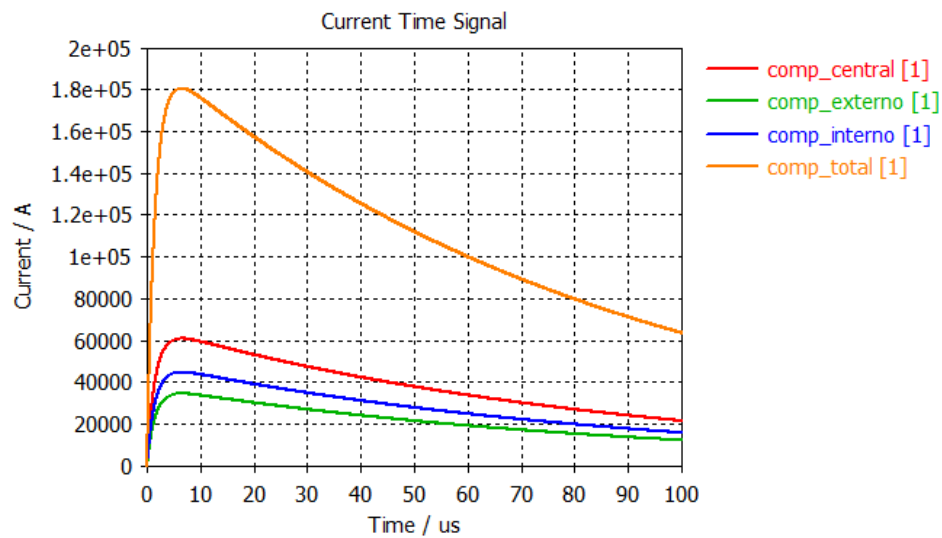
Fonte: Elaborada pelo autor.

5.3 RESULTADOS PERTINENTES A TERCEIRA SIMULAÇÃO

Os registros presentes na figura 29 mostram que, apesar dos monitores de corrente terem sido colocados na mesma posição em relação à discret port nas simulações 1 e 2, o comportamento da corrente ao longo das seções é expressivamente diferente. Tal diferença reforça a ideia de que a forma com que o compósito é fabricado influencia diretamente nas características resistivas do mesmo.

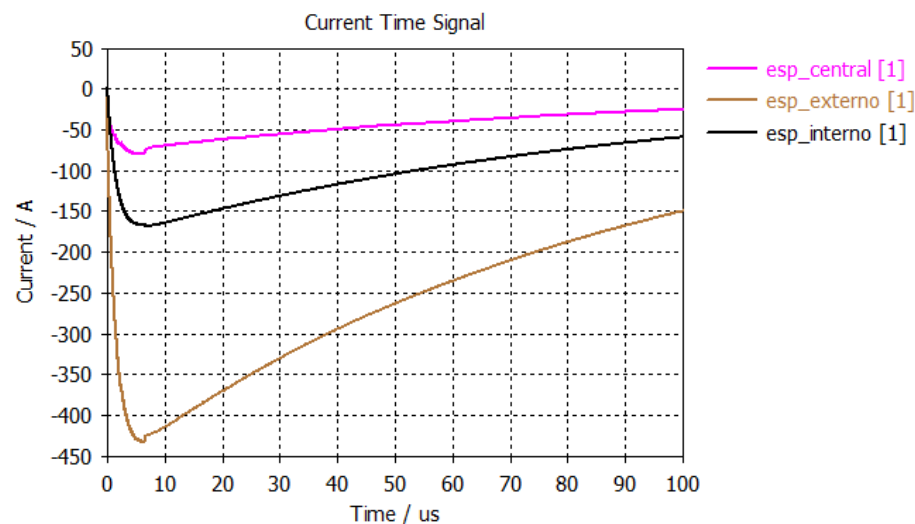
As diferentes curvas presentes nas figuras 27, 28, 29 e 30, contudo, sugerem que, nas simulações, a corrente elétrica vem percorrendo majoritariamente os caminhos determinados pelas fibras de carbono, ignorando o comportamento observado nos estudos de J. Sun et al. (28) citado na seção 3.2.2 deste trabalho. Essa ideia surge do fato de que a soma dos picos de correntes nas diferentes seções (figura 29) não é igual ao pico de corrente total, além disso, a figura 30 mostra que as correntes no sentido da espessura apresentam módulo muito menor do que as correntes presentes na figura 28 e, ainda, estão no sentido contrário.

Figura 29 – Monitores no sentido do comprimento.



Fonte: Elaborada pelo autor.

Figura 30 – Monitores no sentido da espessura.

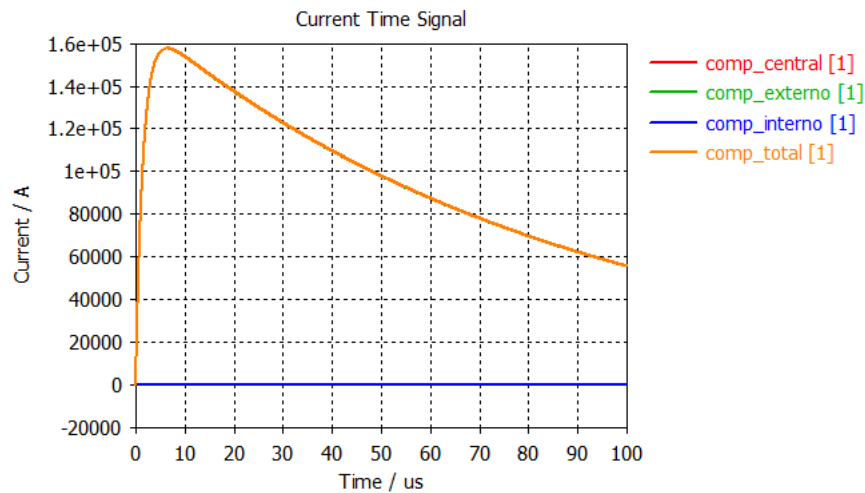


Fonte: Elaborada pelo autor.

5. 4 RESULTADOS PERTINENTES A QUARTA SIMULAÇÃO

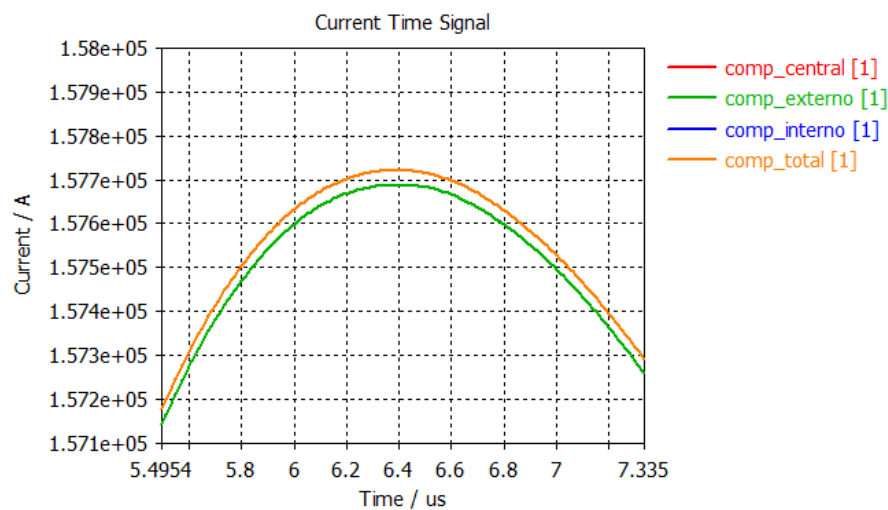
Os resultados contidos na figura 31 mostraram que, de fato, durante a simulação, a corrente tem enorme dificuldade de penetrar o material dielétrico, ainda que mantidos os parâmetros que garantem elevada amperagem de descarga (cerca de 200 kA). Nessa figura, é possível ver que a curva que mensura a corrente total percorrendo o corpo de prova e a curva que mensura a corrente que passa na seção mais exterior do mesmo (região anterior à primeira camada de resina) estão praticamente sobrepostas (figura 32), enquanto os monitores de corrente das demais seções registraram níveis de corrente insignificantes.

Figura 31 – Monitores de corrente no sentido do comprimento.



Fonte: Elaborada pelo autor.

Figura 32 – Região de pico de corrente.



Fonte: Elaborada pelo autor.

6 CONCLUSÕES

Pela análise das simulações realizadas ao longo desse projeto, ficou claro que são inúmeros os fatores que influenciam no comportamento das descargas atmosféricas em materiais compósitos. Dentre eles podemos citar o modo com que as fibras se organizam na estrutura matricial, a proporção em que as fibras estão presentes no material, a região em que o material compósito atingido se encontra na aeronave.

Quanto ao modo com que as fibras se organizam na estrutura matricial, e à proporção em que as fibras estão presentes no material, observou-se que há uma influência direta na resistividade do material e na forma com que a corrente o percorre. Assim, atentar-se ao modo de construção da estrutura e não somente ao material utilizado é uma forma de controlar melhor o comportamento elétrico desses corpos.

Observando os resultados contidos neste trabalho, fica claro que, ainda que via software, a condutividade de um material compósito é fortemente influenciada pela quantidade de interfaces fibra-fibra e fibra-matriz-fibra presente no material. Por se tratarem de simulações consideravelmente simplificadas, entretanto, os métodos não são capazes de reproduzir fielmente o perfil de condutividade não linear apresentado por compósitos quando submetidos a variações bruscas de campo elétrico. Contudo, as simulações se mostraram suficientemente satisfatórias para as análises inicialmente propostas.

De forma geral, qualquer tipo de estrutura aeronáutica utilizada atualmente está, de fato, sujeita a altíssimos valores de corrente elétrica quando atingida por alguma descarga atmosférica. Por isso, é vital que sejam realizados procedimentos para assegurar que faíscas geradas pela movimentação elétrica no material não se infiltrem, por exemplo, nos tanques de combustíveis da aeronave. Neste trabalho, foi possível notar que, mesmo não sendo o objetivo principal, independente da forma com que o CFRP é construído, altas correntes elétricas são capazes de se infiltrar e percorrer o material inclusive em suas regiões mais internas.

Por fim, o estudo via software do comportamento dos materiais compósitos quando sujeitos à descargas elétricas é uma forma de aprimorar cada vez mais os materiais usados na aviação, fazendo com que a ocorrência de raios durante o voo cause menos danos à estrutura da aeronave e aos instrumentos de voo, tornando cada vez menores os gastos com manutenção e sendo cada vez menos preocupantes, tanto no aspecto financeiro quanto nas questões de segurança, que acabam por estarem sempre relacionados uns aos outros.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. J. Y. Lee, “**Electromagnetic Environmental Effects on Aural Warning Systems in Aircraft**”, 2019 IEEE Aerospace Conference, 2-9 March 2019, Big Sky, MT, USA, doi: 10.1109/AERO.2019.8741667
2. J. Pissolato, D. W. P. Thomas, C. Christopoulos, R. Callegari, S. O. Nunes, “**Current density distribution in carbon fiber composites following lightning strikes in aircraft**”, International Conference on Lightning and Static Electricity - ICOLSE 2017, Nagoya, Japão, 2017.
3. R. Callegari, “**Simulações para o estudo da proteção de aeronaves usando fibras de carbono**” Iniciação Científica, Universidade Estadual de Campinas, 2019. Orientador: Jose Pissolato Filho.
4. R. A. Araujo, “**Modelagem eletromagnética de estruturas aeronáuticas em compósitos**”, Iniciação Científica, Universidade Estadual de Campinas, 2008. Orientador: Jose Pissolato Filho.
5. “**A Era dos Compósitos na Fabricação de Aeronaves**”, <http://blog.hangar33.com.br/a-era-dos-compositos-na-fabricacao-das-aeronaves/>, acesso em 25 de março de 2020.
6. H. Librantz, A. F. H. Librantz, “**Descargas atmosféricas e suas interações com aeronaves**”, Exacta, vol. 4, no. 2, pp. 247-258, julho/dezembro, 2006.
7. Grupo de eletricidade atmosférica - ELAT, “**Relâmpagos e efeitos em aviões**”. <http://www.inpe.br/webelat/homepage/menu/infor/relampagos.e.efeitos/avioes.php>, acesso em 25 de março de 2020.
8. L F. Nunes de Souza, H. Librantz, J. Amorim, G. Adabo, “**Analysis of direct effects of lightning on composite structures of aircraft**”, IX International Symposium on Lightning Protection, 4 pp., 26 a 30 de novembro de 2007, Foz do Iguaçu, Brasil.
9. S. A. Baldacim, N. Cristofani, J.L.F Junior, J. R. Lautenschlager, “**Lightning effects in aircraft of the composite material**”, 17º CBECIMat - Congresso Brasileiro de Engenharia e Ciência dos Materiais, pp. 3247-3258, 15 a 19 de novembro de 2006, Foz do Iguaçu, Brasil.
10. M. Apra, M. D'Amore, K. Gigliotti, M. Sabrina Sarto, V. Volpi, “**Lightning Indirect Effects Certification of a Transport Aircraft by Numerical Simulation**”, IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility, vol. 50, no. 3, pp. 513-523, Aug. 2008, doi: 10.1109/TEMC.2008.927738.
11. H. Mulazimoglu, L. Haylock, “**Recent developments in techniques to minimize lightning current arcing between fasteners and composite structure**”, International Conference on Lightning and Static Electricity. S4B1, 16 pp., Oxford, 2011.

12. J. R. Hart, “**Characterization of carbon fiber polymer matrix composites subjected to simultaneous application of electric current pulse and low velocity impact**”, Master of Science Thesis, University of Iowa, 2011. Versão digital: <http://ir.uiowa.edu/etd/1143>.
13. S. Rea, D. Linton, E. Orr, J. McConnell, “**Electromagnetic shielding properties of carbon fibre composites in avionic systems**”, Microwave Review, pp. 29-32, June, 2005.
14. Society of Automotive Engineers, Inc. (SAE), SAE ARP 5412, “**Aircraft lightning environment and related test waveforms**”, 2005.
15. J. C. Corbin and W. W. Cooley, “**Assessment of Aircraft Susceptibility/Vulnerability to Lightning and Development of Lightning-Protection Design Criteria**” in IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility, vol. EMC-24, no. 2, pp. 225-237, May 1982, doi: 10.1109/TEMPC.1982.304033.
16. C. Karck, C. Metzner, “**Lightning Protection of Carbon Fibre Reinforced Plastics - An Overview**”, 33rd International Conference on Lightning Protection, pp. 8, 25-30 September, 2016, Estoril, Portugal, doi: 10.1109/ICLP.2016.7791441.
17. D. Krutílek, Z. Raida, J. Kuþera, Z. Reznícek, “**Lightning Protection of Aircraft Systems Installed inside Composite Nose: Principal Analysis**”, 2015 International Conference on Electromagnetics in Advanced Applications (ICEAA), pp. 934-937, 7-11 September, 2015, Turin, Italy, doi: 10.1109/ICEAA.2015.7297253.
18. J. H. Hagenguth, “**Lightning Stroke Damage to Aircraft**”, Transactions of the American Institute of Electrical Engineers, vol. 68, no. 2, pp. 1036-1046, July 1949, doi: 10.1109/T-AIEE.1949.5060047.
19. D. Krutílek, Z. Raida, “**Electromagnetic Simulation for Certification of Small Aircraft: Direct and Indirect Effects of Lightning**”, 26th Conference Radioelektronika, 4 pp., 19-20 April, 2016, Košice, Slovak Republic, doi: 10.1109/RADIOELEK.2016.7477425.
20. S. A. Sebo, G. Shiao-Yi Tsai Li, D. L. Schweickart, C. Walko, “**Measurement of Lightning Strike Current Effects on an Airplane Fuselage Test Setup**”, International Conference on Electric Power Engineering, PowerTech Budapest, pp. 239, August, 29th to September, 2nd, 1999, Budapest, Hungary, doi: 10.1109/PTC.1999.826671.
21. L. A. V. Carneiro, A. M. A. J. Teixeira, “**Propriedades e características dos materiais compósitos poliméricos aplicados na engenharia de construção**”, Revista Militar de Ciência e Tecnologia, ISSN 0102-3542, vol. XXV, pp. 54-66, 3º quadrimestre de 2008.
22. Compósitos, que materiais são esses?
<https://blogdaengenharia.com/materiais-compositos/> . Acesso em 10/02/2023.
23. Materiais compósitos, aspectos gerais e aplicações.
<https://www.ucs.br/site/midia/arquivos/05-12-17-materiais-compositos-e-aplicacoes1.pdf>, Arquivo: materiais_compositos_e_aplicacoes.pdf, Acesso em 10/02/2023.

24. Material da Unifei
https://www.academia.edu/30644333/MATERIAIS_COMP\%C3\%93SITOS
 Arquivo: materiais_compositos_unifei_2021.pdf, Acesso em 10/02/2023.

25. Material da Faculdade de Zootecnia e Engenharia de Alimentos da USP
<https://cetdosmateriais.files.wordpress.com/2012/08/zea-1038-materiais-compc3b3sites.pdf>
 Arquivo: zea-1038-materiais-compc3b3sites.pdf, Acesso 10/02/2023.

26. Material do Instituto Federal
<https://idoc.pub/download/materiais-compositospdf-3no773xvj5ld>
 Arquivo: materiais_compositos_if_rn_2021.pdf, Acesso em 10/02/2023.

27. Material da Universidade em Portugal, Instituto Superior Técnico, Materiais compósitos
http://www.estt.ipt.pt/download/disciplina/2932_Compositos_MC1.pdf
 Acesso em 10/02/2023.

28. J. Sun, X. Tian, Y. Li, Y. Wu, Y. Duan, J. Chen, G. Ziegmann, M. Rong, X. Yao, B. Wang, “**Lightning strike-induced dynamic conduction characteristics and damage behavior of carbon fiber-reinforced polymer composites**”, Composite Structures, 2021, journal homepage: www.elsevier.com/locate/compstruct

29. R. C. Hibbeler, "**Resistência dos Materiais**", Pearson Universities, April, 2019.

30. W. D. Callsiter Jr., D. G. Rethwisch, "**Ciência e Engenharia de Materiais - Uma Introdução**", LTC, October, 2020.