

LUCAS TORRES DE OLIVEIRA DIAS

**ANÁLISE POR SIMULAÇÃO NUMÉRICA DE MATERIAL COMPÓSITO
SUBMETIDO A IMPACTO**



UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA
FACULDADE DE ENGENHARIA MECÂNICA

UBERLÂNDIA
2018

LUCAS TORRES DE OLIVEIRA DIAS

**ANÁLISE POR SIMULAÇÃO NUMÉRICA DE MATERIAL COMPÓSITO
SUBMETIDO A IMPACTO**

Projeto de Conclusão de Curso, apresentado ao curso de Engenharia Aeronáutica da Universidade Federal de Uberlândia - UFU, como requisito parcial para a obtenção do título de Bacharel em Engenharia Aeronáutica.

Orientador: Prof. Dr. Tobias Souza Morais

UBERLÂNDIA
2018

ANÁLISE POR SIMULAÇÃO NUMÉRICA DE MATERIAL COMPÓSITO SUBMETIDO A IMPACTO

Projeto de conclusão de curso **APROVADO**
pelo Colegiado do Curso de Graduação em
Engenharia Aeronáutica da Faculdade de
Engenharia Mecânica da Universidade Federal
de Uberlândia.

Uberlândia, 13 de julho de 2018.

BANCA EXAMINADORA:

Prof. Dr. Tobias Souza Morais
Universidade Federal de Uberlândia

Prof. Dra. Núbia dos Santos Saad
Universidade Federal de Uberlândia

Prof. Dr. Ruham Pablo Reis
Universidade Federal de Uberlândia

DEDICATÓRIA

Dedico este trabalho à minha família.

AGRADECIMENTOS

Ao meu pai, primeiramente, por ter me dado todo o apoio nessa longa caminhada de faculdade, lutando para fazer o nosso sonho se tornar realidade.

Às minhas tias Alice e Noêmia, as minhas primas Andréia, Priscila, Stella e Myllena, aos meus primos Renan, João Marcelo, Matheus e Fábio, e ao meu amigo Renato Falconi que são como irmãos para mim. Acredito que sem o apoio deles seria muito difícil vencer esse desafio.

Agradeço ao meu orientador Prof. Dr. Tobias Souza Moraes, pelo tempo dedicado a mim, pela motivação durante a minha caminhada até aqui e pela sabedoria com que me passou seus conhecimentos.

Agradeço à banca, pela disponibilidade para poder me examinar, e pelos ensinamentos que me passaram durante o curso.

Agradeço também aos meus colegas de sala, que sempre me ajudaram nos estudos e aos demais professores, que se esforçaram em passar seus conhecimentos a mim.

Enfim, a todos os que por algum motivo contribuíram para a realização deste trabalho.

TORRES, L. O. D.; Análise por Simulação Numérica de Material Compósito Submetido a Impacto. 2018. 80p. Projeto de Graduação, Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, Brasil.

RESUMO

Os materiais compósitos são de suma importância para a indústria aeronáutica. Com isso, o conhecimento de suas propriedades e de seu comportamento perante solicitações mecânicas são cruciais para implementá-los em projetos aeronáuticos. Quando submetido a impacto, o compósito pode sofrer com o fenômeno da delaminação (dois laminados de compósito se separam na interface), e assim pode ocorrer falha estrutural do componente ou da estrutura. Através da acustoelasticidade é possível desenvolver modelos analíticos que relacionam variáveis como tensão e velocidade de propagação, e isso é fundamental para conhecer o comportamento da onda mecânica dentro do material. Com o software comercial *ANSYS®*, foi possível fazer simulações numéricas de impacto em uma viga feita em material compósito, a fim de identificar e quantificar a delaminação. Ficou provado também que a diferença de propriedades entre os materiais que formam o compósito influenciam na delaminação, pois quanto maior a diferença (impedância acústica), menor é a força de tração na interface dos materiais.

Palavras-chave: Material Compósito. Propagação da Onda. Delaminação. Impacto. Simulação Numérica.

TORRES, L. O. D.; Analysis by Numerical Simulation of Composite Material Subjected to Impact. 2018. 80p. Graduation Project, Federal University of Uberlândia, Uberlândia, Brazil.

ABSTRACT

Composite materials are of the utmost importance for the aeronautical industry. Therefore, the knowledge of its properties and their behavior towards mechanical loads are crucial to implement them in aeronautical projects. When subjected to impact, composite materials may suffer of the delamination phenomenon (two composite laminates separate at the interface), thus, a structural failure of the component or the structure may occur. Through acoustic elasticity, it is possible to develop analytic models that relate variables such as stress and propagation velocity, which is fundamental to understand the behavior of the mechanic wave throughout the material. The use of the commercial software *ANSYS®* made possible numerical impact simulations on a beam made of composite materials, in order to identify and quantify delamination. It was also proved that the different properties among the materials that make up the composite material influence delamination. Because the bigger the acoustic impedance difference, the lower the traction force will be on the materials' interface.

Keywords: Composite Material. Wave Propagation. Delamination. Impact. Numerical Simulation.

LISTA DE FIGURAS

| | |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Figura 1 – Evolução de materiais compósitos em porcentagem de massa no setor aeronáutico..... | 2 |
| Figura 2 - Lâmina com fibras orientadas unidirecionalmente..... | 10 |
| Figura 3 - Tipos de entrelaçamento em tecidos..... | 11 |
| Figura 4 - Processo de fabricação por pultrusão..... | 13 |
| Figura 5 – Técnicas de enrolamentos de filamentos helicoidal, circunferencial e polar..... | 14 |
| Figura 6 - Produção por <i>prepreg</i> | 15 |
| Figura 7 - Máquina que executa o entrelaçamento das fibras..... | 16 |
| Figura 8 - Tecidos fabricados a partir de rolos de compósitos..... | 17 |
| Figura 9 - Forças de superfície em um elemento cúbico infinitesimal..... | 19 |
| Figura 10 - Deslocamento no plano x-y de um elemento infinitesimal..... | 21 |
| Figura 11 - Diagrama tensão versus deformação para um compósito unidirecional..... | 24 |
| Figura 12 - Diagrama tensão versus deformação..... | 26 |
| Figura 13 - Ondas longitudinais..... | 30 |
| Figura 14 - Ondas transversais..... | 31 |
| Figura 15 - Ondas de Rayleigh..... | 32 |
| Figura 16 - Ondas de Love..... | 32 |
| Figura 17 - Compósito unidirecional com sistema de coordenadas..... | 33 |
| Figura 18 – Ponto material com diferentes estados no sistema de coordenadas (natural, inicial e final)..... | 34 |
| Figura 19 - Tensões fora do plano de simetria..... | 36 |
| Figura 20 - Plano de propagação de onda..... | 37 |
| Figura 21 - Geometria da viga em estudo – Vista isométrica..... | 42 |
| Figura 22 - Geometria da viga em estudo - Vista frontal..... | 43 |
| Figura 23 - Geometria da viga em estudo – Vista lateral..... | 43 |
| Figura 24 - Viga com a lâmina em destaque..... | 44 |
| Figura 25 - Viga com a esfera de impacto..... | 44 |
| Figura 26 - Corte na viga para melhor visualização..... | 45 |
| Figura 27 - Onda mecânica chegando à interface..... | 46 |
| Figura 28 - Onda mecânica aumentando o campo de tração e compressão..... | 46 |
| Figura 29 - Onda mecânica gerando campo de tensão nas interfaces..... | 47 |
| Figura 30 - Campo máximo de tensão e compressão nas interfaces do compósito..... | 47 |
| Figura 31 - Propagação da onda com frente bem definida..... | 48 |
| Figura 32 - Passagem quase total da onda mecânica pela resina epóxi..... | 48 |
| Figura 33 - Passagem total da onda mecânica pela resina epóxi..... | 48 |
| Figura 34 - Tensões na interface direita em função da velocidade de impacto..... | 50 |
| Figura 35 - <i>ANSYS® Workbench</i> | 56 |
| Figura 36 - Aba <i>Explicit Dynamics</i> | 57 |
| Figura 37 - Propriedades da Fibra de Vidro..... | 58 |
| Figura 38 - Propriedades da Resina Epóxi..... | 59 |
| Figura 39- Propriedades da Espuma de PVC..... | 59 |
| Figura 40 - Aba para elaborar a geometria..... | 60 |
| Figura 41 - Aba <i>Model</i> | 61 |

| | |
|-------------------------------------------------------------------------|----|
| Figura 42 - Configurações da fibra de vidro..... | 61 |
| Figura 43 - Configurações da Resina Epóxi. | 62 |
| Figura 44 - Tamanho da malha..... | 63 |
| Figura 45 - <i>Explicit Dynamics</i> e <i>Initial Conditions</i> | 63 |
| Figura 46 - <i>Analysis Settings</i> | 64 |
| Figura 47 - Viga engastada..... | 65 |
| Figura 48 - Escolha do tipo de tensão para análise..... | 66 |

LISTA DE TABELAS

| | |
|--------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Tabela 1 - Propriedades dos materiais utilizados..... | 41 |
| Tabela 2 - Tensão de tração e de compressão na interface para cada material na lâmina..... | 49 |

LISTA DE SÍMBOLOS

| | |
|------------------|-------------------------------------------------------------------------------|
| \vec{a} | Aceleração |
| a_t | Aceleração no tempo t |
| C | Constante arbitrária |
| c | Velocidade da onda |
| C_{ij} | Constante elástica do material |
| E | Módulo de elasticidade |
| E_f | Módulo de elasticidade da fibra |
| E_{ft} | Módulo de elasticidade da fibra na direção perpendicular ao eixo longitudinal |
| E_l | Módulo de elasticidade longitudinal |
| E_m | Módulo de elasticidade da matriz |
| E_t | Módulo de elasticidade transversal |
| \vec{F} | Força |
| f | Frequência |
| F_t^{ext} | Forças externas |
| F_t^{int} | Forças internas |
| G | Módulo de cisalhamento total do compósito |
| G_f | Módulo de cisalhamento das fibras |
| G_m | Módulo de cisalhamento da matriz |
| G_t | Características do sistema no tempo atual |
| $G_{t+\Delta t}$ | Características do sistema no tempo posterior |
| k | Número de onda |
| $[M]$ | Matriz de massa |
| m | Massa |
| M_f | Fração de massa das fibras |
| M_m | Fração de massa da matriz |
| n_i | Vetor unitário da onda normal na direção i |
| P_i | Vetor de polarização na direção i |
| t | Tempo de deslocamento |
| U | Amplitude da onda |
| \mathbf{u} | Deslocamento das partículas |
| \hat{u} | Deslocamento no espaço da frequência |
| u_t | Deslocamento no tempo atual |

| | |
|----------------------|----------------------------------------------------|
| $u_{t+\Delta t}$ | Deslocamento no tempo posterior |
| V_f | Fração de volume das fibras |
| V_m | Fração de volume da matriz |
| V_{QL} | Velocidade quase-longitudinal |
| V_{QT} | Velocidade quase-transversal |
| w | Frequência angular |
| $\overline{w_x}$ | Vetor de rotação na direção x |
| $\overline{w_y}$ | Vetor de rotação na direção y |
| $\overline{w_z}$ | Vetor de rotação na direção z |
| x_j | Coordenada final do ponto material na posição j |
| Γ_{ij} | Tensor acústico de Christoffel |
| Δ | Dilatação volumétrica |
| Δt | Intervalo de tempo |
| δ_i | Dimensão do elemento cúbico em i |
| δu | Deslocamento infinitesimal em x |
| δv | Deslocamento infinitesimal em y |
| δw | Deslocamento infinitesimal em z |
| ε_{xx} | Deformação direta em x |
| ε_{xy} | Deformação cruzada de x na direção y |
| ε_{yy} | Deformação direta em y |
| ε_{yz} | Deformação cruzada de y na direção z |
| ε_{zx} | Deformação cruzada de z na direção x |
| ε_{zz} | Deformação direta em z |
| θ | Ângulo entre o eixo principal e o eixo de simetria |
| λ, μ | Constante de Lamé |
| ν | Coefficiente de Poisson |
| ν_f | Coefficiente de Poisson das fibras |
| ν_{lt} | Coefficiente de Poisson total do compósito |
| ν_m | Coefficiente de Poisson da matriz |
| ρ | Densidade |
| ρ_f | Densidade das fibras |
| ρ_m | Densidade da matriz |
| ρ^0 | Densidade do material no estado livre de tensão |
| σ_{ij} | Tensão normal no plano i e na direção j |
| $\sigma_{f,ruptura}$ | Tensão última de ruptura das fibras |

$\sigma_{l,ruptura}$ Tensão última de ruptura na longitudinal

SUMÁRIO

| | | |
|---------|-------------------------------------------------------------------|----|
| 1 | INTRODUÇÃO..... | 1 |
| 1.1 | Delimitação do tema | 5 |
| 1.2 | Objetivos e justificativas do trabalho | 5 |
| 2 | REVISÃO BIBLIOGRÁFICA..... | 6 |
| 3 | CONCEITOS BÁSICOS | 9 |
| 3.1 | Materiais compósitos | 9 |
| 3.1.1 | Processo de manufatura em compósitos | 12 |
| 3.1.1.1 | Manufatura por pultrusão..... | 13 |
| 3.1.1.2 | Manufatura por enrolamento de filamentos | 13 |
| 3.1.1.3 | Manufatura por <i>preg</i> | 15 |
| 3.1.1.4 | Manufatura de tecidos feitos em compósito..... | 16 |
| 3.1.2 | Características de um compósito formado por fibras e matriz | 17 |
| 3.2 | Tensões em materiais compósitos..... | 18 |
| 3.3 | Propagação da onda | 26 |
| 3.3.1 | Ondas Longitudinais | 29 |
| 3.3.2 | Ondas transversais..... | 31 |
| 3.3.3 | Ondas de Rayleigh..... | 31 |
| 3.3.4 | Ondas de Love | 32 |
| 3.4 | Propagações de ondas em materiais compósitos..... | 32 |
| 3.4.1 | Acustoelasticidade | 33 |
| 3.4.1.1 | Propagação da onda no plano de simetria..... | 35 |
| 3.4.1.2 | Propagação da onda fora do plano de simetria..... | 36 |
| 4 | DELAMINAÇÃO DE MATERIAIS COMPÓSITOS SUBMETIDOS A IMPACTO..... | 39 |
| 5 | METODOLOGIA PARA ANÁLISE NUMÉRICA E MATERIAIS UTILIZADOS..... | 40 |
| 5.1 | Método implícito | 40 |
| 5.2 | Método explícito..... | 40 |
| 5.3 | Materiais utilizados | 41 |
| 6 | RESULTADOS E DISCUSSÕES..... | 42 |
| 7 | CONCLUSÕES..... | 51 |
| 8 | CONSIDERAÇÕES FINAIS..... | 52 |
| | REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS | 53 |
| | APÊNDICE A..... | 56 |

CAPÍTULO I

INTRODUÇÃO

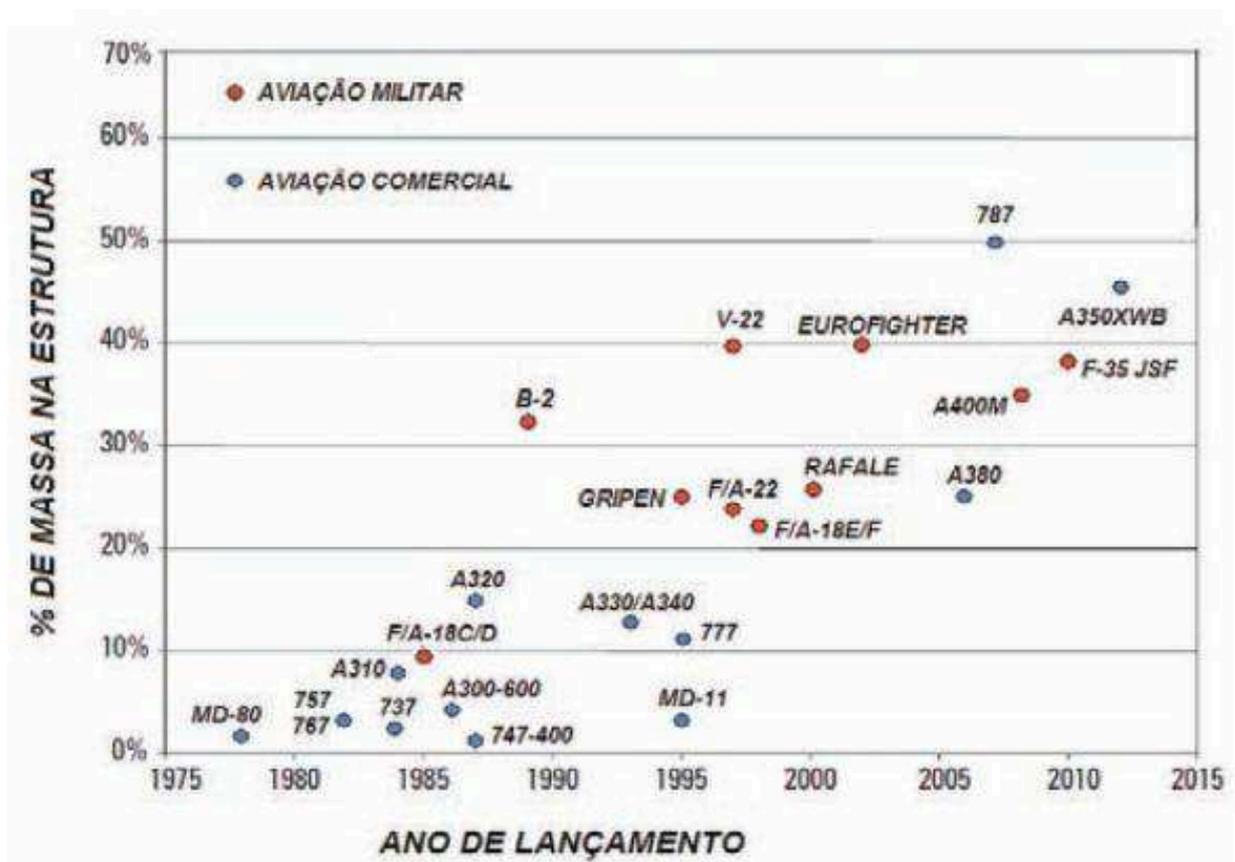
A aviação e o setor aeroespacial são ramos da engenharia que estão em constante evolução. A cada dia que passa, novas tecnologias vão surgindo e assim é possível obter um produto com melhor qualidade e mais eficiente. Na aeronáutica, o peso transportado é de suma importância, assim, a busca por materiais mais leves se torna uma fase crucial para o projeto.

As companhias aéreas buscam o tempo todo minimizar custos. Logo, os fabricantes precisam fornecer aeronaves cada vez mais leves, maximizando a carga paga transportada ou aumentando o número de passageiros por voo. Nessa busca, o material compósito vem se destacando cada vez mais. Eles são formados pela junção de dois ou mais materiais diferentes, sendo um responsável pela resistência do material (fibras) e outro pela adesão e distribuição da carga nesse reforço, denominado matriz.

O material compósito foi introduzido na aeronáutica desde meados dos anos de 1950, mas ele está envolvido em nossa sociedade desde os tempos das cavernas. Os homens das cavernas precisavam caçar e defender a sua família, e assim eles criavam ferramentas e armas que eram feitas da junção de dois ou mais materiais, otimizando assim o desempenho dessas peças que eram fundamentais para a sua sobrevivência.

A indústria aeronáutica se interessa bastante pelos materiais compósitos, pois os mesmos possuem alta resistência mecânica atrelada ao baixo valor de massa específica, tornando as estruturas tão resistentes quanto às do aço e do alumínio, porém bem mais leves. O Boeing 747, que é um projeto do início da década de 70, continha 80% da sua massa em alumínio e somente 1% em material compósito. Já o Boeing 787, que é projeto de 2010, possui cerca de 50% da sua massa em compósito e somente 20% em alumínio aeronáutico. A Figura 1 mostra o exemplo dessas e de outras aeronaves, tanto comerciais como de uso militar.

Figura 1 – Evolução de materiais compósitos em porcentagem de massa no setor aeronáutico.



Fonte: Revista compósitos e plásticos de engenharia – Editora do Administrador Ano XIV – nº 79 dez./abr. 2012.

Com o material compósito na indústria aérea foi possível reduzir a massa das aeronaves em até 40%, e consequentemente impactando no consumo de combustível e no custo do projeto, que foi reduzido de 15 a 30% (REVISTA COMPÓSITOS E PLÁSTICOS DE ENGENHARIA, 2012). Mas, em se tratando do setor aeronáutico, são necessários estudos bem aprofundados, juntamente com

validações via software e ensaios experimentais por parte dos engenheiros para que o produto final saia com qualidade. Além disso, a manutenção do componente também deve ser levada em conta, pois ela é extremamente importante para se evitar falhas.

Acidentes aeronáuticos ocorrem devido à falta ou falha de manutenção, como um reparo inapropriado ou uma instalação mal sucedida, por exemplo. Além das manutenções periódicas, outro fator que contribui e muito para evitar falhas no setor aeronáutico são as simulações e testes experimentais, que devem ser feitos antes de se projetar tal peça. Assim, conhecendo o comportamento do material para determinado tipo de esforço, é possível minimizar o risco de falha do mesmo, tornando o componente bem mais confiável.

Como dito anteriormente, o material compósito é feito de um material reforçador, que pode ser de carbono, vidro ou aramida, que é mais conhecida no mercado como *KEVLAR®*, e uma matriz, que pode ser metálica, polímera ou cerâmica. Existem várias configurações para se montar um compósito, pois é possível variar o tipo de fibra (curta, longa, em partículas grandes ou pequenas) e isso tudo modifica as características mecânicas do material (CALLISTER ET. AL, 1999).

A fuselagem, por exemplo, se feita de compósito deve suportar as cargas devido à pressurização da cabine, já a asa deve conter os esforços aerodinâmicos ali presentes, além do peso do combustível. O *radome* (comumente conhecido como nariz da aeronave) tem a função de proteger os instrumentos e radares de navegação. Em todos os casos, os componentes devem suportar os esforços aerodinâmicos do escoamento incidindo na superfície, assim como eventuais choques com objetos estranhos, como uma tempestade de gelo ou até mesmo pássaros.

Na fabricação de um material compósito, a adesão entre fibras e matriz é muito importante, pois uma alta aderência entre as fibras e a matriz faz com que haja uma boa transferência de carga (alta resistência mecânica), porém o compósito se torna frágil. Por outro lado, uma baixa adesão faz a resistência mecânica cair, mas o material fica mais dúctil. Por isso, deve se ter uma adesão moderada entre as fibras e a matriz (FUNDAMENTOS DE CIÊNCIA E ENGENHARIA DOS MATERIAIS, 2017).

Os principais tipos de falhas em compósitos é o rompimento das fibras ou da matriz, ou ainda a delaminação do compósito. O conhecimento das tensões presentes na estrutura é extremamente importante, para evitar esse tipo de falha. Essas tensões atuantes podem ser as totais ou as tensões residuais, que estão presentes no material mesmo sem terem cargas atuantes. Em compósito, elas acontecem devido a defeitos de fabricação ou são induzidas propositalmente para obter determinadas características para o componente em serviço. As tensões residuais podem ser devido a fontes intrínsecas ou extrínsecas (RODOVALHO, 2012).

As intrínsecas podem ser causadas pela solidificação não uniforme do material, diferença de expansão térmica, efeito da contração da matriz ou absorção de umidade. As extrínsecas dependem dos processos de corte e moldagem dos laminados, e logo estão induzidas na superfície e no entorno do material, e assim sendo distribuída para toda a estrutura (fibra e matriz), afetando toda a resistência mecânica do material.

As forças de impacto no compósito são grandes responsáveis pela ocorrência da delaminação. A absorção da energia devido ao impacto é uma deficiência atual encontrada nesses tipos de materiais. Quando o material recebe uma rajada de chuva de granizo, ou se choca com um pássaro, por exemplo, a energia da colisão se propaga em forma de onda mecânica dentro do material. Essa onda é responsável muitas vezes pela delaminação do compósito.

As ondas mecânicas propagando-se no material podem ser longitudinais, transversais ou de superficiais. Um exemplo de onda longitudinal é o som, que desloca as partículas na mesma direção da propagação. Já as ondas transversais possuem a velocidade de propagação perpendicular à direção de propagação.

Existem também as ondas que se propagam pela superfície do material, conhecidas como ondas de Rayleigh, que tangenciam a superfície de um material, gerando movimentos elípticos nas partículas logo abaixo da superfície. As ondas de Lamb também são ondas de superfície, e são basicamente ondas de Rayleigh em chapas finas.

Dessa forma, o presente trabalho irá mostrar uma análise detalhada do comportamento da onda mecânica em materiais compósitos a partir de simulações feitas no software *ANSYS®*, que é uma excelente ferramenta para esse tipo de análise.

1.1 Delimitação do tema

O estudo dos materiais compósitos levanta várias questões, entre elas a orientação das fibras, o tipo de resina, entre outras. Sabe-se que as fibras são resistentes à força de tração, mas não à compressão. Ocorre também a delaminação do material com alguns tipos específicos de esforços. Outro ponto em consideração é a função do componente, pois é necessário projetá-lo para eventuais falhas, absorvendo ou não, por exemplo, a energia liberada em uma colisão.

As várias camadas do material compósito têm a propriedade de refletir parte da onda mecânica dentro do compósito, porém certa quantidade de energia que vem com essa onda acaba passando pela interface dos dois materiais, gerando assim uma força de tração na junção do material. Isso serve de motivação para o presente trabalho, pois é necessário conhecer o quão grave pode ser esse esforço durante um período de tempo.

A partir desse problema, foram feitas algumas considerações a respeito dessa limitação do material compósito, e dada à vasta biblioteca de ferramentas do software *ANSYS®* com relação à simulação numérica, foi possível fazer um estudo aprofundado com auxílio computacional para buscar alternativas para possíveis soluções.

1.2 Objetivos e justificativas do trabalho

Dado que o compósito é um material com baixa resistência a ação de forças de impacto, será estudado o comportamento de uma viga feita de material compósito sobre a atuação de impacto e a forma de propagação de onda no interior do material com o objetivo de verificar o efeito da delaminação do material compósito.

É de extrema importância fazer um estudo detalhado sobre esse tipo de material, já que este está sendo amplamente utilizado na indústria aeronáutica devido às suas características estruturais, além de sua ótima relação resistência/peso.

CAPÍTULO II

REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Para quantificar e conhecer as propriedades mecânicas dos compósitos, que estão sendo amplamente usados na indústria, pesquisadores fizeram ensaios experimentais e numéricos, embasando-se nas teorias sobre materiais compósitos e propagação de onda. Nesses ensaios, é possível entender melhor o comportamento dos materiais compósitos, assim como sua resposta quando submetido a impactos e também o comportamento da onda mecânica dentro do mesmo. Assim, quanto mais conhecimento técnico se tem a respeito desses materiais, maior será a confiabilidade sobre o mesmo e conseqüentemente maior será seu uso para diversos fins.

Gama et al. em 2001 mostraram que ao fazer uma junção de um material com alto módulo de elasticidade mais a borracha, que possui baixo módulo de elasticidade, ocorre uma influência sobre o desempenho desse compósito, pois atrasa-se a passagem da onda de tensão elástica no material e se reduz de alguma forma a sua amplitude. Assim, eles mostraram que os danos na placa compósita foram menores.

Tasdemirci e Hall, em 2004 pela Universidade de *Delaware Newark* confirmaram os resultados de GAMA et al., demonstrando que, evitar a transmissão é importante, pois em um material com baixo módulo a velocidade de propagação é menor, enquanto que no material com alto módulo, as ondas mecânicas são transmitidas mais facilmente (maior velocidade). Seus experimentos consistiram em colocar em conjunto dois materiais de módulo de elasticidade diferentes (cerâmica e

borracha). Assim, a interface ficou com um módulo alto (cerâmica) e um módulo baixo (borracha).

Quanto maior a diferença das características dos materiais na junção (conhecida também como impedância acústica), maior será a parcela da onda mecânica que será refletida na interface (junção de meio de propagação). Isso ficou provado quando os pesquisadores trocaram a borracha (baixo módulo de elasticidade) pelo teflon® (módulo menor ainda em relação à borracha). Com isso, a transferência de tensão elástica para a cerâmica foi bem menor, pois a impedância aumentou, fazendo com que a onda fosse mais refletida e menos transmitida.

Esse fenômeno é crucial para delaminação do compósito submetido a carregamentos de impacto, pois com essa transmissão e reflexão da onda, gera-se uma tensão elástica de tração e compressão na junção, respectivamente. Assim, o compósito tende a se delaminar, ocasionando posteriores falhas mecânicas.

No final de 2007, os pesquisadores A. L. Camerini, Lucho Terrones e Sergio N. Monteiro fizeram um estudo pela Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro, onde ensaiaram compósitos de tecido de juta (fibra têxtil vegetal) reforçado com polietileno reciclado, testando sua tenacidade ao impacto. Eles realizaram os testes a partir do método de impacto *Charpy*, que consiste em um pêndulo de comprimento e massa conhecida que é solto de certa altura, impactando sobre o componente em estudo. A energia absorvida pelo corpo de prova é então usada para determinar a resistência do material, quantificando suas propriedades mecânicas.

Nesse ensaio, foi possível ver experimentalmente que a adição de tecido de juta contribui de forma significativa para o aumento da resistência ao impacto do compósito, quando a porcentagem de tecido adicionado foi em torno de 30% do volume do compósito. Quando adicionado em torno de 40%, é vista uma fratura predominantemente ocasionada pela separação entre fibras e matriz na direção do comprimento do corpo de prova. Esse fato é devido à baixa energia interfacial entre matriz e fibra.

Tainá Rodovalho, pela Universidade de Campinas em 2012, mostrou experimentalmente que a velocidade de propagação da onda mecânica longitudinal em um material compósito unidirecional depende fortemente da orientação das fibras, não variando significativamente com a temperatura do ambiente. Sua tese

mostra o desenvolvimento da acustoelasticidade para a análise de tensão em materiais compósitos, propondo assim um método de ensaios não destrutivos.

Estudos experimentais feitos por Amanda Coutinho Campanatti e Gigliola Salerno, no Centro Universitário da FEI, em São Bernardo do Campo, mostram que a quantidade de fibras presentes em um material compósito (carbono-epóxi) melhora a sua rigidez. Foram feitos ensaios de tração, onde se observou propagação frágil da trinca.

Em 2016, pesquisadores do instituto militar de engenharia do Rio de Janeiro (Foluke S. de Assis, Sergio N. Monteiro, Felipe M. de Matos Gabriel, Daniel N. N. do Nascimento, Kessy J. Matheus M. Magalhães, Daniel F. Ferreira, Amon R. B. Machado e Artur C. Pereira) fizeram um ensaio experimental de compósito de matriz poliéster reforçada com tecido de juta. Eles usaram esse material para um sistema de blindagem multicamada contra um disparo de arma de fogo calibre 7,62 x 51 mm. No ensaio, foi possível observar que o sistema resistiu bem ao impacto, visto que sem essa blindagem, a munição perfurou o material. Isso acontece porque o compósito absorve a energia cinética da colisão através do mecanismo de incrustação mecânica.

Com esse sistema, a profundidade de recuo foi menor que 44 milímetros, atendendo as especificações da norma internacional NIJ 0101.06. Percebe-se que o tecido de juta é um ótimo material absorvedor de impacto, por essa e também pela pesquisa feita por A. L. Camerini, Lucho Terrones e Sergio N. Monteiro, da Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro, citado anteriormente nesse capítulo.

Segundo a revista brasileira de física tecnológica aplicada, que publicou um periódico a respeito de ondas ultrassônicas em 2017, o desenvolvimento tecnológico sobre ondas superficiais traz avanços importantes relacionados à propagação de ondas mecânicas. Esse avanço permitiu um maior conhecimento da medição por ultrassom em materiais compósitos e o conhecimento sobre a fratura não somente em metais, mas também em componentes de grande dimensão, feitos inclusive, de materiais compósitos.

CAPÍTULO III

CONCEITOS BÁSICOS

3.1 Materiais compósitos

Uma definição provavelmente mais adequada para o compósito seria: são materiais formados por uma matriz e um reforço com excelente afinidade química entre si, processados sinteticamente para atingirem excelentes propriedades mecânicas com a menor massa possível – o que é impossível de ser alcançado com materiais convencionais (MILATIAS, 2014).

O compósito tem a característica de ser um material heterogêneo, e pode ser anisotrópico (as propriedades mecânicas dependem da direção dos esforços atuantes) ou ortotrópicos (as propriedades mecânicas em uma determinada direção podem ser escritas como a decomposição de duas propriedades que atuam em planos perpendiculares entre si).

Ele é formado basicamente por fibras e uma matriz. As fibras são responsáveis por reforçar o material e a matriz tem a tarefa de transferir o esforço mecânico atuante na estrutura para os reforços. A matriz ainda oferece uma maior tenacidade ao material, juntamente com resistência à fadiga e à corrosão.

As fibras são milhares de filamentos com diâmetro na ordem de micrometros. As mais utilizadas hoje pela indústria são as de vidro e de carbono, sendo que as propriedades mecânicas do material com as fibras de carbono no geral acabam sendo um pouco melhor, porém o custo fica mais elevado. Há também

as fibras de aramida (*Kevlar®*), que são altamente resistentes ao impacto, e por isso usada na fabricação de coletes à prova de balas.

As matrizes podem ser de metal, polímero ou cerâmica. As matrizes metálicas são bastante dúcteis, possuem alta tenacidade à fratura, melhor resistência à abrasão, porém são mais caras, e isso restringe o seu uso. Já a polimérica, tem como seu principal reforço o vidro. A resina de epóxi é um exemplo de matriz polímera, possui elevada resistência mecânica (até cerca de 230°C) e resiste bem à umidade (CALLISTER ET. AL, 1999, p. 373).

As cerâmicas são resistentes a altas temperaturas, porém possuem baixa tenacidade à fratura, limitando seu uso. Há técnicas que aumentam a tenacidade à fratura, como por transformação, que consistem em colocar junto das fibras partículas estabilizadoras, que transformam os cristais tetragonais em monocristais estáveis, que vão espremendo a trinca, evitando sua propagação (CALLISTER ET. AL, 1999, p. 374).

A disposição das fibras nessas matrizes é algo muito relevante quando se projeta um compósito, pois elas terão grande influência na estrutura e na resistência mecânica do material a ser fabricado. Elas podem ser unidirecionais (fios e fitas), bidimensionais (tecidos ou tapetes) ou tridimensionais (tecidos com fibras orientadas ao longo de várias direções) (GAY, 2015, p.5).

O compósito formado pelas fibras unidirecionais é anisotrópico. Isso ocorre porque as fibras alinhadas paralelamente à sua orientação longitudinal possuem uma resistência muito maior do que na direção transversal da sua orientação. Um exemplo de lâmina unidirecional é mostrado na Figura 2.

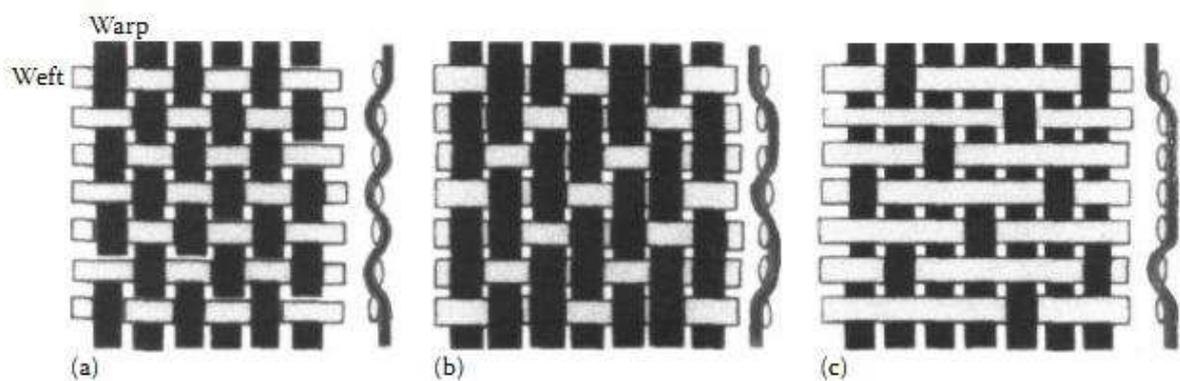


Fonte: Gay, 2015, p. 38.

O material conhecido como *mat* (tapete) pode ser considerado como isotrópico, pois na sua fabricação, as fibras são curtas e ficam todas misturadas dentro da matriz, deixando o material com as propriedades iguais nas direções do plano da lâmina.

Já os *fabrics* (tecidos) possuem o entrelaçamento ortogonal entre as fibras, intercalando as fibras para que elas passem por cima e por baixo uma das outras. Isso faz com que o material fique mais flexível (ajustável para se encaixar em várias geometrias), porém ele fica com baixa resistência à compressão (flamba facilmente), devido aos vazios nos entrelaçamentos. Existem três formas principais de se fazer o entrelaçamento, como é mostrado na Figura 3.

Figura 3 - Tipos de entrelaçamento em tecidos.



Fonte: Gay, 2015, p. 42.

As fibras que estão na direção vertical (em preto) são chamadas de *warp* (teia), enquanto que em branco se têm as *weft* (tramas). A maneira com que as teias e as tramas se cruzam define o tipo de tecido. Na Figura 3, estão em ordem crescente os tecidos que possuem maior capacidade de cobrir superfícies complexas de produção, resistência, rigidez e custo (GAY, 2015, p. 42).

O material compósito pode ser usado para várias finalidades, que variam de acordo com a necessidade e aplicação dessa tecnologia. A partir deles podem ser fabricados tubos e vigas, vasos de alta pressão interna, carenagens, peças, materiais esportivos, coletes balísticos, tanques de combustíveis rígidos ou maleáveis, entre outros. Compósito também é altamente utilizado como reforço estrutural, sendo o compósito laminar e os painéis em sanduíche os mais comuns.

Vigas e tubos são feitos a partir do processo de pultrusão. Vasos de alta pressão são fabricados por enrolamento de filamento. Peças e carenagens podem ser fabricadas pela moldagem por compressão, por exemplo, ou injeção de resina. Os coletes balísticos e os tanques de combustível maleáveis podem ser produzidos por tecidos de compósitos, que são feitos a partir do entrançamento das fibras, que impregnadas de resina, formam o tecido. Para absorver a energia de impactos, esse tipo de compósito é o mais indicado (MARCO, 2000).

Com relação ao compósito laminar, ele é constituído por folhas ou painéis bidimensionais que possuem uma direção preferencial de alta resistência. Para deixar a resistência mecânica mais equilibrada em todas as direções, as camadas são colocadas umas sobre as outras com as orientações das fibras em diferentes posições. O laminado também pode ser construído a partir de vários tecidos tais como os *mat* e os *fabrics* sobrepostos uns sobre os outros.

Os painéis em sanduíche consistem em duas folhas externas mais resistentes, que são separadas por uma camada de material menos denso, ou também chamado de recheio. Esse material interno têm as funções de resistir a deformações perpendiculares ao plano das faces externas e aumentar a rigidez contra o cisalhamento. Podem ser usados como recheio polímeros em espumas, borrachas sintéticas e madeira de balsa (CALLISTER ET. AL, 1999, p. 381).

As faces externas são projetadas para suportar a maior parte da carga, e também evitar as tensões de flexão transversais. Entre os materiais tipicamente usados estão os polímeros reforçados com fibras, o titânio, o aço e a madeira compensada. Fuselagem e asas de aviões são exemplos de estruturas feitas com esse tipo de material. Na próxima seção serão mostrados os processos de manufatura citados anteriormente, utilizados pela indústria de compósitos.

3.1.1 Processo de manufatura em compósitos

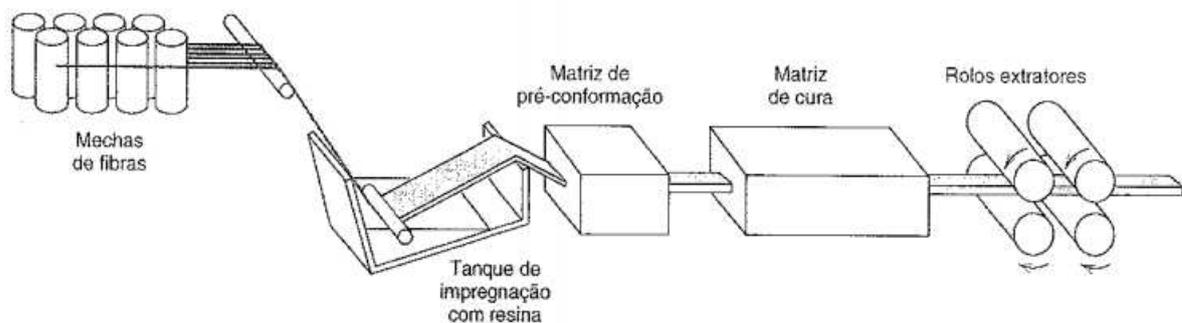
A automação da produção dos compósitos permitiu que o volume produzido aumentasse significativamente (GAY, 2015). As técnicas de confecção de compósitos usados atualmente são a pultrusão, enrolamento de filamentos, produção por *prepeg*, moldagem por contato, por compressão, e por vácuo. Ainda se tem a técnica *braiding*, que é o entrelaçamento de fibras, criando assim tecidos em materiais compósitos.

3.1.1.1 Manufatura por pultrusão

O processo de manufatura por pultrusão consiste em fabricar componentes que possuem comprimentos contínuos e que a seção transversal é constante, como tubos, vigas e barras. As fibras primeiramente são imersas em uma resina termofixa, e assim vão até um molde de aço que conforma a peça de acordo com a forma desejada, além de estabelecer a forma resina/fibra. A partir disso, ela passa por um molde aquecido, a fim de dar a cura para o material. Logo após isso, um dispositivo puxa a peça estirando-a, controlando também a velocidade do processo de produção.

Por ser um processo contínuo, essa técnica apresenta alta produtividade, e é muito eficaz em termos de custos. É possível fabricar as mais variadas formas de seção transversal, sem limite de comprimento para a peça. Os principais reforços usados nesse processo são as fibras de vidro, carbono e aramida, que são adicionados em concentrações em torno de 40% e 70% de volume, ou seja, de 40% a 70% do material compósito é feito de reforço (CALLISTER ET. AL, 1999, p. 376). A Figura 4 mostra um esquema desse processo de fabricação.

Figura 4 - Processo de fabricação por pultrusão.



Fonte: Callister, 1999, p. 377.

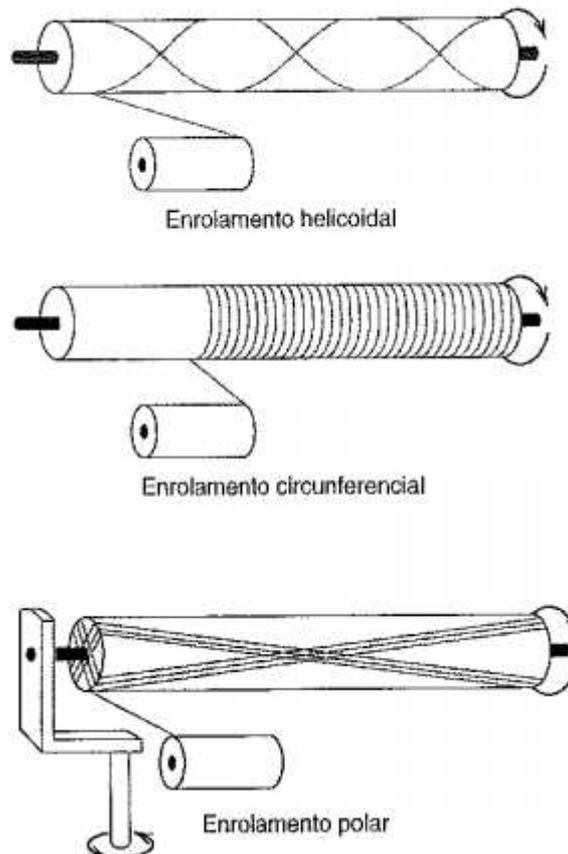
3.1.1.2 Manufatura por enrolamento de filamentos

Nesse processo, as fibras de reforço contínuas são enroladas em torno de um mandril, formando assim uma estrutura oca, geralmente na forma cilíndrica. Essas fibras são alimentadas por um carretel que passa por um banho de resina. Após certa quantidade de voltas, a cura é executada por um forno ou à temperatura ambiente, quando então o mandril é removido (CALLISTER ET. AL, 1999, p.377).

Há vários tipos de enrolamentos, como o helicoidal, polar ou circunferencial, e a escolha dependem das características mecânicas desejadas. As peças produzidas por essa técnicas apresentam alta relação resistência/peso, e ainda há um grande controle no grau de uniformidade e a orientação do enrolamento (CALLISTER ET. AL, 1999, p.377).

Essa técnica é utilizada para fabricar vaso de pressão, vigas, tubos e ainda é usada na indústria bélica para obtenção de peças com formatos cilíndricos para mísseis e foguetes. Para fabricar materiais com alta pressão interna, é usado juntamente com o enrolamento laminar um mandril que permite fazer curvas com o filamento inerte em resina (GAY, 2015, p.22). A Figura 5 mostra as formas de enrolamentos.

Figura 5 – Técnicas de enrolamentos de filamentos helicoidal, circunferencial e polar.



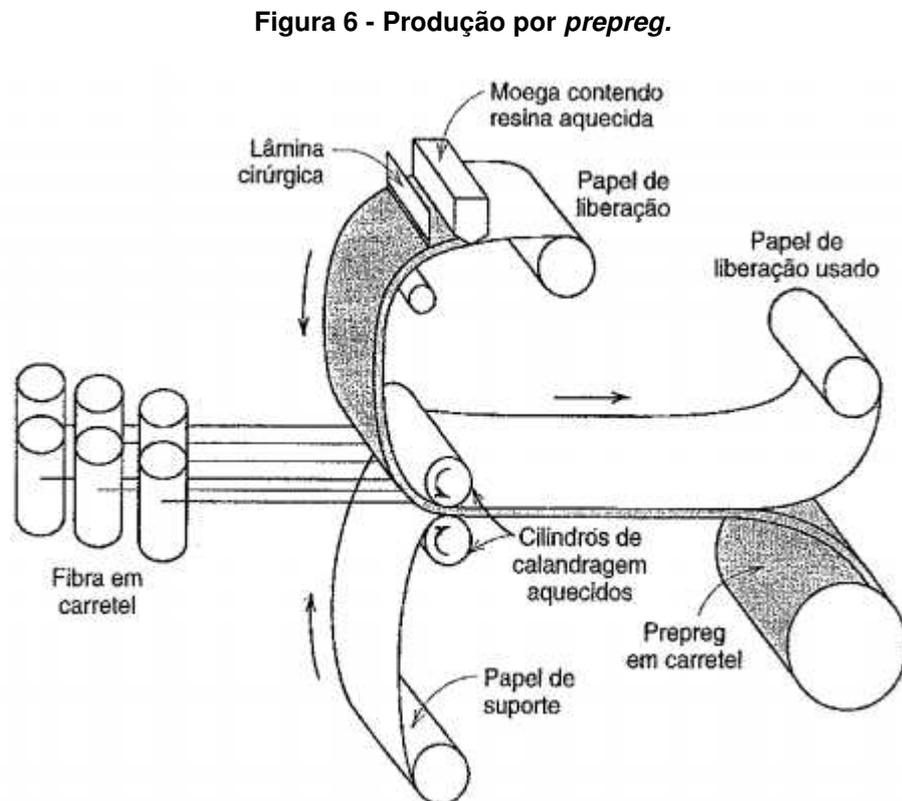
Fonte: N. L. Hancox, Editor, *Fibre Composite Hybrid Materials*, The Macmillian Company, New York, 1981.

3.1.1.3 Manufatura por *prepreg*

Esse termo é usado na indústria para nomear um compósito cuja fabricação é feita a partir de fibras contínuas pré-impregnadas com uma resina polimérica parcialmente curada. A produção por *prepreg* começa com fibras enroladas que são prensadas por rolos aquecidos em uma folha de papel, que será usada posteriormente para a liberação do mesmo.

O produto final *prepreg* é uma fita delgada que consiste em fibras contínuas e alinhadas que se encontram inseridas em uma resina parcialmente curada. Ele é comercializado em uma bobina de papelão. A cura desse tipo de material ocorre à temperatura ambiente, portanto ele deve ser armazenado a uma temperatura próxima ou inferior a 0°C (CALLISTER ET. AL, 1999, p. 376).

O procedimento de descarregamento pode ser manual, onde um operador corta o comprimento de fita desejado e o monta na superfície de acordo com a orientação desejada. Outra opção é fazer o processo automatizado, garantindo assim uma maior produção. A Figura 6 mostra um esquema da produção de compósito por *prepreg*.

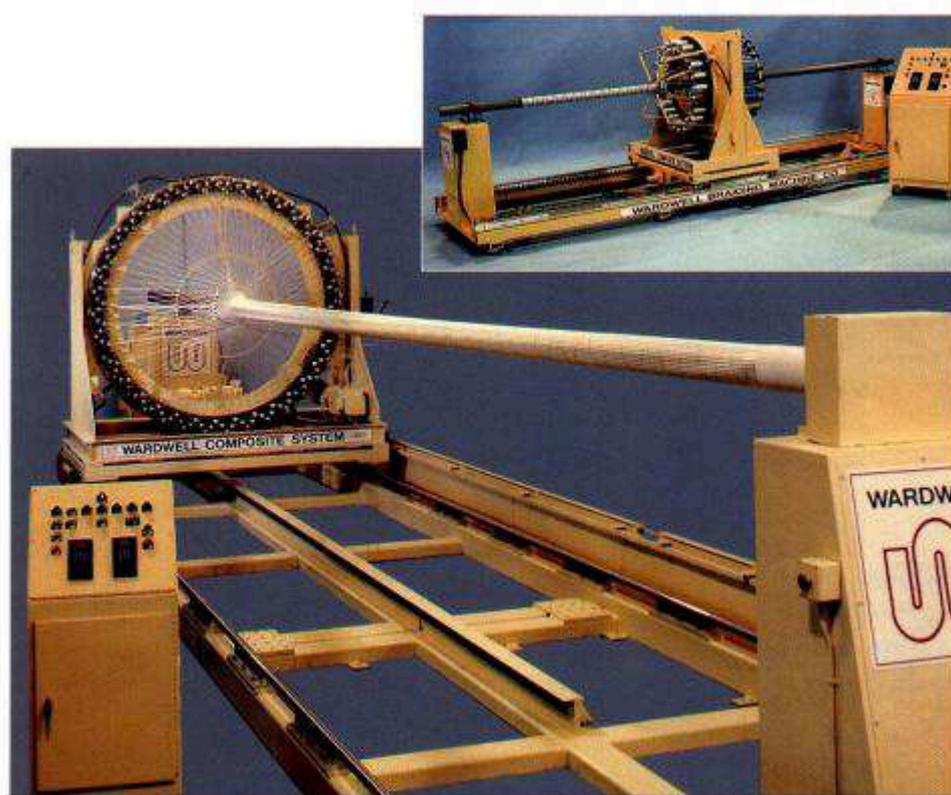


Fonte: Callister, 1999, p. 377.

3.1.1.4 Manufatura de tecidos feitos em compósito

Nesse processo, usa-se a técnica *braiding*, que é o entrelaçamento das fibras para formar o tecido. Máquinas de alta precisão são usadas para fazer o entrelaçamento. A Figura 7 mostra uma dessas máquinas, da fabricante *Wardwell®*.

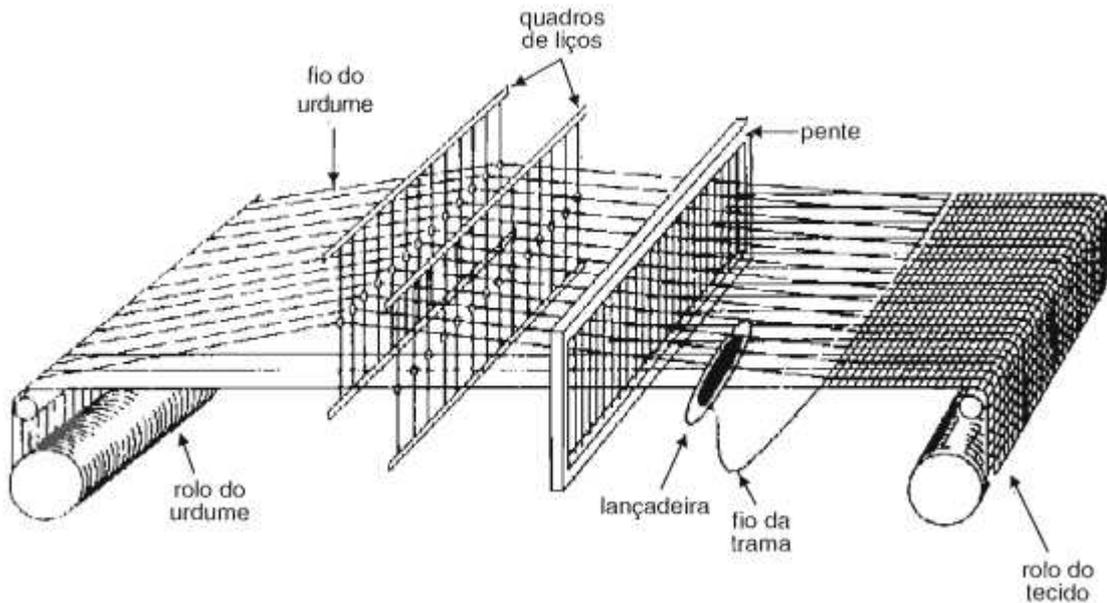
Figura 7 - Máquina que executa o entrelaçamento das fibras.



Fonte: Sérgio Frascino M. de Almeida, *Manufatura de materiais compósitos*, notas de aula. maio/2017, p. 124.

A Figura 8 mostra um esquema simplificado da produção de tecidos a partir de fibras entrelaçadas.

Figura 8 - Tecidos fabricados a partir de rolos de compósitos.



Fonte: Marco, A. Compósito reforçado com tecido – Vol. XVII. 2000. p. 10.

3.1.2 Características de um compósito formado por fibras e matriz

Definição de massa, volume e densidade das fibras e matriz é necessária para a determinação das propriedades mecânicas do compósito. A fração de massa da fibra e da matriz é definida a partir das Equações (1) e (2).

$$M_f = \frac{\text{Massa das fibras}}{\text{Massa total}} \quad (1)$$

$$M_m = \frac{\text{Massa da matriz}}{\text{Massa total}} \quad (2)$$

Já a fração de volume das fibras e da matriz pode ser escrita conforme as Equações (3) e (4).

$$V_f = \frac{\text{Volume das fibras}}{\text{Volume total}} \quad (3)$$

$$V_m = \frac{\text{Volume da matriz}}{\text{Volume total}} \quad (4)$$

A Equação (5) mostra a densidade total do compósito.

$$\rho = \frac{\text{Massa total}}{\text{Volume total}} \quad (5)$$

Mas, separando entre as massas das fibras e matriz, têm-se as parcelas das fibras e da matriz, conforme a Equação (6).

$$\rho = \frac{\text{Massa da matriz}}{\text{Volume total}} + \frac{\text{Massa das fibras}}{\text{Volume total}} \quad (6)$$

Escrevendo em função da fração de volume das fibras e da matriz, tem-se a Equação (7).

$$\rho = \frac{\text{Volume das fibras}}{\text{Volume total}} \rho_f + \frac{\text{Volume da matriz}}{\text{Volume total}} \rho_m \quad (7)$$

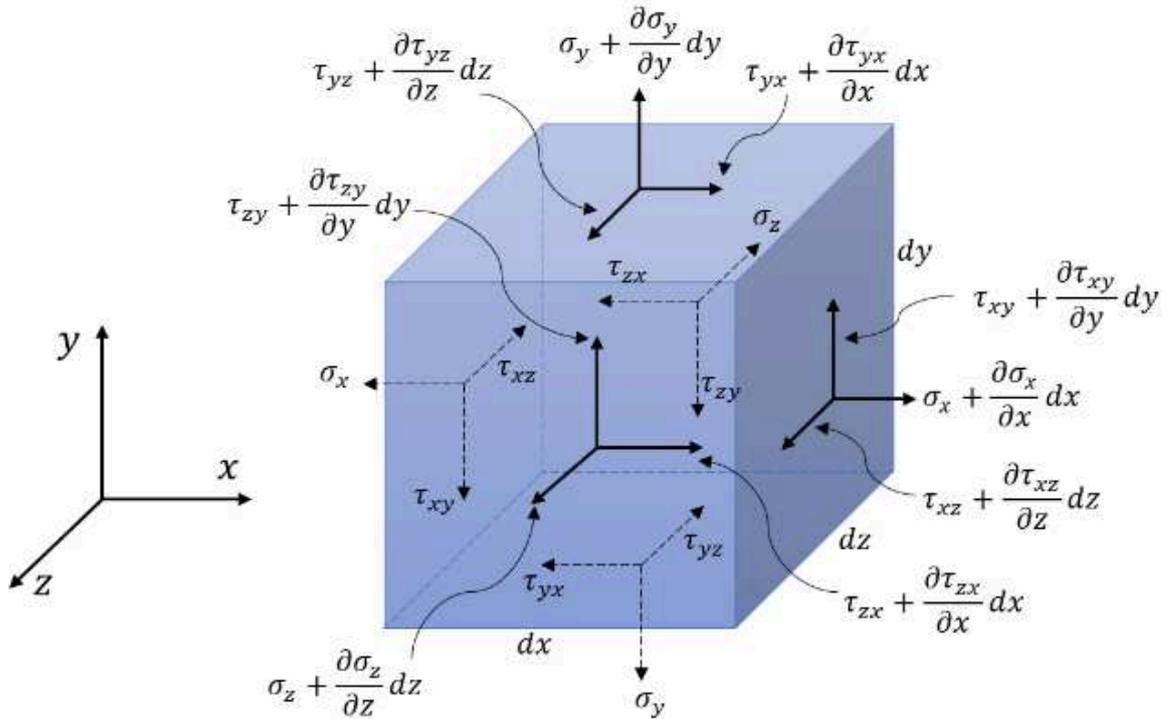
Portanto, chega-se que a densidade total é função da densidade e da fração volumétrica das fibras e da matriz, como pode ser visto na Equação (8).

$$\rho = V_f \rho_f + V_m \rho_m \quad (8)$$

3.2 Tensões em materiais compósitos

Um corpo sólido pode estar sujeito a forças de corpo e de superfície. As forças de corpo estão espalhadas pelo volume do sólido, e exemplos delas são as inerciais, gravitacionais, magnéticas, entre outras. As forças de superfícies são aquelas que atuam na superfície do corpo, como as tensões normais e cisalhantes. Seja um elemento cúbico sujeito a forças superficiais, ou seja, com forças de corpo desprezadas, conforme mostrado na Figura 9.

Figura 9 - Forças de superfície em um elemento cúbico infinitesimal.



Fonte: https://iesb.blackboard.com/bbcswebdav/institution/Ead/_disciplinas/EADG272/nova/aula8.html – Acesso 24/05/2018.

Os deslocamentos infinitesimais em x , y e z , são dados pelas Equações (9), (10) e (11), respectivamente.

$$\delta u = \frac{\partial u}{\partial x} \delta x + \frac{\partial u}{\partial y} \delta y + \frac{\partial u}{\partial z} \delta z \quad (9)$$

$$\delta v = \frac{\partial v}{\partial x} \delta x + \frac{\partial v}{\partial y} \delta y + \frac{\partial v}{\partial z} \delta z \quad (10)$$

$$\delta w = \frac{\partial w}{\partial x} \delta x + \frac{\partial w}{\partial y} \delta y + \frac{\partial w}{\partial z} \delta z \quad (11)$$

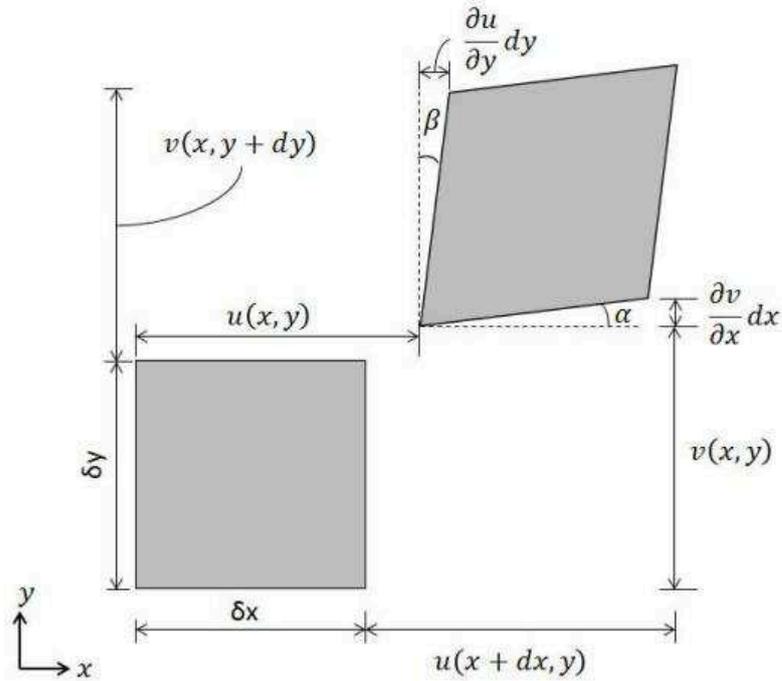
Reagrupando os deslocamentos, tem-se que as deformações podem ser escritas de acordo com a Equação (12).

$$\begin{aligned}
 \varepsilon_{xx} &= \frac{\partial u}{\partial x} \\
 \varepsilon_{yy} &= \frac{\partial v}{\partial y} \\
 \varepsilon_{zz} &= \frac{\partial w}{\partial z} \\
 \varepsilon_{yz} &= \frac{\partial w}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial z} \\
 \varepsilon_{zx} &= \frac{\partial u}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial x} \\
 \varepsilon_{xy} &= \frac{\partial v}{\partial x} + \frac{\partial u}{\partial y}
 \end{aligned}
 \tag{12}$$

Os termos ε_{xx} , ε_{yy} e ε_{zz} são os deslocamentos infinitesimais paralelos aos eixos x , y e z , respectivamente. Já ε_{yz} , ε_{zx} e ε_{xy} são as componentes de deslocamento devido ao cisalhamento entre os planos. Além das deformações, aparecem também vetores de rotação, expressos pela Equação (13). Isso fica mais evidente ao analisar a Figura 10.

$$\begin{aligned}
 2\bar{w}_x &= \frac{\partial w}{\partial y} - \frac{\partial v}{\partial z} \\
 2\bar{w}_y &= \frac{\partial u}{\partial z} - \frac{\partial w}{\partial x} \\
 2\bar{w}_z &= \frac{\partial v}{\partial x} - \frac{\partial u}{\partial y}
 \end{aligned}
 \tag{13}$$

Figura 10 - Deslocamento no plano x-y de um elemento infinitesimal.



Fonte: Rodvalho, 2012, p. 26.

Generalizando a lei de Hooke, pode-se escrever as tensões em função dos deslocamentos, conforme mostra a Equação (14).

$$\sigma_{xx} = C_{11}\varepsilon_{xx} + C_{12}\varepsilon_{yy} + C_{13}\varepsilon_{zz} + C_{14}\varepsilon_{yz} + C_{15}\varepsilon_{zx} + C_{16}\varepsilon_{xy}$$

$$\sigma_{yy} = C_{21}\varepsilon_{xx} + C_{22}\varepsilon_{yy} + C_{23}\varepsilon_{zz} + C_{24}\varepsilon_{yz} + C_{25}\varepsilon_{zx} + C_{26}\varepsilon_{xy}$$

$$\sigma_{zz} = C_{31}\varepsilon_{xx} + C_{32}\varepsilon_{yy} + C_{33}\varepsilon_{zz} + C_{34}\varepsilon_{yz} + C_{35}\varepsilon_{zx} + C_{36}\varepsilon_{xy}$$

$$\sigma_{yz} = C_{41}\varepsilon_{xx} + C_{42}\varepsilon_{yy} + C_{43}\varepsilon_{zz} + C_{44}\varepsilon_{yz} + C_{45}\varepsilon_{zx} + C_{46}\varepsilon_{xy}$$

$$\sigma_{zx} = C_{51}\varepsilon_{xx} + C_{52}\varepsilon_{yy} + C_{53}\varepsilon_{zz} + C_{54}\varepsilon_{yz} + C_{55}\varepsilon_{zx} + C_{56}\varepsilon_{xy}$$

$$\sigma_{xy} = C_{61}\varepsilon_{xx} + C_{62}\varepsilon_{yy} + C_{63}\varepsilon_{zz} + C_{64}\varepsilon_{yz} + C_{65}\varepsilon_{zx} + C_{66}\varepsilon_{xy}$$

(14)

Para um sólido isotrópico, tem-se que as constantes elásticas do material (C_{ij}) se resumem de acordo com a Equação (15).

$$\begin{aligned}
 C_{12} = C_{13} = C_{21} = C_{23} = C_{31} = C_{32} &= \lambda \\
 C_{44} = C_{55} = C_{66} &= \mu \\
 C_{11} = C_{22} = C_{33} &= \lambda + 2\mu
 \end{aligned}
 \tag{15}$$

Onde λ e μ são as constantes de Lamé. As outras 24 constantes são zero. Logo, pode-se escrever as tensões de acordo com a Equação (16).

$$\begin{aligned}
 \sigma_{xx} &= \lambda\Delta + 2\mu\varepsilon_{xx} \\
 \sigma_{yy} &= \lambda\Delta + 2\mu\varepsilon_{yy} \\
 \sigma_{zz} &= \lambda\Delta + 2\mu\varepsilon_{zz} \\
 \sigma_{yz} &= \mu\varepsilon_{yz} \\
 \sigma_{zx} &= \mu\varepsilon_{zx} \\
 \sigma_{xy} &= \mu\varepsilon_{xy}
 \end{aligned}
 \tag{16}$$

Como a dilatação é $\Delta = \frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z}$, ao substituir na Equação (16) tem-se a Equação (17).

$$\begin{aligned}
 \sigma_{xx} &= (\lambda + 2\mu)\varepsilon_{xx} + \lambda(\varepsilon_{yy} + \varepsilon_{zz}) \\
 0 &= (\lambda + 2\mu)\varepsilon_{yy} + \lambda(\varepsilon_{xx} + \varepsilon_{zz}) \\
 0 &= (\lambda + 2\mu)\varepsilon_{zz} + \lambda(\varepsilon_{xx} + \varepsilon_{yy})
 \end{aligned}
 \tag{17}$$

Resolvendo para ε_{xx} , ε_{yy} e ε_{zz} , tem-se a Equação (18) e a (19).

$$\varepsilon_{xx} = \frac{\lambda + \mu}{\mu(3\lambda + 2\mu)} \sigma_{xx}
 \tag{18}$$

$$\varepsilon_{yy} = \varepsilon_{zz} = -\frac{\lambda}{2\mu(3\lambda + 2\mu)}\sigma_{xx} \quad (19)$$

Mas, pela lei de Hooke, o módulo de elasticidade pode ser escrito conforme a Equação (20).

$$E = \frac{\sigma_{xx}}{\varepsilon_{xx}} \quad (20)$$

Portanto, tem-se o módulo de elasticidade, expresso pela Equação (21), em função das constantes de Lamé.

$$E = \frac{\mu(3\lambda + 2\mu)}{(\lambda + \mu)} \quad (21)$$

E, o coeficiente de Poisson é definido de acordo com a Equação (22).

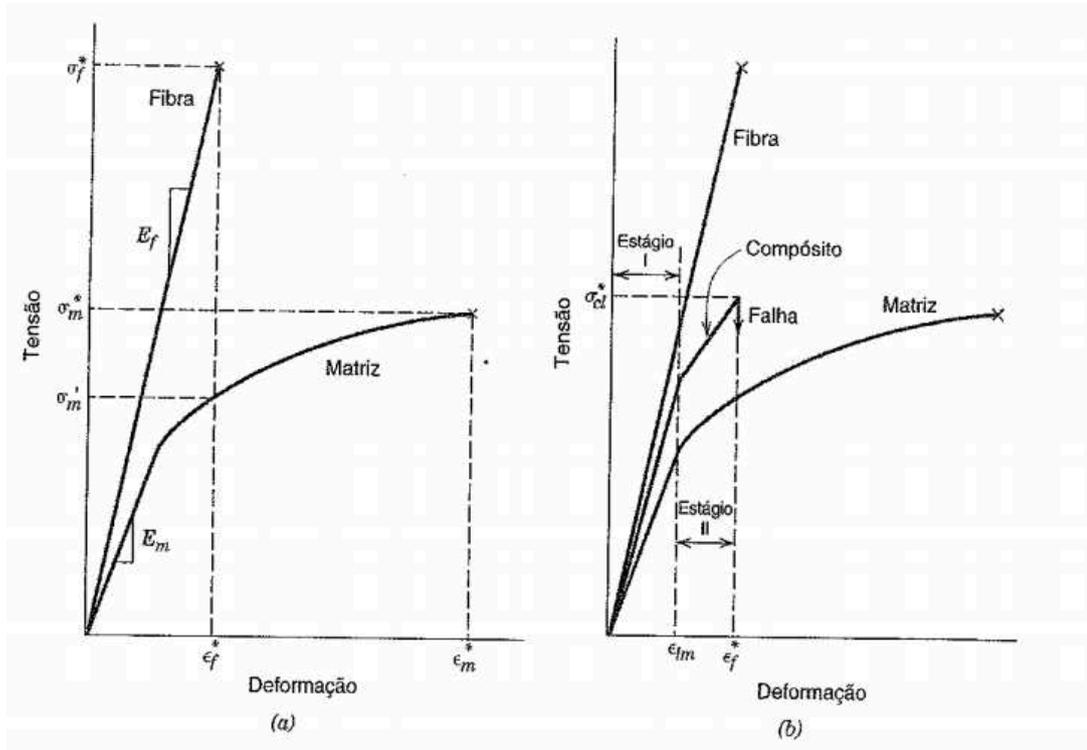
$$\nu = -\frac{\varepsilon_{yy}}{\varepsilon_{xx}} \quad (22)$$

Logo, o coeficiente de Poisson também pode ser escrito em função das constantes de Lamé, conforme mostra a Equação (23).

$$\nu = \frac{\lambda}{2(\lambda + \mu)} \quad (23)$$

O projeto estrutural de um material compósito passa pela análise microscópica e macroscópica de tensões. A nível macroscópico, as características mecânicas de um compósito podem ser estimadas analisando separadamente as fibras e a matriz. A lei de Hooke relaciona a tensão com a deformação através da constante de elasticidade, também conhecida como módulo de elasticidade ou módulo de Young. Considerando um carregamento longitudinal na direção das fibras de um compósito unidirecional, é possível montar o diagrama expresso na Figura 11.

Figura 11 - Diagrama tensão versus deformação para um compósito unidirecional.



Fonte: Callister, 1999. p. 365.

A parte (a) da Figura 11 mostra um compósito com fibra frágil e matriz dúctil. As tensões de ruptura de ambos estão marcadas no diagrama. A parte (b) mostra os estágios de falha no compósito. Analisando o diagrama de tensão-deformação, percebe-se que a matriz se deforma mais que as fibras, mas enquanto a deformação da matriz já é plástica, a da fibra ainda é elástica. A ruptura do compósito normalmente não é catastrófica, pois enquanto algumas fibras se rompem, outras ainda não se romperam, e isso faz com que a matriz continue se deformando e transferindo carga para as fibras restantes.

Pelo diagrama, é possível obter os valores das propriedades do compósito com fibras unidirecionais, como o módulo elástico longitudinal e transversal, módulo de cisalhamento, coeficiente de Poisson e tensão última (tensão que ocorre a ruptura do material). O módulo de elasticidade longitudinal pode ser escrito conforme a Equação (24).

$$E_l = E_f V_f + E_m V_m \quad (24)$$

Sendo E_f e E_m os módulos elásticos das fibras e da matriz, respectivamente. Na prática, o módulo de elasticidade depende essencialmente de

E_f , pois ele é bem maior que o E_m (GAY, 2015, p. 36). O módulo elástico transversal depende da fração de volume das fibras, do módulo elástico da matriz E_m e do módulo de elasticidade da fibra na direção perpendicular ao eixo longitudinal E_{ft} . A Equação (25) mostra a relação entre as propriedades.

$$E_t = E_m \frac{1}{(1 - V_f) + \frac{E_m}{E_{ft}} V_f} \quad (25)$$

De modo análogo ao módulo de elasticidade transversal, o módulo de cisalhamento, dado pela Equação (26), é escrito em função do módulo da matriz, da fração volumétrica das fibras e de G_f , que é o módulo de cisalhamento das fibras.

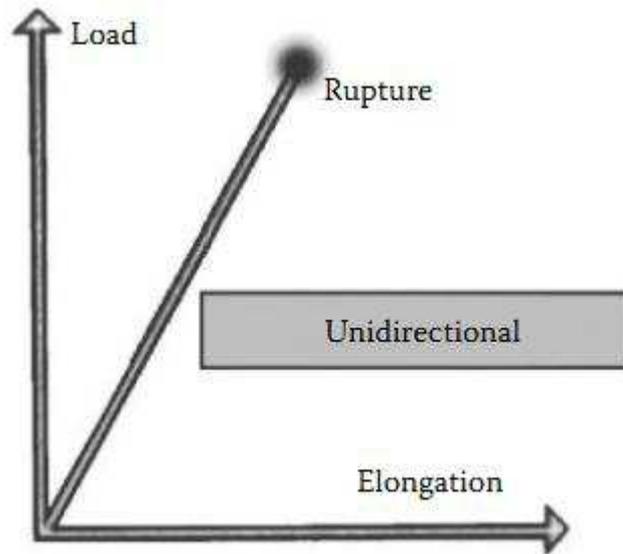
$$G = G_m \frac{1}{(1 - V_f) + \frac{G_m}{G_f} V_f} \quad (26)$$

O coeficiente de Poisson total do compósito, expresso pela Equação (27), depende da parcela das fibras e da matriz. Além disso, ele depende também das frações de volume.

$$\nu_{lt} = \nu_f V_f + \nu_m V_m \quad (27)$$

A tensão última do compósito é definida como a tensão máxima que as fibras aguentam antes de se romperem durante o carregamento ao longo da direção longitudinal. A Figura 12 mostra o diagrama tensão *versus* deformação com a tensão última em destaque.

Figura 12 - Diagrama tensão versus deformação.



Fonte: Gay, 2015. p. 39.

Matematicamente, a tensão última pode ser escrita como segue na Equação (28).

$$\sigma_{l,ruptura} = \sigma_{f,ruptura} \left[V_f + (1 - V_f) * \frac{E_m}{E_f} \right] \quad (28)$$

3.3 Propagação da onda

As ondas podem ser mecânicas ou eletromagnéticas, e essa definição depende do meio que ela se propaga. As ondas mecânicas são decorrentes da deformação de um meio elástico e obedecem às leis de Newton. Elas podem ser longitudinais ou transversais. As ondas eletromagnéticas são ondas transversais que são originadas pela movimentação de cargas elétricas oscilantes, que geram campo elétrico e magnético, que oscilam mantendo-se sempre perpendiculares à direção de propagação. Elas podem se propagar em meios materiais ou no vácuo (NUSSENZVIEG, 2002, p.99).

O som é um exemplo de onda mecânica, que é gerada por oscilações periódicas, ou seja, oscilações consecutivas com frequências que podem ou não serem audíveis pelo ouvido humano. O ser humano consegue ouvir na faixa de frequência que varia de 20 Hz até 20.000 Hz. Se estiverem abaixo dessa faixa, os

sons são denominados de infrassons e se estiverem acima, são ultrassons. Uma corda oscilando é um exemplo de onda mecânica, porém é denominada transversal, pois as partículas se deslocam perpendicularmente à propagação da onda.

A partir de artifícios matemáticos é possível chegar à equação que relaciona a frequência de uma onda com a sua velocidade. Considera-se uma partícula de um corpo sólido. Ao fazer a derivada total do deslocamento desta, tem-se a Equação (29). Uma onda sonora unidirecional propagando em meio elástico obedece a essa equação, sendo u o deslocamento das partículas, c a velocidade da onda e t o tempo.

$$\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} = \frac{1}{c^2} \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} \quad (29)$$

A velocidade de propagação da onda é determinada a partir da equação característica da onda (DOYLE, 1997). Usando a representação espectral, com frequência angular w e velocidade c , tem-se a Equação (30).

$$\frac{d^2 \hat{u}}{dx^2} + \frac{w^2}{c^2} \hat{u} = 0 \quad (30)$$

Onde \hat{u} é o deslocamento no espaço da frequência. Uma solução para a Equação (30) é a Equação (31).

$$\hat{u} = C e^{-ikx} \quad (31)$$

Sendo k o número de onda e C uma constante. Substituindo a Equação (31) na Equação (30), tem-se a Equação (32).

$$\left[-k^2 + \frac{w^2}{c^2} \right] C = 0 \quad (32)$$

Assim, conclui-se que a velocidade da onda em um meio não dispersivo, é dada pela Equação (33).

$$c = \frac{w}{k} \quad (33)$$

O número de onda se relaciona com o comprimento de onda λ através da Equação (34).

$$\lambda = \frac{2\pi}{k} \quad (34)$$

Substituindo a equação (34) na (33) tem-se a Equação (35).

$$\lambda = \frac{2\pi c}{w} \quad (35)$$

Mas, a frequência da onda é definida pela Equação (36).

$$f = \frac{w}{2\pi} \quad (36)$$

Portanto, chega-se na Equação (37), que é conhecida como a equação fundamental da onda.

$$c = \lambda f \quad (37)$$

É possível conhecer o deslocamento de uma partícula em um sólido, através das equações do movimento. Analisando o elemento cúbico sobre forças superficiais, dado pela Figura 9, tem-se que a somatória das forças que agem na direção x é dada pela Equação (38).

$$\Sigma F_x = \left(\frac{\partial \sigma_{xx}}{\partial x} + \frac{\partial \sigma_{xy}}{\partial y} + \frac{\partial \sigma_{xz}}{\partial z} \right) \delta_x \delta_y \delta_z \quad (38)$$

Pela segunda lei de Newton, tem-se a seguinte igualdade expressa na Equação (39), válida para um deslocamento na direção x .

$$\left(\frac{\partial \sigma_{xx}}{\partial x} + \frac{\partial \sigma_{xy}}{\partial y} + \frac{\partial \sigma_{xz}}{\partial z} \right) \delta_x \delta_y \delta_z = \rho \delta_x \delta_y \delta_z \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} \quad (39)$$

Logo, tem-se a Equação (40).

$$\frac{\partial \sigma_{xx}}{\partial x} + \frac{\partial \sigma_{xy}}{\partial y} + \frac{\partial \sigma_{xz}}{\partial z} = \rho \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} \quad (40)$$

Similarmente, para um deslocamento na direção y e na direção z , tem-se as Equações (41) e (42), respectivamente.

$$\frac{\partial \sigma_{yx}}{\partial x} + \frac{\partial \sigma_{yy}}{\partial y} + \frac{\partial \sigma_{yz}}{\partial z} = \rho \frac{\partial^2 v}{\partial t^2} \quad (41)$$

$$\frac{\partial \sigma_{zx}}{\partial x} + \frac{\partial \sigma_{zy}}{\partial y} + \frac{\partial \sigma_{zz}}{\partial z} = \rho \frac{\partial^2 w}{\partial t^2} \quad (42)$$

Ao substituir as tensões e deslocamentos calculados em função das constantes de Lamé, têm-se as equações em termos de deslocamentos da partícula em u , v e w correspondentes às direções x , y e z , respectivamente. Elas são expressas pelas Equações (43), (44) e (45), respectivamente.

$$\rho \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} = (\lambda + \mu) \frac{\partial \Delta}{\partial x} + \mu \nabla^2 u \quad (43)$$

$$\rho \frac{\partial^2 v}{\partial t^2} = (\lambda + \mu) \frac{\partial \Delta}{\partial y} + \mu \nabla^2 v \quad (44)$$

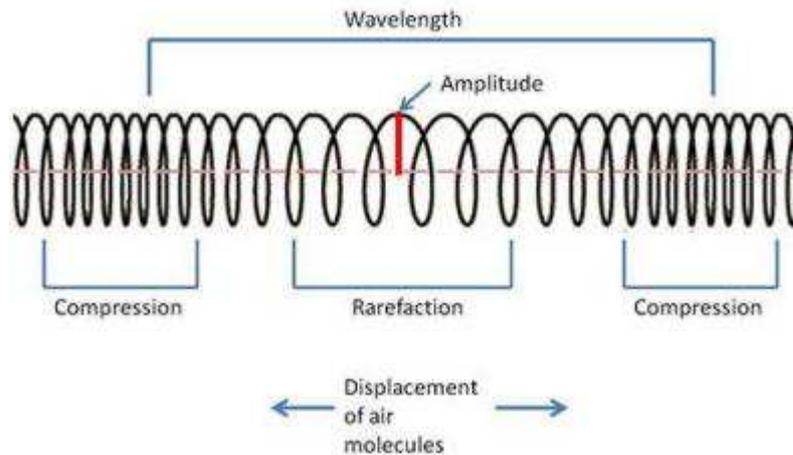
$$\rho \frac{\partial^2 w}{\partial t^2} = (\lambda + \mu) \frac{\partial \Delta}{\partial z} + \mu \nabla^2 w \quad (45)$$

Sendo ∇^2 o operador Laplaciano, $\frac{\partial^2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2}{\partial y^2} + \frac{\partial^2}{\partial z^2}$, e μ o módulo de cisalhamento. Resolvendo essas equações para a dilatação e para rotação em torno dos eixos de referência, e comparando com a Equação (29), têm-se as equações para ondas longitudinais e transversais (KOLSKY, H. 1963).

3.3.1 Ondas Longitudinais

Se as partículas do meio no qual uma onda mecânica se propaga se movimentarem na mesma direção da velocidade dessa onda, isso caracteriza uma onda longitudinal. Nesse modo de propagação, o deslocamento das partículas não é uniforme, pois ocorre uma compressão e depois uma rarefação, que é uma diminuição na densidade das partículas no meio. A Figura 13 mostra esse fenômeno.

Figura 13 - Ondas longitudinais.



Fonte: <https://www.difference.wiki/longitudinal-wave-vs-transverse-wave/> - Acesso dia 12/05/2018.

A Equação (46) é a solução das equações do movimento, expresso pelas Equações (43), (44) e (45). Ela representa a velocidade da onda longitudinal em função das constantes de Lamé e da densidade do meio material.

$$c = \sqrt{\frac{\lambda + 2\mu}{\rho}} \quad (46)$$

O módulo de elasticidade se relaciona com as constantes de Lamé conforme a Equação (47) para uma dilatação Δ .

$$E = \lambda + 2\mu \quad (47)$$

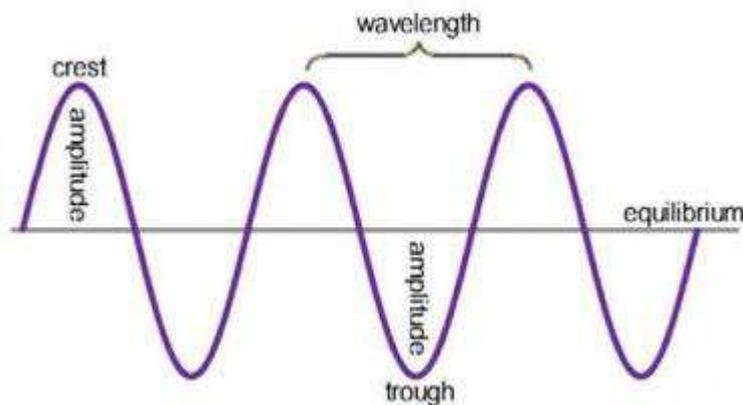
Assim, pode-se escrever a velocidade em função do módulo de elasticidade e da densidade do meio material onde a onda se propaga, conforme a Equação (48).

$$c = \sqrt{\frac{E}{\rho}} \quad (48)$$

3.3.2 Ondas transversais

Nesse tipo de onda, as oscilações das partículas ocorrem perpendicularmente à direção de propagação da onda. Cordas quando oscilam reproduzem esse movimento, que pode ser visto na Figura 14.

Figura 14 - Ondas transversais.



Fonte: <https://www.difference.wiki/longitudinal-wave-vs-transverse-wave/> - Acesso dia 12/05/2018.

A outra solução das equações do movimento fornece a velocidade para a onda transversal, expressa na Equação (49).

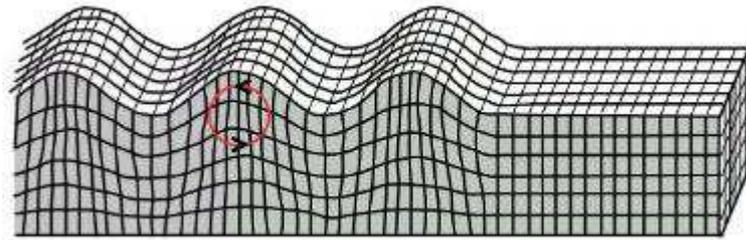
$$c = \sqrt{\frac{\mu}{\rho}} \quad (49)$$

Percebe-se que para esse tipo de onda, a velocidade depende da densidade e do módulo de cisalhamento do material.

3.3.3 Ondas de Rayleigh

As ondas de Rayleigh, ou ondas acústicas superficiais são ondas transversais que tangenciam a superfície do material com profundidade de um comprimento de onda. Tais ondas possuem suas componentes longitudinais e transversais acopladas, apresentando assim a mesma velocidade de propagação (CHEEKE, 2002). Essa característica faz com que a onda gere vórtices durante sua propagação, o que pode ser visto na Figura 15.

Figura 15 - Ondas de Rayleigh.

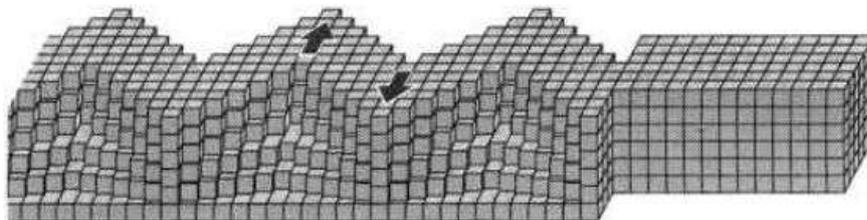


Fonte: <https://earthquake.usgs.gov/learn/glossary/?term=Rayleigh%20wave> – Acesso dia 15/05/2018.

3.3.4 Ondas de Love

São ondas que cisalham na horizontal da superfície. Essas ondas representam os abalos sísmológicos da terra quando há terremotos. A Figura 16 mostra um esquema dessas ondas.

Figura 16 - Ondas de Love.

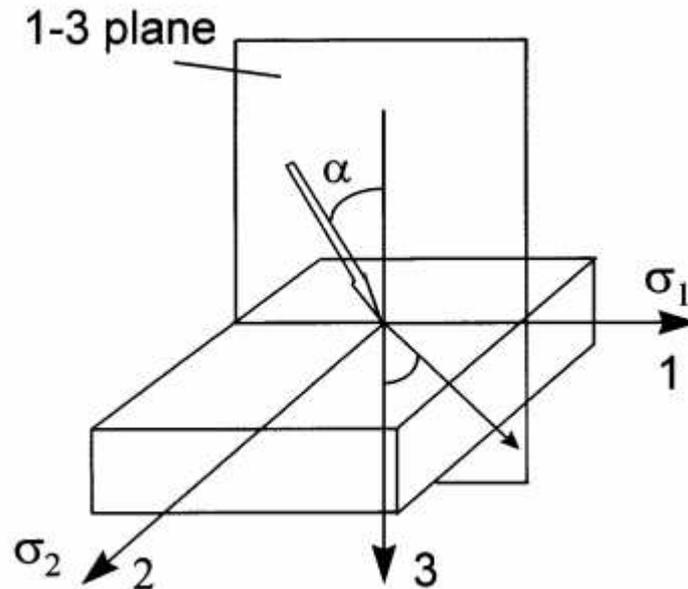


Fonte: <http://allshookup.org/quakes/wavetype.htm> - Acesso dia 15/05/2018.

3.4 Propagações de ondas em materiais compósitos

Para elaborar o equacionamento da propagação de onda em um compósito laminado unidirecional, é necessário adotar um sistema de coordenadas. Considera-se o seguinte compósito unidirecional mostrado na Figura 17.

Figura 17 - Compósito unidirecional com sistema de coordenadas.



Fonte: Rokhlin, 1997. p. 8.

Partindo desse princípio, é possível estabelecer a relação entre a tensão e a velocidade de propagação em um compósito unidirecional, através da acustoelasticidade.

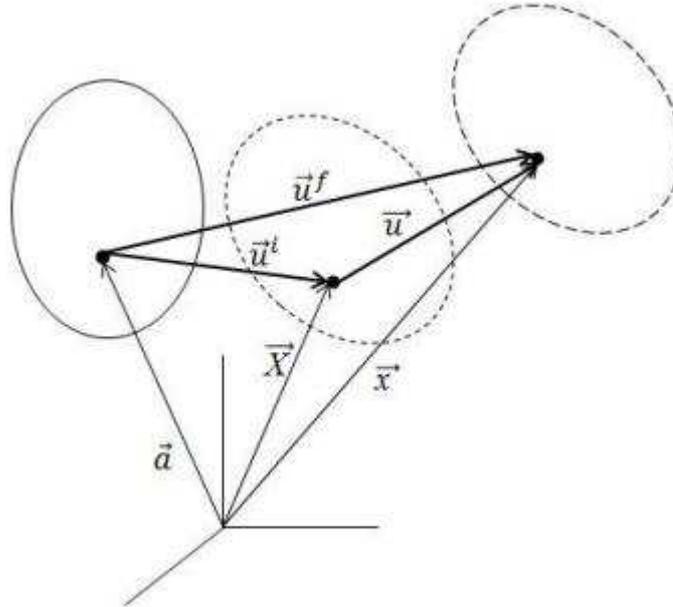
3.4.1 Acustoelasticidade

Segundo CHILLA ET. AL., 2001, a velocidade de fase de uma onda acústica propagando-se em meio sólido varia conforme as tensões (ou deformações) existentes no mesmo. Esse fenômeno é conhecido como efeito acustoelástico.

Para entender a acustoelasticidade, considera-se um ponto material em diferentes estados, que podem ser chamados de natural, inicial e final. O estado natural consiste no estado original de um corpo completamente livre de tensões e deformações. Ao sofrer uma tensão estática, o corpo assume uma nova posição, que é denominada estado inicial.

Se uma onda mecânica se propagar por esse ponto material, então existirá uma tensão dinâmica proveniente dessa onda que será sobreposta à tensão estática já existente, determinando assim o estado final do ponto material, com coordenadas x_j , com $j = 1, 2$ e 3 , conforme mostra a Figura 18 (RODOVALHO, 2012).

Figura 18 – Ponto material com diferentes estados no sistema de coordenadas (natural, inicial e final).



Fonte: Pao et. al., 1984.

Aplicando as leis de Newton para esse sistema e substituindo na relação de tensão-deformação não linear (que depende da tensão residual do sistema e dos tensores de deformação Eulerianos), tem-se a Equação (50), que representa a equação do movimento do corpo em estado natural. Ela é dada em função das deformações e constantes elásticas do material.

$$A_{\alpha\beta\gamma\delta} \frac{\partial^2 u_\gamma}{\partial a_\beta \partial a_\delta} = \rho^0 \frac{\partial^2 u_\alpha}{\partial t^2} \quad (50)$$

Onde ρ^0 representa a densidade do material em seu estado natural, ou seja, livre de tensões. $A_{\alpha\beta\gamma\delta}$ é um parâmetro que depende do tensor de tensão estática inicial e das constantes elásticas do material. A Equação (51) foi obtida pela transformada de Fourier da Equação (31) (considerando a coordenada y na formulação) e representa o deslocamento das partículas em um plano x - y . U representa a amplitude da onda.

$$u = U e^{-i(kx+ky-wt)} \quad (51)$$

Substituindo a Equação (50) na (51), tem-se a Equação (52), que é conhecida como a equação de Christoffel para um meio anisotrópico tensionado (ROKHLIN, 1997).

$$[C_{\alpha\beta\gamma\delta}n_\alpha n_\delta + (\sigma_{\alpha\delta}n_\alpha n_\delta - \rho V^2)\delta_{\alpha\gamma}]P_\gamma = 0 \quad (52)$$

A Equação (52) relaciona a tensão com a velocidade de propagação da onda em um meio sólido. O termo $C_{\alpha\beta\gamma\delta}$ expressa as constantes elásticas do material, n_β e n_δ são os vetores unitários da onda normal e P_γ é o vetor de polarização da onda. Se o meio for ortotrópico, a Equação (52) pode ser expressa na forma matricial, conforme a Equação (53).

$$\begin{bmatrix} \Gamma_{11} - \rho V^2_{11} & \Gamma_{12} & \Gamma_{13} \\ \Gamma_{12} & \Gamma_{22} - \rho V^2_{22} & \Gamma_{23} \\ \Gamma_{13} & \Gamma_{23} & \Gamma_{33} - \rho V^2_{33} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} P_1 \\ P_2 \\ P_3 \end{bmatrix} = 0 \quad (53)$$

3.4.1.1 Propagação da onda no plano de simetria

Para uma onda se propagando no plano 1-3, conforme mostra a Figura 17, tem-se que a equação de Christoffel pode ser escrita conforme a Equação (54).

$$\begin{bmatrix} \Gamma_{11} - (\rho V^2 - \sigma_{11}s^2) & 0 & \Gamma_{13} \\ 0 & \Gamma_{22} - (\rho V^2 - \sigma_{11}s^2) & 0 \\ \Gamma_{13} & 0 & \Gamma_{33} - (\rho V^2 - \sigma_{11}s^2) \end{bmatrix} = 0 \quad (54)$$

$$\left. \begin{aligned} \Gamma_{11} &= C_{11}s^2 + C_{55}s^2 \\ \Gamma_{22} &= C_{66}s^2 + C_{44}c^2 \\ \Gamma_{13} &= (C_{13} + C_{55})cs \\ \Gamma_{33} &= C_{55}s^2 + C_{33}c^2 \end{aligned} \right\} \quad (55)$$

Onde $s = \text{sen}(\theta)$, $c = \text{cos}(\theta)$ e θ é o ângulo entre a onda normal e o eixo 3 da Figura 17. Ao desacoplar a Equação (54), é possível chegar às soluções para as velocidades de fase, conforme escrito nas Equações (56) e (57).

$$\rho V_{QL}^2 = \frac{\Gamma_{11} + \Gamma_{33}}{2} + \sqrt{(\Gamma_{11} - \Gamma_{33})^2 + 4\Gamma_{13}^2 + \sigma_{11}S^2} \quad (56)$$

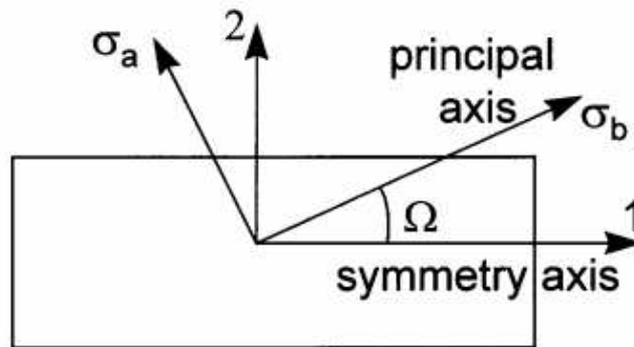
$$\rho V_{QT}^2 = \frac{\Gamma_{11} + \Gamma_{33}}{2} - \sqrt{(\Gamma_{11} - \Gamma_{33})^2 + 4\Gamma_{13}^2 + \sigma_{11}S^2} \quad (57)$$

Percebe-se que as velocidades V_{QL} e V_{QT} dependem somente as constantes elásticas do material e da tensão σ_{11} . Elas são chamadas de velocidades quase-longitudinal e quase-transversal. Similarmente, para o plano 2-3, as velocidades de fase dependerão das constantes C_{22} , C_{33} , C_{23} , C_{44} e da tensão σ_{22} .

3.4.1.2 Propagação da onda fora do plano de simetria

Para ondas que se propagam fora do eixo de simetria, consideram-se as orientações de tensão conforme a Figura 19.

Figura 19 - Tensões fora do plano de simetria.



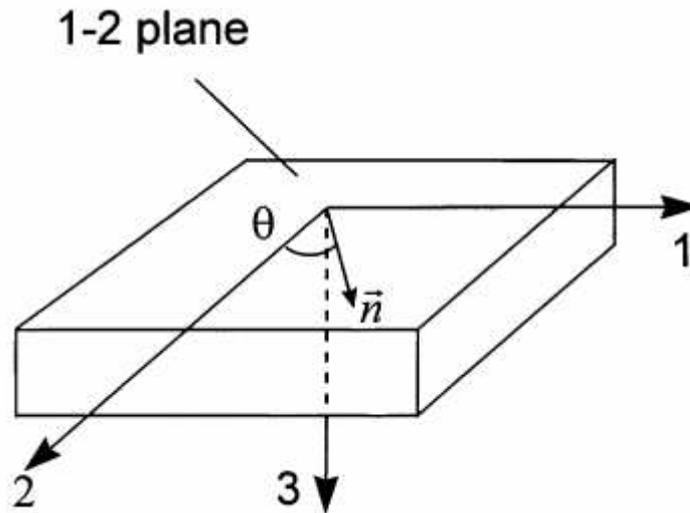
Fonte: Rokhlin, 1997. p. 9.

Tem-se que somente σ_{11} , σ_{22} e σ_{12} são diferentes de zero. Assim, as constantes elásticas se reduzem conforme a Equação (58).

$$[C_{ij}] = \begin{bmatrix} C_{11} & C_{12} & C_{13} & 0 & 0 & C_{16} \\ C_{12} & C_{22} & C_{23} & 0 & 0 & C_{26} \\ C_{13} & C_{23} & C_{33} & 0 & 0 & C_{36} \\ 0 & 0 & 0 & C_{44} & C_{45} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & C_{45} & C_{55} & 0 \\ C_{16} & C_{26} & C_{36} & 0 & 0 & C_{66} \end{bmatrix} \quad (58)$$

Os termos C_{16} , C_{26} , C_{36} , C_{45} são as constantes elásticas induzidas pela tensão σ_{12} . Se σ_{12} é diferente de zero, então a solução da equação de Christoffel não pode ser do tipo da Equação (56) e (57), porque essa tensão de cisalhamento altera a simetria do material, e o plano 1-3 torna-se não simétrico (ROKHLIN, 1997). Uma solução para esse problema é considerar a propagação da onda no plano de acordo com a Figura 20.

Figura 20 - Plano de propagação de onda.



Fonte: Rokhlin, 1997. p. 9.

Este plano ainda permanece o plano de simetria, portanto a Equação (54) pode ser desacoplada, tendo-se assim as soluções para as velocidades de fase quase-longitudinal e quase-transversal. As Equações (59) e (60) mostram essas velocidades (ROKHLIN, 1997).

$$\rho V_{QL}^2 = \frac{\Gamma_{11} + \Gamma_{22}}{2} + \sqrt{(\Gamma_{11} - \Gamma_{22})^2 + 4\Gamma_{12}^2 + (\sigma_{11} - \sigma_{22})s^2 + \sigma_{22} + 2\sigma_{12}sc} \quad (59)$$

$$\rho V_{QT}^2 = \frac{\Gamma_{11} + \Gamma_{22}}{2} - \sqrt{(\Gamma_{11} - \Gamma_{22})^2 + 4\Gamma_{12}^2 + (\sigma_{11} - \sigma_{22})s^2 + \sigma_{22} + 2\sigma_{12}sc} \quad (60)$$

Os termos Γ_{11} , Γ_{22} e Γ_{12} são representados de acordo com a Equação (61). $s = \text{sen}(\theta)$ e $c = \text{cos}(\theta)$.

$$\begin{aligned}
 \Gamma_{11} &= C_{11}s^2 + C_{66}s^2 + 2C_{16}cs \\
 \Gamma_{22} &= C_{66}s^2 + C_{22}c^2 + 2C_{26}cs \\
 \Gamma_{12} &= (C_{12} + C_{66})cs + C_{16}s^2 + C_{26}c^2
 \end{aligned}
 \tag{61}$$

Novamente, as velocidades de fase são expressas em função das constantes de rigidez do material e do ângulo entre os eixos principais e o eixo de simetria (θ). Nessa seção foram apresentados os conceitos básicos desde a definição de materiais compósitos e seus métodos de fabricação até a propagação de onda em um meio isotrópico e ortotrópico.

Foram mostradas também as equações que representam as tensões em compósitos e as equações da velocidade de propagação de onda obtida através da equação de Christoffel, desenvolvida em 1877. Essas equações são usadas para a medição de tensão em compósitos, e também são implementadas para análise de tensão e propagação de ondas a partir de software de simulação numérica.

Com o auxílio dessas ferramentas, será possível analisar o comportamento de ondas com velocidades longitudinais, transversal, Lamb, e de Rayleigh em laminados compósitos unidirecionais. O foco principal desse trabalho é verificar fatores que podem influenciar na delaminação de materiais compósitos, com um carregamento que produz uma onda mecânica longitudinal.

CAPÍTULO IV

DELAMINAÇÃO DE MATERIAIS COMPÓSITOS SUBMETIDOS A IMPACTO

A delaminação de materiais compósitos é um grande problema para a indústria aeronáutica. Quando submetido ao impacto, o compósito pode se delaminar e assim ocasionar falha mecânica da estrutura. Como visto na revisão bibliográfica, a delaminação do compósito pode ocorrer em decorrência da diferença nas características dos materiais que compõe os laminados.

Ao receber um impacto, a onda mecânica se propaga pelo material, e ao passar pela interface, parte dessa onda é transmitida e parte é refletida. Essa reflexão e transmissão da onda gera uma tensão elástica resultante de tração na junção, contribuindo para a delaminação do compósito.

CAPÍTULO V

METODOLOGIA PARA ANÁLISE NUMÉRICA E MATERIAIS UTILIZADOS

Em simulações via software (simulação numérica) existem dois tipos de métodos para análise de um problema físico: implícito e explícito. Basicamente, a maneira de se calcularem os deslocamentos dos nós é que diferencia um método do outro (RODRIGUES, 2013).

5.1 Método implícito

Nesse método, o cálculo dos deslocamentos dos nós é feito no estado do sistema atual e posterior, conforme a Equação (62).

$$u_{t+\Delta t} = G_{t+\Delta t}, G_t \quad (62)$$

Em sistemas lineares, sem contato físico entre os corpos ou que envolvem grandes deformações esse método é bem estável para grandes passos de tempo.

5.2 Método explícito

Para o método explícito, o problema é resolvido com o sistema no estado de tempo atual somente, conforme a Equação (63).

$$u_{t+\Delta t} = G_t \quad (63)$$

Diferentemente do método implícito, o explícito é usado em problemas que se enquadram na segunda lei de Newton ($\sum \vec{F} = m\vec{a}$), e assim são conhecidos por simulações dinâmicas. No método explícito, as acelerações presentes no modelo precisam ser calculadas a cada instante de tempo. Assim, as acelerações

{a} são calculadas através da inversão da matriz de massa [M] multiplicada pela diferença entre as forças externas e internas. A Equação (64) mostra essa relação.

$$\{a_t\} = [M]^{-1}\{F_t^{ext} - F_t^{int}\} \quad (64)$$

Com os dados do instante atual, calcula-se a aceleração. Pela Equação (65) e (66), encontram-se as velocidades {v} e os deslocamentos {u} dos nós no instante, respectivamente.

$$\{V_{t+\Delta t/2}\} = \{V_{t-\Delta t/2}\} + \{a_t\}\Delta t \quad (65)$$

$$\{u_{t+\Delta t}\} = \{u_t\} + \{V_{t+\Delta t/2}\}\Delta t_{t+\Delta t/2} \quad (66)$$

Um problema deste método é que se a simulação for complexa, é necessário um Δt muito pequeno, o que ocasionaria um longo tempo para a solução do modelo (RODRIGUES, 2013).

5.3 Materiais utilizados

Para realizar as simulações, utilizou-se os materiais da Tabela 1.

Tabela 1 – Propriedades dos materiais utilizados.

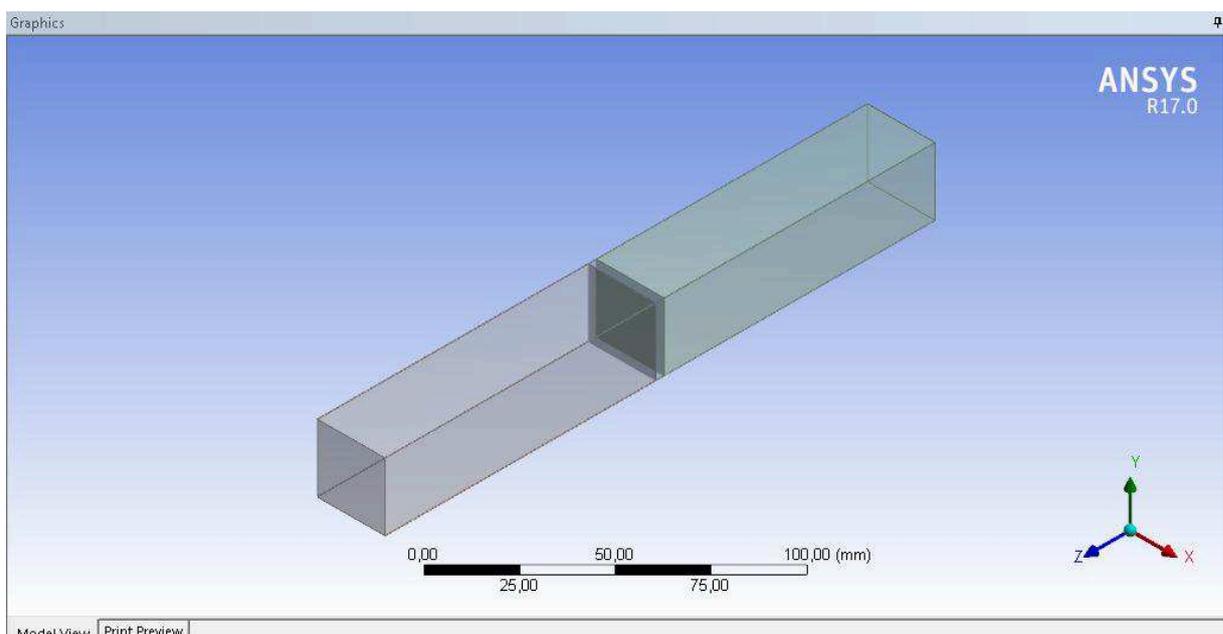
| Material | Módulo de Elasticidade [MPa] | Densidade [kg/m³] |
|-----------------|-------------------------------------|-------------------------------------|
| Fibra de vidro | 10000 | 2000 |
| Resina epóxi | 3780 | 1160 |
| Espuma de PVC | 70 | 60 |

CAPÍTULO VI

RESULTADOS E DISCUSSÕES

Para realizar as simulações, foi usado o software *ANSYS®* versão 17.0. Todo o método utilizado para se chegar aos resultados está descrito no Apêndice A. A viga analisada possui dimensões (25 mm x 25 mm x 203 mm) e foi feita em fibra de vidro (duas maiores partes de dimensão 25 mm x 25 mm x 100 mm cada) conjuntamente com uma lâmina de resina epóxi (depois trocada pela espuma de PVC, de dimensões 25 mm x 25 mm x 3 mm). A Figura 21 mostra a vista isométrica da viga.

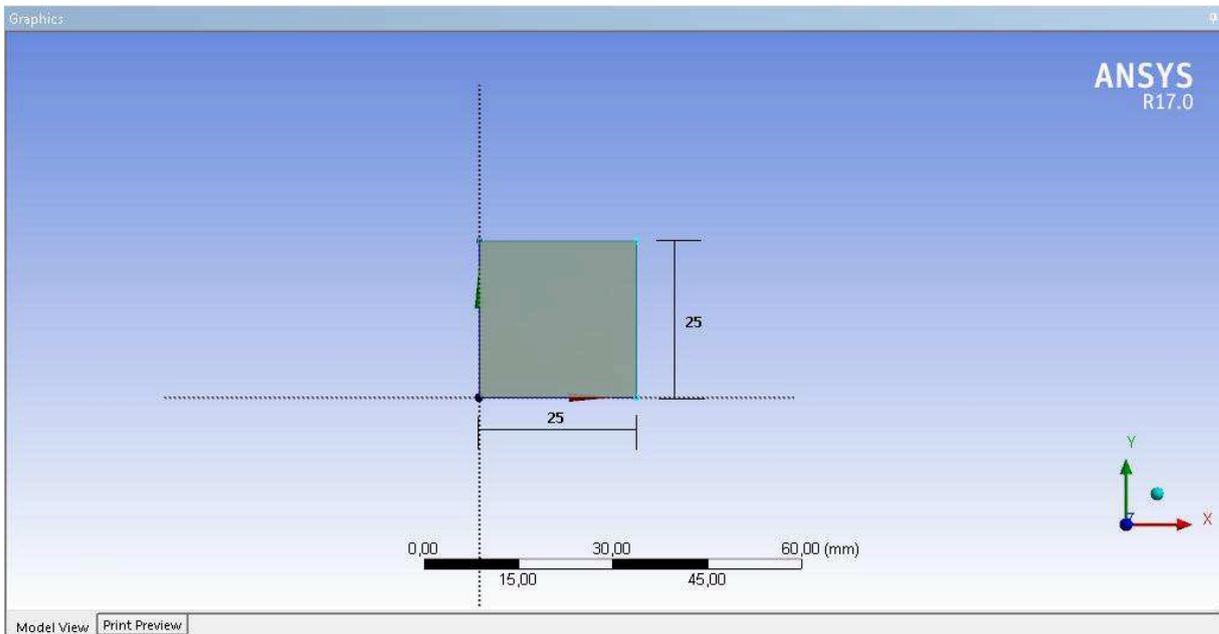
Figura 21 - Geometria da viga em estudo – Vista isométrica.



Fonte: O próprio autor.

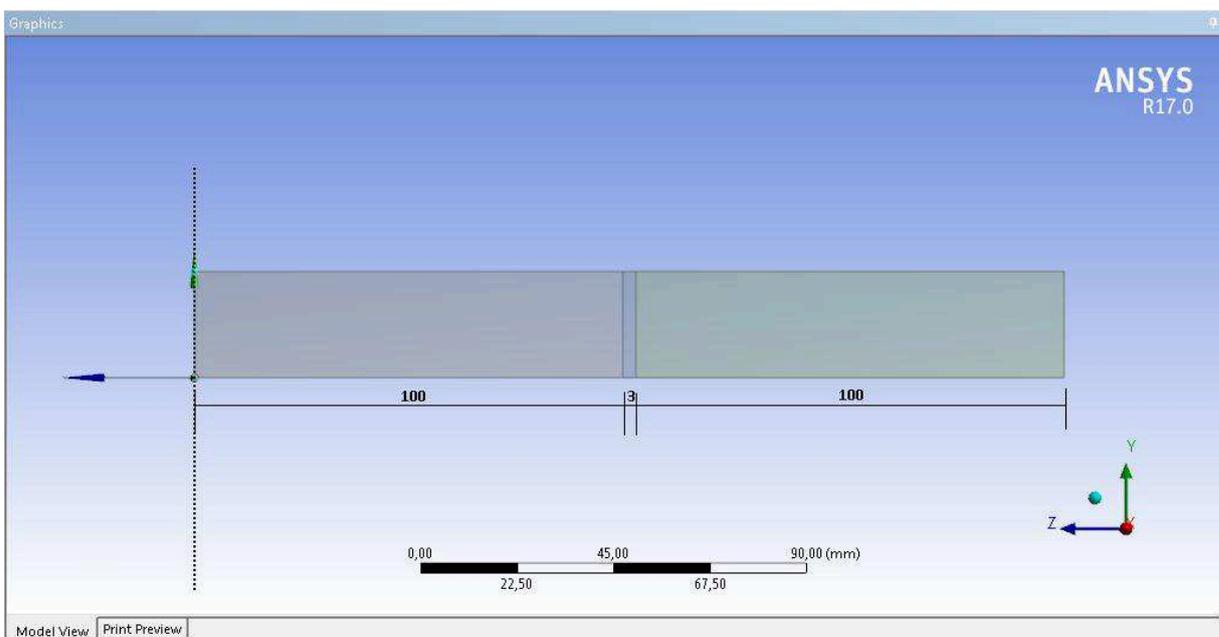
As Figuras 22 e 23 mostram as vistas frontal e lateral, com as suas respectivas dimensões.

Figura 22 - Geometria da viga em estudo - Vista frontal.



Fonte: O próprio autor.

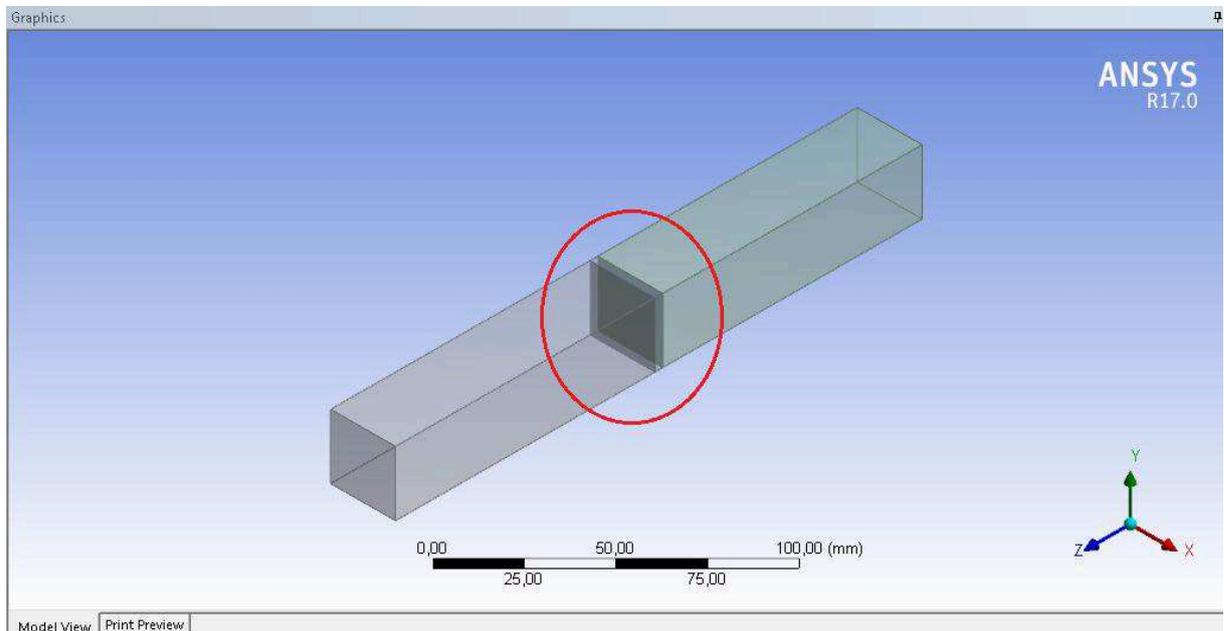
Figura 23 - Geometria da viga em estudo – Vista lateral.



Fonte: O próprio autor.

A Figura 24 mostra a lâmina em destaque.

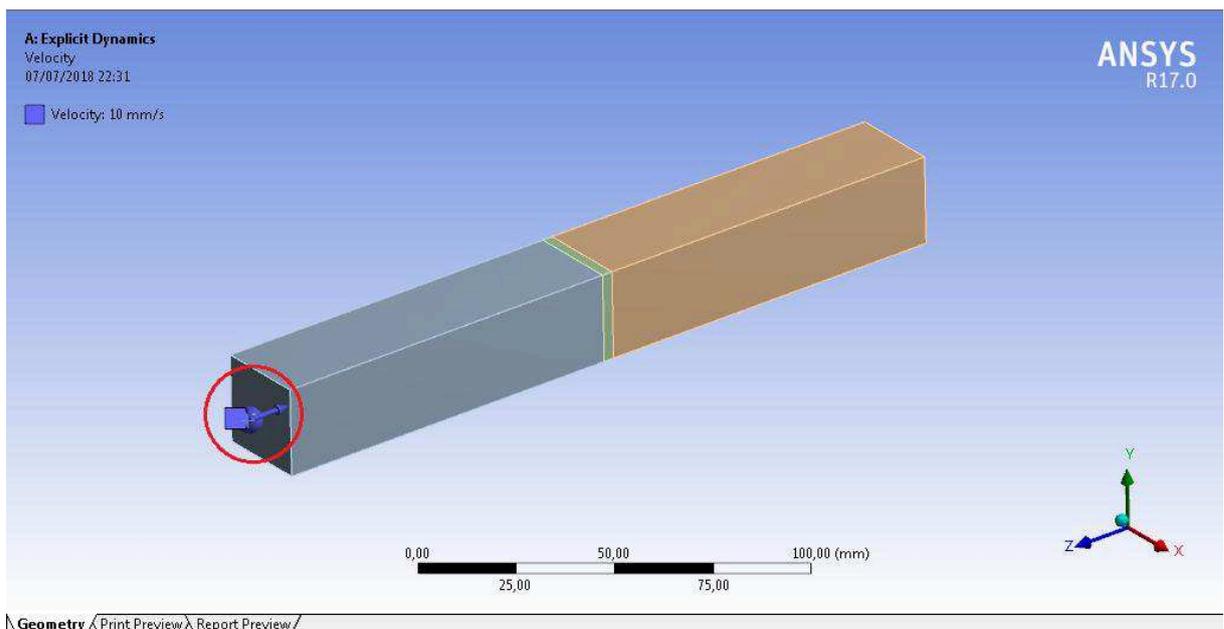
Figura 24 - Viga com a lâmina em destaque.



Fonte: O próprio autor.

Para simular o impacto, foi colocada uma pequena esfera de aço se chocando contra a viga na direção negativa do eixo z, conforme mostra a Figura 25.

Figura 25 - Viga com a esfera de impacto.



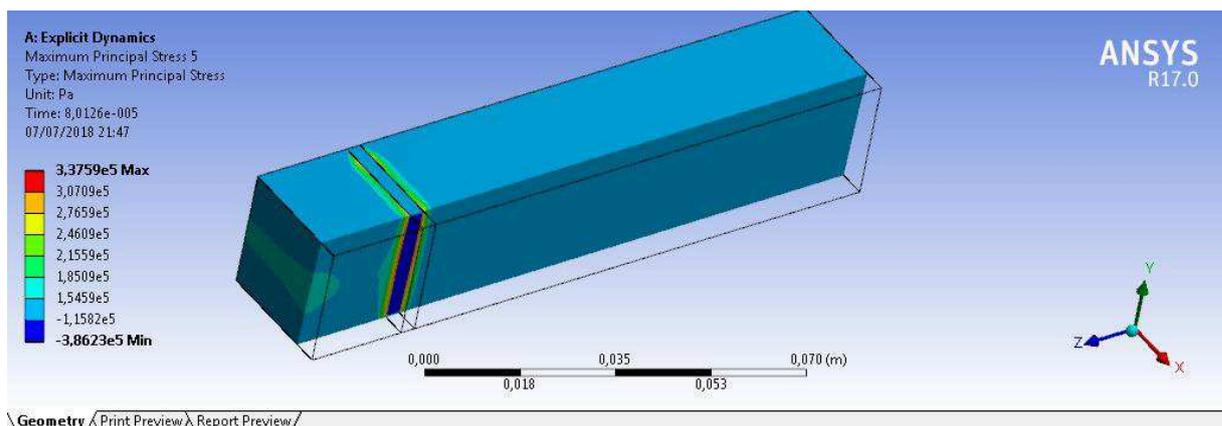
Fonte: O próprio autor.

O centróide da esfera coincide com o da seção transversal da viga. A distância entre elas é quase zero. A massa da esfera é de aproximadamente 1,3 gramas. O módulo de elasticidade (E) da fibra de vidro é de 10.000 MPa na direção do impacto (eixo z do sistema de coordenadas). Assim, escolheu-se a resina epóxi ($E = 3780$ MPa) e o PVC ($E = 70$ MPa) como os materiais de união das lâminas do laminado, pois eles possuem módulos bem menores que o da fibra de vidro.

Por mais que se tenham outros tipos de ondas (Rayleigh, transversais, entre outras), o tipo predominante no problema é a onda mecânica longitudinal, devido ao tipo de carregamento (impacto na longitudinal da viga). A intenção em variar os materiais é criar uma impedância acústica na junção, para possibilitar a análise da transferência de carga e sua influência no estudo da delaminação do compósito.

A Figura 26 mostra os dois cortes feitos na viga para melhor visualização. O primeiro (na seção transversal) foi para excluir a parte do impacto, que mostram níveis de tensão bem altos e prejudica os valores que de fato se devem analisar (na junção). O segundo corte é na longitudinal do comprimento da viga, para poder analisar a onda no interior da viga, correspondentes aos valores máximos de tração e compressão.

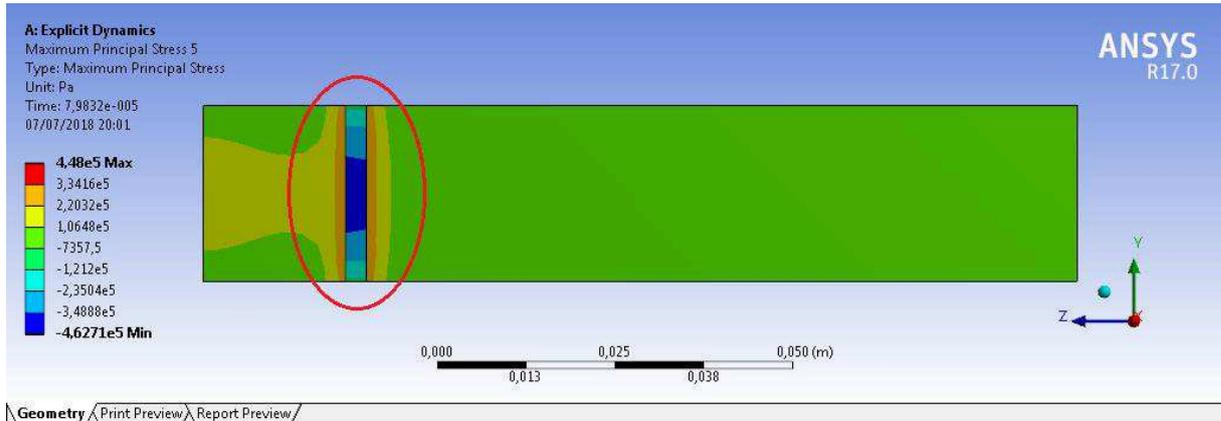
Figura 26 - Corte na viga para melhor visualização.



Fonte: O próprio autor.

Os ensaios dinâmicos foram realizados na viga em fibra de vidro e a lâmina em resina epóxi. A velocidade de impacto foi de 10 m/s. Da Figura 27 até 33 é possível ver os resultados.

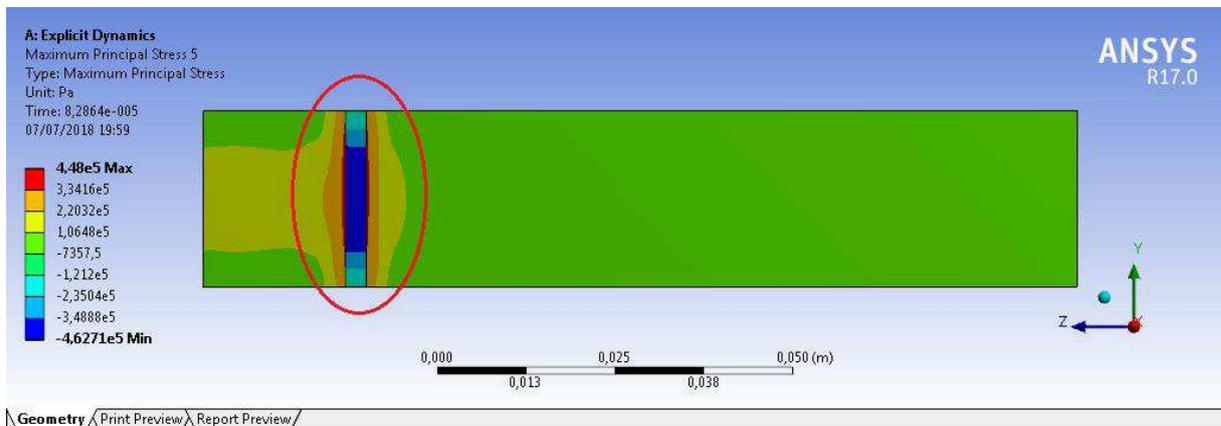
Figura 27 - Onda mecânica chegando à interface



Fonte: O próprio autor.

Por essa imagem, é possível ver a onda mecânica chegando à primeira interface, parte sendo transmitida e parte refletida. Na Figura 28, é possível ver o campo de tração e compressão das tensões principais aumentando.

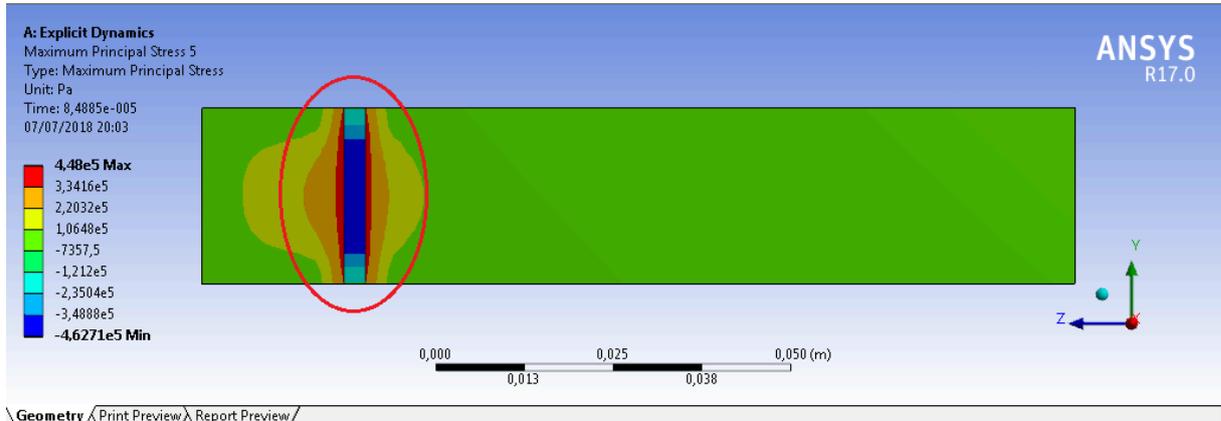
Figura 28 - Onda mecânica aumentando o campo de tração e compressão.



Fonte: O próprio autor.

Pela Figura 29 é possível notar que o campo de tensão aumenta mais ainda, à medida que a onda passa. Nas duas junções, a cor em vermelho já é maior, mostrando que naquela interface tem uma tração resultante.

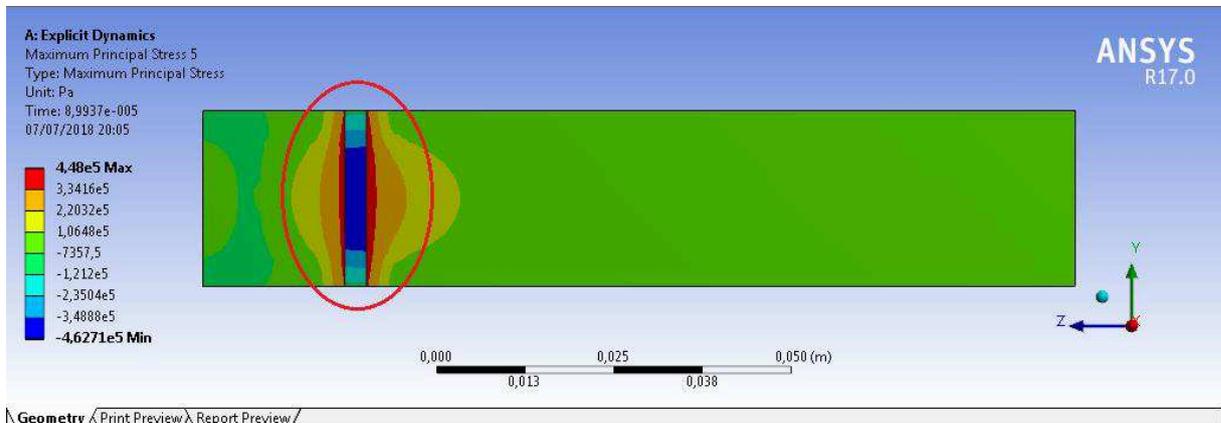
Figura 29 - Onda mecânica gerando campo de tensão nas interfaces.



Fonte: O próprio autor.

Percebe-se ainda que uma boa parcela da onda refletiu. Já na Figura 30, a transmissão é maior, pois a onda mecânica continua a propagar. Há um campo de compressão na resina, e antes e depois das interfaces há um campo de tração (cores azul e vermelha, respectivamente).

Figura 30 - Campo máximo de tensão e compressão nas interfaces do compósito.

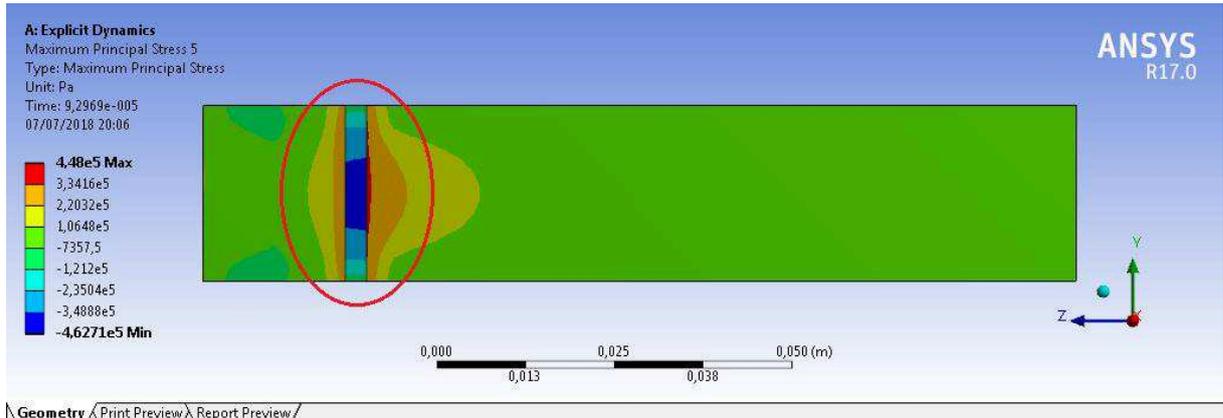


. Fonte: O próprio autor.

Pela Figura 30 é notório que a parcela da onda que reflete na primeira interface traciona as partículas (lado esquerdo da interface). Já na segunda interface, ocorre o mesmo efeito, pois à medida que a onda mecânica passa pela segunda interface, a parte transmitida traciona as moléculas da junção (lado direito da interface). O resultado disso é que a resina fica comprimida.

Na Figura 31, percebe-se que a onda mecânica continua sua propagação, com a frente de onda bem definida. Os níveis de tensão já são mais baixos.

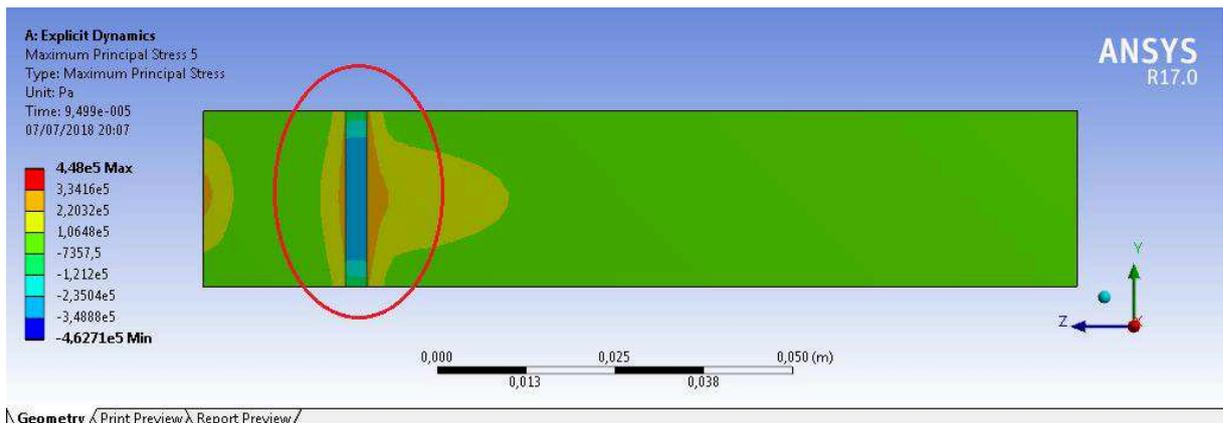
Figura 31 - Propagação da onda com frente bem definida.



Fonte: O próprio autor.

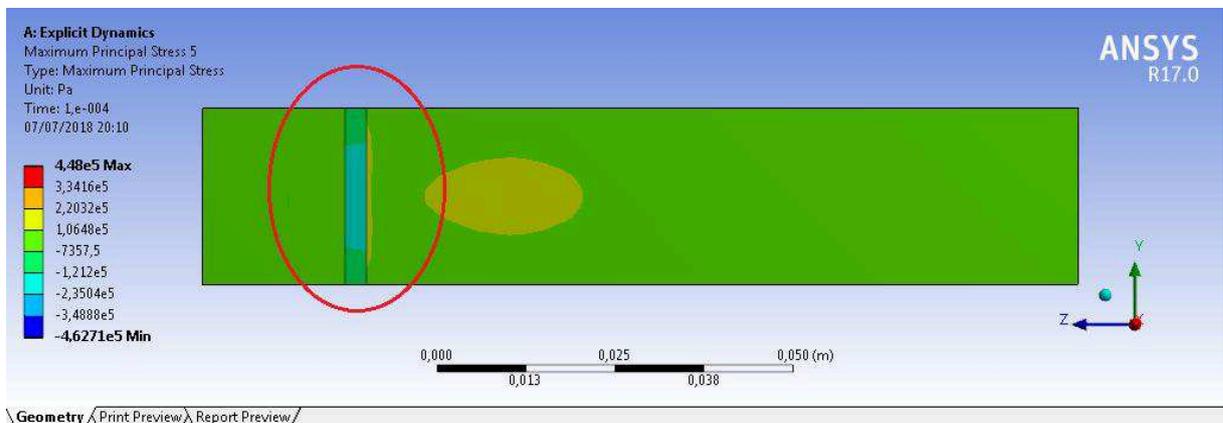
As Figuras 32 e 33 mostram o término da passagem da onda.

Figura 32 - Passagem quase total da onda mecânica pela resina epóxi.



Fonte: O próprio autor.

Figura 33 - Passagem total da onda mecânica pela resina epóxi.



Fonte: O próprio autor.

O fenômeno da delaminação de materiais compósitos fica bem evidente a partir dessas imagens. A força de tração resultante nas duas interfaces devida à transmissão e reflexão da onda é vista com clareza. Isso é de extrema importância para entendimento da delaminação.

Para analisar o comportamento da viga com diferentes velocidades foram simulados impactos cujas velocidades variaram de 2,5 m/s até 20 m/s. A Tabela 2 mostra as cargas atuantes na interface direita (segunda junção) da lâmina.

Tabela 2 – Tensão de tração e de compressão na interface para cada material na lâmina.

| Velocidade [m/s] | Resina epóxi | | | Espuma de PVC | | |
|---------------------|----------------|--------------------|------------|----------------|--------------------|------------|
| | Tração [Pa] | Compressão [Pa] | T/C [%] | Tração [Pa] | Compressão [Pa] | T/C [%] |
| 2,5 | 110570 | 115400 | 95,81 | 31479 | 39265 | 80,17 |
| 2,8 | 124990 | 128750 | 97,08 | 35346 | 44072 | 80,20 |
| 3,0 | 133980 | 138260 | 96,90 | 37873 | 47220 | 80,20 |
| 3,5 | 155980 | 161610 | 96,52 | 44143 | 55040 | 80,20 |
| 4,0 | 177940 | 184850 | 96,26 | 50408 | 62850 | 80,20 |
| 4,5 | 200990 | 207190 | 97,00 | 56819 | 70874 | 80,17 |
| 5,0 | 222810 | 231010 | 96,45 | 63061 | 78653 | 80,18 |
| 8,0 | 357420 | 369420 | 96,75 | 101020 | 100870 | 100,00 |
| 13,0 | 580560 | 601540 | 96,51 | 164140 | 164100 | 100,00 |
| 20,0 | 888760 | 916180 | 97,00 | 251170 | 251560 | 100,00 |

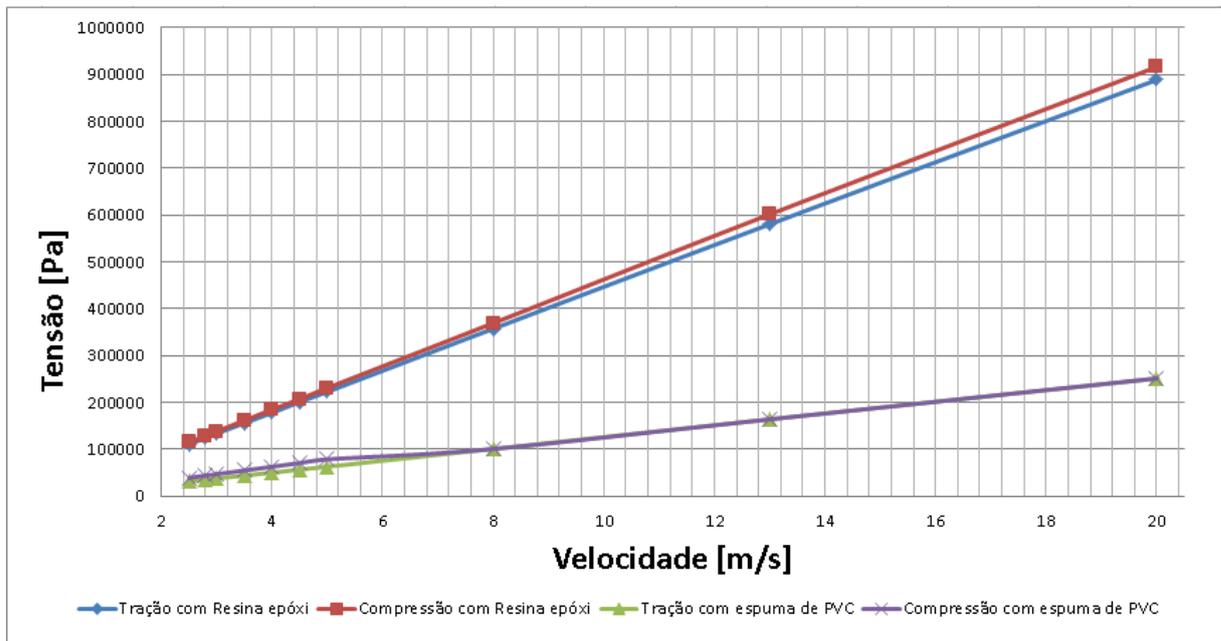
Fonte: O próprio autor.

Percebe-se que o carregamento na interface dos laminados é bem menor com a espuma de PVC, provando que de fato, um material com menor módulo de elasticidade transfere menos carga para a face posterior (GAMA ET. AL, 2001). Um material com baixo módulo atrasa a passagem da onda mecânica na interface, diminuindo sua amplitude e transferindo menos carga na junção (TASDEMIRCI E HALL, 2004). Isso é fundamental para o entendimento da delaminação, pois quanto maior esse carregamento na interface (transmissão e reflexão) mais facilmente ocorre a delaminação, porque a força resultante de tração também se torna maior.

Até 5 m/s, a espuma de PVC transfere a mesma quantidade de carga para a lâmina posterior, ou seja, 80% do valor da onda refletida. Isso é mostrado na Tabela 2, quando se analisa a tensão de tração (onda transmitida) e tensão de

compressão (onda refletida). A partir de 5 m/s, a mesma quantidade que é transmitida, também é refletida. Percebe-se que com a resina, o comportamento na junção é diferente, pois a carga transmitida permaneceu em torno de 97% da que é refletida, independentemente da velocidade, conforme é possível ver pela Tabela 2. A Figura 34 mostra a variação das tensões de tração e de compressão em relação à velocidade de impacto.

Figura 34 - Tensões na interface direita em função da velocidade de impacto



Fonte: O próprio autor.

Percebe-se que o crescimento dos níveis de tensão na interface é linear, independentemente do material que esteja na interface do laminado. À medida que se aumenta a velocidade, os valores de tensão na interface aumentam também, como era de se esperar, pois o choque é maior, e, portanto mais energia é transportada pela onda mecânica. As Equações (56) e (57), conhecidas como equações de Christoffel também provam essa relação de velocidade e tensão. Como visto na Tabela 2, a partir de 5 m/s a tração é igual a compressão para a espuma de PVC.

CAPÍTULO VII

CONCLUSÕES

A partir da teoria sobre propagação de ondas, delaminação de materiais compósitos e dos dados numéricos fornecidos pelo software *ANSYS®*, conjuntamente com a análise qualitativa dos resultados (interface gráfica), pode-se concluir que os compósitos, quando submetidos a impacto, podem se delaminar devido à força de tração que ocorre na junção entre os materiais.

O fenômeno físico que ocorre é a transmissão e reflexão da onda mecânica, que gera uma força de tração resultante na interface. O fato de se terem grandes diferenças nos módulos de elasticidade (que é crucial para a propagação da onda) muda completamente a transferência de carga na junção de dois materiais.

Quanto maior a impedância acústica na junção, menor será a carga transmitida e refletida na interface, resultando em uma força de tração de menor intensidade e conseqüentemente uma delaminação menos acentuada. Isso ficou provado quando substituiu a resina epóxi pela espuma de PVC, aumentando a impedância, e diminuindo as cargas na junção. Essa análise é crucial para entender o fenômeno da delaminação.

CAPÍTULO VIII

CONSIDERAÇÕES FINAIS

Como sugestão para trabalhos futuros, pode-se citar:

- Utilizar diferentes materiais tanto na viga, quando na lâmina.
- Variar as dimensões da lâmina e da viga, bem como variar/adicionar materiais na resina a fim de deixar suas propriedades elásticas mais próximas ou mais distantes das da viga.
- Fazer a análise de ruptura da lâmina.
- Fazer a comparação dos resultados obtidos aqui com dados experimentais, comparando níveis de tensão e taxa de deformação.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- CALLISTER, W. Ciência e engenharia dos materiais. 5. ed. Rio de Janeiro: LTC, 1999.
- CAMERINI, A.L.; TERRONES, L.A.H.; MONTEIRO, S.N. Revista Matéria, v. 13, n. 1, pp. 180 – 185, 2007.
- CAMPANATTI, A. C.; SALERMO, G. Engenharia de Materiais, estudante, Departamento de Materiais, Centro Universitário da FEI, São Bernardo do Campo, São Paulo, Brasil.
- CHEEKE, N. D. J. Fundamentals and applications of ultrasonic waves. Boca Raton: CRC Press LLC, 2002. 462 p.
- CHILLA, E.; OSETROV, A. V.; KOCH, R. Acoustoelastic anomaly in stressed heterostructures. Physical Review B, v. 63, 2001.
- DOYLE, J. F. Wave propagation in structures: spectral analysis using fast discrete fourier transform. New York: Springer, 1997. 320p.
- FUNDAMENTOS DE CIÊNCIA E ENGENHARIA DOS MATERIAIS. 2º semestre de 2017. Disponível em: <https://edisciplinas.usp.br/pluginfile.php/4141306/mod_resource/content/1/PMT3100_2017-Un19-Compositos-v4.0.pdf>. Acesso em 20 mar. 2018.
- GAMA, B.A.; GILLESPIE, J.W. Jr.; BOGETTI, T.A.; FINK, B. Innovative design and ballistic performance of Lightweight Composite Integral Armor, In: SAE 2001 World Congress, SAE, Detroit, MI.
- GAY, D.; HOA, S. V. Composite materials: design and applications. 3. ed. In: Boca Raton, FL: CRC Press, 2015.
- GIL, A. A., SILVA, H. L. Hybrid-electric aircraft: conceptual design, structural and aeroelastic analyses. 2017. 123p. Graduation project, Federal University of Uberlândia, Uberlândia, Brazil.
- KOLSKY, H. Stress waves in solids, New York, Dover publications, 1963.
- MARCO, A. S. P. Professor conferencista no IME - Compósito reforçado com tecido – Vol. XVII. 2000.

MARIA, A., S., F.; NANI, M., F.; SALETE, M., F., P. UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA. Guia para normalização de publicações técnico-científicas. EDUFU. Uberlândia: UFU, 2011.

MILATIAS, G.; Mundo da usinagem, Introdução aos materiais compósitos. 2014. Disponível em: <<http://www.omundodausinagem.com.br/?p=5418>>. Acesso em: 20 mar. 2018.

MORAIS, D.; LYRA, D., R.; POSSANI, D.; CONTE, F. C. - R. bras. Fís. Tecnol. apl., Ponta Grossa, v. 4, n. 1, p. 16-33, jan./jun. 2017.

NUSSENZVEIG, H., M. Curso de Física Básico - Vol. 2. 4. ed. Rio de Janeiro: Edgard Blucher, 2002.

PAO, Y. H.; SACHSE, W.; FUKUOKA, H. Acoustoelasticity and ultrasonic measurements of residual stress. Physical Acoustics, vol.17, n., p.62-140. 1984.

Revista compósitos e plásticos de engenharia – Editora do Administrador Ano XIV – nº 79 dez./abr. 2012.

RODOVALHO, T. G. Medição da velocidade da onda ultrassônica longitudinal em compósitos de fibra de carbono/epóxi. Projeto de Mestrado, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2012.

RODRIGUES, D., F. E ai, convergiu. 2013. Disponível em:<<https://eaiconvergiu.wordpress.com/2013/01/29/as-diferencas-entre-os-metodo-implicito-e-explicito/>> Acesso em: 30 junho 2018.

ROKHLIN, S. I. Determination of residual stress in composite materials using ultrasonic waves. Columbus: NASA, p.60. 1997.

SALERMO, G. Tecnologia metal. Mater. Miner., São Paulo, v. 10, n. 2, p. 153-161, abr.-jun. 2013.

SALGADO, F. A.; NEVES, S. M.; MAGALHÃES, F. M. G.; NERI, D. N. N.; JHOONNES, K. M. M. M.; FERNANDES, D. F.; RHANIERY, A. B. M.; CAMPOSO, A. P. Fabricação de compósito de matriz poliéster reforçado com tecido de juta aplicado

em blindagem multicamada. Instituto militar de engenharia. Rio de Janeiro, Brasil, 2016.

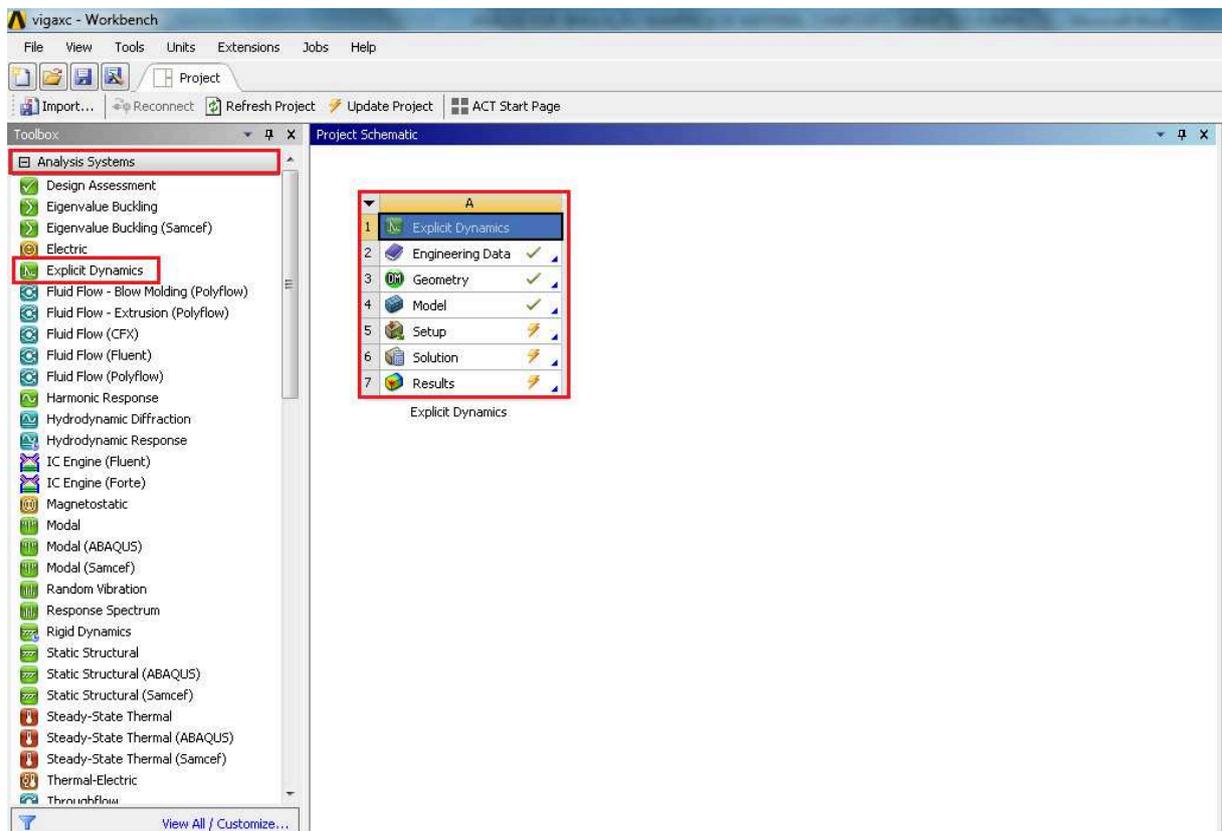
TASDEMIRCI, A.; HALL, I., W. Experimental and modeling studies of stress wave propagation in multilayer composite materials: Low modulus interlayer effects. 2004, Estados Unidos da América.

APÊNDICE A

METODOLOGIA PARA ANÁLISE NUMÉRICA VIA ANSYS®

Foi usada a versão 17.0 do ANSYS®. Entrando na aba *Analysis Systems*, é possível achar o ícone que direciona para a aba *Explicit Dynamics*, conforme mostra a Figura 35.

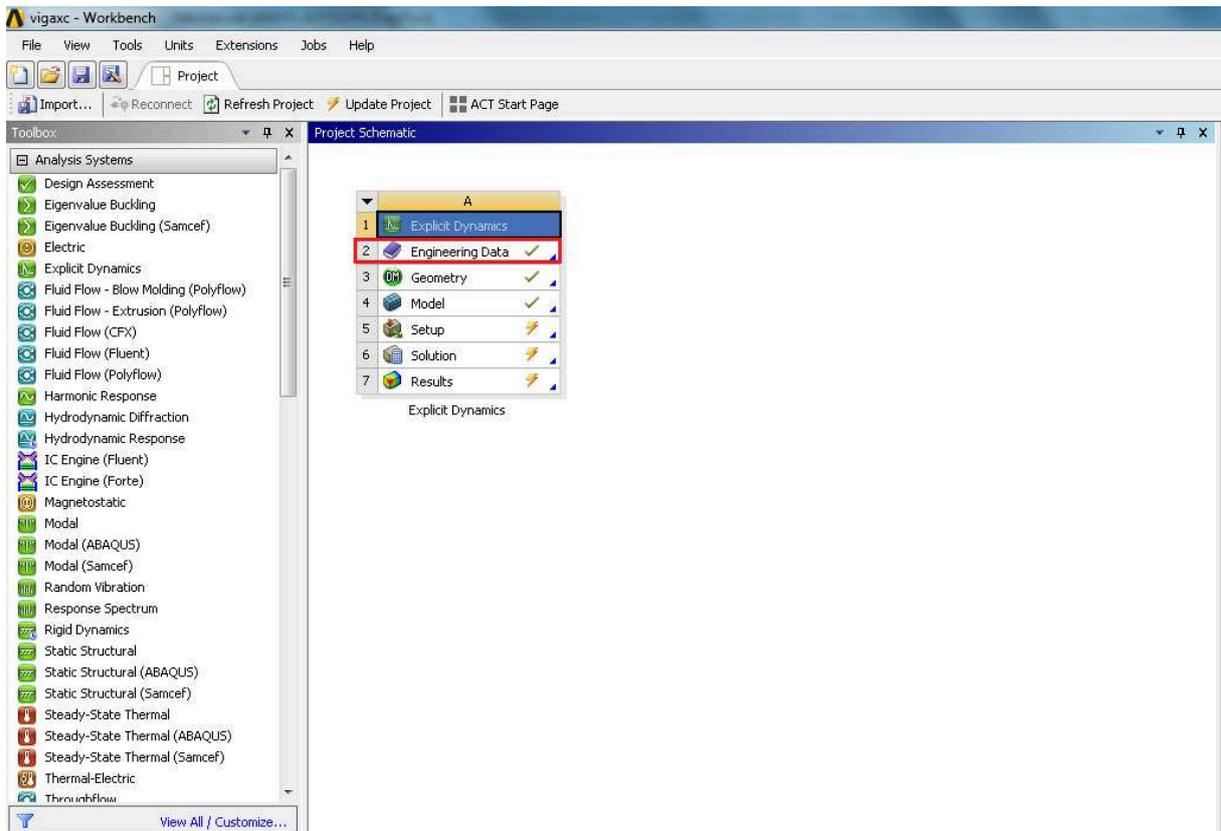
Figura 35 - ANSYS® Workbench.



Fonte: O próprio autor.

A fim de se provar a delaminação do material compósito, foi feita a análise dinâmica de um elemento de viga. O primeiro passo foi escolher os tipos de materiais para o modelo em análise. Isso é feito na aba *Engineering Data*, conforme mostra a Figura 36.

Figura 36 - Aba *Explicit Dynamics*.



Fonte: O próprio autor.

Foi escolhida a Fibra de Vidro (*Epoxy E-Glass UD*), a Resina Epóxi (*Resin Epoxy*) e a Espuma de PVC (*Foam PVC*). As principais características mecânicas da Fibra de vidro são mostradas na Figura 37.

Figura 37 - Propriedades da Fibra de Vidro.

| Outline of Schematic A2: Engineering Data | | | | |
|-------------------------------------------|------------------------------|---|---|-------------------------|
| | A | B | C | D |
| 1 | Contents of Engineering Data | | | Source |
| 2 | Material | | | Description |
| 3 | Epoxy E-Glass UD | | | Composite_Materials.xml |

| Properties of Outline Row 3: Epoxy E-Glass UD | | | | |
|-----------------------------------------------|-----------------------------|--------|--------------------|---|
| | A | B | C | D |
| 1 | Property | Value | Unit | |
| 2 | Density | 2000 | kg m ⁻³ | |
| 3 | Orthotropic Elasticity | | | |
| 4 | Young's Modulus X direction | 45000 | MPa | |
| 5 | Young's Modulus Y direction | 10000 | MPa | |
| 6 | Young's Modulus Z direction | 10000 | MPa | |
| 7 | Poisson's Ratio XY | 0,3 | | |
| 8 | Poisson's Ratio YZ | 0,4 | | |
| 9 | Poisson's Ratio XZ | 0,3 | | |
| 10 | Shear Modulus XY | 5000 | MPa | |
| 11 | Shear Modulus YZ | 3846,2 | MPa | |
| 12 | Shear Modulus XZ | 5000 | MPa | |
| 13 | Orthotropic Stress Limits | | | |
| 14 | Tensile X direction | 1100 | MPa | |
| 15 | Tensile Y direction | 35 | MPa | |
| 16 | Tensile Z direction | 35 | MPa | |
| 17 | Compressive X direction | -675 | MPa | |
| 18 | Compressive Y direction | -120 | MPa | |
| 19 | Compressive Z direction | -120 | MPa | |
| 20 | Shear XY | 80 | MPa | |
| 21 | Shear YZ | 46,154 | MPa | |
| 22 | Shear XZ | 80 | MPa | |

Fonte: O próprio autor.

A Fibra de Vidro é ortotrópica, e sua maior rigidez para deformações na longitudinal é na direção x . As principais características mecânicas da Resina Epóxi e da Espuma de PVC são mostradas nas Figuras 38 e 39, respectivamente.

Figura 38 - Propriedades da Resina Epóxi.

| Outline of Schematic A2: Engineering Data | | | | | |
|-------------------------------------------|------------------------------|---|---|-------------------------|-------------|
| | A | B | C | D | E |
| 1 | Contents of Engineering Data | | | Source | Description |
| 2 | Material | | | | |
| 3 | Epoxy E-Glass UD | | | Composite_Materials.xml | |
| 4 | Resin Epoxy | | | Composite_Materials.xml | |

| Properties of Outline Row 4: Resin Epoxy | | | | | |
|------------------------------------------|----------------------|-------------------|--------------------|---|---|
| | A | B | C | D | E |
| 1 | Property | Value | Unit | | |
| 2 | Density | 1160 | kg m ⁻³ | | |
| 3 | Isotropic Elasticity | | | | |
| 4 | Derive from | Young's Modulu... | | | |
| 5 | Young's Modulus | 3780 | MPa | | |
| 6 | Poisson's Ratio | 0,35 | | | |
| 7 | Bulk Modulus | 4,2E+09 | Pa | | |
| 8 | Shear Modulus | 1400 | MPa | | |

Fonte: O próprio autor.

Figura 39- Propriedades da Espuma de PVC.

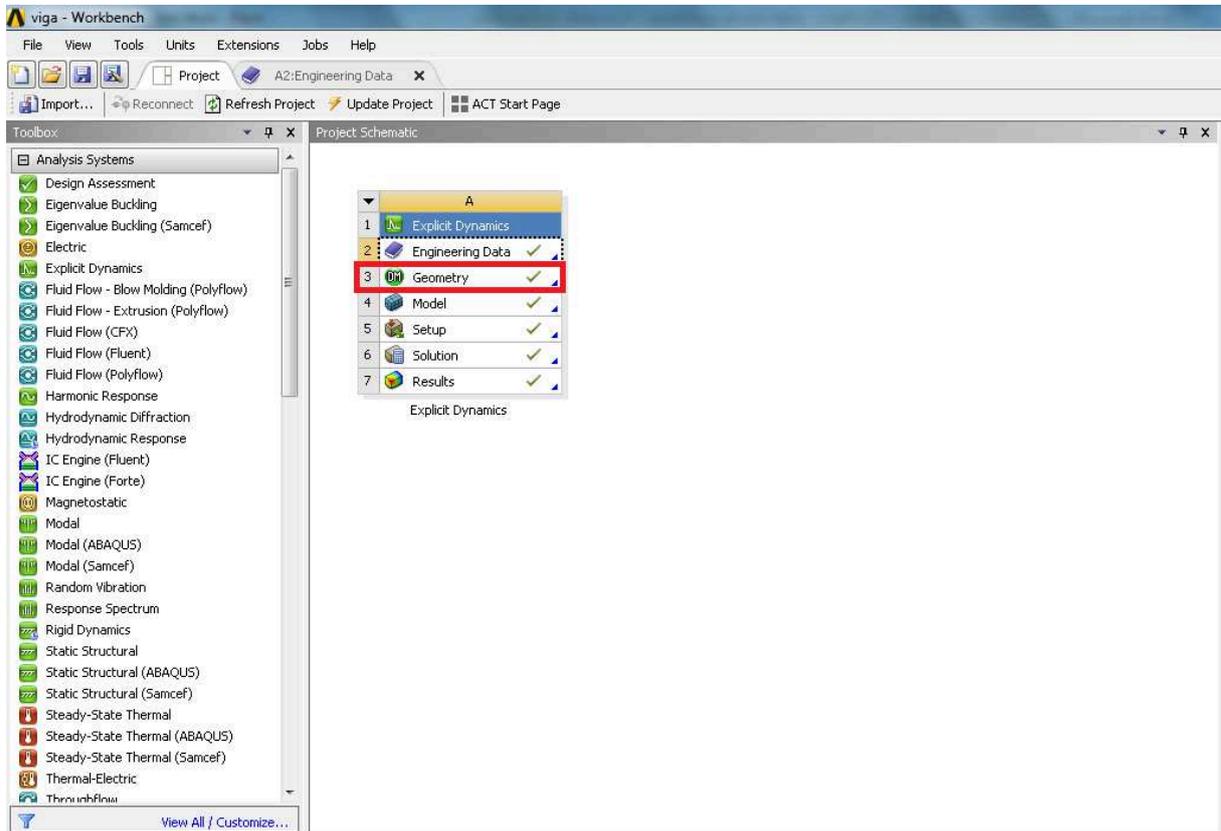
| Outline of Schematic A2: Engineering Data | | | | | |
|-------------------------------------------|-----------------------------------|---|---|-------------------------|-------------|
| | A | B | C | D | E |
| 1 | Contents of Engineering Data | | | Source | Description |
| 4 | PVC Foam (60 kg m ⁻³) | | | Composite_Materials.xml | |

| Properties of Outline Row 4: PVC Foam (60 kg m ⁻³) | | | | | |
|----------------------------------------------------------------|----------------------|-------------------|--------------------|---|---|
| | A | B | C | D | E |
| 1 | Property | Value | Unit | | |
| 2 | Density | 6E-11 | mm ⁻³ t | | |
| 3 | Isotropic Elasticity | | | | |
| 4 | Derive from | Young's Modulu... | | | |
| 5 | Young's Modulus | 70 | MPa | | |
| 6 | Poisson's Ratio | 0,3 | | | |
| 7 | Bulk Modulus | 5,8333E+07 | Pa | | |
| 8 | Shear Modulus | 26,923 | MPa | | |

Fonte: O próprio autor.

Como pode-se ver, esses materiais são isotrópicos. Assim, foi possível partir para a geometria do modelo, sendo esta elaborada no *designer modeler* do ANSYS®, clicando na aba *Geometry*, conforme mostra a Figura 40.

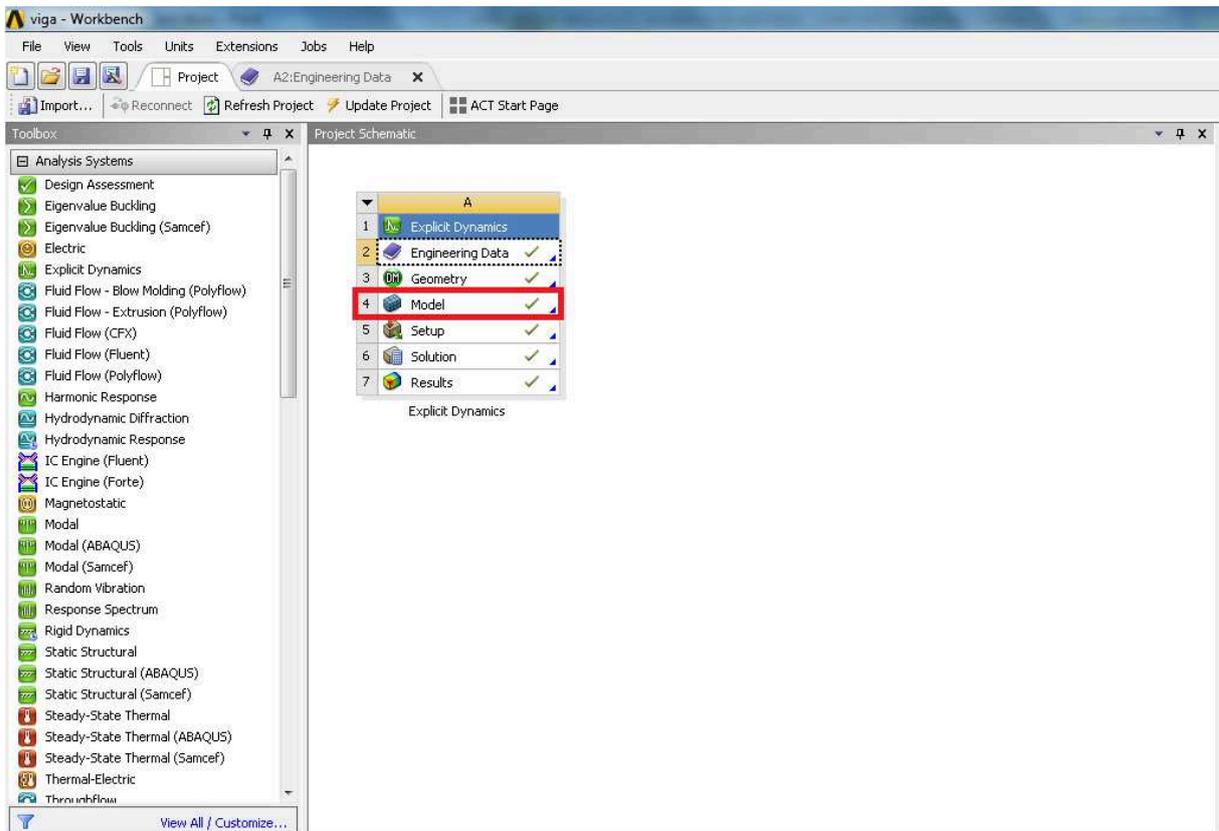
Figura 40 - Aba para elaborar a geometria.



Fonte: O próprio autor.

A Figura 21 mostra a geometria da viga finalizada (Capítulo VI – Resultados e Discussões). Outra opção é exportar o modelo pronto, elaborado em outro software de desenho, como o AUTOCAD® ou SOLIDWORKS®, pois o ANSYS® aceita normalmente. Com a geometria pronta, precisa-se ajustar todos os parâmetros para a simulação. Isso é feito na aba *Model*, como ilustra a Figura 41.

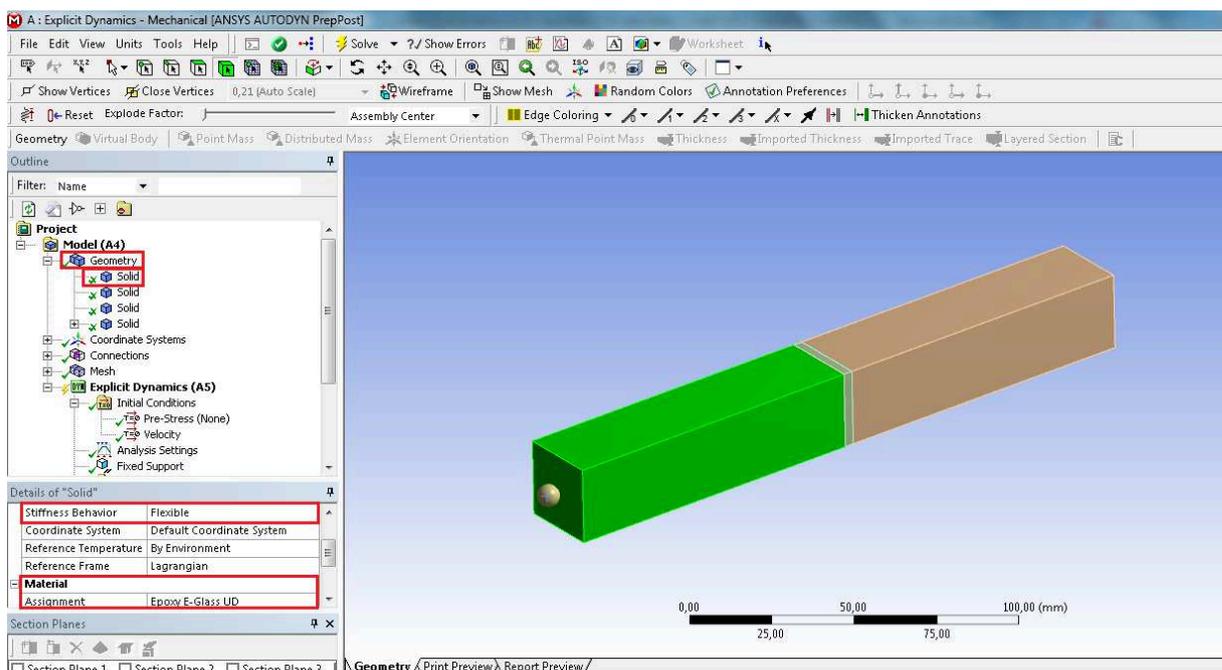
Figura 41 - Aba Model.



Fonte: O próprio autor.

Dentro do *Model*, escolhe-se o material para cada parte do modelo. A viga em estudo foi dividida em 3 partes, conforme ilustra a Figura 42.

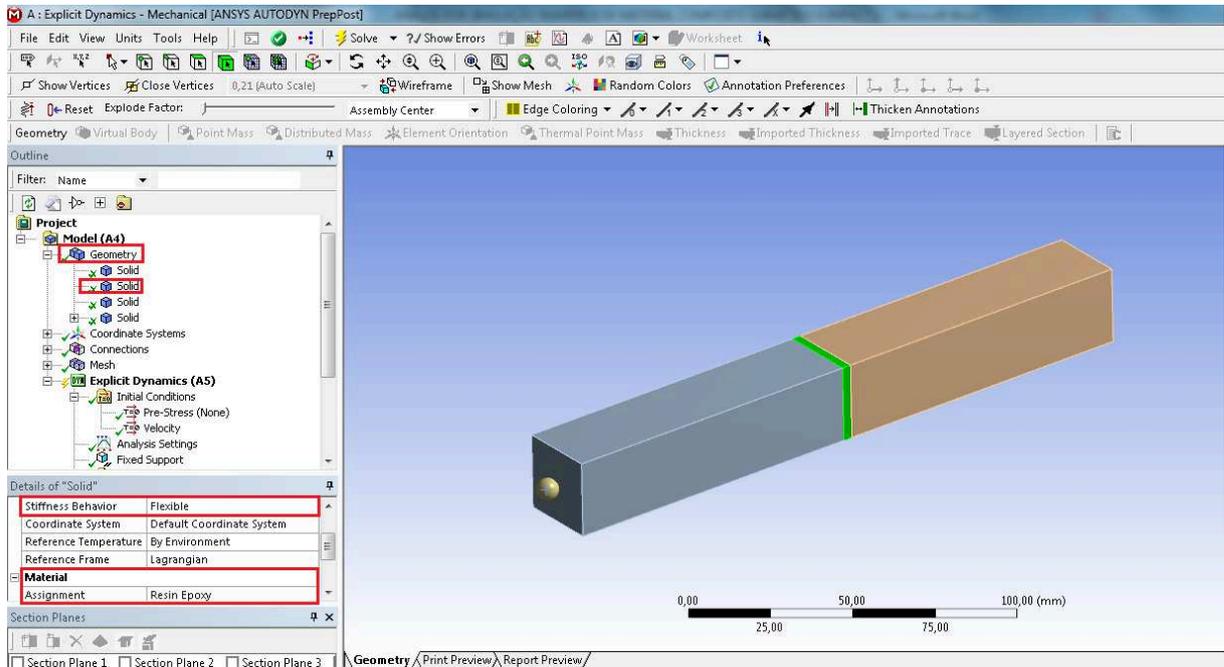
Figura 42 - Configurações da fibra de vidro.



Fonte: O próprio autor.

Percebe-se também pela Figura 42 que foi definido que o material seria flexível, através da aba *Stiffness Behavior* (Comportamento da Rigidez). Na Figura 43 é possível ver as configurações da lâmina.

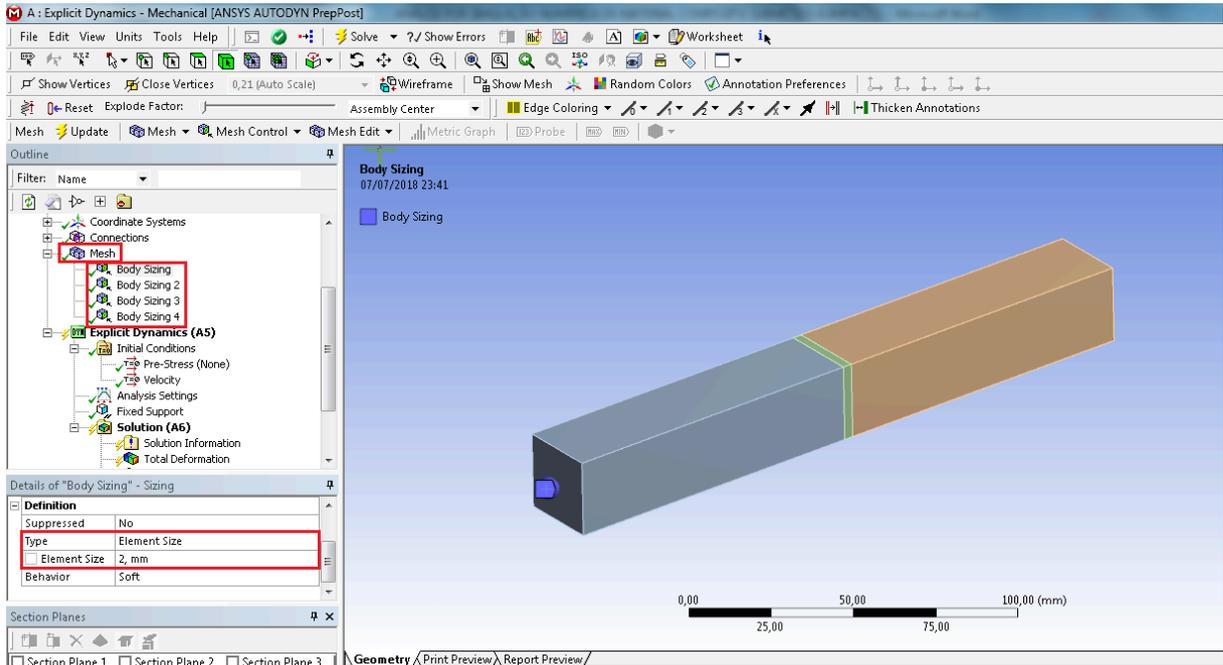
Figura 43 - Configurações da Resina Epóxi.



Fonte: O próprio autor.

A Figura 44 mostra como a malha foi feita, sendo que cada elemento tem o tamanho de 2 mm.

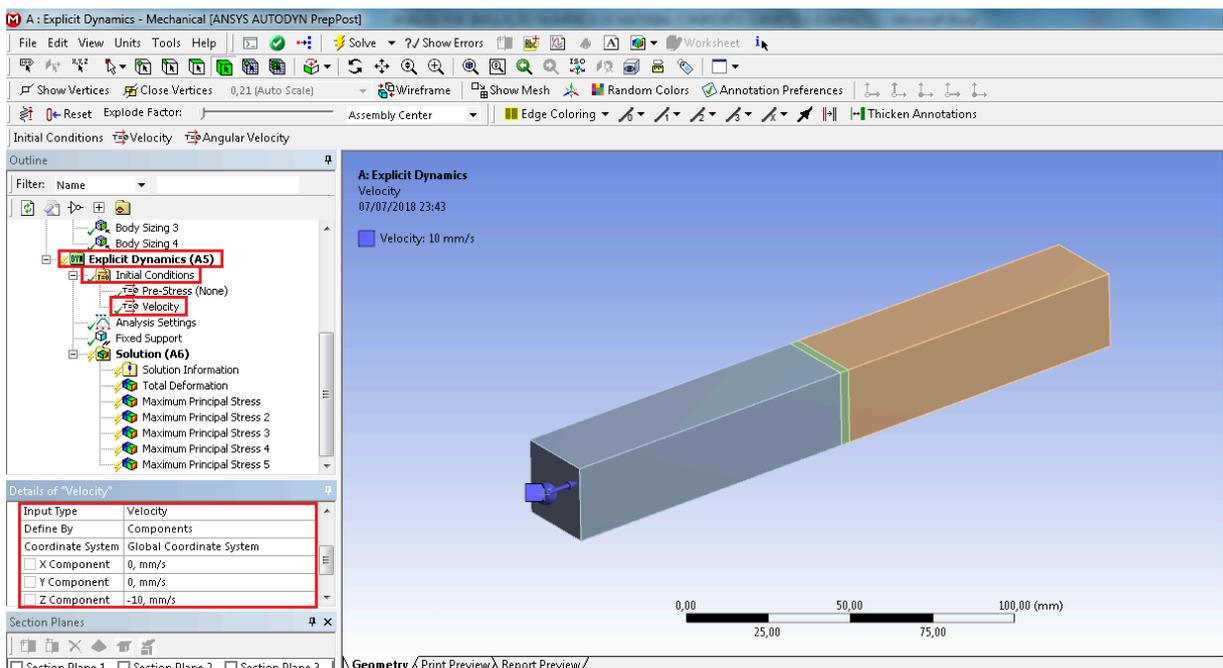
Figura 44 - Tamanho da malha.



Fonte: O próprio autor.

Dentro da aba *Explicit Dynamics*, é possível acessar as condições iniciais, e então colocar a velocidade e a direção da esfera. A Figura 45 mostra o passo a passo.

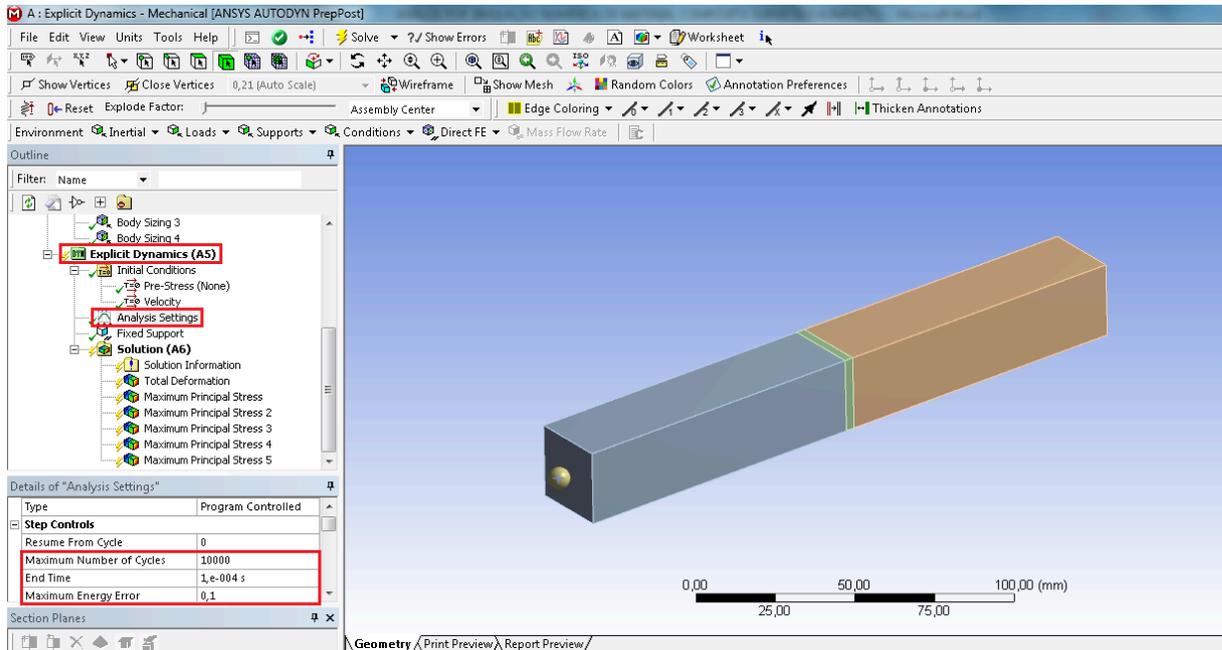
Figura 45 - *Explicit Dynamics* e *Initial Conditions*.



Fonte: O próprio autor.

Ainda em *Explicit Dynamics*, dentro de *Analysis Settings*, foi escolhido o número máximo de ciclos, o tempo de duração da simulação e também a máxima energia de erro, conforme mostra a Figura 46.

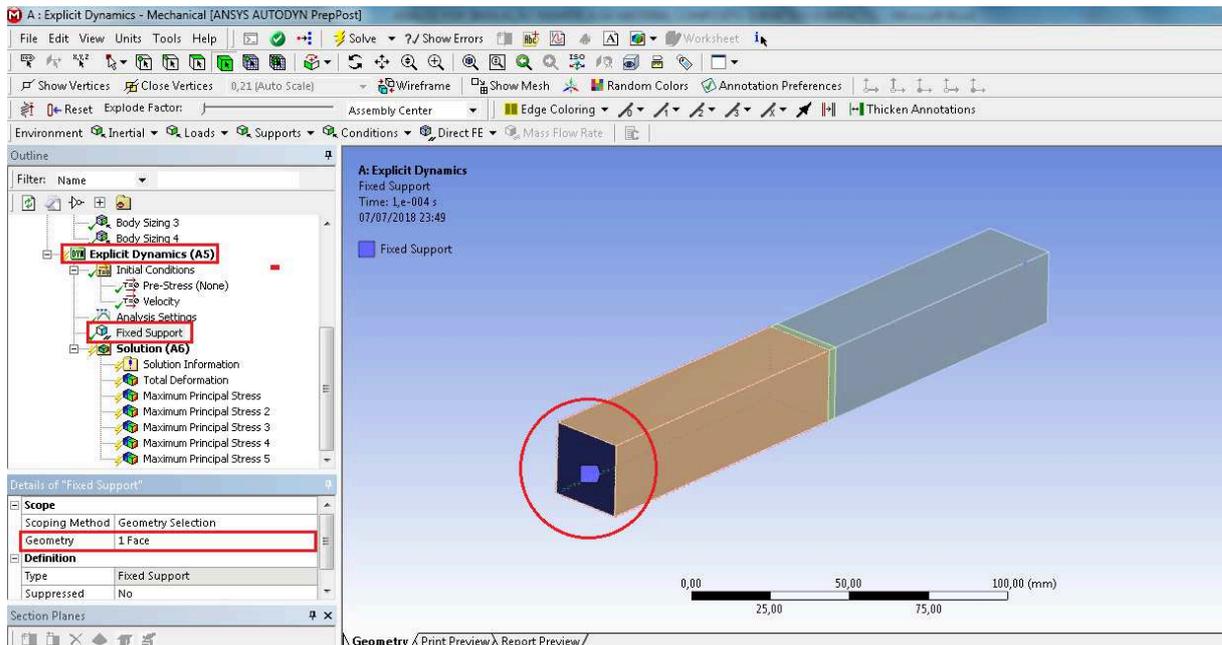
Figura 46 - Analysis Settings.



Fonte: O próprio autor.

A viga foi engatada na face oposta ao impacto. Essa configuração é feita em *Fixed Support*, dentro da aba *Explicit Dynamics*. O engastamento é mostrado na Figura 47.

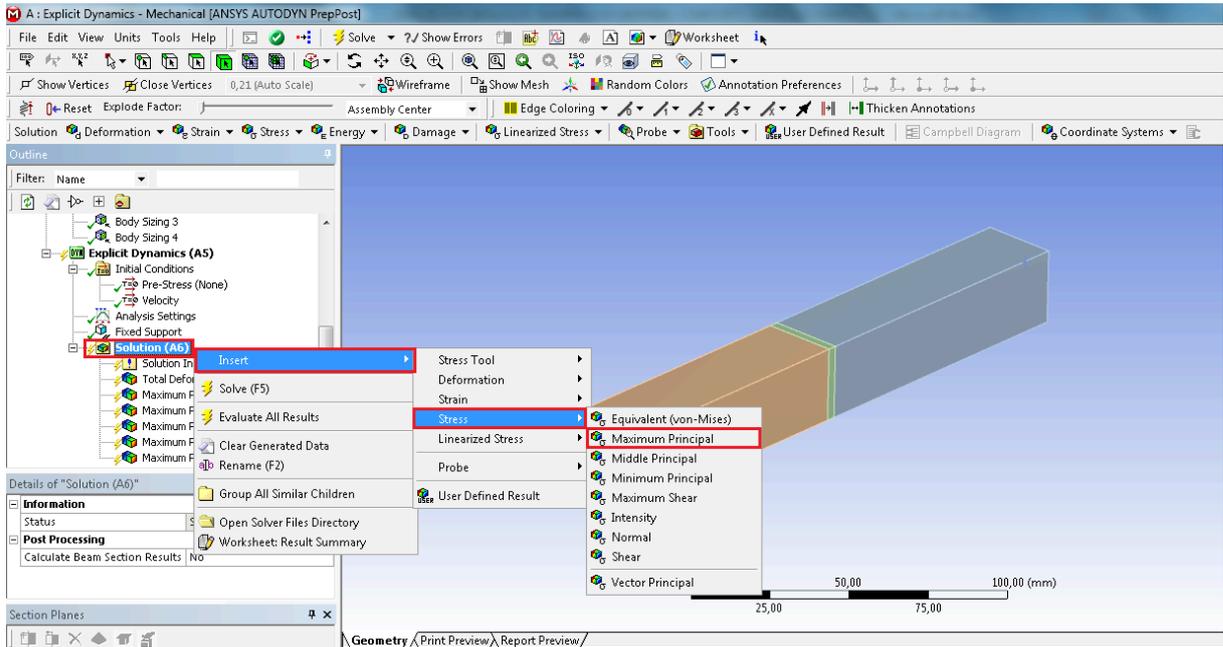
Figura 47 - Viga engastada.



Fonte: O próprio autor.

Partindo para a solução do problema, é necessário escolher o tipo de tensão que, então, o software irá apresentar os resultados. Foi escolhida a tensão máxima principal, pois o carregamento é normal à viga, e assim fica melhor de se visualizarem os resultados. Clicando com o botão direito em *solution*, irá aparecer a opção para inserir o tipo de tensão desejada. Nessa aba também se pode escolher visualizar a deformação, que é outro parâmetro muito usado em análises dinâmicas. A Figura 48 mostra como escolher esse tipo de tensão.

Figura 48 - Escolha do tipo de tensão para análise.



Fonte: O próprio autor.