



Universidade Federal do ABC

Projeto de Pesquisa

Iniciação Científica

Análise, simulação e otimização de estruturas aeroespaciais
em materiais compósitos: revisão bibliográfica e estudo de
casos práticos

Área: Engenharia de Estruturas

Subárea: Otimização de estruturas

Junho de 2022

Resumo

A demanda por otimizações em projetos de engenharia é cada vez maior, assim sendo uma prática cada vez mais presente no cotidiano de engenheiros. Um poderoso conceito, comumente chamada de otimização estrutural, é amplamente utilizada para a criação e fabricação de estruturas cada vez mais eficientes estruturalmente, assim como o uso de materiais compósitos. Tendo em vista estes fatores, os objetivos do presente projeto de pesquisa são, primeiramente, realizar uma revisão bibliográfica detalhada acerca de materiais compósitos e, posteriormente, a partir do conteúdo absorvido nessa revisão da literatura, realizar estudos de casos práticos envolvendo as técnicas de análise, simulação e otimização de estruturas aeroespaciais em materiais compósitos.

Palavras-chave: análise e otimização estrutural, materiais compósitos, estruturas aeroespaciais.

1. Introdução e justificativa

A humanidade faz uso da mistura de materiais desde a pré-história, quando foi desenvolvido utensílios e ferramentas necessários à sobrevivência utilizando-se diferentes tipos de material. Nos primórdios da construção civil, um hábito comum era misturar capim seco à argila para produzir tijolos mais resistentes aos esforços solicitantes. No ramo da metalurgia, a união do estanho e do cobre resultou na liga metálica chamada bronze, com propriedades excelentes para alguns usos. A união do zinco e cobre resultou na liga metálica chamada latão.

No final do século XIX, ficou evidenciado que alguns ramos de atividade dependiam fortemente de novos materiais para se desenvolver, especialmente a aviação (DE SOUZA RÊGO et al., 2020). Devido a isso, motivou-se o estudo de materiais mais leves e que cumprissem suas funções estruturais a que foram designados. Devido a essa necessidade constante de componentes cada vez mais leves nas estruturas aeroespaciais a indústria aeronáutica foi a principal pioneira a desenvolver os compósitos como conhecemos atualmente, visando um produto com propriedades mais eficientes para determinada aplicação. Através destes estudos e utilizações os materiais compósitos se mostraram muito eficientes e uteis e seu uso passou a ser empregado em outras áreas.

No cenário econômico atual, a busca pela eficiência estrutural é cada vez maior e bem vista pela indústria e pela sociedade como um todo. A redução do consumo de recursos, do peso, mantendo a mesma eficiência estrutural é a força motriz da otimização estrutural, muito visada por engenheiros de estruturais. Tendo em vista isso, há a necessidade também de realizar otimizações nestes materiais inovadores chamados materiais compósitos. Extraindo a máxima eficiência estrutural possível destes materiais.

1.1 Materiais compósitos

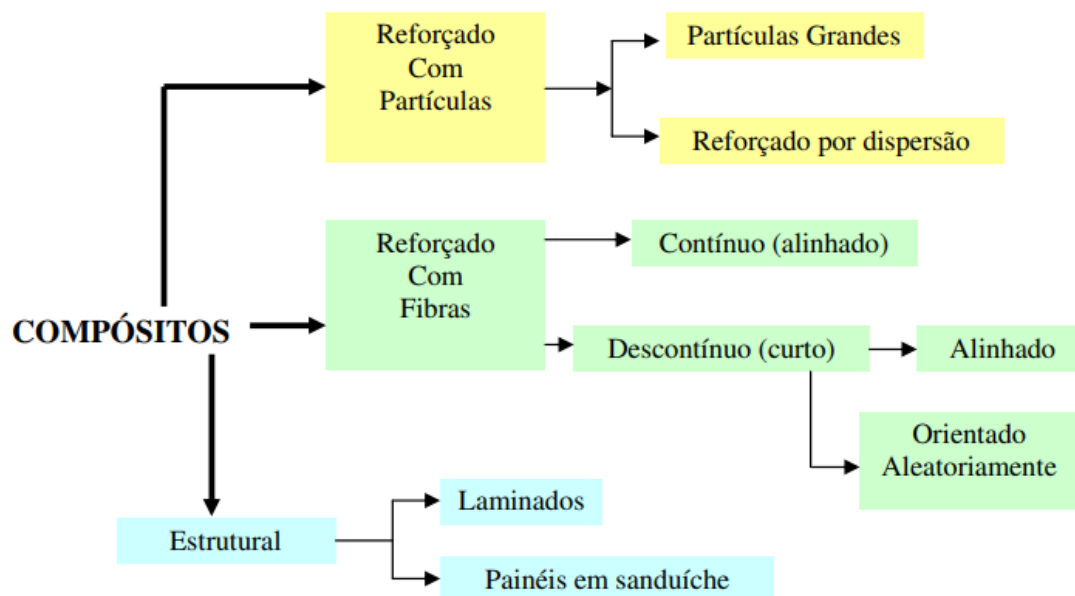
São materiais compósitos são materiais que são produzidos através da utilização de dois ou mais materiais, e esse material resultante é caracterizado por possuir propriedades físicas e/ou químicas distintas quando comparados aos materiais isolados utilizados em sua composição. O largo emprego desta mistura heterogênea de material na engenharia atualmente é devido ao fato de que isso resulta em um composto que apresenta um desempenho estrutural superior comparando aos componentes originais individualmente.

Esta classe de materiais é composta por um material identificado como matriz e outro como reforço. O material matriz é o responsável por preencher os espaços vazios existentes, afim de manter o reforço coeso e em configuração estável, conferindo a estrutura do compósito, enquanto o

material reforço é principal responsável por realçar alguma de suas propriedades desejadas, como a exemplo, resistir os carregamentos mecânicos.

A partir da concepção deste tipo de material é possível categoriza-los, conforme a Figura 1 abaixo.

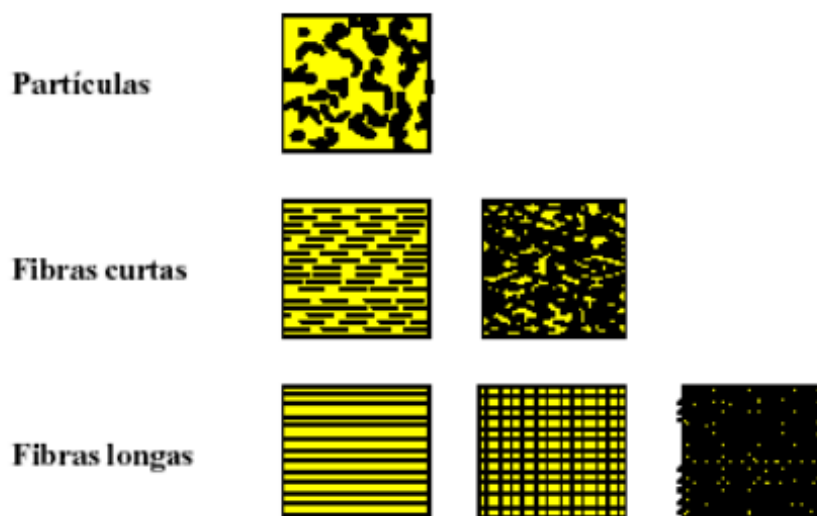
Figura 1: Classificação dos materiais compósitos.



Fonte: MOREIRA, ANABELA MENDES, 2009, p. 3.

O reforço é disposto, de forma geral, em forma de partículas ou fibras, podendo ser curtas ou longas. Na Figura 2 é possível visualizarmos as diferentes formas de disposição dos tipos de reforço de um material compósito.

Figura 2: Representação estrutural de diferentes tipos de reforços.



Fonte: MOREIRA, ANABELA MENDES, 2009, p. 2.

Quando às geometrias resultantes, podemos classificar em 4 principais estruturas: vigas, placas, painéis e cascas. Cada um destes tipos pode possuir suas singularidades quanto ao processo de fabricação, composição e aplicações, além de vantagens e desvantagens inatas. Mas inúmeras outras estruturas mais complexas, como peças de automóveis, colunas, pás do rotor de um helicóptero, entre outras peças, também são fabricados com materiais compósitos. E é fatídico a necessidade da otimização dessas estruturas, e com isso, existem diversos estudos voltados a otimização dessas diferentes estruturas (NIKBAKT et al., 2018).

Normalmente a manufatura de peças feitas de materiais compósitos exigem o uso de moldes que servem para dar forma a peça, cuja viabilidade de manufatura e custos também devem ser estudados na escolha do método de confecção da peça. Os moldes podem ser classificados como fechado (rígido) ou aberto (semi-rígido), sendo monolítico, desmontável/colapsável ou inflável. Quanto a composição dos moldes pode ser de material metálico, possuindo maior durabilidade e capacidade térmica, entre outras características, porém com um alto custo, enquanto que moldes de materiais compósitos apresentam baixa durabilidade, geometria simples, são passíveis de modelagem e um custo reduzido. (ALMEIDA, 2018).

Para um melhor entendimento acerca do que é e o que compõe um material compósito e alguma de suas possíveis aplicações podemos exemplificar, com o caso do laminado de fibra de carbono. Este tipo de material laminado é largamente utilizado em aplicações onde se deseja materiais resistentes e de baixo peso, como em aeronaves, carros de alto desempenho e bicicletas, por exemplo. É composto por filamentos muito finos, constituídos de carbono (ZANCHETTA, 2019). As fibras de carbono têm sido amplamente utilizadas em compósitos na forma de tecidos, fibras contínuas/mechas e fibras picadas. E as peças compostas por este material podem ser produzidas através de processos como a pultrusão, moldagem por compressão, ensacamento a vácuo, moldagem líquida e moldagem por injeção, entre outras formas (HUANG, 2009).

Abaixo, na Figura 3, podemos ver uma placa laminada de fibra de carbono, utilizando a técnica do ensacamento a vácuo.

Figura 3: Placa laminada de fibra de carbono



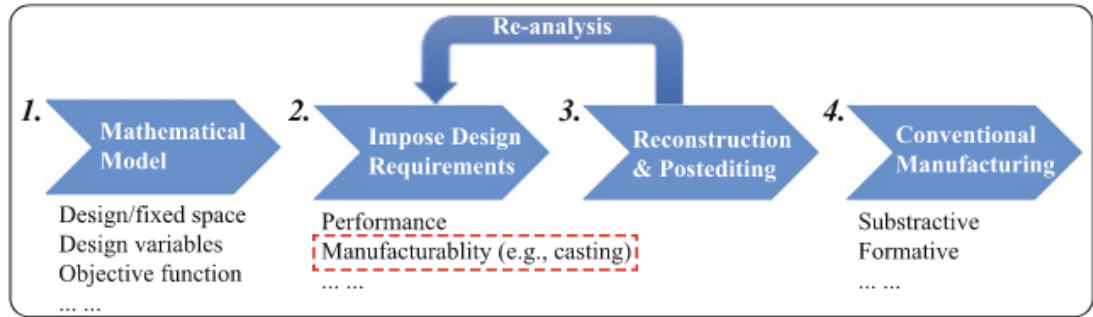
Fonte: Elaborado pelo autor

1.2. Otimizações de materiais compósitos

Apesar das estruturas fabricadas utilizando materiais compósitos já serem bem eficientes, ainda há vantagens da utilização de estratégias de redução de massa. Em projetos estruturais que fazem uso de materiais compósitos um dos fatores que dificultam a utilização destes materiais é seu custo elevado ao comparar com materiais clássicos. Sendo assim, a otimização estrutural em peças confeccionadas com materiais compósitos tem uma grande relevância em projetos, pois este custo elevado da matéria-prima, como a exemplo o custo das fibras de elevada resistência e elevado módulo de elasticidade, diversas vezes inviabilizam o uso desses materiais no projeto (CALIXTO et al., 1998). A otimização de materiais compósitos é chave para o desenvolvimento de peças ainda mais eficientes.

O desenvolvimento de peças de forma convencional (DfM – *Design for Manufacturing*), método largamente empregado quando se trata de materiais compósitos, é geralmente realizado de acordo com a metodologia presente no fluxograma presente na Figura 4. E um dos itens cruciais presente são as “restrições de desenvolvimento”, que se trata da manufaturabilidade de determinado componente e, caso este item não possa ser cumprido, é impossível a fabricação da peça.

Figura 4: Fluxograma do DfM.



Fonte: adaptado de MENG et al., 2019.

Fatores como tempo de fabricação e consumo de material devem ser levados em consideração na escolha do método de manufatura. E também, diferentes tipos de materiais compósitos a serem otimizados, talvez exijam diferentes abordagens no momento de realizar a usinagem para alcançar o produto final da otimização.

Há diversas técnicas de fabricação e otimização de materiais compósitos que vão desde processos manuais a processos completamente automatizados. Além disso, a estrutura final comumente é obtida utilizando-se de diversos processos que ocorrem simultaneamente (TITA et al., 2007).

Para otimizar um componente é necessário encontrar a configuração de variáveis de um problema que atenda aos critérios estabelecidos para o produto final, da melhor forma possível. Sendo assim, se faz necessário ter uma boa definição do problema, para identificar a função objetivo do problema, ou seja, o que se deseja otimizar. Por exemplo, para se obter a menor massa para a fuselagem de uma aeronave, a função objetivo do problema, que será minimizada, será a massa (JERONIMO, 2014).

Ao tentar otimizar um componente podemos ter enfoque em modificar uma ou mais características do elemento, podemos por exemplo, maximizar a carga de flambagem, aprimorar as características vibracionais, minimizar o peso, maximizar a rigidez, minimizar a deflexão e/ou minimizar o estresse sofrido pelo componente, entre outras coisas. E para tal feito podemos trabalhar com o formato e disposição do material no componente.

No caso dos compósitos laminados convencionais podemos trabalhar com os ângulos de orientação das fibras em cada camada do material. A otimização da distribuição dos ângulos das fibras do material e dos caminhos das curvas das fibras culminam em placas compostas com propriedades mecânicas melhoradas. Esta estratégia de distribuição de orientação de fibra de

materiais origina componentes de rigidez variáveis, comparados entre as diferentes possibilidades. Portanto, o comportamento de flambagem dessas estruturas, por exemplo, pode ser alterado notavelmente.

Com relação às peculiaridades de cada otimização estrutural, podemos citar algumas classes, que a utilização ou não deve ser realizada considerando fatores como design e restrições de projeto. Os diferentes tipos de otimizações podem ser classificados considerando diferentes aspectos, conforme Nikbakt et al. (2018, p. 4) podemos classifica-las conforme as classes a seguir.

- a. Tentativa e erro e otimização baseada em função: Tentativa e erro é um processo em que o efeito dos parâmetros de projeto sobre os objetivos não é diagnosticado. Por outro lado, em alguns casos, há uma formulação vívida determinando a correlação entre variáveis de projeto e funções objetivo. Tais problemas são chamados de função de otimização de problemas.
- b. Otimizações unidirecionais e multidirecionais: Esta categoria está associada com o número de variáveis de projeto. No caso de uma única variável de projeto, o problema é chamado problema de otimização unidimensional, enquanto os problemas multidirecionais lidam com mais de uma variável de projeto
- c. Otimizações discretas e contínuas: Esta classificação é baseada na qualidade de variáveis de projeto. Quando as variáveis de projeto são discretas, o problema de otimização é também indicado como discreto. O número de camadas é um exemplo de design discreto variável. Em contraste, em problemas de otimização contínua, as variáveis de projeto são contínuas.
- d. Otimizações restritos e irrestritos: Em algumas abordagens de otimização, juntamente com a mudança de variáveis de projeto, certas restrições devem ser satisfeitas. Estas são chamados problemas de otimização restrita. Pelo contrário, no processo de estudos de otimização sem restrições, as variáveis de projeto podem mudar livremente sem quaisquer restrições.
- e. Busca local e problemas de otimização de busca aleatória: Em problemas de busca local, o processo de otimização começa em um ponto específico que foi diagnosticado matematicamente para obter resultados melhores e mais precisos. Esses métodos têm um alto taxa de convergência. No entanto, existe a probabilidade de erro de cálculo em torno do extremo pontos em oposição a problemas de busca aleatória onde melhores resultados são obtidos seguindo padrões possíveis. Portanto, é complicado prever o desempenho do algoritmo. A taxa de convergência desses métodos é menor do que os problemas de busca local enquanto a chance de obter o ótimo global é maior.
- f. Otimizações de objetivo único e multiobjetivo: Esta categorização tem a ver com a quantidade de funções objetivo. Quando há apenas um critério ou função objetivo para avaliar os resultados ótimos, o problema de otimização é chamado de objetivo único. No caso de otimização multiobjetivo, no entanto, várias funções objetivo estão frequentemente em conflito umas com as outras e há mais de uma ótimos resultados em relação à prioridade dos objetivos. Esse conjunto de resultados ótimos é chamado de Frente de Pareto.
- g. Otimizações estáticas e dinâmicas: Se o procedimento de otimização depende de tempo, e o resultado muda após um período de tempo, é conhecido como uma dinâmica problema de otimização em contraste com o tipo estático onde o projeto ótimo não depende da hora.

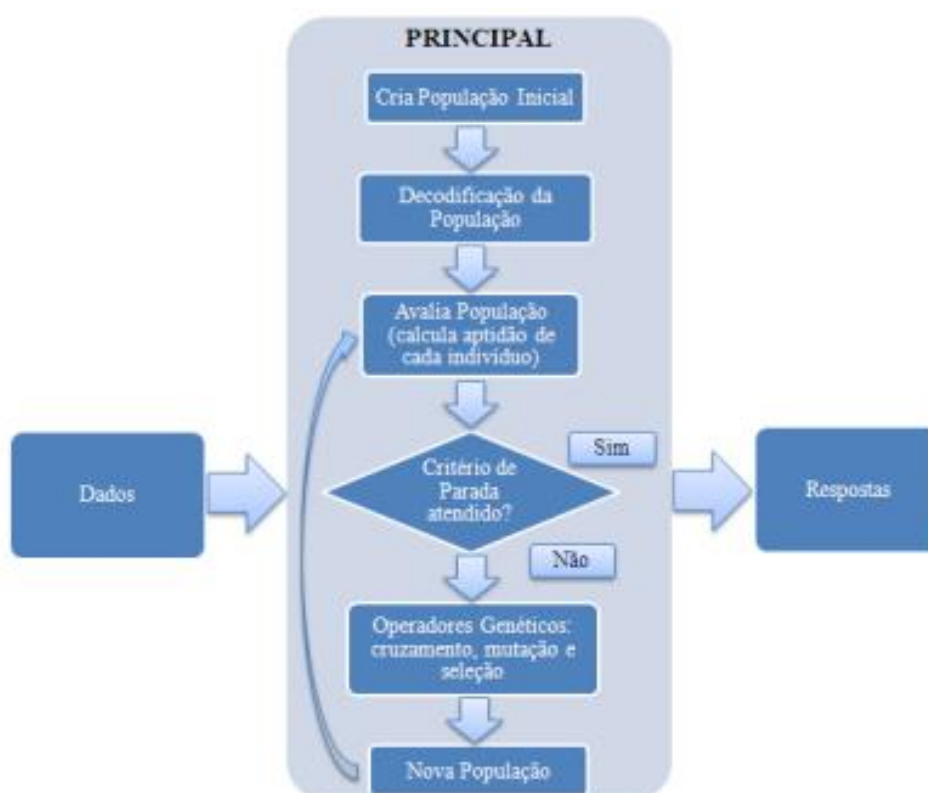
Para realizar as otimizações necessárias nos materiais compósitos usualmente é necessário o emprego de linguagem de programação. Um dos algoritmos amplamente utilizados no caso de otimização de estruturas de materiais compósitos são os algoritmos genéticos (GA), que é um tipo de método de otimização que tem como base os princípios da genética e da seleção natural, que

pode ser definido, de acordo com Castro et al. (2006), conforme citado por Jeronimo (2014, p.26) conforme a descrição abaixo.

Os algoritmos genéticos podem ser considerados como uma família de modelos computacionais inspirados nos princípios da evolução. Uma boa forma de entender a filosofia desta técnica é entender o Darwinismo. Um algoritmo genético permite que uma população composta por muitos indivíduos evolua, sobre regras de seleção específicas. Assim permite que se encontre o indivíduo mais apto para a situação imposta.

A fim de um melhor entendimento podemos observar as etapas do algoritmo genético para o caso de uma otimização com variáveis discretas em forma de fluxograma, conforme a Figura 5.

Figura 5: Fluxograma de um algoritmo genético discreto.



Fonte: Jeronimo (2014, p. 33)

As otimizações utilizando algoritmo genético têm sido aplicados em análises estruturais estáticas com objetivo de redução de peso desde 1989 (CASTRO et al., 2006, apud JERONIMO, 2014, p. 23-24). Sendo assim, já podemos ver diversas aplicações bem sucedidas de tal algoritmo. Por exemplo, Liu et al. (2016), conforme citado por Nikbakt et al. (2018), utilizou-se de uma otimização fundamentada em GA, para reduzir a peso de uma estrutura reticulada da fuselagem cilíndrica de uma aeronave. Sendo que a tensão global, estabilidade e rigidez formaram as restrições em sua otimização. Yuan et al. (2013, apud NIKBAKT et al., 2018) considerou a fuselagem do avião com a geometria de casca cilíndrica laminada e utilizou-se do método fundamentado em GA

para minimizar o nível de pressão sonora interna assim como o peso da estrutura. Eles otimizaram os ângulos de orientação da fibra, reduzindo a pressão interna e encontraram a espessura ideal em cada parte da fuselagem, que os levou à configuração com peso mínimo.

Há diversos outros algoritmos com a finalidades similares, que em maioria, utilizam da disposição do empilhamento de camadas como variável para alcançar os objetivos da otimização. Em diversos casos, os efeitos de parâmetros influentes, como condições de contorno, geometria da estrutura, temperatura, as variáveis de projeto, entre outras coisas, são observadas durante a solução do problema. Maximizar a carga de flambagem e frequência fundamental aliado à redução do peso estrutural são as mais cobiçadas funções objetivos. E algoritmos meta-heurísticos como GA (*Genetic Algorithm*), SA (*Simulated Annealing*), PSO (*Particle Swarm Optimization*), ACO (*Ant Colony Optimization*), FA (*Firefly Algorithm*), entre outros. São os mais populares dado sua eficiência e estabilidade. Porém, há também o desenvolvendo de algoritmos de otimização convencionais para aumentar a taxa de convergência e economizar custos computacionais, sendo o NSGA (*Non-dominated Sorting Genetic Algorithm*), RCGA (*Real-Coded Genetic Algorithm*), MCLACO (*Multi-City-Layer Ant Colony Optimization*), PDPSO (*Permutation Discrete Particle Swarm Optimization*), MFD (*Modified Feasible Direction*), ILOA (*Improved Layer-wise Optimization Algorithm*), entre outros, exemplos de algoritmos modificados que se evidenciaram ainda mais eficientes do que outras versões tradicionais (NIKBAKT et al., 2018).

Sendo um campo de estudo relativamente recente, a otimização de materiais compósitos ainda possui um grande campo fértil para oportunidades de desenvolvimento. Então é nítido o interesse tanto industrial quanto acadêmico sobre a compreensão da otimização de tais materiais. Como todo grande avanço científico, ainda existem dificuldades e limitações na utilização destas técnicas de otimização utilizando materiais compósitos.

2. Objetivos gerais do projeto

Os objetivos do presente projeto de pesquisa são:

- Etapa 1: primeiramente, realizar uma revisão bibliográfica detalhada com as principais características e técnicas de simulação envolvendo otimização de materiais compósitos;
- Etapa 2: na sequência, a partir dos conhecimentos adquiridos na Etapa 1, realizar estudos de casos envolvendo as técnicas análise, simulação e otimização de estruturas aeroespaciais em materiais compósitos.

3. Recursos computacionais e infraestrutura

Para a execução deste projeto, por se tratar de um projeto que visa aplicar métodos de otimização estrutural, utilizando diferentes condições de carregamento e propriedades de materiais, é factual a necessidade de programas destinados à simulação e otimização estrutural baseados no MEF (Método dos Elementos Finitos), assim como computadores com hardwares compatíveis para esta finalidade. Tendo em vista esses fatores supracitados, pretende-se utilizar computadores disponíveis nos laboratórios da UFABC, fazendo uso dos softwares disponíveis em tais computadores, como por exemplo, SolidWorks, Altair HyperWorks, Ansys Workbench, Matlab, entre outros. Vale salientar que os referidos softwares estão disponíveis em versões estudantis, disponibilizados gratuitamente para aplicações com fins não comerciais e de pesquisa acadêmica garantindo, portanto, a viabilidade do projeto em termos de infraestrutura computacional.

4. Metodologia proposta

A partir da revisão bibliográfica proposta para este projeto de pesquisa, a metodologia a ser aplicada irá ser, inicialmente, baseada na utilização das referências Nikbakt, Kamarian, Shakeri (2018, 2019), Sager (2021), Jeronimo (2014) e Toledo (2016) . No entanto, dependendo dos resultados da Etapa 1, evidenciada nos objetivos gerais do projeto (seção 2), outras referências poderão ser selecionadas e aliadas para a realização dos estudos de caso, previstos na Etapa 2. E na sequência, após a revisão bibliográfica, daremos início aos estudos de caso.

5. Cronograma de execução

O projeto possui duração prevista de um ano. E a duração de cada etapa, subdividida em meses, está contida na Tabela 1.

Tabela 1 - Calendário de Execução

Atividades	out/22	nov/22	dez/22	jan/23	fev/23	mar/23	abr/23	mai/23	jun/23	jul/23	ago/23	set/23
I - Revisão bibliográfica												
II - Seleção de modelos da literatura												
III - Elaboração de modelos preliminares												
IV - Análise de resultados preliminares												
V - Simpósio UFABC 2022 (resultados preliminares)												
VI - Relatório parcial												
VII - Elaboração e atualização de modelos definitivos												
VIII - Análise de resultados e ajuste fino de modelos												
IX - Atualização bibliográfica												
X - Relatório final												
XI - Elaboração de artigo para congresso ou periódico												
XII - Poster para Simpósio UFABC 2023												

Referências Bibliográficas

ALMEIDA, S. F. M. **Manufatura de Materiais Compósitos**. Notas de aula. Universidade de São Paulo, 2018.

CALIXTO, Alexandre Kaelble. **Análise e otimização de cascas de materiais compostos laminados**. 1998. 109f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis.

DE SOUZA RÊGO, Juliana Jeniffer Fernandes; SANTOS, Dino Lincoln Figueiroa; MARINHO, George Santos. Breve histórico da evolução do uso de materiais compósitos na indústria aeronáutica. **Mens Agitat**, v. 15, p. 35-42, 2020.

HUANG, Xiaosong. Fabrication and properties of carbon fibers. **Materials**, v. 2, n. 4, p. 2369-2403, 2009.

JERONIMO, Jefferson Luiz. **Otimização de estruturas de materiais compósitos baseada em algoritmos genéticos contínuos**. 2014. 120f. Dissertação (Pós graduação em Engenharia Mecânica) – Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis.

MENG, L. et al. From Topology Optimization Design to Additive Manufacturing: Today's Success and Tomorrow's Roadmap. **Archives of Computational Methods in Engineering**, 2019.

MOREIRA, Anabela Mendes. **Materiais compósitos. Área de construção**, 2009.

NIKBAKHT, S.; KAMARIAN, S.; SHAKERI, M. A review on optimization of composite structures Part II: Functionally graded materials. **Composite Structures**, v. 214, p. 83-102, 2019.

NIKBAKHT, S.; KAMARIAN, S.; SHAKERI, M. A review on optimization of composite structures Part I: Laminated composites. **Composite Structures**, v. 195, p. 158-185, 2018.

SAGER, Guilherme Camerin. **Otimização multiobjetivo de placas de materiais compósitos**. 2021. 17f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Mecânica) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre.

TITA, Volnei et al. **Projeto e fabricação de estruturas em material compósito polimérico**. São Carlos, [s.n.], p. 58-67, 2007.

TOLEDO, Breno Mussu Feres. **Otimização da longarina da asa de um vant em estrutura sanduíche**. 2016. 81f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Metalúrgica) – Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro.

ZANCHETTA, André. **Materiais compósitos: características, propriedades e aplicações**. Notas de aula. [S.l: s.n.], 2019.