

**CÁLCULO DAS CONTANTES ELÁSTICAS DE COMPÓSITOS DE FIBRA DE  
CARBONO PELA TÉCNICA DE ULTRASSOM POR TRANSPARÊNCIA**

Daniel Scandiuzzi Valença de Castro

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-graduação em Engenharia Metalúrgica e de Materiais, COPPE, da Universidade Federal do Rio de Janeiro, como parte dos requisitos necessários à obtenção do título de Mestre em Engenharia Metalúrgica e de Materiais.

Orientadores: Gabriela Ribeiro Pereira  
Cesar Giron Camerini

Rio de Janeiro  
Outubro de 2020

CÁLCULO DAS CONTANTES ELÁSTICAS DE COMPÓSITOS DE FIBRA DE  
CARBONO PELA TÉCNICA DE ULTRASSOM POR TRANSPARÊNCIA

Daniel Scandiuzzi Valença de Castro

DISSERTAÇÃO SUBMETIDA AO CORPO DOCENTE DO INSTITUTO ALBERTO  
LUIZ COIMBRA DE PÓS-GRADUAÇÃO E PESQUISA DE ENGENHARIA (COPPE)  
DA UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO DE JANEIRO COMO PARTE DOS  
REQUISITOS NECESSÁRIOS PARA A OBTENÇÃO DO GRAU DE MESTRE EM  
CIÊNCIAS EM ENGENHARIA METALÚRGICA E DE MATERIAIS.

Orientadores: Gabriela Ribeiro Pereira  
Cesar Giron Camerini

Aprovada por: Prof<sup>a</sup>. Gabriela Ribeiro Pereira  
Prof. Cesar Giron Camerini  
Prof. Carlos Otávio Damas Martins  
Prof. Alan Conci Kubrusly

RIO DE JANEIRO, RJ - BRASIL

OUTUBRO DE 2020

Castro, Daniel Scandiuzzi Valença de

Cálculo das constantes elásticas de compósitos de fibra de carbono pela técnica de ultrassom por transparência / Daniel Scandiuzzi Valença de Castro – Rio de Janeiro: UFRJ/ COPPE, 2020.

IX, 137 p.: il.; 29,7 cm.

Orientadores: Gabriela Ribeiro Pereira

Cesar Giron Camerini

Dissertação (mestrado) – UFRJ/COPPE/ Programa de Engenharia Metalúrgica e de Materiais, 2020

Referências Bibliográficas: p.122-137.

1.Materiais Compósitos. 2.Ensaio de Ultrassom. 3. Constantes Elásticas. 4. Velocidade Sônica. I. Pereira, Gabriela Ribeiro *et al.* II. Universidade Federal do Rio de Janeiro, COPPE, Programa de Engenharia Metalúrgica e de Materiais. III. Título.

## **Agradecimentos**

Primeiramente, agradeço a minha família, minha fortaleza e base de todas as minhas conquistas. Agradeço todo o amor, carinho, educação e sorrisos que sempre me proporcionaram e que me tornaram a pessoa que sou hoje.

Agradeço imensamente a minha orientadora, Gabriela Pereira, por toda ajuda, cada conversa, cada reunião e cada café juntos, mesmo nos momentos mais difíceis. Muito Obrigado!

Agradeço muito também ao meu orientador Cesar Camerini, excelente pesquisador e grande fonte de inspiração. Obrigado pela extrema confiança que sempre depositou em mim, pelo grande aprendizado conjunto que me proporcionou e por todas as conversas, por toda orientação fornecida.

Ao prof. Héctor Kotik e à Eng<sup>a</sup> Priscila Duarte, meus padrinhos acadêmicos, por toda ajuda, por cada reunião, por cada conselho e por cada risada juntos. Muito Obrigado!

A todos os meus amigos e funcionários do LNDC, por toda ajuda e também por fazerem meu dia a dia mais feliz e harmonioso, proporcionando um ambiente de trabalho maravilhoso e prazeroso.

Ao meu querido amigo Rafael Cidade, por toda a ajuda oferecida, por todas as orientações, sugestões, estando ao mesmo tempo tão longe mas afetivamente tão perto.

Aos meus amigos Ligia, Débora, Bruno, Caíque, Élber, Stella, Cristiano, Pedro, Djalma, Rodrigo, Vinicius, Luiz Gustavo e Ana Clara por todas as conversas e conselhos, mesmo nos momentos mais difíceis, sempre trazendo boas energias e renovando meu ânimo para sempre seguir em frente.

Resumo da Dissertação apresentada à COPPE/UFRJ como parte dos requisitos necessários para a obtenção do grau de Mestre em Ciências (M.Sc.)

## CÁLCULO DAS CONSTANTES ELÁSTICAS DE COMPÓSITOS DE FIBRA DE CARBONO PELA TÉCNICA DE ULTRASSOM POR TRANSPARÊNCIA

Daniel Scandiuzzi Valença de Castro

Outubro/2020

Orientadores: Gabriela Ribeiro Pereira

Cesar Giron Camerini

Programa: Engenharia Metalúrgica e de Materiais

O crescente uso de materiais compósitos de fibra de carbono em diversos ramos industriais exige a elaboração de projetos de alta confiabilidade, para os quais se faz necessária a obtenção segura dos valores de suas constantes elásticas. Até então, esses valores são geralmente calculados através de ensaios mecânicos normatizados dispendiosos e demorados. Este trabalho apresenta o ensaio de ultrassom como uma alternativa que se mostra mais atrativa devido ao seu caráter não destrutivo e à possibilidade de estimar diversas constantes em um único ensaio. Propõe-se o uso de uma sequência metodológica para estimativa das constantes elásticas de 3 diferentes laminados a partir de informações sobre os ângulos críticos e as velocidades sônicas das ondas transmitidas no material, sob diversos ângulos de incidência. O tratamento dos dados inclui ajuste não-linear, segundo modelo físico, para os dados de velocidades longitudinais e transversais. As constantes calculadas considerando-se os ângulos críticos aproximam-se dos valores previstos teoricamente. Para as demais constantes calculáveis, a aproximação com os valores obtidos por modelo teórico está diretamente vinculada ao tipo de laminado avaliado e à vigência do regime de propagação sônica homogênea. Para o laminado unidirecional, onde predomina o regime homogêneo, foram observados os resultados mais fidedignos. Paralelamente, observou-se perda de qualidade e de acurácia dos resultados a medida que se aumenta a complexidade do laminado e o regime de propagação sônica se afasta do regime homogêneo.

Abstract of Dissertation presented to COPPE/UFRJ as a partial fulfillment of the requirements for the degree of Master of Science (M.Sc.)

CALCULATION OF ELASTIC CONSTANTS OF CARBON FIBER  
COMPOSITES BY ULTRASONIC THROUGH-TRANSMISSION TECHNIQUE

Daniel Scanduzzi Valença de Castro

September/2020

Advisors: Gabriela Ribeiro Pereira

Cesar Giron Camerini

Department: Metallurgical and Materials Engineering

The growing use of carbon fiber composite materials in several industrial sectors requires the development of highly reliable projects, for which an accurate estimate of their elastic constants values is necessary. By then, these values are generally calculated using expensive and time-consuming standardized mechanical tests. This work presents the ultrasound test as an alternative that is more attractive due to its non-destructive character and the possibility of estimating several constants in a single test. It is proposed a methodological sequence to estimate the elastic constants of 3 different laminates based on information about the critical angles and the sonic velocities of the waves transmitted in the material under different angles of incidence. The data processing includes non-linear fitting, according to a physical model, for longitudinal and transverse velocity data. The constants calculated considering the critical angles approximate the theoretically predicted values. For the other calculable constants, the approximation with the values obtained by theoretical model is directly linked to the type of laminate evaluated and to the validity of the homogeneous sonic propagation regime. For the unidirectional laminate, where the homogeneous regime predominates, the most reliable results were observed. At the same time, there was a loss of quality and accuracy of the results as the laminate complexity increases and the sonic propagation regime moves away from the homogeneous regime.

# Sumário

<b>1</b>	<b>Introdução .....</b>	<b>1</b>
<b>2</b>	<b>Revisão Bibliográfica.....</b>	<b>5</b>
2.1	Ensaio de Ultrassom.....	5
2.1.1	Princípios Básicos .....	5
2.1.2	Escolha do Transdutor e Modos de Visualização .....	6
2.1.3	Incidência Oblíqua e Conversão de Modo .....	9
2.2	Defeitos e heterogeneidades em compósitos .....	11
2.3	Ultrassom em Compósitos.....	13
2.3.1	Dispersão de Velocidades.....	15
2.3.2	Propagação em Meio Estratificado: Interação com as camadas e as interfaces ricas em resina.....	17
2.3.3	Efeitos da Rugosidade Superficial .....	24
2.4	Cálculo das Constantes Elásticas .....	26
2.4.1	Modelos Teóricos para as Propriedades .....	27
2.4.2	Princípio Ultrassônico Envolvido .....	29
2.4.3	Modelagem Matemática e a Equação de Christoffel .....	31
2.4.4	Relações de Simetria .....	35
2.4.1	Metodologia Experimental .....	36
2.4.2	Cálculo das Velocidades.....	41
2.4.3	Problema Inverso e Algoritmos Utilizados .....	43
2.5	Considerações Finais sobre a Revisão bibliográfica .....	46
<b>3</b>	<b>Materiais e Métodos .....</b>	<b>50</b>
3.1	Corpos de Prova.....	50
3.2	Caracterização Estrutural.....	51
3.2.1	Medição de Densidade .....	51
3.2.2	Micrografia em Microscópio Eletrônico de Varredura .....	51

3.2.3	Microtomografia Computadorizada .....	54
3.2.4	Queima de Amostras .....	55
3.2.5	Medição da Rugosidade .....	56
3.3	Cálculo Teórico das Contantes Elásticas .....	57
3.4	Caracterização sônica .....	60
3.4.1	Ensaio de Transparência com Amostra Rotatória .....	60
3.4.2	Cálculo das Velocidades.....	64
3.5	Cálculo das Constantes Elásticas .....	67
3.5.1	Cálculo de $C_{11}$ e $C_{22}$ pelo Ângulo Crítico .....	67
3.5.2	Caso Especial: Amostra Unidirecional – Rotação em X.....	68
3.5.3	Cálculo do ângulo de Propagação .....	69
3.5.4	Cálculo das Constantes por Ajuste Não-Linear .....	69
3.5.5	Influência do valor inicial para o algoritmo .....	71
3.5.6	Influência da complexidade do empilhamento .....	72
<b>4</b>	<b>Resultados e Discussões.....</b>	<b>74</b>
4.1	Caracterização Estrutural.....	74
4.1.1	Medição de Densidade .....	74
4.1.2	Micrografia em Microscópio Eletrônico de Varredura .....	74
4.1.3	Micro-Tomografia Computadorizada .....	79
4.1.4	Queima das Amostras.....	80
4.1.5	Medição da Rugosidade .....	82
4.2	Cálculo Teórico das Constantes .....	84
4.3	Resultados Gerais do Ensaio Rotatório .....	86
4.4	Cálculo das Constantes Elásticas .....	96
4.4.1	Cálculo de $C_{11}$ e $C_{22}$ pelo primeiro ângulo crítico .....	96
4.4.2	Amostra Unidirecional ( $[0^\circ]_{12s}$ ) .....	98
4.4.3	Amostra $[0^\circ/90^\circ]_{6s}$ .....	102

4.4.4 Amostra $[0^\circ/90^\circ/+45^\circ/-45^\circ]_{3s}$ .....	106
4.4.5 Influência do valor inicial para o algoritmo .....	111
4.4.6 Influência da complexidade do empilhamento .....	113
<b>5 Conclusões .....</b>	<b>119</b>
<b>6 Sugestões para trabalhos futuros.....</b>	<b>121</b>
<b>7 Bibliografia .....</b>	<b>122</b>

# 1 Introdução

Com a evolução da tecnologia ao longo do último século, foram lançados desafios em relação à descoberta de novos materiais que aliassem leveza e resistência, visando substituir aqueles mais tradicionais em diversas aplicações. Nesse contexto, foram desenvolvidos os materiais compósitos, sendo aqueles compostos por 2 ou mais materiais diferentes, combinados numa unidade estrutural macroscópica [1]. Sua vantajosa relação da tensão de ruptura com a densidade comparada a diversas classes de materiais é exemplificada na Figura 1.

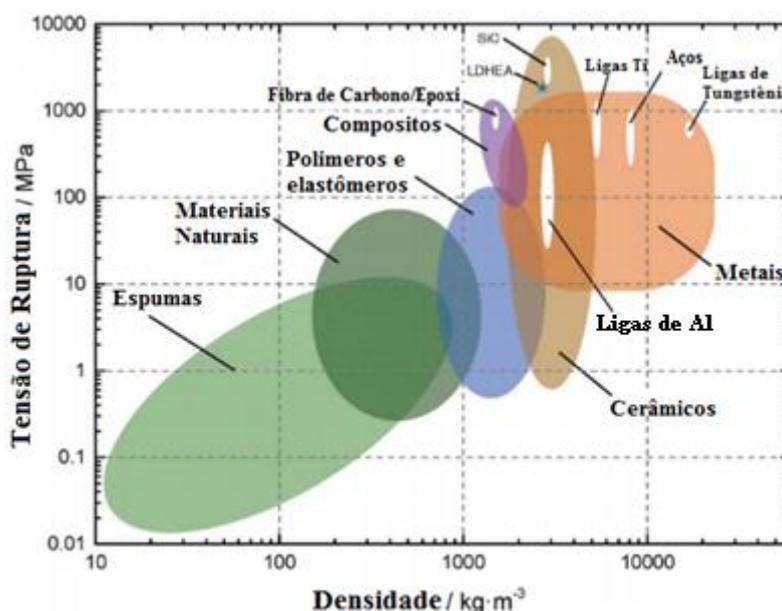


Figura 1 - Diagrama de Ashby relacionando tensão de ruptura e densidade (Adaptado de [2])

Dentre os tipos de compósitos mais tradicionais estão aqueles compostos por fibra de carbono e uma matriz polimérica, tipicamente a resina epóxi. Devido à sua versatilidade, resistência, leveza, estabilidade química e tenacidade [1], este tipo de material vem sendo cada vez mais utilizado tanto em indústrias de alta tecnologia como a aeroespacial, óleo e gás, energia eólica, biomédica, como também em aplicações mais corriqueiras como os ramos automobilísticos e a de esportes e lazer [3]. Como exemplo, temos a introdução deste material na fabricação de grandes aeronaves comerciais, como o Airbus A380 e o Boeing 787, cujo peso é composto, respectivamente, de 25 e 50% de compósitos de fibra de carbono [4], representando grande economia de combustível e redução na emissão de CO<sub>2</sub>.

Estes materiais podem ser confeccionados por diversos métodos de processamento, mas quase todos com o fator comum de se basearem na adição de camadas sobrepostas de fibras com orientação definida ou orientações combinadas em trançado e ortogonais (*woven*). A fração volumétrica de fibras geralmente está entre 50 e 65% e as propriedades da estrutura dependem da direção analisada e da sequência de direções das camadas empilhadas, caracterizando o material como anisotrópico. O constante aperfeiçoamento dos processos de manufatura resultou em elevação da produtividade e queda dos preços, alavancando ainda mais o seu mercado, a ponto de chegar a previstos 35 bilhões de dólares em 2020 (Figura 2). Isto representa um crescimento de cerca de 130% do uso de compósitos em relação a 2013 [3], reforçando ainda mais a consolidação do seu espaço no mercado.

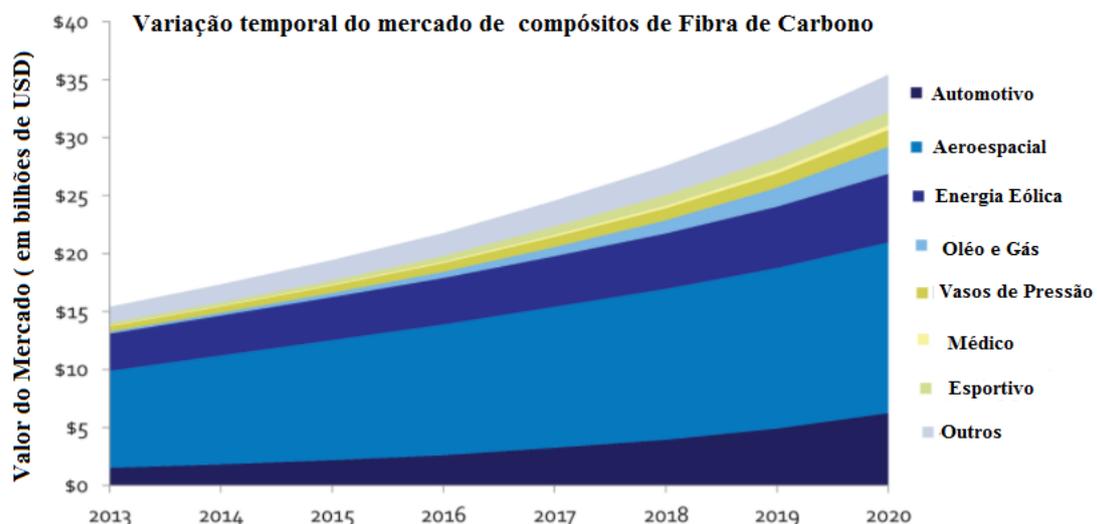


Figura 2 - Comparativo temporal do valor do mercado sobre compósitos de fibra de carbono (Adaptado de [3])

Acompanhando esta tendência, que ocorre inclusive em setores onde a estabilidade estrutural é primordial para a segurança do uso, um cuidadoso controle de qualidade é exigido, tanto na fabricação do material como também durante a vida útil. Determinar de forma eficiente e confiável as suas propriedades mecânicas, tanto no momento da fabricação como perante degradação ou envelhecimento, emerge como um fator primordial para a confecção de projetos seguros e otimizados. Fatores como dimensionamento de estruturas e carga máxima aplicável são altamente dependentes do cálculo preciso destas constantes. Isto reforça a aplicação de técnicas que caracterizem

mecanicamente estes materiais dadas as diversas direções de simetria e graus de anisotropia, permitindo qualificá-los ou não para a sua devida aplicação. Tal avaliação também possibilita avaliar o quanto fatores degradantes como exposição exagerada ao calor ou à radiação UV [5], ingressão de fluido, alta concentração de tensões, modificam as propriedades monitoradas. Tradicionalmente, estas medições são realizadas por ensaios mecânicos normatizados, e.g. ASTM D3039 [6], ASTM D5379 [7], ISO 20975-2 [8]. Todavia, estes são procedimentos destrutivos dispendiosos, exigindo uma maior quantidade de corpos de prova e necessitando de testes considerando diversas orientações, o que nem sempre é viável em questões práticas e financeiras.

Neste contexto, além das clássicas metodologias mecânicas destrutivas, ensaios não destrutivos (END) também despontaram como uma alternativa atrativa, conduzindo a uma quantificação das constantes de engenharia do material anisotrópico sem que seja preciso o sacrifício de amostras do material avaliado. A relação íntima entre os parâmetros ultrassônicos e as propriedades elásticas e mecânicas dos materiais compósitos torna o ensaio de ultrassom uma sondagem efetiva para este tipo de caracterização. Tal fato, aliado à constante evolução e aprimoramento das tecnologias de emissão e medição de sinais ultrassônicos, tais como o desenvolvimento de transdutores mais modernos e de sistemas digitais de aquisição de sinais, impulsionaram ainda mais a aplicação desta técnica nos citados materiais. Além disso, a técnica de ultrassom adquiriu popularidade devido a vantagens como boa profundidade de penetração, alta sensibilidade, possibilidade de inspeção com apenas uma das superfícies, resultados em tempo real, portabilidade dos equipamentos, ampla gama de materiais inspecionáveis [9].

Seguindo esta vertente, buscar a melhor combinação de procedimento experimental e processamento de dados que acarretem em resultados precisos e aprimorados torna-se uma tarefa relevante. Em geral, este processo é realizado em 2 linhas de ação principais, que ocorrem paralelamente. Primeiramente, é preciso entender o processo físico vigente, abordando desde as condições e propriedades do material até os parâmetros de propagação sônica e todos os detalhes que potencialmente modifiquem o experimento e que devem ser ajustados. Concomitantemente, deve-se selecionar e adaptar metodologias matemáticas eficientes que permitam transformar os dados brutos de velocidades em valores finais de propriedades mecânicas de forma eficiente, estável e confiável, seguindo as equações e o modelo físico vigentes. Os resultados das constantes elásticas são comparados com os valores obtidos por testes mecânicos ou modelos

mecânicos específicos, já consolidados para compósitos [1] [10] e que levem em consideração as variáveis influentes.

Dada a importância tecnológica deste tipo de análise em compósitos reforçados por fibra de carbono (CFRP) e os desafios citados nos parágrafos acima, este trabalho visa propor uma sequência metodológica que permita estimar o conjunto de constantes elásticas de 3 tipos de laminados de larga aplicação industrial. Para tal são realizados, experimentos utilizando a técnica de ultrassom com incidência oblíqua sob a amostra em diversos ângulos de incidência. De forma subsequente, as constantes elásticas são calculadas a partir de duas metodologias complementares. Primeiramente, extrai-se o valor da primeira constante elástica utilizando a Lei de Snell e a os valores dos ângulos críticos das ondas longitudinais. Subsequentemente, os valores das outras constantes calculáveis são estimados a partir de ajuste não-linear, segundo modelo físico, de parâmetros de equações que contém os valores de velocidade adquiridos no experimento. Como forma de averiguação dos resultados, os valores experimentais são comparados a valores calculados a partir de modelos teóricos associados a dados obtidos por caracterização do material. Além disso, busca-se discutir as peculiaridades e limitações de cada etapa do processo e de cada laminado utilizado, visando maior entendimento dos fenômenos presentes e dos resultados alcançados. Por fim, são apresentadas alternativas para alcançar melhores resultados, buscando preencher as lacunas deixadas pela literatura.

As constantes calculadas pelo ângulo crítico estão na região dos valores previstos teoricamente, enquanto a correspondência dos resultados para as outras constantes calculáveis é altamente dependente do tipo de laminado avaliado. Tal fato se deve ao aumento do desvio do regime de propagação sônica homogênea no material quanto maior a complexidade do empilhamento da amostra, fazendo com que haja um padrão de transmissão de energia irregular. Isto dificulta uma medição propícia das velocidades sônicas, acarretando em estimativas inverossímeis para as constantes elásticas através do ajuste não-linear.

## 2 Revisão Bibliográfica

### 2.1 Ensaio de Ultrassom

O ensaio de ultrassom (UT) é uma técnica amplamente empregada na indústria como ferramenta para inspeção de equipamentos, sendo um dos testes mais consagrados e utilizados devido à sua boa efetividade e contínuo aprimoramento, que ocorre com o desenvolvimento de novos instrumentos e conceitos inovadores. Sua utilização pode focar na detecção e dimensionamento de descontinuidades internas e superficiais, medição de espessura e caracterização de materiais.

#### 2.1.1 Princípios Básicos

As ondas sônicas podem se propagar de modos específicos, dentre os quais os mais utilizados para inspeções em sólidos são o modo longitudinal e transversal. No primeiro a movimentação das partículas é paralela à direção de propagação, já no segundo a movimentação das partículas ocorre de forma perpendicular à direção de propagação. O princípio básico do uso de ultrassom é ligado ao fenômeno de reflexão e transmissão, que ocorrem quando a onda encontra uma interface entre dois meios que possuem impedâncias acústicas distintas [11]. Ao encontrar uma interface ocorre a transmissão de parte da energia da onda para o outro meio e parte da energia é refletida. O percentual desta energia transmitida é diretamente proporcional ao quadrado da diferença de impedância acústica entre os meios envolvidos [12]. A impedância acústica, por sua vez, é definida como o produto da densidade do material pela velocidade de propagação sônica no material.

Assim sendo, quanto mais próximos os valores de impedância acústica entre os meios, mais vantajosa será a transmissão, e menor as perdas por reflexão. Em função disto, os ensaios de ultrassom com transdutores como atuadores e/ou receptores, exigem a presença de um acoplante para o seu contato com o material, amenizando a mudança de impedância acústica e minimizando a perda de energia sônica. Dentre os principais tipos de acoplamento utilizados estão:

- Medições por contato do transdutor com a superfície através de acoplantes tradicionais como gel, óleo, mel, vaselina.

- Medidas por imersão, em tanques com água.
- Acoplamento com jato contínuo de água, evitando a necessidade de imersão.
- Acoplamento ao ar, com a vantagem de não haver acoplante, porém com grande perda por atenuação.
- Ultrassom estimulado por laser, muito favorável à inspeção em larga escala industrial, porém com a limitação de ser um sistema complexo, com baixa sensibilidade e baixa eficiência de conversão [13].

Uma vez que o feixe é transmitido ou refletido, ele é detectado, também por um transdutor contendo cristal piezoelétrico [14], provendo informações como a intensidade e o tempo de percurso associado ao caminho percorrido na área inspecionada. Estas grandezas por sua vez são associadas com a presença, tamanho e profundidade de defeitos, propriedades físicas e adesivas, heterogeneidades, interfaces. Mais detalhadamente, a interação das ondas com estes componentes não é simples e depende de fatores como o tamanho relativo perante o comprimento de onda e a sua orientação. Reflexões de maior intensidade ocorrem para defeitos com dimensões que excedem o comprimento de onda enquanto difração e atenuação predominam para heterogeneidades pequenas em relação ao comprimento de onda, afetando mais brandamente a propagação da onda [15].

### 2.1.2 Escolha do Transdutor e Modos de Visualização

A seleção do transdutor, juntamente com a alocação da amostra, é uma etapa primordial do processo de inspeção, e exige um compromisso entre a frequência do teste e a sua área, visto que tais parâmetros definem uma zona do campo ultrassônico gerado onde ocorre interferência bastante complexa, com vários máximos e mínimos de intensidade, não havendo uma frente de onda bem definida. Esta região, onde o feixe sônico é convergente, é denominada de campo próximo e sua extensão é determinada pela Eq. 1, onde  $d_f$  é o comprimento do campo próximo,  $D$  se refere ao diâmetro do transdutor e  $\lambda$  ao comprimento de onda [16].

$$d_f = D^2 / 4\lambda \quad \text{Eq. 1}$$

Assim sendo, é substancial que as medidas estejam associadas a uma zona onde há uma frente de onda mais definida e também divergente, denominada de campo

distante, onde a intensidade é decrescente à medida que nos afastamos do transdutor. Um desenho explicativo destas zonas é disposto na Figura 3.

Outro parâmetro de interesse é o ângulo de divergência  $\theta$  do feixe sônico no campo distante. O valor de  $\theta$  é definido pela Eq. 2 onde  $K$  é uma constante que depende da forma do transdutor e  $D$  se refere ao diâmetro do transdutor [16]. O diâmetro do feixe sônico ( $W$ ), exposta na Eq. 3 por convenção, é definido como o lugar geométrico radial na qual a intensidade do feixe diminui à metade (-6dB). Para a zona focal de um transdutor plano, na divisa entre os campos próximo e distante, o feixe possui diâmetro calculado pela Eq. 3 [16]. Este fator define a sensibilidade do transdutor, configurando a porção de energia refletida por possíveis defeitos e interfaces em casos de reflexão parcial.

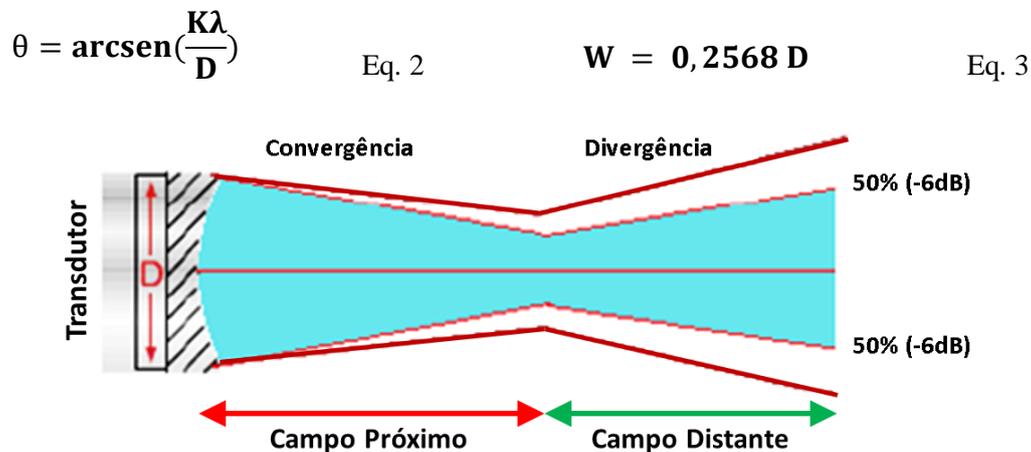


Figura 3 – Representação do feixe sônico com os campos próximo e distante (Adaptado de [17]).

Garantida a condição de campo distante, os pontos de interesse da estrutura são inspecionados, provendo as informações de interação do feixe sônico com a mesma nestes pontos. O sinal ultrassônico recebido pode ser disposto na forma conhecida como *A-Scan*, demonstrado na Figura 4, onde é representada a intensidade das ondas sônicas detectadas em relação ao tempo, onde a resolução temporal depende da duração do pulso e do comprimento de onda emitido [16]. A inspeção pode ser realizada manualmente ou automaticamente, com a utilização de mesas automatizadas ou manipuladores robóticos, garantindo maior precisão das medidas principalmente para o caso de geometrias mais complexas, e também arrays e pórticos industriais estacionários para inspeção em fábricas de alta produtividade.

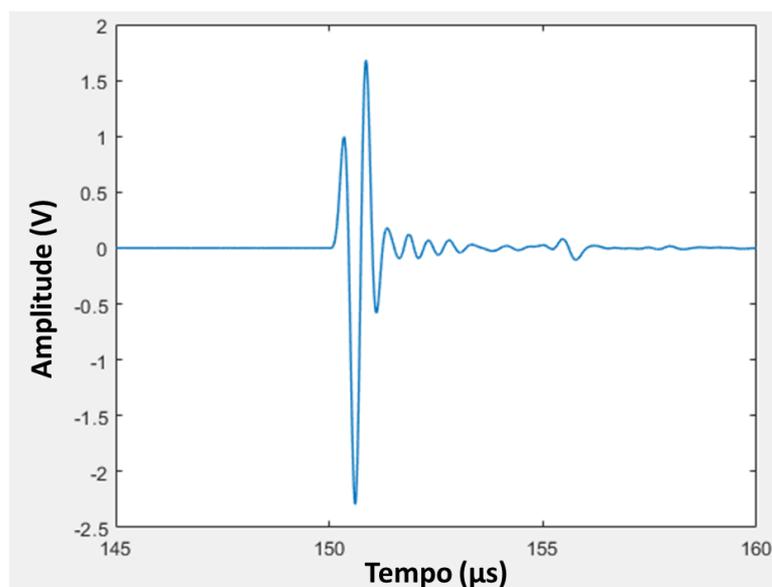


Figura 4 – Exemplo de *A-Scan* para um ensaio de ultrassom por transparência.

Em relação ao tipo de inspeção, existem as seguintes modalidades, que são exemplificadas na Figura 5:

- Transmissão: São utilizados dois transdutores, um atuando como emissor e outro como receptor. Nesse caso ocorre a diminuição ou desaparecimento do pico relacionado à onda sônica transmitida. O primeiro pico observado se refere a chegada da onda no transdutor passando diretamente pela amostra, já um segundo pico observado se refere a chegada do feixe sônico após penetrar na amostra e refletir em ambas as interfaces antes de se propagar até o receptor.
- Pulso-Eco: O mesmo transdutor atua como emissor e receptor do sinal. Nesse caso a presença do defeito gera outro pico antes do pico de fundo. Para o caso de materiais intactos, o primeiro pico observado se associa a reflexão na entrada do feixe sônico no material, com um segundo pico (eco de fundo) representando a chegada do feixe sônico após passar a amostra, refletir na face posterior e retornar ao transdutor.

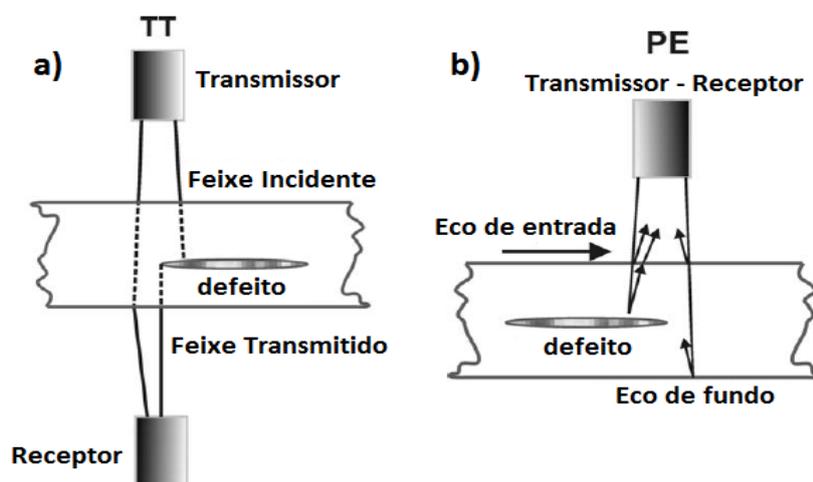


Figura 5 – Representação das modalidades mais tradicionais do ultrassom convencional: a) Método de Transparência; b) Método Pulso-Eco (Adaptado de [11]).

De acordo com a evolução da demanda e a complexidade dos testes exigidos, foram desenvolvidos ao longo do tempo transdutores com diversos tamanhos, orientações e geometrias. Isto permitiu a propagação de ondas em diferentes direções e modos, com a possibilidade de ondas longitudinais, transversais, Lamb e Rayleigh [16], o que gera uma maior gama de possibilidades de detecção de defeitos com diversas geometrias e orientações. Adicionalmente, a aplicação de técnicas de reconstrução e processamento de sinais se tornaram de grande importância na eliminação de ruídos e efeitos parasíticos nos sinais captados, seja devido à problemas de acoplamento, variações de espessura, heterogeneidades, interferência [16]. Aparelhos mais sofisticados ainda ajudaram a melhorar a resolução espacial e rapidez do ensaio, como no caso das sondas *phased-array*, onde uma combinação geométrica de sensores é eletronicamente programada para gerar sinais com escaneamento angular e variações de foco. Todavia, este tipo de transdutor exige maior preparo do inspetor e possui preço elevado, fazendo com que não esteja tão difundido na indústria de inspeção de compósitos quanto às sondas convencionais. Além disso, a condição de anisotropia torna o escaneamento angular um processo complexo e que exige métodos de processamento e interpretação de dados bastante específicas e detalhadas, reforçando ainda mais a dificuldade de difusão desta tecnologia neste ramo de materiais.

### 2.1.3 Incidência Oblíqua e Conversão de Modo

Se uma frente de onda incide em uma interface entre materiais com diferentes propriedades acústicas, ocorre uma partição de energia entre as ondas transmitidas e refletidas (refração e reflexão) e entre os tipos de onda. Para o caso de incidência normal na superfície, os fenômenos de transmissão e reflexão ocorrem sem mudança na direção do feixe e sem modificação do tipo de onda. Para qualquer outro ângulo de incidência, os fenômenos de conversão de modo e refração coexistem, modificando a direção de propagação da onda no material [16].

A conversão de modo consiste na mudança do tipo de onda, segundo suas características de propagação e polarização, ao encontrar uma interface. Como exemplo, ondas longitudinais se propagando na água ao incidirem obliquamente um sólido transmitem para este ondas longitudinais e transversais, com direções de propagação dissemelhantes, além de gerar um feixe refletido no qual o ângulo de reflexão é igual ao de incidência. Caso a água fosse substituída por um sólido, também observar-se-ia uma componente cisalhante refletida. Esta mudança pode ocorrer de forma parcial ou total. Isto posto, para os ensaios onde há dificuldade no acoplamento e a geração de ondas cisalhantes é necessária, ou se ângulos específicos de propagação são desejados, recomenda-se o uso de testes com amostras imersas em um líquido com incidência oblíqua na interface.

Já a refração é o fenômeno de desvio da direção de propagação de uma onda ao passar de um meio para outro com características distintas, demonstrado na Figura 6. Não há alteração de frequência, no entanto, a velocidade e o comprimento de onda são modificados, sendo o percentual do feixe modificado dependente do coeficiente de transmissão da interface. Todas estas mudanças ocorrentes estão diretamente ligadas ao ângulo de incidência, às velocidades de ambos os meios envolvidos e à aptidão da onda em propagar em cada material. Matematicamente, o comportamento da refração é definido pela Lei de Snell, representada na Eq. 4, onde  $\theta_i$  representa o ângulo de incidência,  $\theta_r$  representa o ângulo de reflexão,  $\theta_l$  é o ângulo de refração da componente longitudinal,  $\theta_t$  o ângulo de refração de uma componente transversal e  $\theta_r$  é o ângulo de reflexão. Os índices das velocidades na expressão se referem ao tipo de onda (l – Longitudinal e t – transversal ou cisalhante) e ao meio de propagação.

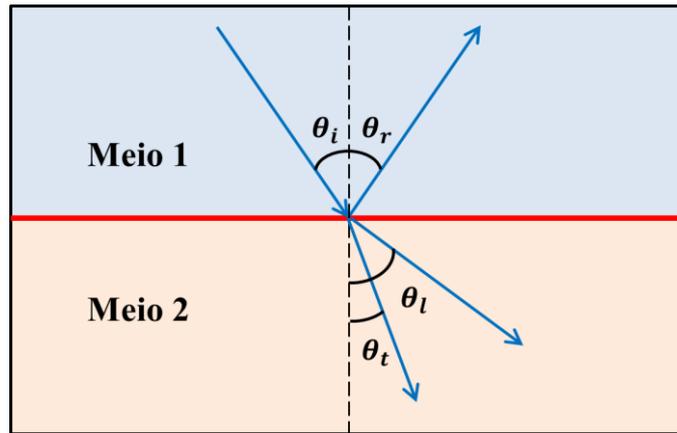


Figura 6 – Representação dos fenômenos de refração e conversão de modo em uma interface líquido-sólido.

$$\frac{\sin \theta_i}{v_{l1}} = \frac{\sin \theta_l}{v_{l2}} = \frac{\sin \theta_t}{v_{t2}} \quad \text{Eq. 4}$$

A partir de um determinado ângulo de incidência, uma das ondas refratadas pode ter sua direção de propagação de energia pertencente ao plano da interface ( $\theta_l = 90^\circ$ ). Este ângulo é denominado ângulo crítico. Assim sendo, considerando a presença de 2 modos de onda existentes no meio devido à refração, são esperados 2 ângulos críticos, cada um associado a um modo. Uma vez que em sólidos a velocidade longitudinal é maior que a transversal, ocorre o inverso para o ângulo crítico, que é maior para a propagação transversal. Para sua estimativa basta substituir, na Lei de Snell, o valor do ângulo de refração por  $90^\circ$ .

## 2.2 Defeitos e heterogeneidades em compósitos

Materiais compósitos laminados, de fibra longa pela sua estrutura heterogênea e em camadas, estão susceptíveis a diversos tipos de defeitos que podem surgir durante sua fabricação ou aplicação. Em comparação com metais, estes possuem propriedades mecânicas complexas não-homogêneas e dependentes da orientação em decorrência da anisotropia, heterogeneidade e defeitos intrínsecos a sua confecção. Os diversos tipos de defeitos possíveis em compósitos de fibra longa estão representados na Figura 7.

Uma das irregularidades mais usuais em compósitos são os vazios [18]. Estes ocorrem na matriz e nas interfaces entre camadas, sendo geralmente resultado de um

processo de cura imperfeito devido à inadequada eliminação dos gases liberados, falta de penetração da resina por toda a área do laminado, variabilidade do teor de resina, taxa de aquecimento inadequada e até mesmo adsorção de fluidos durante a laminação. Os vazios podem possuir diversos tamanhos, formatos e orientações. Entretanto há uma tendência de formar vazios mais esféricos no interior das camadas e, principalmente, vazios maiores, mais achatados e alongados na direção das fibras nas zonas intercamadas e entre os feixes de fibras [9] [19]. Estes defeitos também são prejudiciais às propriedades mecânicas do material e podem causar concentração de tensões, porém com menos intensidade quando comparado às falhas interlaminares [18].

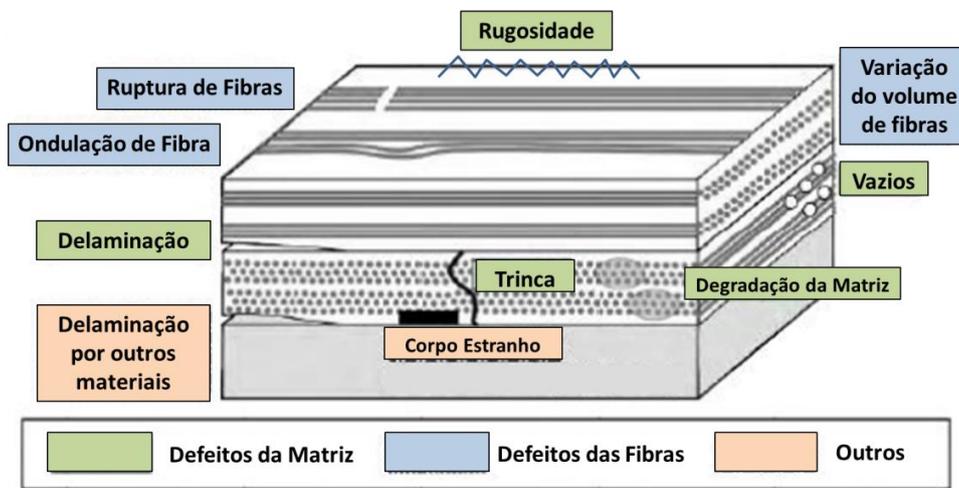


Figura 7 – Representação dos diversos defeitos possíveis em materiais compósitos de fibra longa (Adaptado de [1]).

Embora a presença de defeitos neste tipo de material seja intrínseca a sua própria estrutura, algumas metodologias de confecção dos laminados permitem que sua presença seja reduzida. Dentre estes os compósitos pré-impregnados (“*prepregs*”) são a alternativa mais e tradicional para garantir uma estrutura com maior homogeneidade e conformidade com a projetada. Para suprimir o desenvolvimento destes defeitos no processamento, geralmente são aplicadas pressões de consolidação por autoclaves ou prensas e são utilizadas bolsas de vácuo. No entanto, estas estruturas exibem certa quantidade de vazios resultante da fabricação inicial do pré-impregnado. Lukaszewicz, *et al* [20] testaram laminados *prepregs* com métodos de processamento de qualidade e encontrou percentuais de vazios entre 1,2 e 2,5%, a depender dos parâmetros de processamento e de cura, encontrando heterogeneidades típicas em algumas propriedades como, por exemplo,

variação do percentual local de resina. Propriedades dominadas pela matriz, como os módulos e resistências associados a direção transversal e ao cisalhamento interlaminar, são mais afetadas pela presença dos vazios, com pouca influência no módulo elástico longitudinal. Uma proporção de 1 a 3% destes podem afetar negativamente as propriedades mecânicas mais dependentes da matriz em até 20% [18].

Não sendo exatamente um defeito, a rugosidade superficial também entra na lista de fatores de fabricação possivelmente interferentes nas propriedades e, também, nos resultados de inspeções por ultrassom. A indústria de processamento de compósitos de fibra de carbono produz peças com vários graus de acabamento superficial dependendo do seu processo de fabricação e da aplicação final, sendo a rugosidade média ( $R_a$ ) o parâmetro mais frequentemente avaliado. Em alguns casos não é vantajoso economicamente ou tecnicamente realizar processos de retificação uma vez que pode haver considerável encarecimento da peça e até mesmo inserção de novos problemas como ranhuras e curvaturas indesejadas em caso de erros de processo. Condições superficiais, assim como percentual e distribuição dos vazios, dependem das configurações de pressão e temperatura do molde, resultando em configurações de processo que devem se balancear de forma a obter as propriedades satisfatórias e equilibradas [21]. Tipicamente os laminados confeccionados utilizando *prepregs* são fabricados utilizando autoclaves ou prensas, utilizando uma variedade de folhas de *peel-ply* nas interfaces superior e inferior, conforme recomendações [21]. Este material funciona como uma película protetora da estrutura para a ação do molde, garantindo também a não aderência de frações do compósito no mesmo. Em muitos casos, estas películas possuem uma base de tecido texturizada com recobrimentos externos e, juntamente com a ação da superfície do molde, resulta na criação de um padrão de rugosidade nas superfícies do laminado.

Assim sendo, os fatores explicitados nesta seção como a presença de vazios e rugosidade, inerente a alguns modos de processamento, potencialmente modificam a propagação sônica. Por isto, ressalta-se a importância de realizar qualquer avaliação de forma cuidadosa, buscando os melhores parâmetros e métodos que permitam eliminar a influência aleatória destes defeitos no resultado final ou quantificar de forma acurada a variação sistêmica causada por estes.

### 2.3 Ultrassom em Compósitos

Alguns dos maiores desafios na área de caracterização por ensaios não destrutivos envolvem avaliações em materiais não homogêneos e anisotrópicos, como os compósitos. Reverberações e mudanças no sinal recebido devido a sua estrutura anisotrópica multicamadas, de pequenos defeitos e heterogeneidades inerentes a confecção do material complicam a retirada de informações úteis, levando a considerações incertas e impossibilidade de resultados conclusivos. Nestes casos, tem-se a contribuição de respostas do material de forma sistêmicas, mais previsíveis e também de fatores aleatórios. Assim sendo, o tratamento e interpretação das respostas fornecidas devem ser diferenciados e realizados minuciosamente, de acordo com o objetivo final, para garantir a sensibilidade necessária aos mais diversos tipos de análises.

Ao longo dos anos, diversas bibliografias abordaram amplamente a aplicação desta técnica neste tipo de material [9] [22] [23] e dentre os estudos que podem ser realizados estão à caracterização da estrutura com a utilização de métodos de ressonância [24], estudos de avaliação de porosidade de acordo com a atenuação [19], estimativa de propriedades físicas via medidas de velocidade de propagação [25]; e suas variações com a frequência; detecções de delaminações [26] e avaliação de integridade estrutural através de uma representação 3D da estrutura [27]. Ondas longitudinais normais à espessura são as mais utilizadas na inspeção de compósitos, sendo que sua propagação é, teoricamente, independente da direção das fibras e da sequência de empilhamento do material [28]. Todavia, para algumas avaliações, é necessária a incidência de forma oblíqua. Para esta situação, a estrutura multicamadas e a anisotropia do material começam a possuir papel mais significativo, com intensa dependência do ângulo de incidência e mudanças significativas no espectro de frequência. Isto reforça uma demanda de maior entendimento físico do processo de propagação, assim como desenvolvimento de técnicas de processamento que permitam extrair as informações desejadas.

Resumidamente, a aplicação do teste ultrassônico em materiais compósitos tipicamente recai em duas principais categorias: avaliação de propriedades físicas do material, e como estas podem variar, e detecção de defeitos. Para tal, dentre as principais dificuldades técnicas encontradas estão a alta atenuação, espalhamento e reflexões indevidas no sinal, efeito de obscuridade sobre defeitos múltiplos próximos, variação de percentual das fases constituintes, dispersão de velocidade e até mesmo a rugosidade superficiais de algumas estruturas. Por isto, tendo em vista o objetivo do trabalho em estimar as constantes elásticas do material a partir dos valores de velocidade sônica,

quaisquer fatores dificultadores ou modificadores na medição desta grandeza devem ser levados em conta, avaliando o seu grau de influência e as alternativas mais propícias para mitigar a falta de acurácia gerada.

### 2.3.1 Dispersão de Velocidades

O fenômeno da dispersão de velocidades é associado à variação do valor de velocidade da onda com relação a variação da frequência ou a presença de heterogeneidades, como, por exemplo, vazios [29]. As ondas sofrem dispersão por dois mecanismos distintos à medida que se propagam através de compósito de matriz polimérica, podendo inclusive modificar sua forma. O primeiro mecanismo é a dispersão visco elástica devido à viscoelasticidade do meio e o segundo é a dispersão geométrica [29]. Ao incidir sobre heterogeneidades, as ondas são difratadas ao redor dos mesmos, o que aumenta o tempo de propagação e, conseqüentemente, reduz a velocidade de fase. Todavia, de forma análoga a atenuação, isto também dependerá de parâmetros como a faixa de frequência utilizada, sequência de empilhamento, percentual de vazios e algumas características destes como tamanhos, orientação e morfologia [30]. Assim sendo, diversos trabalhos buscaram entender mais profundamente os aspectos de uma possível variação de velocidade sônica em laminados CFRP. À medida que a presença de vazios reduz o valor de algumas propriedades mecânicas e constantes elásticas, é de se esperar que ocorra modificação nos valores de velocidades. Todavia, segundo Martin [31], a magnitude desta modificação irá depender do tipo de fibra de carbono e do tipo de resina utilizados, assim como da frequência.

Considerando a presença de vazios na matriz, Hsu *et al* [29] observaram que, para frequências de 5 e 10 MHZ, há uma leve diminuição nas velocidades das ondas longitudinais com o aumento destes, mas de forma muito menos intensa quando comparada a mudança na atenuação sônica. Além disso, o autor reforça que, para compósitos mais espessos e com porosidade, o sinal sônico que se propaga sofre modificações de forma em relação ao sinal de referência. Isto é resultado da dependência da velocidade e da atenuação em relação a frequência, o que modifica o conteúdo espectral do sinal e, conseqüentemente, sua forma temporal. Utilizando de simulação de elementos finitos e considerando uma frequência de 2,25 MHZ, Ishii *et al* [32], constataram relação praticamente linear entre a porosidade e a queda na velocidade para

amostras com porosidade de até 7,1% em volume, mas de forma quase insensível ao tamanho dos vazios. Outros estudos observaram queda nos valores de velocidades normais ao plano do laminado com aumento do percentual de vazios [33] [34] [35]. A partir disso notou-se distintas relações matemáticas entre o percentual de vazios e os valores de velocidade encontrados, com a influência da frequência utilizada sendo mais eminente quanto maior a porosidade. Todavia, foram encontradas diferenças de velocidade menores que 5%, em relação ao material perfeito, para laminados com porosidades de até 3%, valor já pouco provável para materiais confeccionados em processos de alta qualidade. Além disso, uma maior variabilidade de velocidades de acordo com o tamanho dos poros pode ser eliminada utilizando frequências nas quais os comprimentos de onda fiquem em uma faixa maior que os maiores vazios [35].

Segundo Jeong *et al* [36], as taxas de variação das velocidades longitudinais normais ao laminado em relação a frequência é mais intensa para laminados com maiores percentuais de vazios, possuindo valor muito baixo para amostras com conteúdo de vazios menor que 0,5%. Esta mesma taxa também ascende à medida que a frequência é mais baixa, sendo bastante notória em faixas de frequência de geralmente até 6 MHz, se tornando mais suave, estabilizada e com menor variação em relação a porosidade à medida que a frequência aumenta, conforme exposta na Figura 8.

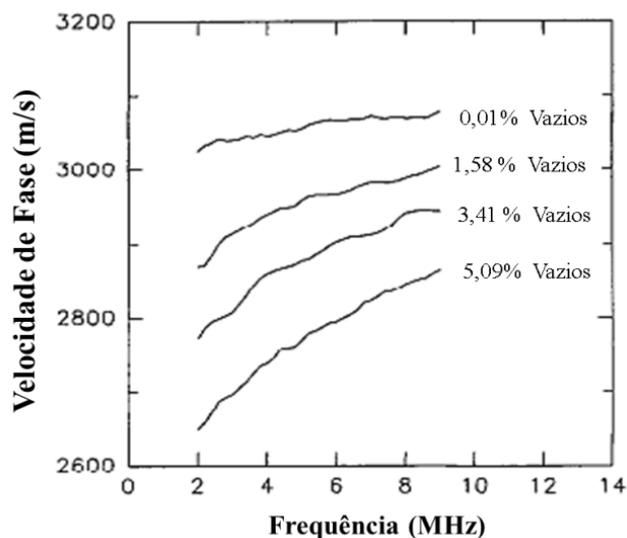


Figura 8 – Relação entre a velocidade de fase e a frequência de ensaio para laminados CFRP com diversos percentuais de porosidade (Adaptado de [36]).

Por outro lado, para todos os casos e em todas as direções de propagação, as velocidades aumentam à medida que aumenta o percentual de fibras no material [30] [35] [37], com influência irrisória da distribuição dos feixes de fibra na seção transversal [37]. No geral, para amostras onde ocorre dispersão, maiores valores de velocidade tipicamente são constatados para maiores valores de frequência.

Dado que a maior parte das inspeções ocorre com ondas longitudinais incidindo de forma perpendicular ao material, a maior parte dos estudos de dispersão se concentra neste caso, que é muito dependente das condições da matriz, com pouca bibliografia sobre outros tipos de onda, principalmente para as transversais. Desta forma, as observações citadas enaltecem que os parâmetros sônicos associados às propriedades do laminado com maior influência da matriz recebem maior influência da porosidade, sendo, portanto mais suscetíveis a mudanças nos resultados de acordo com a condição real da estrutura [31]. Enquanto isto as propriedades governadas pela fibra sofrem pouca influência dos poros e do tipo de resina, mas com forte dependência do percentual das fases componentes. Dados estes efeitos de variação, uma alternativa interessante é realizar diversas medições considerando diferentes áreas de incidência sobre a amostra, de forma a garantir diferentes percursos sônicos e ter maior abrangência das heterogeneidades presentes, de forma a obter um resultado médio mais representativo. Uma outra possibilidade é buscar a realização de testes nos quais o feixe seja menos focalizado, com maior diâmetro, de forma também a possuir uma maior abrangência destas heterogeneidades e garantir que sua influência seja avaliada de uma forma geral na estrutura. Além disso, para ensaios comparativos e avaliações das constantes elásticas a partir dos valores de velocidade sônica, é interessante que seja realizada uma análise da presença de vazios na amostra para se tenha noção do seu grau de influência e para que, possivelmente, possam ser justificadas diferenças nos valores encontrados.

### 2.3.2 Propagação em Meio Estratificado: Interação com as camadas e as interfaces ricas em resina

Por fatores inerentes ao próprio processamento de compósitos laminados com matriz polimérica, finas interfaces ricas em resina são encontradas entre as camadas principais [20], sendo representadas na Figura 9. Assim como as camadas principais do laminado, estas interfaces podem não ser totalmente regulares, variando a sua espessura e propriedades em torno de um valor médio ao longo de sua extensão. Tal fato acarreta a

possibilidade de diferentes comportamentos de interação sônica e velocidade de fase, também em torno de um valor médio, a depender do local de passagem do feixe e de heterogeneidades presentes [38]. Os valores de espessura derivam do material utilizado e do método de processamento (e dos seus parâmetros), com valores entre 5 e 50  $\mu\text{m}$ . Por isto, foi dada importância ao entendimento de como estas interfaces e a estrutura em camadas do material afetam o feixe sônico e o sinal adquirido.

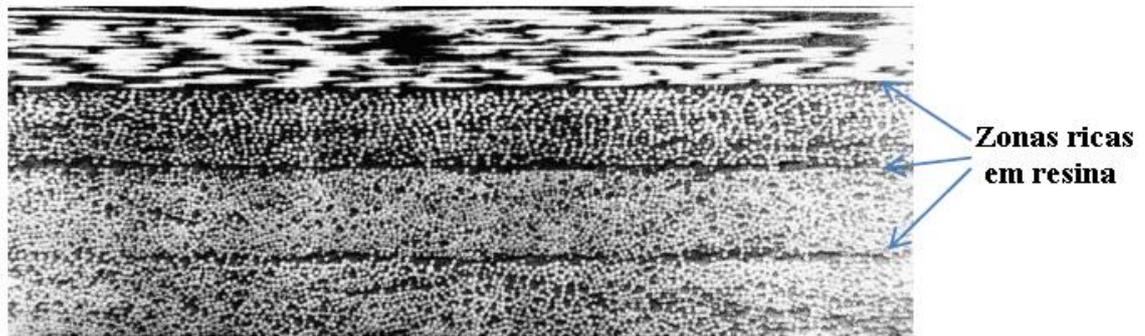


Figura 9 - Micrografia na seção de  $0^\circ$  de um laminado com configuração  $[0^\circ/45^\circ/90^\circ/-45^\circ]$  no qual são observadas as zonas entre as camadas. (Adaptado de [39]).

Dada sua composição, essa zona possui impedância acústica um pouco diferente da camada principal e, portanto, permite a coexistência de reflexão e transmissão ultrassônica nas interfaces compósito-resina e vice-versa [40]. Isto pode ser visto de forma positiva visando caracterizar as camadas em relação a sua espessura, localização, orientação [41]; ou também como algo negativo por gerar um grau de ruído estrutural e interferências que prejudicam a identificação de outros aspectos do sinal. Wang e Rokhlin [42] demonstraram que as regiões ricas em resina podem ter um efeito significativo nas características de reflexão em laminados multidirecionais, podendo introduzir reverberação aleatória e espalhamento. Paralelamente, a transmissão pode ser reduzida e afetada pelos múltiplos fenômenos de refrações presentes, acarretando em uma propagação irregular e fracionada. Ambos fenômenos são dependentes da razão entre o comprimento de onda e a espessura das camadas do laminado e das interfaces ricas em resina e podem ser influenciados por fatores como ondulações ou vazios alongados presentes nesta zona [42]. Segundo Smith *et al* [43], na faixa de frequência tipicamente utilizada em CFRP, até 10 MHz, a amplitude dos ecos de reflexão das interfaces é proporcional a suas espessuras e aumentam também com a frequência, porém às vezes nem são observados devido à alta atenuação presente. Entretanto, é possível enaltecer estes pequenos ecos ao selecionar uma frequência coincidente com a ressonância das

mesmas ou das camadas principais [40]. Para as camadas principais de um laminado unidirecional, que possuem tipicamente espessura entre de 0.125 mm e 0.3 mm, foi observado que reflexões são bem fracas até cerca de 3 MHz para as ondas cisalhantes e 5 MHz para ondas longitudinais, limites até os quais o comprimento de onda é consideravelmente maior que a espessura e onde começa a haver maior sensibilidade [44].

Em um sólido anisotrópico em camadas, a propagação das ondas é significativamente afetada pela periodicidade de propriedades e orientações. O modelo acústico vigente para este tipo de material é baseado na propagação das chamadas ondas *Floquet* que se propagam em um meio infinito [45] [46]. A propagação destas ondas é caracterizada pela combinação linear de ondas clássicas planas (longitudinal, cisalhante rápida e cisalhante lenta) em cada camada do laminado, com polarização dependente da camada e do local. Para elucidar esta questão, assim como os aspectos de reflexão e transmissão, algumas estratégias são tomadas, levando em conta tanto em incidência normal quanto oblíqua [47]. Como as múltiplas ondas refratadas interagirem continuamente com as camadas do laminado, sinais muito complexos serão adquiridos devido à reflexão da onda, refração e conversão de modo.

Uma das alternativas é utilizar modelos baseados na propagação de ondas *Floquet*, como o desenvolvido por Braga *et al* [47]. Estudos nesta linha focaram no caso de periodicidade das camadas e elucidação da dispersão das ondas considerando as camadas perfeitamente aderidas. Todavia, na maioria dos compósitos reais, devido à presença das interfaces ricas em resina, isto não é incontestável. Seguindo esta narrativa, o desenvolvimento de modelos que atentem à influência destas regiões é uma tarefa que mereceu atenção, principalmente para maiores frequências. Uma das vertentes principais de modelagem teórica dos efeitos destas interfaces é o modelo interfacial de mola (fina camada elástica) [38] [45] [48] [49], possuindo espessura e matriz de rigidez própria de acordo com suas propriedades viscoelásticas, através da qual se estima o espectro de transmissão da onda longitudinal que atinge obliquamente as interfaces. Rigorosamente falando, esta consideração é válida quando as regiões interlaminares de resina são suficientemente finas em comparação com o comprimento de onda em questão, sendo o caso dos compósitos prepregs convencionais para as faixas de frequência habituais. Nesta vertente, Ishii *et al* [48], ao avaliar a propagação de ondas sônicas em CFRP através do método de elementos finitos, constataram que considerar a rigidez das camadas

interlaminares causa variação nos valores calculados de velocidade de fase comparado a situações onde a interface não é considerada (Figura 10). Tal fato demonstra a importância de considerar este aspecto quando se busca resultados altamente fidedignos, principalmente quando a amostra possui maior porosidade [48].

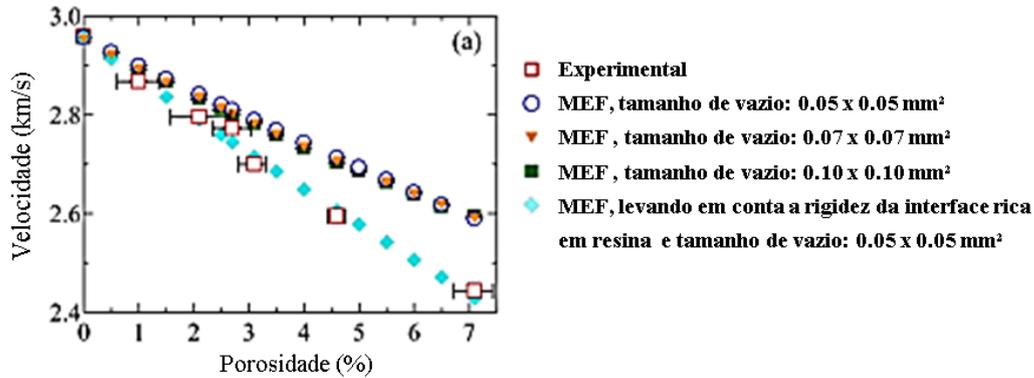


Figura 10 – Cálculo de velocidades para CFRP contendo porosidade, considerando ou não a presença das interfaces ricas em resina (Adaptado de [48]).

Em dependência do ângulo de incidência, do comprimento de onda e da espessura da célula unitária (laminas que compõem o período do laminado + interfaces ricas em resina), Potel *et al* [50] citaram que a propagação das ondas de *Floquet* em um meio de múltiplas camadas finito pode ser muito semelhante à propagação em um meio homogêneo, o que torna o desenvolvimento matemático mais simples e direto. Dessa forma tem-se uma estrutura onde não há ocorrência de interferência devido às reflexões nas interfaces, o que garante um valor de coeficiente de transmissão maior e mais previsível, além de tornar menos complexo o sinal no domínio do tempo. Assim sendo, é possível definir uma região de homogeneização sônica do material, isto é, considerando um material anisotrópico, porém como uma estrutura unificada efetiva, sem camadas, no qual se propagam ondas similares às planas tradicionais e para o qual se têm matrizes de rigidez e de transferência globais. Para este pode-se desenhar curvas de dispersão e de propagação para as ondas longitudinais e transversais presentes. Além disso, tem-se uma relação linear entre o número de onda das ondas *Floquet* e a frequência, com polarização constante e retilinear de cada onda para toda a estrutura, assim como uma onda plana [50]. Uma representação didática dos processos de propagação das ondas *Floquet* e da propagação homogênea é exposta na Figura 11.

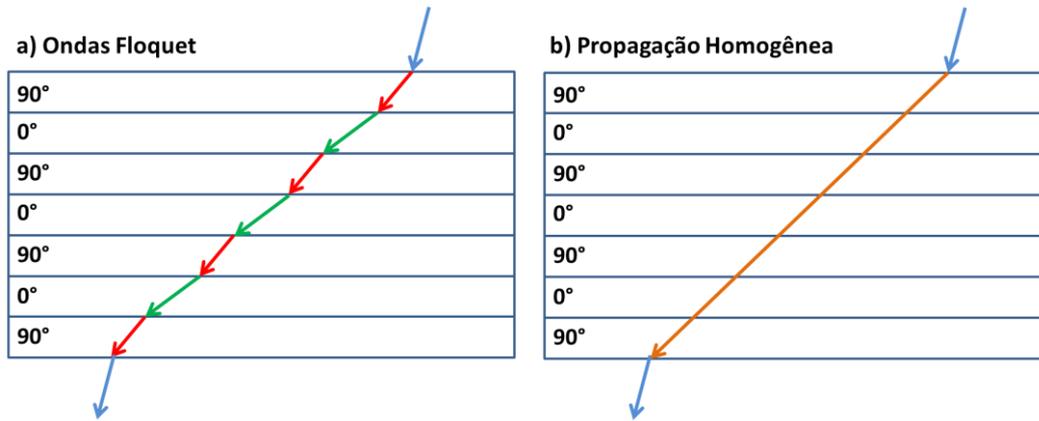


Figura 11 – a) Representação de propagação das ondas *Floquet*; b) Representação de propagação das ondas homogêneas.

O processo de homogeneização não altera as velocidades das ondas de *Floquet* ou outras propriedades, devido à igualdade das matrizes de rigidez e a satisfação das condições de contorno de tensões e deslocamentos nos limites das células [51]. Neste caso, a camada epóxi residual entre as lâminas não afeta diretamente as componentes de reflexão e a transmissão, e o compósito está agindo como um corpo homogêneo. Fora desta zona de homogeneização, o laminado pode ser considerado um meio periódico e estratificado perante o feixe sônico, para o qual são observadas faixas de parada e passagem, que ainda serão discutidas nesta seção. Este processo também pode ser feito através de análise do espectro de Fourier para extração dos números de onda envolvidos [52]. A frequência limite para considerar o domínio de homogeneização ( $f_h$ ) é dada pela Eq. 5, onde  $V_{\min}(\theta_p)$  é a velocidade mínima dos modos de propagação presentes no material para um dado ângulo de propagação  $\theta_p$ , e  $h_c$  é a espessura da célula unitária do laminado, que depende da sequência de empilhamento [53].

$$f_h < \frac{0.5 V_{\min}(\theta_p)}{h_c \cos(\theta_p)} \quad \text{Eq. 5}$$

Com base nesta equivalência, Wang e Rokhlin [51] [53] descreveram um método de homogeneização dinâmica baseado em ondas de *Floquet* e o usaram para medir com sucesso as velocidades e módulos elásticos de até mesmo uma única camada. Para condições onde a Eq. 5 se torna uma igualdade, tem-se a condição de ressonância, com valores de transmissibilidade muito baixos até mesmo para ângulos pequenos de incidência [41].

Também baseados nas teorias citadas considerando a presença das interfaces de resina, diferentes estudos em CFRP com diferentes sequências de empilhamento [41] [42] [49] [50] [54] constataram que, ao examinar o fluxo de energia das ondas parciais no laminado para um determinado ângulo de incidência, são observadas faixas de frequência alternando os valores do coeficiente de transmissão e os modos de ondas *Floquet* presentes. Isto ocorre devido à interferência construtiva e destrutiva de ondas dispersas e refletidas das interfaces, as reflexões de Bragg e aos ângulos críticos presentes [40]. Assim sendo, foram reportadas zonas de combinação dos fatores ângulo de incidência e frequência onde ocorrem valores normais ou muito baixos do coeficiente de transmissão, podendo inclusive gerar maior variabilidade nos resultados de medição de velocidade [55]. Vale lembrar que, localização e a largura das bandas de frequência, assim como os valores de coeficiente de transmissão e os modos de onda envolvidos, dependem fortemente do ângulo de incidência, do plano de laminação e da rigidez (normal e cisalhante) da zona interfacial. Este conjunto de considerações reportadas é graficamente exposto na Figura 12, na qual é possível definir o domínio de validade da homogeneização [49]. A variação da espessura da camada residual não altera a estrutura geral da banda de parada e passagem na incidência normal, mas introduz espalhamento aleatório nas bandas de passagem. Já na zona de homogeneização, as bandas de parada e passagem se separam em quatro regimes divididos por três ângulos críticos do incidente, nos quais os fenômenos de atenuação e transmissão são mais conhecidos e previsíveis, tornando esta região mais apropriada para inspeções ultrassônicas nestes materiais.

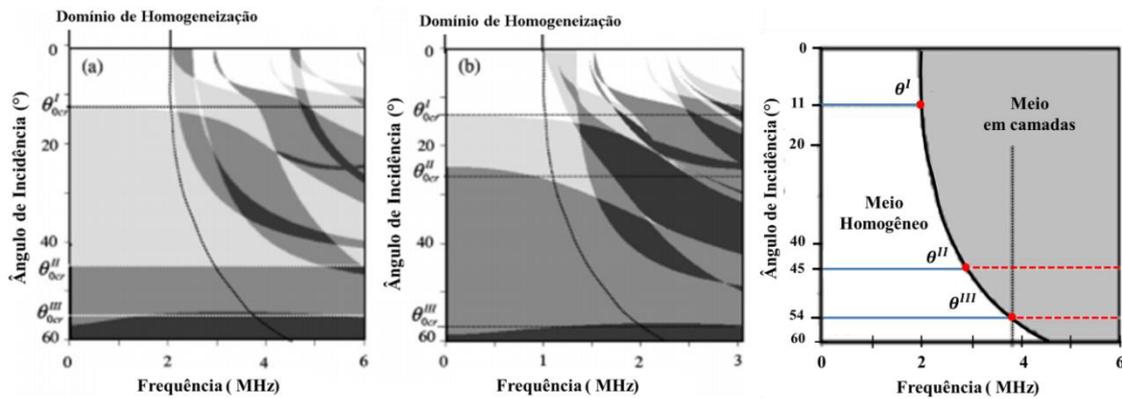


Figura 12 – Bandas de Passagem (transmissão considerável) e de parada( transmissão muito baixa) para todos os tipos de onda se propagando em uma estrutura: a) [0°/90°]; b) [0°/45°/90°/-45°]. (branco: três ondas propagando; cinza: uma ou duas ondas propagando; preto: Banda de parada, não há ondas de propagação permitidas).; c) Domínio previsto de homogeneização para laminado [0°/90°] em teste imerso em água. Também são representados os ângulos críticos (Adaptado de [49]).

Muitas destas observações são relatadas por Ishii *et al* [41] em laminados CFRP. Diferentemente da disposição unidirecional, os laminados de *cross-ply* e quase isotrópico têm várias faixas de frequência de baixa transmissividade a depender do ângulo de incidência. Entretanto, para ângulos menores que o primeiro ângulo crítico, a transmissão possui menor dependência em relação ao tipo de laminado, enquanto ângulos maiores que 60° geram transmissão diminuta em quase todo o espectro em razão da reflexão quase total da onda incidente. Outro fato interessante é que a complexidade das faixas de frequência na maior parte do espectro está diretamente relacionada com a simplicidade do plano de laminação, gerando espectros mais complexos e fragmentados para os laminados [0°/90°] e [0°/45°/90°/-45°] [49]. Logo, é preciso selecionar a frequência do sinal com muito cuidado, de acordo com a aplicação, para evitar ou explorar esses efeitos de banda de parada e passagem. No geral, o percentual de transmissão médio e sua dependência angular decaem com aumento da frequência em razão da maior absorção estrutural e reflexões na estrutura, sendo também afetada devido as flutuações de condições nas interfaces [38]. Paralelamente, uma outra opção importante é avaliar a espessura das células unitárias do material avaliado de forma a analisar o regime sônico vigente, pois assim averigua-se se qualquer resultado inesperado ou ilógico pode ter sido causado por um desvio do regime de propagação homogênea.

### 2.3.3 Efeitos da Rugosidade Superficial

Visto que a presença de rugosidade é algo intrínseco ao processamento de laminados *prepregs*, conforme exposto na seção 2.2, é de grande importância entender como a presença deste fator influencia a qualidade do feixe sônico, possivelmente modificando o seu grau de complexidade e exigindo processamento de dados mais complexo para eliminar qualquer efeito deletério no cálculo das velocidades sônicas.

A rugosidade da superfície de entrada de um feixe acústico em um material é um fator significativo em um teste ultrassônico. Uma vez que grandezas resultantes do ensaio podem possuir sensibilidade à esta propriedade em determinadas condições de teste, a instabilidade de resultados é um desafio real a ser superado [56]. Desde os anos 80 a técnica ultrassônica é reportada como alternativa plausível para medição de rugosidade superficial [57] [58]. Embora haja um direcionamento de diversos estudos a encontrar o efeito exato da rugosidade e revelar uma correlação, cada trabalho examinou diferentes materiais, equipamentos e condições de ensaio [56] [59] [60]. A grandeza superficial mais utilizada para qualquer avaliação desta temática foi a  $R_a$ , que é a média aritmética do desvio vertical do perfil da superfície em relação ao centro do mesmo (Figura 13). De forma convergente, percebeu-se o efeito desta variável nos resultados de testes ultrassônicos, sendo o seu grau de influência dependente dos parâmetros utilizados. Todavia, alguns aspectos interessantes foram reportados quase que unisonantemente pela literatura.

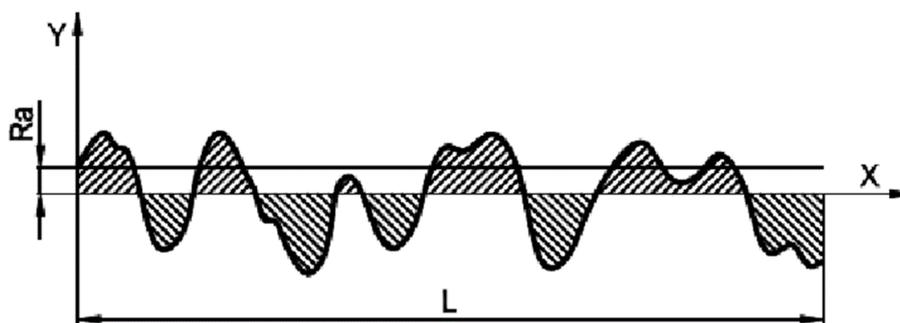


Figura 13 – Representação da grandeza  $R_a$  em relação ao perfil de rugosidade.

O efeito da rugosidade é considerado uma perturbação fraca da solução de onda plana conhecida, sendo uma possível fonte de imprecisões nas tentativas de medição de potência acústica, atenuação e mudanças de velocidade ou de dimensão. A sensibilidade

do feixe a características da superfície varia em função da morfologia do mesmo, sendo dependentes da razão entre a rugosidade superficial e o comprimento de onda [59]. Ondas acústicas, tanto refletidas como refratadas, coerentes e incoerentes são geradas pela interação de uma onda com uma interface líquido-sólida rugosa. As ondas coerentes se propagam na direção determinada pela Lei de Snell (reflexão e refração), sendo a caracterização das fases e magnitudes destas afetada pela rugosidade da superfície. As ondas incoerentes são componentes aleatórios do sinal ultrassônico recebido, que correspondem a flutuações aleatórias da superfície. Em caso de baixa razão entre a rugosidade superficial e o comprimento de onda, ocorre a presença de ruído e redução de amplitude. Todavia, não há mudanças consideráveis na morfologia do feixe, possuindo os efeitos modelados por uma reflexão mais simples e menos degradante [61]. Para casos contrários, além dos fatores citados na condição anterior, há coexistência dos fenômenos de transmissão difusa e espalhamento, gerando randomização de fase, incoerência e distorção do feixe (vista a variação da fase da onda na superfície), gerando anulação parcial do somatório construtivo responsável pela formação de um sinal consistente e definido. Tal interação acarreta na diminuição da amplitude dos ecos e perda do poder de resolução [62]. Desta forma, o aumento das irregularidades superficiais também podem afetar o fenômeno de conversão de modo e o redirecionamento das ondas geralmente regido pela Lei de Snell, que podem gerar sinais espúrios ao alcançarem o transdutor [63].

O aumento da frequência ou da rugosidade acentua o decaimento da amplitude devido ao aumento do espalhamento difuso [63], com quedas de até 13 dB para valores de  $R_a/\lambda = 0,15$  [57]. Por outro lado, Isleicy descreveu que até uma relação  $R_a/\lambda = 0,1$ , o efeito de espalhamento é demasiadamente baixo [64] [65] enquanto Salazar [63] cita que este valor é de  $1/6$ . Neste contexto, até modelos matemáticos para efeitos de difração, atenuação e espalhamento em interfaces sólido-líquidas com rugosidades randômicas e periódicas foram aplicados tais como o modelo de Kirchoff [57] [62], que obteve resultados bem satisfatórios para frequências moderadas ( $\lambda$  é menor que  $R_a$ ).

Alguns autores abordaram a influência da rugosidade na mudança e randomização da fase na onda refletida ou transmitida, assim como avaliaram a atenuação induzida, ruído e os coeficientes de reflexão e transmissão presentes [63] [66], para propagação de ondas planas incidindo tanto de forma normal quanto em ângulos distintos de incidência [67] [68]. A atenuação induzida pela rugosidade da superfície da onda transmitida é menor que a do componente refletido e ligeiramente mais alta que a da reflexão na direção

oposta (reflexão sólido-líquido) [59] [66]. Como consequência, o efeito da rugosidade é mais severo para os testes de pulso eco, porém também pode afetar os resultados em testes de transparência. Em relação à morfologia do feixe, as variações de fase aumentam a divergência, tornando o feixe mais amplo quando comparado à transmissão por superfície lisa [66]. O efeito da rugosidade é mais proeminente para o caso de incidência oblíqua, comprometendo também o fenômeno de transmissão principalmente para o caso de transmissão de ondas cisalhantes [56].

Dadas estas possíveis mudanças no sinal causadas pela rugosidade, técnicas de caracterização e medição com base no domínio do tempo também podem ser afetadas, uma vez que pode haver perda de sinais difratados distintos, porém com propensão ao erro levemente menor [69] [70]. Desta forma, a escolha apropriada da frequência, da distância do transdutor à peça e do acoplante, associados a um processamento de sinais e algoritmos de temporização eficiente permitem contornar, mesmo que parcialmente, os efeitos negativos causados pela rugosidade e obter resultados acurados e precisos [65] [69].

## 2.4 Cálculo das Constantes Elásticas

A caracterização mecânica de materiais compósitos laminados através da estimativa de suas constantes de engenharia é uma etapa primordial para validar a utilização destes materiais em diversos projetos de engenharia. Fatores como dimensionamento de estruturas e carga máxima aplicável são altamente dependentes do cálculo preciso destas constantes. Seus valores podem inclusive se modificar ao longo do tempo pela atuação de agente degradante como penetração de fluidos ou radiação UV [5], reforçando a importância de monitoramento periódico das propriedades.

A inspeção ultrassônica em CFRP requer conhecimento teórico acerca da propagação ultrassônica e os efeitos da interação da onda sônica com a estrutura do material. A velocidade de propagação da onda depende da densidade do material, das constantes elásticas, da direção de propagação e de sua polarização. Uma caracterização completa de um compósito com dada simetria requer tantas medições de velocidades nas direções e polarizações adequadas quanto o material possui de constantes elásticas distintas. Esta abordagem exige amostras com área e espessuras consideráveis e com diversas orientações das fibras, o que pode ser uma tarefa complicada para compósitos laminados de fibra longa devido à natureza dos processos de confecção das amostras,

geralmente propício para amostras finas e com as fibras alojadas sempre paralelas ao plano de laminação. Dito isso, a melhor alternativa encontrada para gerar ondas em diferentes direções no material e com distintas polarizações foi a de testes realizados por imersão com ângulo de incidência variável.

Desde o início dos anos 70, técnicas de ensaios ultrassônicos, por seu caráter não destrutivo, são utilizadas como uma ótima alternativa para cálculo das constantes elásticas de materiais anisotrópicos [71]. Ao longo do tempo, esta metodologia foi se aprimorando, utilizando aparato experimental mais eficiente e preciso, utilizando ferramentas matemáticas mais adequadas e desenvolvendo processamento de dados que permitam extrair uma maior quantidade de informações úteis, chegando até a calcular as constantes elástica de uma lâmina individualmente a partir dos sinais temporais [53]. Desta forma, é de grande interesse entender os aspectos já desenvolvidos, averiguando as possíveis variáveis presentes de forma a buscar uma arquitetura de processos experimental e matemático que permita chegar a resultados mais verossímeis. Os valores das constantes obtidas podem ser comparados à testes de contato, testes mecânicos, estimativa de modelos teóricos e os dados fornecidos pelos fabricantes [72] .

#### 2.4.1 Modelos Teóricos para as Propriedades

Os valores de velocidade das ondas sônicas que se propagam em um compósito estão conectados diretamente a algumas propriedades mecânicas e constantes de engenharia. Desta forma, a estimação destas constantes por outra metodologia também possui exímia importância para gerar valores de comparação final, de modo a validar uma metodologia experimental e seu processamento de dados. Nesse cenário, utilização de modelos teóricos que permitam estimar as propriedades mecânicas de acordo com as propriedades das fases constituintes e de suas distribuições e percentuais volumétricos é uma ferramenta bastante poderosa dentro do ramo de compósitos. O processo mais comum é estimar as propriedades da camada principal via modelos micromecânicos e, em seguida, unificar todas as camadas em um corpo único de acordo com as orientações das camadas e modelos macromecânicos.

Assim sendo, alguns dos modelos que se destacam para o cálculo de constantes elásticas de uma lâmina em compósitos reforçados por fibra longa são as Regras das Misturas (Direta e Inversa) [73], Modelos de Hashin [33] [74], Eshelby [75], Nielsen [76], Mori-Tanaka [77], Chamis [78], Método Generalizado das Células (GMC) [79] e

homogeneização por elementos finitos [77], dentre os quais alguns permitem considerar a presença de vazios. Este tipo de modelagem pode ser utilizados tanto como base para buscar as propriedades do laminado ou como até mesmo no processo inverso, obtendo as propriedades da camada e dos componentes, conforme feito por Chu *et al* [74]. Dentre estes modelos, os mais populares, devido a sua simplicidade e efetividades são as Regras das Misturas, sendo amplamente utilizadas por diversos autores.

Outro fator importante é levar em consideração a porosidade visto que os valores de módulos elásticos (tensão, flexão, cisalhamento) geralmente decrescem com o aumento da porosidade, porém em graus distintos [80]. Uma revisão bastante informativa sobre o efeito dos vazios nas propriedades mecânicas de compósitos de fibra longa foi realizada por Mehdikhani *et al* [18]. Em geral, as propriedades com domínio da matriz (módulo de cisalhamento, módulo transversal, módulo de compressão) sofrem maior degradação, enquanto há menos mudanças para aquelas mais governadas pelas fibras (módulo longitudinal, coeficiente de Poisson). Todavia, em uma visão quantitativa, há variabilidade nos valores de mudança das propriedades devido à mudança de aspectos como morfologia, orientações, tamanhos, e distribuição espacial, que modificam a forma de atuação dos vazios no material sob cargas e tornam mais difícil uma modelagem unanimemente certa [81]. Outra constatação é de que o efeito dos vazios nas propriedades mecânicas é dissimilar para laminados com diferentes sequências de empilhamento, dada a mudança do grau de anisotropia do material e a mudança no grau de dependência da matriz para cada propriedade [82].

Mesmo com tais empecilhos, uma alternativa é associar a porosidade através dos módulos elásticos e de coeficiente de Poisson, de acordo com calibrações e modelos micromecânicos propostos por múltiplos autores. Se os poros forem de forma semelhante e distribuídos homogeneamente, é possível inclusive modelar uma expressão mais simples para as constantes elásticas. Muitos destes modelos avaliam os efeitos de cada fase e dos vazios de forma a encontrar propriedades de uma lâmina anisotrópica homogênea, sendo posteriormente capaz de fornecer estimativas dos resultados do teste ultrassônico. Dentre estes estão aqueles propostos por Hashin [83] [84], Reynolds *et al* [35], Eshelby com solução de Mori-Tanaka [85], Teoria de Boucher [35] e de Rubin-Jenara [86], que demonstram resultados coerentes.

Realizada as análises micromecânicas para cada lâmina, levando em conta os vazios ou não, são calculadas as propriedades globais do laminado, e sua matriz de

rigidez, de acordo com a sequência de empilhamento utilizando modelos macromecânicos. Dentre estes, o mais tradicional é a Teoria Clássica dos Laminados (CLPT), válida para laminados com finas camadas, em deslocamentos pequenos e sob o regime da mecânica linear elástica. Todavia, este modelo considera a interface como uma ligação perfeita e infinitamente pequena (não há espaço entre as camadas), não deformável por cisalhamento e forte, de forma a garantir a peça como algo único com propriedades integradas. Entretanto, estes requisitos são apenas ideais e nem sempre satisfeitos, principalmente observando a presença das interfaces ricas de resina entre as camadas principais, conforme apresentado na Figura 9. A consideração destas interfaces é importante, pois sua presença, assim como a modificação da sua espessura, pode obter influência em diversas propriedades mecânicas e nas configurações dos defeitos gerados, conforme estudo por Grande *et al* [87]. Caso estas interfaces tenham valor razoável, uma possibilidade é considera-las como lâminas isotrópicas elásticas, com propriedades próprias (propriedades da matriz) e inseri-las nos cálculos dos modelos, de forma análogo ao que foi realizado por Ishii *et al* [41] para modelagem de propagação sônica e por Tan *et al* [88] para modelagem mecânica.

#### 2.4.2 Princípio Ultrassônico Envolvido

Dentro de um meio de vibração livre, as forças de restauração inerciais e elásticas atuam sobre cada átomo componente da estrutura. A interação dessas forças produz movimentos oscilatórios de maneira análoga à vibração livre de um sistema macroscópico de massas e molas. Deste cenário emerge a Lei de Hooke, relatando uma relação linear direta entre as tensões e as deformações presentes dentro do limite linear elástico. Estas grandezas são relacionadas de acordo com as constantes elásticas do material, conforme descrito, pela notação de Voigt [89], na Eq. 6, onde  $\sigma_i$  se refere ao vetor das tensões,  $C_{ij}$  se refere a matriz de constantes elásticas do material e  $\varepsilon_j$  se refere ao vetor de deformações. O som é uma onda vibracional oscilatória que viaja através de um meio. A velocidade do som em um meio depende da rapidez com que a energia da vibração pode ser transferida através do meio, sendo, dentro do limite linear elástico, independente da amplitude.

$$\sigma_i = C_{ij}\epsilon_j$$

Eq. 6

Ao acoplar esta relação com a segunda Lei de Newton, é possível construir um modelo físico-matemático para descrever a propagação de ondas em sólidos. Como consequência, as velocidades de propagação das ondas sonoras em diversos eixos cristalográficos estão diretamente relacionadas com as constantes elásticas ( $C_{ij}$ ) e densidade do material ( $\rho$ ) [65]. Em geral, a equação para a velocidade de uma onda mecânica em um meio depende da raiz quadrada da força restauradora ou da propriedade elástica, dividida pela propriedade inercial. Todavia, esta relação pode assumir várias formas diferentes, dependendo do tipo de onda, da anisotropia do material, das direções de propagação e polarização e da estrutura do material, utilizando inclusive constantes diferentes. As propriedades elásticas do material geralmente associadas à propagação sônica e a mecânica linear elástica estão expostas na Tabela 1. Ao calcular a velocidade de uma onda longitudinal, o Módulo de Young e a Razão de Poisson são comumente usados, enquanto para ondas transversais o módulo de cisalhamento é utilizado.

Tabela 1 – Constantes de Interesse na mecânica linear elástica.

<b>Constantes de Interesse</b>	
<b>Módulo de Young (E)</b>	Proporcionalidade direta entre tensão uniaxial e deformação no mesmo eixo.
<b>Coefficiente de Poisson (<math>\nu</math>)</b>	Razão entre as deformações axial e transversal
<b>Módulo de Cisalhamento (G)</b>	Razão entre as tensões e deformações de cisalhamento.
<b>Módulo <i>Bulk</i> (K)</b>	Medida da incompressibilidade de um corpo sujeito a pressão hidrostática.
<b>Constantes de Lamé (<math>\lambda</math> e <math>\mu</math>)</b>	Constantes do material derivadas do módulo de Young e da razão de Poisson.

Tipicamente, as equações envolvidas neste processo utilizam grandezas tensoriais, as quais tem seu modo de atuação definido pelos seus índices  $ij$ , que indicam a direcionalidade da onda em relação à direção de deslocamento, ligada a direção de propagação, e ao tipo de atuação, ligado ao tipo de polarização. A partir dos valores das grandezas expostas na Tabela 1, e sabendo o grau de anisotropia relacionado ao material

é possível estimar as constantes elásticas. Em materiais isotrópicos, as constantes elásticas são as mesmas para todas as direções dentro do material. No entanto, para materiais anisotrópicos as constantes elásticas diferem em cada direção.

Conforme comentado anteriormente, os ensaios de ultrassom nos fornecem informações acerca da velocidade de propagação do som no meio, assim como também sobre a atenuação ocorrida. Neste enquadramento, alinhando estas informações com a base teórica que relaciona a velocidade de propagação com a matriz de rigidez do material e com conhecimentos sobre a microestrutura do material, é possível estimar o valor das constantes elásticas através do ensaio de ultrassom. Isto será explicado mais detalhadamente nas próximas seções.

Por consequência, modificações na estrutura ou em condições no material que acarrete em mudanças nas constantes ou da densidade pode ser detectada e ter seu grau quantificado por esta modalidade de ensaio perante calibração. Algumas destas mudanças presumivelmente avaliadas é o grau de cura da matriz [9] [90], no qual a quantidade de ligações transversais entre as cadeias poliméricas impacta diretamente sobre as informações de velocidade mensuradas. Analogamente, também são incluídos na lista de avaliação fatores como variação de temperatura ou ciclagem térmica, fadiga, absorção de umidade, radiação [91] [92]. Inclusive, devido ao efeito acústico-elástico, também é possível estimar as tensões estáticas às quais a estrutura é submetida [93] [94]. Essa mescla de possibilidades aumenta a versatilidade desta metodologia não destrutiva, tornando uma opção plausível para monitoramento estrutural em tempo real.

#### 2.4.3 Modelagem Matemática e a Equação de Christoffel

Visto que a propagação sônica ocorre de acordo com as interações elásticas da estrutura do material, é possível aplicar modelos da mecânica do contínuo elástica para associar as velocidades de fase ( $V_p$ ) da onda com as constantes de engenharia do meio homogêneo através da equação de Christoffel [22], representada na Eq. 7.

$$\left[ C_{ijkl} n_j n_k - \rho V_p^2 \delta_{il} \right] P = 0 \quad ; \quad P = \begin{bmatrix} P_1 \\ P_2 \\ P_3 \end{bmatrix} \quad \text{Eq. 7}$$

Nesta última  $C_{ijkl}$  é o tensor de rigidez elástica (que se torna de segunda ordem através da notação de Voigt [89]),  $\rho$  é a densidade do material,  $P$  é o vetor de polarização,  $\delta$  é o delta de Kronecker e  $n_j$  e  $n_k$  são componentes do vetor unitário que define a direção de propagação da onda. Para haver soluções não triviais, o determinante principal da Eq. 7 deve ser nulo. Isto caracteriza um problema onde os autovalores são relacionados à velocidade de fase e os autovetores à direção de polarização, sendo representado pela Eq. 8.

$$|C_{ijkl} n_j n_k - \rho V_p^2 \delta_{il}| = 0 \quad \text{Eq. 8}$$

Com a consideração de meios anisotrópicos efetivos, tem-se um único tensor de Christoffel para o meio efetivo em uma determinada frequência. Desta forma, sabendo os valores das velocidades do material e a densidade do mesmo, é possível estimar as constantes elásticas do laminado de forma não destrutiva utilizando metodologias numéricas de resolução de problema inverso. Definindo um novo termo  $\Gamma_{ij}$  para facilitar a representação, a Eq. 8 pode ser representada resumidamente como a Eq. 9 e matricialmente conforme a Eq. 10. Assim sendo, para um dado plano de propagação, as 3 velocidades que satisfazem a nulidade do determinante exposto solução da Eq. 10 estão relacionadas as ondas longitudinal, transversal rápida e transversal lenta, caracterizando um problema de autovalores.

$$\Gamma_{ij} = C_{ijkl} n_j n_k \quad ; \quad |\Gamma_{ij} - \rho V_p^2 \delta_{il}| = 0 \quad \text{Eq. 9}$$

$$\begin{vmatrix} \Gamma_{11} - \rho v^2 & \Gamma_{12} & \Gamma_{13} \\ \Gamma_{12} & \Gamma_{22} - \rho v^2 & \Gamma_{23} \\ \Gamma_{13} & \Gamma_{23} & \Gamma_{33} - \rho v^2 \end{vmatrix} = 0 \quad \text{Eq. 10}$$

A formulação de todos os componentes da matriz exposta na Eq. 10, incluindo os valores de  $\Gamma_{ij}$  para todas as combinações de índices em um laminado ortotrópico [1] estão expostas equações 11 a 16.

$$\Gamma_{11} = C_{11} n_1^2 + C_{66} n_2^2 + C_{55} n_3^2 \quad \text{Eq. 11}$$

$$\Gamma_{22} = C_{66} n_1^2 + C_{22} n_2^2 + C_{44} n_3^2 \quad \text{Eq. 12}$$

$$\Gamma_{33} = C_{55}n_1^2 + C_{44}n_2^2 + C_{33}n_3^2 \quad \text{Eq. 13}$$

$$\Gamma_{12} = (C_{12} + C_{66})n_1n_2 \quad \text{Eq. 14}$$

$$\Gamma_{13} = (C_{13} + C_{55})n_1n_3 \quad \text{Eq. 15}$$

$$\Gamma_{23} = (C_{23} + C_{44})n_2n_3 \quad \text{Eq. 16}$$

Os valores de  $n_j$  e  $n_k$  estão associados a direção de propagação do feixe sônico. Assim sendo, irão depender do plano de incidência do feixe durante o ensaio e do ângulo de refração do feixe na amostra, que está intimamente ligado com o ângulo de incidência pela Lei de Snell. Para o caso de compósitos laminados em testes sob imersão, basicamente ocorre propagação de ondas planas em dois planos: 1-3 e 2-3, considerando o plano 1-2 como o plano das lâminas e a direção 1 como a direção das fibras, conforme representado na Figura 14.

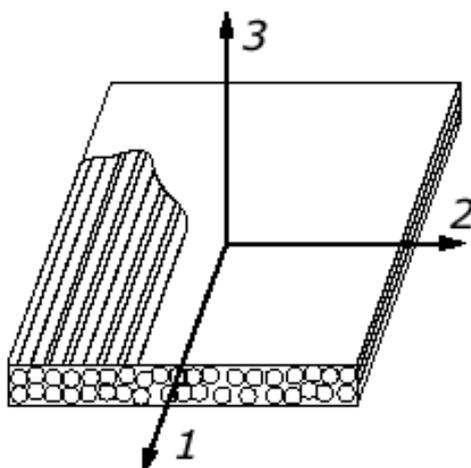


Figura 14 – Representação das direções principais em um compósito laminado.

### Plano 1 – 3

Para o caso do plano 1-3, a componente  $n_2$  é nula, fazendo com que os termos  $\Gamma_{12}$  e  $\Gamma_{23}$  sejam nulos e facilitando a expressão de forma a tomar a forma exposta na Eq. 17. Os valores de  $n_1$  e  $n_3$  se tornam dependentes do ângulo de propagação da onda na amostra ( $\theta_p$ ), se tornando  $n_1 = \sin \theta_p$  e  $n_3 = \cos \theta_p$ . Desta forma as grandezas  $\Gamma_{ij}$  envolvidas tomam a forma expostas nas equações 18 a 21.

$$\begin{vmatrix} \Gamma_{11} - \rho v^2 & 0 & \Gamma_{13} \\ 0 & \Gamma_{22} - \rho v^2 & 0 \\ \Gamma_{13} & 0 & \Gamma_{33} - \rho v^2 \end{vmatrix} = 0 \quad \text{Eq. 17}$$

$$\Gamma_{11} = C_{11} \text{sen}^2 \theta_p + C_{55} \cos^2 \theta_p \quad \text{Eq. 18} \quad \Gamma_{22} = C_{66} \text{sen}^2 \theta_p + C_{44} \cos^2 \theta_p \quad \text{Eq. 19}$$

$$\Gamma_{33} = C_{55} \text{sen}^2 \theta_p + C_{33} \cos^2 \theta_p \quad \text{Eq. 20} \quad \Gamma_{13} = (C_{13} + C_{55}) \text{sen} \theta_p \cos \theta_p \quad \text{Eq. 21}$$

Os valores das velocidades que satisfazem o determinante e estão associados as propagações das ondas presentes são representados nas equações 22 a 24, onde o primeiro se refere a velocidade da onda longitudinal, o segundo a onda transversal rápida e o terceiro a onda transversal lenta.

$$\rho V_L^2 = \frac{\Gamma_{11} + \Gamma_{33}}{2} + \frac{\sqrt{(\Gamma_{11} - \Gamma_{33})^2 + 4\Gamma_{13}^2}}{2} \quad \text{Eq. 22}$$

$$\rho V_{T1}^2 = \frac{\Gamma_{11} + \Gamma_{33}}{2} - \frac{\sqrt{(\Gamma_{11} - \Gamma_{33})^2 + 4\Gamma_{13}^2}}{2} \quad \text{Eq. 23}$$

$$\rho V_{T2}^2 = \Gamma_{22} \quad \text{Eq. 24}$$

### Plano 2 - 3

De forma análoga, a teoria é igual para propagação no plano 2-3, apenas com a modificação dos locais dos valores nulos, do vetor da direção de propagação e dos índices das componentes  $\Gamma_{ij}$  envolvidas. Para este caso, a componente  $n_1 = 0$ , fazendo com que os termos  $\Gamma_{12}$  e  $\Gamma_{13}$  sejam nulos e facilitando a expressão de forma a tomar a forma exposta na Eq. 25. Os valores de  $n_1$  e  $n_3$  se tornam dependentes do ângulo de propagação da onda na amostra ( $\theta_p$ ), se tornando  $n_2 = \text{sen} \theta_p$  e  $n_3 = \cos \theta_p$ . Desta forma as grandezas  $\Gamma_{ij}$  envolvidas tomam a forma expostas nas equações 26 a 29.

$$\begin{vmatrix} \Gamma_{11} - \rho v^2 & 0 & 0 \\ 0 & \Gamma_{22} - \rho v^2 & \Gamma_{23} \\ 0 & \Gamma_{23} & \Gamma_{33} - \rho v^2 \end{vmatrix} = 0 \quad \text{Eq. 25}$$

$$\Gamma_{11} = C_{66} \text{sen}^2 \theta_p + C_{55} \cos^2 \theta_p \quad \text{Eq. 26} \quad \Gamma_{22} = C_{22} \text{sen}^2 \theta_p + C_{44} \cos^2 \theta_p \quad \text{Eq. 27}$$

$$\Gamma_{33} = C_{44} \text{sen}^2\theta_p + C_{33} \text{cos}^2\theta_p \quad \text{Eq. 28} \quad \Gamma_{23} = (C_{23} + C_{44}) \text{sen}\theta_p \text{cos}\theta_p \quad \text{Eq. 29}$$

Os valores das velocidades que satisfazem o determinante e estão associados as propagações das ondas presentes são representados nas equações 30 a 32, onde o primeiro se refere a velocidade da onda quase longitudinal, o segundo a onda quase transversal rápida e o terceiro a onda transversal lenta (não observada para incidência em planos de simetria).

$$\rho V_L^2 = \frac{\Gamma_{22} + \Gamma_{33}}{2} + \frac{\sqrt{(\Gamma_{22} - \Gamma_{33})^2 + 4\Gamma_{23}^2}}{2} \quad \text{Eq. 30}$$

$$\rho V_{T1}^2 = \frac{\Gamma_{22} + \Gamma_{33}}{2} - \frac{\sqrt{(\Gamma_{22} - \Gamma_{33})^2 + 4\Gamma_{23}^2}}{2} \quad \text{Eq. 31}$$

$$\rho V_{T2}^2 = \Gamma_{11} \quad \text{Eq. 32}$$

#### 2.4.4 Relações de Simetria

A depender do tipo de simetria do material pode haver constantes e, consequentemente, velocidades que sejam iguais ou estejam diretamente relacionadas. Para os casos mais típicos de compósitos o material é transversalmente isotrópico (unidirecional) ou tetragonal ([0°/90°] e [0°/90°/45°/-45°]), para os quais as relações entre as constantes estão expostas na Tabela 2. A direção 1 é considerada como a direção de alinhamento das fibras e a direção 3 é tomada como a direção da espessura.

Nota-se que para o caso de simetria tetragonal, devido às igualdades de constantes presentes e a simetria presente em relação ao eixo 3, as medições realizadas com propagação sônica nos planos 1-3 e 2-3 são equivalentes, possuindo teoricamente os mesmos valores de velocidade e de ângulos críticos.

Tabela 2 – Representação das matrizes de rigidez ( $C_{ij}$ ) para laminados com tipos distintos de simetria.

Transversalmente Isotrópico (Simetria Hexagonal)						
$\begin{bmatrix} C_{11} & C_{12} & C_{13} = C_{12} & 0 & 0 & 0 \\ & C_{22} & C_{23} & 0 & 0 & 0 \\ & & C_{33} = C_{22} & 0 & 0 & 0 \\ & & & C_{44} = \frac{C_{22} - C_{23}}{2} & 0 & 0 \\ \text{Sim.} & & & & C_{55} = C_{66} & 0 \\ & & & & & C_{66} \end{bmatrix}$						
<b>5 Constantes Independentes</b>						
Simetria Tetragonal						
$\begin{bmatrix} C_{11} & C_{12} & C_{13} & 0 & 0 & 0 \\ & C_{22} = C_{11} & C_{23} = C_{13} & 0 & 0 & 0 \\ & & C_{33} & 0 & 0 & 0 \\ & & & C_{44} & 0 & 0 \\ \text{Sim.} & & & & C_{55} = C_{44} & 0 \\ & & & & & C_{66} \end{bmatrix}$						
<b>6 Constantes Independentes</b>						

#### 2.4.5 Metodologia Experimental

Para haver uma caracterização sônica completa do material é necessário aplicar diferentes tipos de onda em algumas direções específicas. Isto pode ser feito de formas distintas. Ensaio por contato são mais penosos, exigiram amostras com cortes e formatos muito específicos, presença de sapatas e ainda contam com a possibilidade de problemas de acoplamento devido a rugosidade, tornando-se impraticáveis para uma avaliação mais completa. Uma das formas mais efetivas de realizar este tipo de análise garantindo a existência dos tipos de onda exigidos é a utilização de ensaios por imersão com incidência oblíqua. Ondas sônicas ao incidirem de forma oblíqua em um material podem se decompor em 3 ondas distintas, sendo estas longitudinal, transversal rápida e transversal

lenta [35]. Visto que cada onda possui velocidade distinta, os seus ângulos de refração nas amostras também serão diferentes, assim como os 3 ângulos críticos de incidência [22]. Se a orientação e simetria da amostra são conhecidas, a direção do vetor de velocidade de fase pode ser determinada em relação à simetria do material. As direções de propagação de cada onda são regidas pela Lei de Snell (seção 2.1.3). Por isto, a variação do ângulo de incidência faz com que ondas decompostas sigam em diferentes direções na estrutura do material em velocidades distintas, gerando diferentes tempos de percurso sônico e permitindo mensurar suas componentes em múltiplas condições. Ao deixar o corpo de prova, as ondas cisalhantes se reconfiguram em longitudinais, porém com atraso em relação às ondas longitudinais originais. Paralelamente, à medida que ângulo de incidência se desvia da incidência normal em estruturas compostas, os sinais transmitidos podem ser distorcidos e sua amplitude de sinal transmitido pode diminuir acentuadamente [95].

Esta abordagem por imersão recebeu bastante atenção devido a suas vantagens como a ausência de problema de acoplamento por hora encontrado em inspeções por contato, possibilidade de gerar ondas com tipos diferentes e com diversas direções no interior da peça, potencial de automatização, medições diretas e utilização de apenas um (par, para transparência) transdutor, para o qual não é exigido movimentação angular. Assim sendo, conjuntos de testes baseados na rotação de diferentes planos do material em relação aos seus eixos principais visando estimar as velocidades principais são amplamente citados na literatura.

Neste cenário estão inclusas propostas de variadas metodologias experimentais utilizando sistemas, por vezes automatizados, de ultrassom. Os modos mais tradicionalmente utilizados neste tipo de avaliação são o pulso eco com reflexão após passar a amostra e o método de transparência. No primeiro método, a amostra é alocada entre um transdutor e uma parede refletora. O feixe sônico atravessa a amostra seguindo as leis de conversão de modo, reflexão e refração e chega a parede refletora. Posteriormente, ocorre a reflexão do feixe sônico na parede e retorno do mesmo para a amostra, onde este atravessa a amostra e retorna ao mesmo transdutor de onde foi originado. Com uma frequência de 5 MHz, Munoz *et al* [96] utilizaram este método para estimar as constantes elásticas de laminados CFRP unidirecionais de 2 mm de espessura com rotação dos planos de simetria. Os autores encontraram valores de propriedades mecânicas parcialmente correspondentes aqueles fornecidos por correlação digital de

imagem, ensaios mecânicos e modelos teóricos utilizados. Os autores ainda citam como empecilhos a alta atenuação envolvida no processo e descontinuidades nos valores de velocidade calculados, principalmente para as ondas cisalhantes, o que reforça a importância da aplicação de um método acurado e robusto para medição das velocidades. Um fator encontrado e também observado por outros autores [97] [98] [99] é a maior dificuldade de uma medição precisa das velocidades em regiões próximas ao primeiro ângulo crítico, devido a fenômenos como atenuação e sobreposição dos padrões de ecos presentes. Outros trabalhos onde esta metodologia foi utilizada foram desenvolvidos por Su *et al* [99], revelando compatibilidade os resultados experimentais de velocidade com valores estimados por simulação computacional, e também por Vishnuvardhan *et al* [98].

Já na técnica de transparência simples, a amostra é alocada entre 2 transdutores alinhados. O feixe sônico é gerado por um dos transdutores, atravessa a amostra seguindo os fenômenos de conversão de modo, reflexão e refração e posteriormente viaja até o segundo transdutor, que atua como receptor, de onde são extraídos os sinais a serem analisados. Meza *et al* [25] utilizaram esta metodologia para avaliar as propriedades mecânicas de laminados unidirecionais de fibra de carbono (1,85 mm de espessura) considerando a rotação de 2 planos de simetria. Os valores das propriedades encontradas foram bastante condizente com aqueles obtidos por ensaios mecânicos e encontrados por modelos teóricos. Os autores também ressaltaram que para a rotação em torno do eixo das fibras (rotação em torno do eixo 1) os valores das velocidades longitudinal e transversal não modifica com a mudança do ângulo de incidência. Enquanto isso, os valores de velocidade para rotação em torno do eixo normal as fibras (rotação em torno do eixo 2) depende do ângulo de incidência, com grande e repentino aumento do valor de velocidade longitudinal próximo ao primeiro ângulo crítico. Os resultados obtidos são apresentados na Figura 15. Outros autores também obtiveram sucesso na extração das constantes elásticas de materiais compósitos utilizando esta metodologia [97] [100] [101] [102]. Reddy *et al* [72] utilizaram ambas as metodologias experimentais para avaliar laminados unidirecionais de fibra de carbono de espessura de 2,16 mm e laminados unidirecionais de fibra de vidro com espessuras de 10,8 mm e 4,02 mm. Os valores das constantes obtidas demonstraram compatibilidade com aqueles obtidos em medições por contato e também pela regra das misturas considerando informações fornecidas pelo fabricante. Além disso, os autores ressaltaram a rapidez do processo como um todo, com obtenção das constantes elásticas em menos de 30 minutos, com planejamento de melhorias para realização em até 5 minutos.

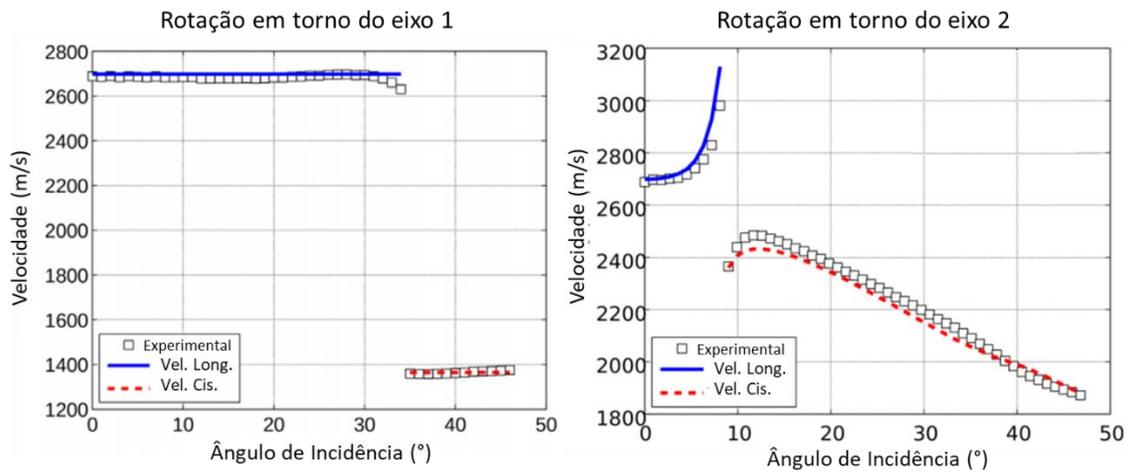


Figura 15 – Resultados dos valores de velocidades sônicas obtidos por Meza *et al* [25] para ensaio de transparência por imersão considerando rotação em torno de 2 eixos distintos.

Outros estudos utilizaram outras metodologias como técnica acusto-ultrassônica (*acoustoultrasonic*) [103], ultrassom a laser [104] e sistemas por transparência avaliando reflexões múltiplas [105], todavia exigem equipamentos específicos ou desenvolvimento numérico mais complicado, não sendo metodologias difundidas na literatura. Os exemplos de metodologias mais utilizadas na literatura, já discutidos nesta seção, são expostas na Figura 16. Uma excelente revisão sobre as metodologias utilizadas e seus principais aspectos e aplicações foi realizada por Paterson *et al* [106]. Um fato de interesse é que a grande maioria dos autores realizaram experimentos utilizando laminados unidirecionais com rotação em torno de 2 de seus eixos principais, deixando uma lacuna para a avaliação de laminados com distintos tipos de empilhamento tais como  $[0^\circ/90^\circ]$  e  $[0^\circ/90^\circ/+45^\circ/-45^\circ]$ .

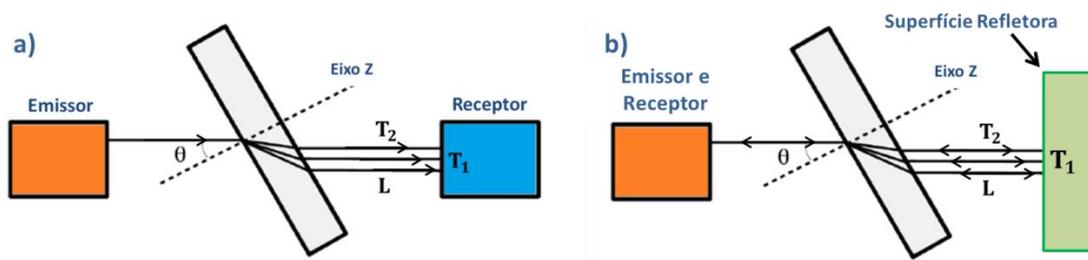


Figura 16 – Metodologias mais utilizada para análise de velocidades sob vários ângulos de incidência: a) Transparência clássica em imersão; b) Pulso-Eco com reflexão após transpassar a amostra.

Dentre as metodologias citadas, o método de transparência tradicional imerso em água tem recebido bastante destaque devido a algumas vantagens como possuir requisito menos rigoroso para normalização do feixe ultrassônico no plano superficial, menor percurso altamente atenuativo, menor suscetibilidade ao ruído estrutural e redução da interferência do espalhamento do sinal causado por heterogeneidades [101]. Como extra, conforme citado na seção, o uso dos ângulos críticos pode ser acoplado a essa metodologia para que, através da Lei de Snell, mais velocidades e constantes possam ser calculadas [107]. Todavia, existem alguns desafios a serem contornados tais como resquícios de ruído estrutural, possibilidade de dispersão de velocidades, interferências, alta atenuação para amostras espessas e translação da linha de energia do feixe.

A alta atenuação em materiais compósitos é, provavelmente, o problema experimental mais relevante, sendo um fator chave na escolha das configurações do ensaio. Além das baixas amplitudes obtidas na recepção, a forte atenuação em altas frequências distorcem a forma de onda. Esse fenômeno dificulta a comparação das ondas no cálculo dos atrasos temporais. Por isto, erros significativos podem ser induzidos à medida que a frequência e a espessura da amostra aumentam. Feito na frequência adequada, o ensaio ultrassônico fornece tipicamente bom compromisso entre penetração, sensibilidade e resolução temporal. Todavia, a atenuação sônica cresce à medida que a frequência aumenta, ao mesmo tempo que este aumento também conduz a uma melhora da resolução temporal. Dessa forma, estruturas mais espessas requerem o uso de frequências menores, o que acaba tendo efeitos colaterais na redução da sensibilidade e aumento do ângulo do feixe sônico, forçando os usuários a otimizar essa compensação através da alocação da amostra em local adequado. Assim sendo, extensão da faixa espectral é limitada por um mínimo de acordo pela espessura da amostra para evitar uma sobreposição muito apertada dos sinais e por um máximo que evite alta atenuação de forma a tornar os sinais fracos e de difícil processamento. Este cenário de alta atenuação pode inclusive afetar a aplicação de metodologias convencionais de medição de velocidades com base na correlação cruzada e na transformação de Hilbert, e tornam mais complicada a identificação de uma metodologia adequada para o cálculo do atraso no tempo (seção 2.4.6) [108]. Além disso, apesar da simplicidade experimental da técnica, existem fontes potenciais de erro ao medir as velocidades. Atenção deve ser dada ao paralelismo das faces da amostra, gradientes de temperatura, dispersão de velocidade,

difração acústica, precisão na fixação da amostra, alocação dos transdutores, entre outros [108].

Os compósitos são geralmente fabricados como estruturas semelhantes a placas. Essa geometria pode apresentar um problema para medições de propriedades no plano, dado que a incidência exatamente no plano da espessura não é trivial. Dessa forma as possibilidades abrangem tentativas mais tradicionais de incidência de forma normal ao plano da espessura posicionando a amostra na zona focal para o caso de amostras não tão finas, ou utilizar os valores dos ângulos críticos para cada tipo de onda. Uma vez que acima do ângulo crítico a propagação ocorre no plano do laminado, o seu valor pode fornecer informações sobre as velocidades do plano para as ondas correspondentes.

Em um cenário ideal, considerando todas as ondas esperadas, seus ângulos críticos e utilizando 2 planos distintos de rotação, o método de imersão é capaz de medir todas as 5 constantes elásticas características para amostras unidirecionais (transversalmente isotrópico), as 6 constantes elásticas características a amostras com simetria tetragonal ( $[0^\circ/90^\circ]$  e  $[0^\circ/90^\circ/+45^\circ/-45^\circ]$ ), sete das nove constantes elásticas de compósitos ortotrópicos, e até mesmo todas as 9 se estiver associado a medições de contato em uma direção específica ou a medidas com incidência fora dos planos de simetria [72] [109]. Todavia, nem sempre o cenário é ideal. Alguns autores reportam que, para testes em amostras CFRP com rotação em torno do plano de simetria, a onda cisalhante mais lenta não foi detectada [108] [110], diminuindo um pouco a gama de respostas do ensaio e exigindo por ora testes extras por contato ou utilização de modelos teóricos para estimativa das constantes que não puderam ser estimadas.

#### 2.4.6 Cálculo das Velocidades

Os cálculos acurados e reprodutivos das velocidades são de extrema importância na reconstrução de constantes elásticas [111]. Este procedimento pode ser realizado de diversas maneiras, abrangendo métodos tanto no domínio do tempo como no domínio da frequência, muitas vezes sendo acoplado a técnicas de processamento de sinais para facilitar a seleção dos parâmetros corretos e evitar ambiguidades. Para o caso do domínio do tempo, uma etapa crucial neste processo é a medição da diferença de tempo associada aos percursos comparados no processo, sendo inclusive normatizado para ensaios pulso-eco (ASTM E494) [112]. Para tal, uma boa precisão no processo é exigida visto que

pequenos erros nesta estimativa podem acarretar em considerável falta de acurácia no cálculo da velocidade e, conseqüentemente, das constantes elásticas. Considerando a possibilidade de sinais complexos relacionados a inspeção em compósitos, foram propostas diversas metodologias para esta quantificação tais como associação dos máximos dos picos [5] [113], associação dos máximos dos envelopes do sinal [110] [114], correlação cruzada [5] [102] [114] [115], tempo de chegada a determinado limiar da amplitude normalizada [5] [114] [116], Zero Crossing [109] [117] e transformada de Hilbert [5] [116] [118]. Naturalmente, cada um destes fornece resultados e graus de precisão e de acurácia diferentes, que se propagam até o cálculo final das velocidades e constantes elásticas.

Métodos utilizando amplitude máxima de picos podem fornecer resultados ambíguos devido a efeitos de distorção, mudança de fase e atenuação do feixe sônico, principalmente para sinais com múltiplos picos [116]. Audoin e Roux [118] mostraram que o método utilizando transformada de Hilbert oferece uma boa resolução em relação a sobreposição, permitindo, sob as mesmas condições experimentais, trabalhar com uma frequência mais baixa e, portanto, se desviar menos das hipóteses de meio homogêneo equivalente. Por ser altamente dependente da forma do pulso, a correlação cruzada é menos influenciada por ruído aleatório [119], mas também pode gerar resultados com menor precisão e até descontínuos [108], principalmente para materiais mais heterogêneos ou rugosos, onde há maior distorção da forma do pulso sônico [114]. Já os métodos baseados em detecção de máximo de envelope e tempos de chegada a um limiar dependem de uma alta relação sinal ruído, mas são menos dependentes da forma do pulso [69]. Alguns trabalhos observaram que algoritmos baseando em chegada a limiares próximos de picos tais como o *Zero Crossing* (ponto entre os dois primeiros picos onde o sinal cruza o zero) e tempo de chegada a limiar da amplitude normalizada obtiveram maior sucesso e precisão devido a maior estabilidade do ponto de início do pulso [69] [108] [120]. Jarvis e Cegla [114] investigaram a estabilidade de três algoritmos de cronometragem comumente usados para extrair medições de espessura de parede. Verificou-se que a estimativa da espessura da parede muda significativamente para diferentes instâncias de uma superfície rugosa, com valores diferentes para cada método. Concluiu-se que o *Zero Crossing* foi mais estável sob condições de rugosidade crescentes do que aqueles baseados no formato do pulso. Em alguns artigos, certos métodos inclusive causaram discontinuidades nas sequências de valores de velocidade para distintos

ângulos de incidência devido a imprecisão de pontos de referência para a medição [108] [113].

Outros estudos, tais como Caistaings [121], Hsu *et al* [29] e Holmman *et al* [122] propuseram a medição de velocidade através da análise de Fourier com incidência em diversos ângulos, utilizando informações de toda a onda. Caistaings utilizou a razão entre os espectros de saída e o de referência, enquanto Holmann [122] baseou-se no coeficiente angular do espectro de fase em relação a um sinal de referência. Em particular, os resultados de velocidade para ondas transversais exibiram menor variação com este método quando comparados a superposição de máximo dos ecos. Outra possibilidade relativamente simples de estimar algumas velocidades é baseada na Lei de Snell através da observação de ângulos críticos de incidência do feixe sônico [22], principalmente para valores de velocidades no plano do laminado. Isto é reforçado por Paterson *et al* [97], que encontraram uma compatibilidade entre a velocidade da fase determinada pelo ângulo crítico e técnicas de transmissão por imersão.

Assim sendo, existe uma boa gama de possibilidades a serem aplicadas para cálculo das velocidades. A escolha do método e dos parâmetros deve ser minuciosa e é diretamente relacionada ao objetivo da análise, à espessura da amostra, à frequência utilizada, ao procedimento experimental e à influência das heterogeneidades no sinal adquirido, levando em conta tanto ruído aleatório como sistemático.

#### 2.4.7 Problema Inverso e Algoritmos Utilizados

A etapa final do processo baseia na transformação dos valores de velocidades de fase calculadas para diversos ângulos em valores formais das constantes de engenharia baseado nas premissas representadas pela equação de Christoffel. A maioria das constantes é calculada pelas medições de ondas cisalhantes e longitudinais pelo teste de incidência oblíqua rotacionando as amostras em dois eixos (1 e 2), enquanto outras são calculadas por condições invariantes de combinação linear [109]. Dado o conjunto de valores de velocidade, diversas ferramentas matemáticas de ajuste não-linear podem ser utilizadas para realizar a reconstrução das constantes elásticas. Isto é feito ao garantir a maior correspondência possível entre os valores experimentais e valores candidatos, de forma a minimizar o erro quadrático total e satisfazer da melhor forma as equações regentes do modelo físico (Seção 2.4.3). Este erro quadrático total é geralmente mensurado pelo somatório do quadrado das diferença entre os valores candidatos e os

valores experimentais para as velocidades sônicas ou números de onda [52], levando em conta todos os ângulos de incidência para um determinado tipo de onda. A correspondência é maior quanto menor o valor da expressão do erro [102], sendo os valores candidatos das constantes elásticas equivalentes aos valores experimentais para o caso onde o valor do erro quadrático total é mínimo.

Neste tipo de situação, o problema inverso é altamente não linear devido à presença de termos trigonométricos e raízes (seção 2.4.3), portanto, analiticamente intratável, o que exige o uso de metodologias de otimização iterativas. Por isto, diversos algoritmos de otimização foram utilizados. Dhamen *et al* [123] utilizaram a metodologia de máxima descida em um algoritmo desenvolvido no software MATLAB. Todavia, o processo exigiu a definição de gradientes de diversos termos não-lineares, tornando a implantação do código matematicamente custosa e passível de erros. Wolf [124] desenvolveu um algoritmo em FORTRAN para reconstrução das constantes elásticas de materiais ortotrópicos baseada na metodologia LSQSDN (Gauss-Newton Corrigido), todavia a metodologia também se mostra de implementação dispendiosa. Wang *et al* [53] utilizaram o algoritmo de Levenberg-Marquardt para reconstrução das constantes utilizando dados simulados baseados na teoria de propagação das ondas *Floquet*, relatando robustez do algoritmo com variações nas constantes menores que 1 % mesmo para um espalhamento de 5% nos valores de velocidades. Nesta vertente outras metodologias foram utilizadas por diversos autores tais como Newton Ramphson [115], Nelder-Mead Não-Linear [105], recozimento simulado [99], BFGS [117]. Devido a sua facilidade de uso e alta difusividade na comunidade científica, soam também como uma opção atrativa o uso de funções pré-definidas de ajuste não linear de softwares como o MATLAB, que utiliza a técnica de Levenberg-Marquardt, e o EXCEL, que utiliza a técnica de Gradiente Reduzidos Generalizados. Neste caso exige-se apenas a definição da função avaliada, os dados a serem ajustados, os limites dos valores finais e o valor final do algoritmo, tornando o uso facilitado e sem exigências de desenvolvimento de códigos dispendiosos.

Uma abordagem direta ao problema da reconstrução do módulo de elasticidade é medir diretamente o número mínimo de velocidades de onda independentes necessárias e resolver o sistema resultante de equações não lineares para as constantes desejadas. No entanto, para reduzir o efeito do erro experimental e do ruído aleatório nos valores de velocidade encontrados nessas medições, geralmente usa-se um número de medições que

excedam o mínimo necessário, resolvendo o sistema sobredeterminado [71] [125]. Algoritmos diferentes podem ser utilizados em sequência e em etapas para criar chutes iniciais melhores para o próximo algoritmo, de forma a garantir convergência mais certa e buscar valores mais fidedignos [117].

As medidas podem ser realizadas tanto em planos simétricos como em planos não simétricos. Ao utilizar algoritmos de mínimos quadrados não-linear com métodos determinísticos, Chu *et al* [125] [126] demonstraram que quando todas as constantes elásticas são reconstruídas a partir de dados de velocidade em planos não simétricos, a inversão é altamente dependente das suposições iniciais e suscetível à dispersão aleatória de dados, sendo também altamente não-linear comparada as análises em planos de simetria. Por outro lado, enquanto 7 das 9 constantes elásticas de um laminado ortotrópico são encontradas a partir de dados de velocidade em planos de simetria, as duas restantes ( $C_{12}$  e  $C_{66}$ ) podem ser encontradas a partir de dados de plano não simétrico, em um processo de inversão de duas etapas com valores finais das constantes independentes de estimativas iniciais e de níveis de dispersão. Isso é especialmente importante, pois as constantes elásticas  $C_{12}$  e  $C_{66}$  não podem ser determinadas a partir de medidas de velocidade em dois planos acessíveis de simetria.

A diferença observada em relação à importância da suposição inicial ocorre porque as técnicas de otimização baseadas em gradiente (baseadas no algoritmo de Newton) possivelmente causam aprisionamento em mínimos local para suposições iniciais que não estão próximas do mínimo global, fato agravado quanto mais longe da linearidade o problema está. Assim sendo, em casos de alta não-linearidade estas metodologias exigem um bom chute inicial para garantir convergência para os valores ótimos reais [102]. Uma boa possibilidade de valor inicial para a matriz de rigidez é obtida pelos modelos mecânicos empregados em compósitos [53]. Em outro estudo, Chu *et al* [127] focaram na avaliação de parâmetros de algoritmo de otimização por mínimos quadrados não-linear, observando que os valores obtidos não foram afetados pela suposição inicial da velocidade para o caso de incidência nos planos de simetria 1-3 e 2-3 (Figura 14). O procedimento de inversão mostrou-se muito robusto contra dispersão aleatória e excelentes resultados foram obtidos mesmo com dispersão de 5%. Uma outra possibilidade é utilizar os planos de simetria dentro de um material transversalmente isotrópico e a abordagem de ângulo crítico, que permitem a recuperação direta de alguns componentes da matriz de rigidez, para dividir o processo de recuperação da matriz de

rigidez em etapas para reduzir a complexidade do processo e aumentar a precisão da solução [116].

Métodos heurísticos como os algoritmos genéticos, ou algoritmos evolutivos, também surgem como opções bastante promissoras na busca de máximos ou mínimos globais em problemas não lineares, se mostrando de boa robustez em relação ao ruído dos dados. Por não serem técnicas baseadas em gradiente, não são necessárias suposições iniciais de valores próximos ao valor real. Além disso, o desenvolvimento do algoritmo começa a partir de um conjunto de pontos no espaço de pesquisa em vez de um único ponto. Apesar das vantagens, seu desempenho próximo à solução global parece ser relativamente impreciso quando comparado às técnicas convencionais baseadas em gradiente. Embora possa não chegar a um valor exato da solução, chega-se muito próximo, possivelmente exigindo a complementação de uma técnica tradicional. Assim sendo, estudos [98] [128] utilizaram desta metodologia para calcular as 9 constantes associadas ao laminado ortotrópico a partir de experimentos rotatórios com incidência em planos não simétricos como também em planos de simetria. O método demonstrou boa aplicabilidade, inclusive para dados de velocidades ruidosos (até 10%), entretanto, exigiu o desenvolvimento de códigos algoritmos trabalhosos, incluindo a transformação dos valores das constantes em códigos binários [98]. Analogamente ao que ocorre para os métodos determinísticos, uma alternativa interessante, dada a sua facilidade de uso e difusividade no ramo científico e industrial, é a utilização do software EXCEL, que possui um *solver* não-linear predefinido baseado em um algoritmo evolutivo, tornando o processo mais simplificado e de maior abrangência para o público geral.

## 2.5 Considerações Finais sobre a Revisão bibliográfica

A medição de constantes elásticas de materiais compósitos por testes de contato exige a utilização de diversas amostras com cortes em planos e direções específicas, o que se caracteriza como uma tarefa árdua, custosa e dispendiosa. Por isso, a estimativa das constantes elásticas por ensaios de imersão considerando diversos ângulos de incidência do feixe sônico se torna uma prática comum e atrativa, sendo desempenhada por diversos autores. Dentro deste contexto, algumas das observações acerca de etapas do processo, bem como possíveis fatores que influenciam a propagação sônica, foram

destacadas pela bibliografia e discutidos na revisão bibliográfica. A seguir são destacados os principais pontos:

- Foram apresentados conceitos fundamentais sobre aspectos da propagação ultrassônica e incidência oblíqua entre meios distintos. A partir disto, destaca-se a importância da realização das medidas com a amostra no campo distante, onde ocorre uma frente de onda mais definida, de forma a garantir um sinal de melhor qualidade e de mais fácil interpretação.

- A manufatura de compósitos pré-impregnados (*prepregs*) gera defeitos intrínsecos ao material e que podem influenciar o processo de propagação sônica, tais como a rugosidade superficial e a presença de porosidade. Por isto, foram apresentados estudos que avaliam a influência de cada uma destas variáveis no processo de inspeção por ultrassom para extração de propriedades do material [30] [29] [32] [35] [36] [37] [57] [63] [65]. Neste contexto, torna-se importante a avaliação destes fatores de forma a averiguar o grau de influência no resultado final observado, realizando também análises comparativas entre as amostras. Isto é importante pois, ao avaliar tipos distintos de laminado, torna possível avaliar se qualquer diferença observada nos resultados se devem a diferenças apenas no tipo de laminado avaliado ou se pode haver uma interferência destes defeitos intrínsecos, que podem variar de magnitude entre as amostras. Paralelamente, torna-se importante esta averiguação de defeitos intrínsecos para confirmar que os valores estão na faixa de normalidade esperada para o material, o que valida comparações com modelos teóricos e com a literatura.

- A propagação sônica em meios estratificados periódicos é modelada através das ondas *floquet* [47], sendo estas combinações lineares de frentes de onda com direções distintas. Todavia, a depender da frequência utilizada e da célula unitária do material a propagação pode ocorrer de forma homogênea, de forma, como se ocorresse em um material não estratificado [50] [51]. Esta consideração é importante para garantir a medição de velocidades sônicas relacionadas ao material como um todo, sendo requisitos para o cálculo apropriado das constantes elásticas [53]. Caso a condição de homogeneização não seja satisfeita, ocorrem bandas de transmissão e de parada, gerando um perfil irregular do coeficiente de transmissão podendo inclusive levar ao cálculo de valores de velocidades incorretos [55].

- É vantajosa a obtenção de valores das constantes elásticas por outras técnicas para que se tenha uma base de comparação com os valores extraídos pela técnica de ultrassom. Uma prática comum é a utilização de modelos teóricos para esta estimativa, com o cálculo baseada nas propriedades mecânicas de cada componente para o cálculo das propriedades da lâmina e, posteriormente, do laminado. Diversos modelos foram propostos, considerando ou não a presença de porosidade, dentre os quais se destacam as Regras das Misturas Direta e Inversa devido a sua simplicidade, sendo bastante difundida e utilizada na literatura.

- A bibliografia ressalta a presença das interfaces ricas em resina entre as camadas principais dos compósitos, avaliando sua influência na modelagem da propagação sônica e indicando a possibilidade de considera-las como uma parte independente no momento do cálculo das constantes elásticas, possuindo espessura e propriedades mecânicas próprias (sendo as propriedades da resina) [41] [88].

- Dentre os métodos experimentais citados na bibliografia destacam-se o método de transparência clássico com amostra rotatória, onde são utilizados dois transdutores (um emissor e um receptor), e o método de pulso-eco com reflexão após passar a amostra rotatória, onde é utilizado apenas um transdutor (que é emissor e receptor). O método de transparência simples tem como vantagem a menor atenuação do sinal sônico, o que é vantajoso principalmente para amostras mais espessas.

- Existem diversas opções de métodos de processamento de sinais para a medição das velocidades sônicas, com destaque para o *Zero-Crossing* [109], associação de máximas de picos [5], associação de máximo de picos de envelopes [114], transformada de Hilbert [116], métodos baseados em chegada em determinado limiar da amplitude [114] e métodos baseados no espectro de Fourier [122]. Paralelamente, é citada uma limitação da metodologia de correlação cruzada devido a possibilidade de distorção do feixe devido a propagação em material heterogêneo [119]. Com uma ampla gama de métodos de medição de velocidades existente, torna-se interessante a aplicação de alguns distintos para uma análise comparativa do seu desempenho e acurácia perante os sinais adquiridos.

- O processo de ajuste não-linear realizado para estimar as constantes elásticas através do conjunto de velocidades sônicas, baseado na Equação de Christoffel, pode ser realizado por uma ampla gama de metodologias matemáticas, englobando métodos determinísticos, que utilizam gradientes, e heurísticos. Devido a sua modelagem já pronto, o uso de

softwares comerciais como o MATLAB e o EXCEL aparecem como opções vantajosas para tal ajuste, possibilitando uma análise rápida e utilizando ambos os tipos de metodologias, as quais podem ter o desempenho comparado para o mesmo conjunto de dados. Além disso, aspectos sobre a influência dos valores iniciais citados na bibliografia [125] [126] [127] reforçam a importância de uma análise de sensibilidade dos algoritmos utilizados em relação aos valores iniciais escolhidos para o caso de metodologias determinísticas.

- Devido a sua ampla gama de utilização, a maioria dos trabalhos de caracterização das constantes elásticas ocorre em amostras unidirecionais, com poucos exemplos abordando outros tipos de sequência de empilhamento. Assim sendo torna-se interessante preencher esta lacuna deixada pela literatura, utilizando outras sequências de empilhamento também utilizadas na indústria, tais como a  $[0^\circ/90^\circ]$  e a  $[0^\circ/90^\circ/+45^\circ/-45^\circ]$ .

Dada a importância tecnológica deste tipo de análise em compósitos reforçados por fibra de carbono (CFRP) e os aspectos citados nos tópicos acima, este trabalho visa propor uma sequência metodológica que permita estimar o conjunto de constantes elásticas de 3 tipos de laminados amplamente utilizados na indústria. Para isto, experimentos utilizando a técnica de ultrassom de transparência com incidência oblíqua sob a amostra em diversos ângulos de incidência são executados. Em seguida, o cálculo das constantes ocorre a partir de duas metodologias complementares. Primeiramente, extrai-se o valor da primeira constante elástica com base nos valores dos ângulos críticos das ondas longitudinais. Já os valores das outras constantes calculáveis são estimados a partir de ajuste não-linear de parâmetros de equações que envolvem os valores de velocidade obtidos nos experimentos, seguindo um modelo físico estabelecido. Para averiguar os resultados, os valores das constantes obtidas experimentalmente são comparados a valores calculados com base em modelos teóricos associados a dados obtidos por caracterização do material. Ademais, busca-se discutir as peculiaridades e limitações de cada etapa do processo e de cada laminado utilizado, visando maior entendimento dos fenômenos presentes e dos resultados adquiridos. Alternativas para alcançar melhores resultados, buscando preencher as lacunas deixadas pela literatura, também são apresentadas.

### 3 Materiais e Métodos

#### 3.1 Corpos de Prova

As amostras utilizadas nas diversas análises deste trabalho são retiradas de placas de compósitos laminados pré-impregnados (*prepregs*) de resina epóxi do tipo reforçada por fibra de carbono de alta resistência. Para satisfazer um intervalo no qual estão as aplicações mais frequentes deste tipo de material e também utilizar uma faixa de espessura pouco abordado na literatura, os corpos de prova possuem espessura de cerca de 7 mm. Assim sendo, cada placa é formada por 24 camadas empilhadas de forma simétrica em relação ao plano médio da espessura, havendo 3 sequências de empilhamento distintas que são corriqueiramente utilizadas na indústria. Estas configurações de empilhamento são reportadas na Tabela 3. É esperado que este material possua um volume de fibras próximo a 60% [129].

Na Tabela 3, para cada laminado, a sequência de ângulos entre colchete representa um período da sequência de empilhamento do laminado, sendo a sequência completa formada por vários períodos. Cada ângulo representado indica a direção das fibras de cada camada em relação a uma direção principal específica e fixa. Já o *s*, localizado fora dos colchetes, significa que o laminado é simétrico, ou seja, possuem sequências de direções que são espelhadas em relação a um plano central. O número anterior ao *s* denota a quantidade de períodos de empilhamento presentes até o plano médio. Assim sendo o número total de camadas de um laminado pode ser calculado pelo dobro (devido a simetria do laminado) do produto do número de direções distintas presentes no período com o número de períodos de direções presentes até o plano médio. Por exemplo, para o laminado  $[0^\circ/90^\circ/+45^\circ/-45^\circ]$ , existem 4 direções no período de empilhamento e 3 períodos até alcançar o plano médio, fornecendo um total de 24 camadas ( $2 \times 4 \times 3$ ).

Tabela 3 – Amostras utilizadas para os ensaios de ultrassom.

Estruturas de CFRP utilizadas		
Laminado 1	Laminado 2	Laminado 3
$[0^\circ]_{12s}$	$[0^\circ/90^\circ]_{6s}$	$[0^\circ/90^\circ/+45^\circ/-45^\circ]_{3s}$

## 3.2 Caracterização Estrutural

### 3.2.1 Medição de Densidade

Visto que o valor da densidade do material avaliado é uma das propriedades a serem utilizadas no modelo físico que estima as constantes elásticas a partir dos valores de velocidade, a sua determinação de forma acurada é um fator chave em todo o processo. Para tal, três amostras com formato aproximadamente de quadrado foram cortadas das zonas extremas das três placas principais e tiveram suas larguras, comprimentos dimensionadas com paquímetro, enquanto as espessuras foram quantificadas com auxílio de um micrômetro. As medidas foram realizadas, em 10 pontos distintos destas dimensões, de modo a obter um valor médio e seu desvio padrão. Em seguida as amostras foram pesadas em balança de precisão. Considerando a razão valor da massa mensurada nesse processo e o volume da amostra, calculado com base nos valores das três dimensões espaciais, estima-se a densidade aparente das 3 arquiteturas de material laminado ao calcular a razão entre a massa e o volume das amostras. As amostras utilizadas para a medição de densidade estão expostas na Figura 17.

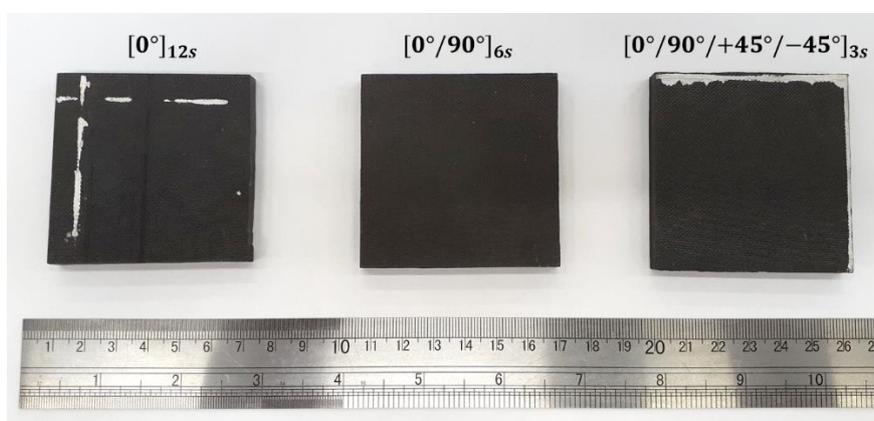


Figura 17 – Corpos de prova utilizados para medição da densidade do material.

### 3.2.2 Micrografia em Microscópio Eletrônico de Varredura

Com o objetivo saber o valor da espessura das camadas componentes do material, das zonas de resina intercamadas e estimar o percentual volumétrico de fibra e matriz, foram realizadas micrografias da seção transversal de todos os laminados utilizados. Para tal, foram cortados pequenos pedaços da estrutura (30 mm x 30 mm x 7 mm), as quais

tiveram as laterais polidas por uma sequência de lixas com granulometria de 400, 600 e 1200. Suas faces foram observadas em Microscópio Eletrônico de Varredura (MEV) de Ultra Alto Vácuo TESCAN. As imagens foram adquiridas em aumentos de 30x, 200x, 500x e 2000x. A microscopia eletrônica de varredura foi utilizada para garantir imagens de qualidade das diferentes fases presentes na estrutura do compósito (fibra e matriz), o que é de mais difícil obtenção com microscopia óptica para o caso de compósitos de fibra de carbono. As amostras utilizadas na análise por microscopia eletrônica são apresentadas na Figura 18 .

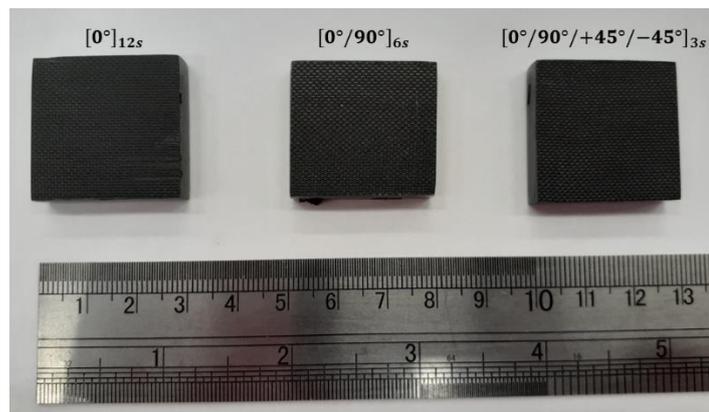


Figura 18 – Amostras utilizadas para análise em MEV.

A técnica de medição da espessura das interfaces ricas em resina é semelhante à realizada por Fritz [130], com algumas mudanças e adaptações. Com as imagens obtidas, o dimensionamento das espessuras das interfaces de resina foi realizado através de procedimento envolvendo seleção de zonas de interesse retangulares que contêm as partes a serem mensuradas. Com a zona de interesse devidamente selecionada, realizou-se ajuste de contraste, binarização da região de interesse, cálculo da área total referente a um dos estados binários ( $\mu\text{m}^2$ ) e divisão do valor de área encontrado pelo comprimento da zona de interesse (em  $\mu\text{m}$ ), selecionada de forma a calcular um valor médio de espessura para cada região selecionada. Todas as etapas são realizadas no software MATLAB. Este processo, exemplificado na Figura 19, é realizado ao menos 30 vezes por imagem selecionando regiões distintas ao longo da extensão do componente dimensionado na imagem. Os valores da média considerando todas as regiões de interesse foi considerada como o valor final da grandeza para a imagem analisada, processo que também gerou um valor de desvio padrão para cada imagem. Finalmente, os valores de média total e desvio padrão total foram calculados baseados nos valores obtidos para cada imagem e em

formulações estatísticas para estimação de parâmetros estatísticos para soma de populações.

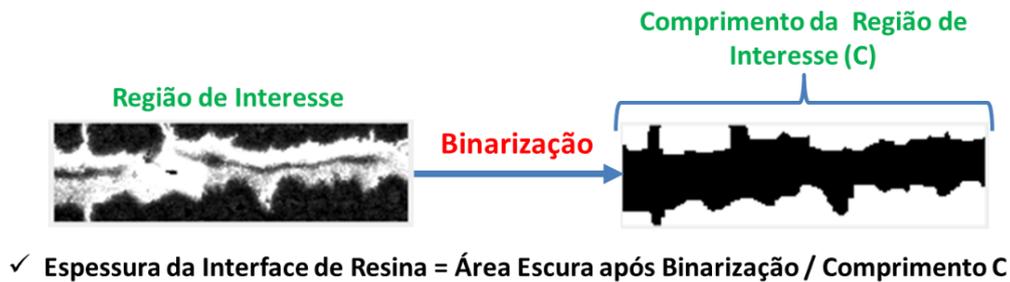


Figura 19 – Representação do processo de cálculo da espessura das interfaces ricas em resina

Os valores de espessura da camada principal (lâmina) foram calculadas utilizando os valores de espessura do laminado e os valores de espessura de interface calculados, segunda a expressão da Eq. 33.

$$Esp. da Camada = \frac{Esp. do Laminado - (N^{\circ} de camadas - 1) * Esp. da Interface}{N^{\circ} de Camadas} \quad Eq. 33$$

De forma análoga, os valores dos percentuais volumétricos das fases constituintes foram calculados utilizando micrografias com aumentos de 2000x, nas quais é possível observar as fibras em um plano normal perpendicular aos seus eixos. Para este processo foram realizadas etapas de ajuste de contraste, suavização e binarização, conforme representado na Figura 20. Após a binarização, a fração volumétrica de fibras foi calculada ao se dividir a área escura pela área total presente. Este processo foi repetido em 5 imagens para cada tipo de laminado, sempre considerando a região na qual o eixo das fibras é perpendicular ao plano da imagem. O cálculo da fração volumétrica total foi realizado levando em conta a fração volumétrica na camada, a espessura da camada e a espessura das interfaces ricas em resina, segundo a Eq. 34. Esta etapa é de suma importância pois os valores teóricos das constantes elásticas de cada camada constituinte e, conseqüentemente, do laminado como um todo são diretamente dependentes da fração volumétrica das fibras. Com isto, qualquer erro nesta etapa afeta consideravelmente os valores das propriedades mecânicas modeladas teoricamente e utilizadas como base de comparação para experimentos realizados.

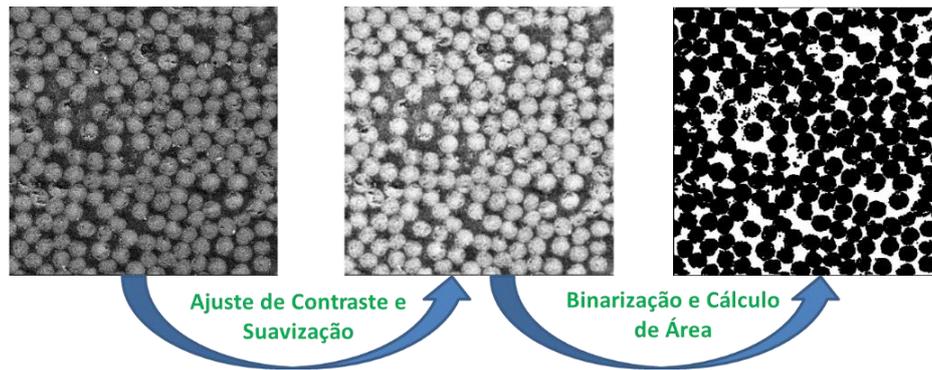


Figura 20- Representação do processo para cálculo de percentual de fases no interior das lâminas a partir de imagens MEV com aumento de 2000x.

$$\text{Fração Volumétrica de Fibras} = \frac{\text{Fração Vol. no Interior da Camada} * \text{Esp. Camada}}{(\text{Esp. da Camada} + \text{Esp. da Interface de Resina})} \quad \text{Eq. 34}$$

### 3.2.3 Microtomografia Computadorizada

Visando possuir uma imagem tridimensional mais detalhada das amostras para caracterizar a estrutura, foram realizados escaneamentos por Microtomografia computadorizada. Para este tipo de teste, é recomendável o uso de amostras cilíndricas para manter constante o percurso dos raios-X penetrados na amostra, mitigando efeitos negativos de quadratura [131]. Foram usinadas 3 amostras cilíndricas, oriundas uma de cada placa, com diâmetro de 22 mm. O local de retirada foi uma zona exatamente ao lado da região de retiradas das amostras utilizadas para medição da densidade e para os testes ultrassônicos. Em seguida, as amostras passaram por melhora no acabamento superficial com lixas 400 e 600 e submetidas ao escaneamento em microtomógrafo. O equipamento utilizado para a inspeção por microtomografia está ilustrado na Figura 21. As amostras utilizadas para esta análise, assim como um exemplo de fatia axial obtida por esta metodologia são apresentados na Figura 22 .

Os percentuais volumétricos dos vazios foram estimados para cada amostra. Isto foi feito através de um algoritmo computacional desenvolvido no software MATLAB, envolvendo processamento de imagem, binarização e contagem de área de uma das cores (vazios) para todas as fatias axiais que compõem o corpo de prova.



Figura 21 – Equipamento utilizado para análise de microtomografia.

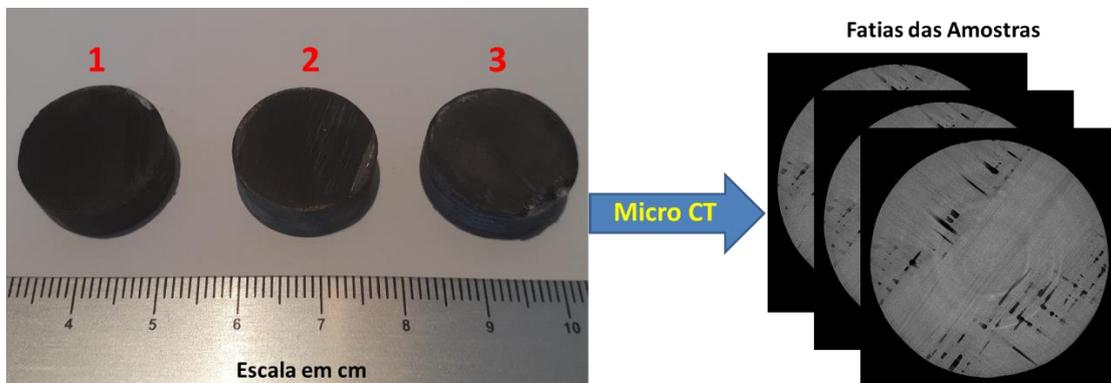


Figura 22 – Amostras utilizadas na análise por microtomografia e exemplos de fatiais axiais geradas (Amostra 1:  $[0^\circ]_{12s}$ , Amostra 2:  $[0^\circ/90^\circ]_{6s}$ , Amostra 3:  $[0^\circ/90^\circ/+45^\circ/-45^\circ]_{3s}$ ).

### 3.2.4 Queima de Amostras

Para determinar o percentual de fase em massa e volume de forma a comparar os valores obtidos com a análise microscópica, amostras de cerca de  $1 \text{ cm}^2$  foram queimadas em forno com atmosfera inerte (Argônio), em procedimento descrito pela norma ASTM D3175 [132]. As amostras foram pesadas em balança de precisão antes e após a queima, revelando a massa de fibra remanescente e a massa de resina eliminada no processo. Utilizando os valores de densidade dos constituintes inseridos no *datasheet* [133] do material, calculou-se a fração volumétrica de ambas as fases utilizando as equações 35 a 38. Os termos  $\rho_f$  e  $\rho_m$  se referem as densidades da fibra ( $1,8 \text{ g/cm}^3$ ) e da matriz ( $1,16 \text{ g/cm}^3$ ) utilizadas, enquanto os termos  $m_f$  e  $m_m$  se referem as massas consideradas para estes mesmos constituintes.

$$m_m = \Delta m = m_{antes} - m_{depois} \quad \text{Eq. 35}$$

$$m_f = m_{depois} \quad \text{Eq. 36}$$

$$V_m = \frac{m_m/\rho_m}{m_m/\rho_m + m_m/\rho_m} \quad \text{Eq. 37}$$

$$V_f = \frac{m_f/\rho_f}{m_m/\rho_m + m_m/\rho_m} \quad \text{Eq. 38}$$

### 3.2.5 Medição da Rugosidade

Visando estimar os efeitos da textura inserida pela folha de *peel-ply* (seção 2.2) na superfície dos laminados, a rugosidade superficial das placas foi avaliada utilizando um rugosímetro portátil modelo *SurfTest SJ-30* e monitoramento da bancada com nível, conforme representado na Figura 23. As amostras avaliadas são as mesmas utilizadas para o procedimento de estimativa da densidade e também para os testes rotatórios de medição de velocidade sônica. O processo é realizado ao se movimentar a ponteira do rugosímetro por uma determinada distância ao longo de uma linha reta, adquirindo o perfil de rugosidades no devido segmento. Assim sendo, foram realizadas 24 medidas em cada face das amostras, sendo 12 realizadas considerando uma linha de perfil na direção 1 (alinhada as fibras) e outras 12 considerando uma linha de perfil na direção 2, de forma a obter valores de média e desvio padrão para ambas as direções. Os parâmetros de rugosidade revelados pelo teste são:

- Rugosidade Média da Superfície ( $R_a$ ) – Média Aritmética dos valores absolutos dos desvios de altura em relação a uma linha central média avaliado em determinado comprimento.

- Maior Diferença de Altura do Perfil de Rugosidade ( $R_z$ ) – Diferença de altura entre o pico mais alto e o vale mais profundo, em relação a linha central média, do perfil de rugosidade avaliado em determinado comprimento.



Figura 23 – Aparato utilizado no teste de medição de rugosidade.

### 3.3 Cálculo Teórico das Contantes Elásticas

Com o intuito proporcionar uma base de dados para comparação com os resultados associados aos testes ultrassônicos, valores teóricos das constantes são considerados utilizando modelos micro e macromecânicos, assim como também valores reportados pela bibliografia para compósitos muito semelhantes aos utilizados. Determinadas propriedades são dependentes de medição experimental demasiadamente complexa, sendo utilizadas valores clássicos na literatura baseados em poucos experimentos realizados. Como consequência, muitas destas propriedades não são fornecidas pelos fabricantes nos *datasheets* dos *prepregs*. Dada a disponibilidade de dados acerca apenas dos módulos elásticos de tensão para cada componente, as únicas propriedades da lâmina calculadas por modelagem micromecânica são os módulos elásticos longitudinais e transversais. Este cálculo foi realizado pela regra das misturas diretas (Eq. 39) para o módulo longitudinal ( $E_1$ ), e pela regra das misturas inversas (Eq. 40) para o módulo transversal ( $E_2$ ). Os termos  $E_f$  e  $E_m$  se referem aos módulos elásticos da fibra e da matriz, enquanto  $v_f$  e  $v_m$  se referem aos percentuais volumétricos de fase destes constituintes. Para tal foi utilizado o percentual de fibras na camada principal do laminado, que é diferente do percentual total, que inclui as interfaces ricas em resina.

As outras propriedades para a lâmina foram consideradas como a média daquelas expostas por Tsai *et al* [134] para diversos exemplos de *prepregs* com percentuais de fibra em cerca de 60%, expostas na Tabela 4. Os valores médios destas propriedades são expostos na Tabela 5.

$$E_1 = E_f v_f + E_m v_m \quad \text{Eq. 39}$$

$$\frac{1}{E_2} = \frac{v_m}{E_m} + \frac{v_f}{E_f} \quad \text{Eq. 40}$$

Tabela 4 – Propriedades de diversos *prepregs* unidirecionais de CFRP, reunidas por Tsai *et al* [134].

	E <sub>1</sub>	E <sub>2</sub>	E <sub>3</sub>	E <sub>4</sub>	E <sub>5</sub>	E <sub>6</sub>	v <sub>12</sub> *	v <sub>13</sub> *	v <sub>21</sub> *	v <sub>23</sub> *	v <sub>31</sub> *	v <sub>32</sub> *
IM6/epoxy	203	11.20	11.20	3.81	8.40	8.40	0.018	0.018	0.320	0.470	0.320	0.470
IM7/977-3	191	9.94	9.94	3.38	7.79	7.79	0.018	0.018	0.350	0.470	0.350	0.470
T300/5208	181	10.30	10.30	3.50	7.17	7.17	0.016	0.016	0.280	0.470	0.280	0.470
IM7/MTM45	175	8.20	8.20	2.79	5.50	5.50	0.015	0.015	0.330	0.470	0.330	0.470
T800/Cytec	162	9.00	9.00	3.06	5.00	5.00	0.022	0.022	0.400	0.470	0.400	0.470
IM7/8552	159	8.96	8.96	3.05	5.50	5.50	0.018	0.018	0.320	0.470	0.320	0.470
T800S/3900	151	8.20	8.20	2.79	4.00	4.00	0.018	0.018	0.330	0.470	0.330	0.470
T300/F934	148	9.65	9.65	3.28	4.55	4.55	0.020	0.020	0.300	0.470	0.300	0.470
T700 C-Ply 64	141	9.30	9.30	3.16	5.80	5.80	0.020	0.020	0.300	0.470	0.300	0.470
AS4/H3501	138	8.96	8.96	3.05	7.10	7.10	0.019	0.019	0.300	0.470	0.300	0.470
T650/epoxy	139	9.40	9.40	3.20	5.50	5.50	0.022	0.022	0.320	0.470	0.320	0.470
T4708/MR60H	142	7.72	7.72	2.63	3.80	3.80	0.018	0.018	0.340	0.470	0.340	0.470
T700/2510	126	8.40	8.40	2.86	4.20	4.20	0.021	0.021	0.310	0.470	0.310	0.470
AS4/MTM45	127	7.93	7.93	2.70	3.60	3.60	0.019	0.019	0.300	0.470	0.300	0.470
T700 C-Ply 55	121	8.00	8.00	2.72	4.70	4.70	0.020	0.020	0.300	0.470	0.300	0.470

Tabela 5 – Valores médios de propriedades mecânicas de *prepregs* expostas por Tsai *et al* [128].

Valores Médios	E <sub>4</sub> (Gpa)	E <sub>5</sub> (Gpa)	E <sub>6</sub> (Gpa)	v <sub>12</sub>	v <sub>13</sub>	v <sub>21</sub>	v <sub>23</sub>	v <sub>31</sub>	v <sub>32</sub>
	3,065	5,574	5,574	0,019	0,019	0,320	0,470	0,320	0,470

Com o conhecimento das propriedades da lâmina, de forma a caracterizar as propriedades elásticas do laminado, realizou-se o seguinte procedimento:

- Baseado nos valores de módulos longitudinal e transversal calculados para a lâmina e nas outras propriedades adquiridas da Tabela 5, foram calculadas as constantes elásticas para a lâmina utilizando as equações 41 a 50. O fabricante cita um intervalo entre 227 e 257 GPa para o módulo longitudinal das fibras, sendo considerado para estudos o valor médio deste intervalo (242 GPa).

$$\Lambda = \frac{1}{1 - \nu_{12}\nu_{21} - \nu_{32}\nu_{23} - \nu_{13}\nu_{31} - 2\nu_{21}\nu_{13}\nu_{32}} \quad \text{Eq. 41}$$

$$C_{11} = (1 - \nu_{23}\nu_{32})\Lambda E_1 \quad \text{Eq. 42}$$

$$C_{22} = (1 - \nu_{31}\nu_{13})\Lambda E_2 \quad \text{Eq. 43}$$

$$C_{33} = (1 - \nu_{21}\nu_{12})\Lambda E_3 \quad \text{Eq. 44}$$

$$C_{12} = (\nu_{12} + \nu_{13}\nu_{32})\Lambda E_1 \quad \text{Eq. 45}$$

$$C_{13} = (\nu_{13} + \nu_{12}\nu_{23})\Lambda E_1 \quad \text{Eq. 46}$$

$$C_{23} = (\nu_{23} + \nu_{21}\nu_{13})\Lambda E_2 \quad \text{Eq. 47}$$

$$C_{44} = G_{23} = E_4 \quad \text{Eq. 48}$$

$$C_{55} = G_{31} = E_5 \quad \text{Eq. 49}$$

$$C_{66} = G_{12} = E_6 \quad \text{Eq. 50}$$

- Analogamente, as mesmas constantes foram calculadas para a resina utilizando o valor de módulo elástico fornecido pelo fabricante (3,9 GPa) e considerando o coeficiente de Poisson como 0,3 [10]. O valor do módulo de cisalhamento foi calculado pela Eq. 51.

$$G = \frac{E}{2(1 + \nu)} \quad \text{Eq. 51}$$

- As propriedades do laminado foram estimadas de acordo com a formulação da Teoria Clássica dos Laminados (CLPT) [10], levando em consideração as propriedades da lâmina, sua espessura, e também as interfaces ricas em resina e suas propriedades.

Um diagrama de blocos explicitando o passo a passo para a estimativa dos valores teóricos das constantes é exposto na Figura 24.

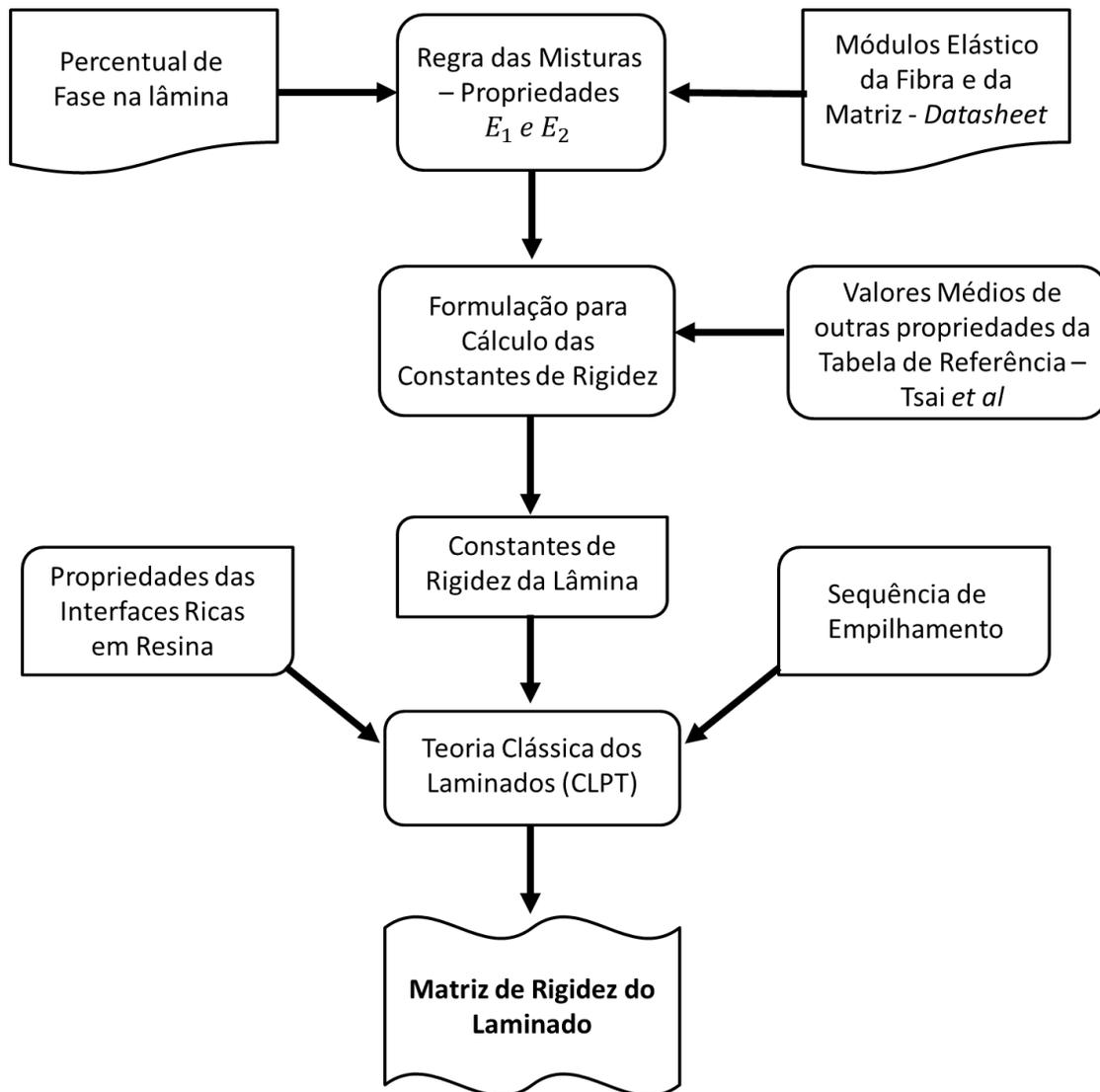


Figura 24 – Diagrama de blocos do processo de cálculo dos valores teóricos das constantes elásticas.

### 3.4 Caracterização sônica

#### 3.4.1 Ensaio de Transparência com Amostra Rotatória

Para estimar as constantes elásticas do material com base nas velocidades sônicas observadas, foi realizado ensaio ultrassônico pelo método de transparência em imersão, modificando gradualmente o ângulo de incidência do feixe sônico no material. Esta mudança se deu pela rotação da amostra em torno dos dois eixos do plano dos laminados. Com a rotação da amostra, o ângulo de incidência do feixe sônico é alterado, modificando também o ângulo de propagação e o percurso sônico e possivelmente modificando também a velocidade de propagação devido às condições de anisotropia do material.

Além disso, ocorre conversão de modo na interface fluido-amostra, fazendo com que três componentes distintas de onda coexistam no interior da amostra, uma longitudinal e outras duas transversais, cada qual com velocidades de propagação diferentes [135]. As duas ondas de cisalhamento se propagam em velocidades diferentes porque os vetores de polarização podem se estabelecer em direções com rigidez distintas. Para a rotação foi utilizado um braço robótico KUKA<sup>®</sup>, possuindo notória precisão de movimentos. O passo angular utilizado no ensaio foi de 3°, exceto para faixas onde se espera o ângulo crítico, para as quais o passo foi de 1° devido a maior precisão exigida [115]. A Figura 25 ilustra a montagem do ensaio.

Assim como Adamowski *et al* [136] e próximo a Nielsen *et al* [5], a frequência utilizada foi de 2,25 MHz. Este valor garante a mitigação de propagação complexa de ondas por gerar um comprimento de onda consideravelmente menor que a espessura da amostra [101], reduz em elevado grau a influência da rugosidade presente e ainda elimina a possibilidade de espalhamento nas fibras [69]. Também ressalta-se a menor presença de ruídos, dispersão e menor atenuação do sinal devido à baixa frequência, o que facilita a interpretação dos dados, mas não é benéfico para o objetivo de averiguar a parte complexa das constantes conforme [137], o que não é o caso neste trabalho. As amostras utilizadas são as mesmas consideradas para avaliação de densidade (seção 3.2.1), considerando os três tipos de empilhamento avaliados.

Os transdutores, cujos diâmetros são de 12,7 mm, foram posicionados sobre uma base fixa confeccionada com a sobreposição de perfis industriais de alumínio, garantindo que estejam na mesma altura e completamente alinhados. A distância de separação entre os transdutores utilizada foi de cerca de 22,8 cm (Figura 25). Primeiramente, adquiriu-se um sinal sem as amostras para que se tenha um sinal de referência associado a propagação do som na água apenas. Em seguida foram realizadas as medições com as amostras entre os transdutores.

O corpo de prova foi posicionado aproximadamente na metade do percurso entre os transdutores, garantindo que esteja fora do campo próximo do feixe sônico e em uma região onde o feixe é menos focalizado, com diâmetro maior. Feixes mais focalizados para técnicas de transmissão em compósitos podem ser prejudiciais pois avaliam uma área menor da amostra e, dada a heterogeneidade do material, podem sofrer maior influência de vazios ou de áreas com modificações de propriedades, portanto não são recomendados para este tipo de caracterização [66]. Em todos os casos, a amostra foi

ajustada para que seu centro esteja alinhado com o centro de ambos os transdutores. O ponto de início do teste ( $0^\circ$ ) foi considerado como aquele no qual o ângulo de rotação fornece a maior amplitude de sinal recebido com a amostra presente na linha entre os transdutores, sendo calculado empiricamente por rotações próximas a um palpite visual.

O sinal, na frequência especificada, foi gerado por um gerador de funções considerando um formato senoidal, 1 ciclo de duração, e uma amplitude pico a pico de 10 V. Os sinais captados no transdutor receptor, para cada condição de teste, foram enviados a um osciloscópio, a partir de onde são salvos em um arquivo formato CSV (*comma separated values*) constando o sinal (tela inteira: tempo x amplitude) por completo em 4000 pontos. O aparato completo utilizado para este ensaio é representado nas figuras 25 e 26.

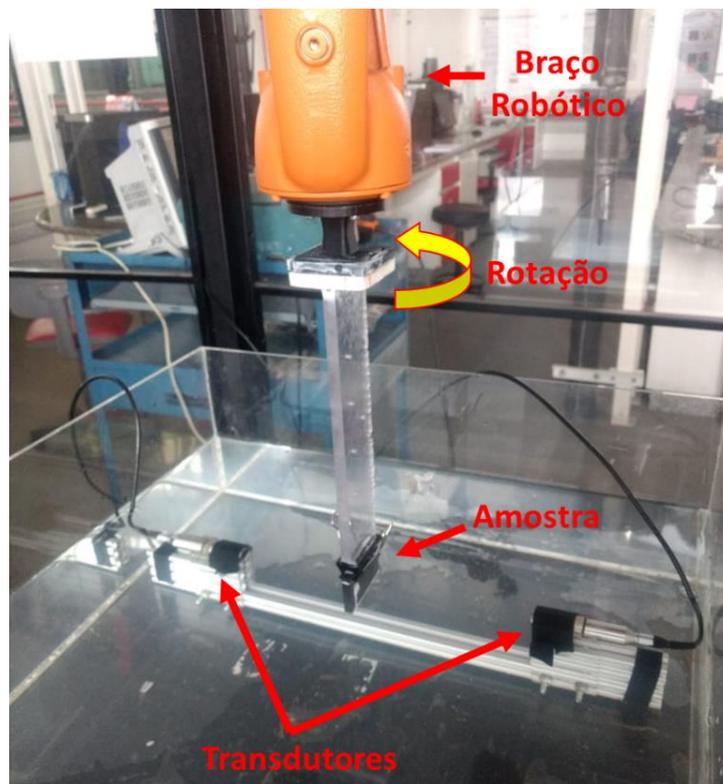


Figura 25 – Aparato utilizado para teste de incidência sônica multiangular



Figura 26 – Aparato para geração e captação do sinal no teste de incidência sônica multiangular

Os ensaios foram realizados considerando rotações em torno de ambos os eixos que definem o plano do laminado. Assim sendo, é importante criar referências para que seja bem entendido qual o eixo de rotação considerado. Nota-se que, na prática, esta diferença só ocorrerá de fato para o laminado unidirecional, devido a simetria dos demais em relação aos eixos do plano do laminado. Considera-se o eixo das fibras como eixo X, conforme representado na Figura 27. Já os ângulos de incidência e de propagação foram considerados em relação ao eixo normal ao plano do laminado (eixo Z), conforme representado na Figura 28.

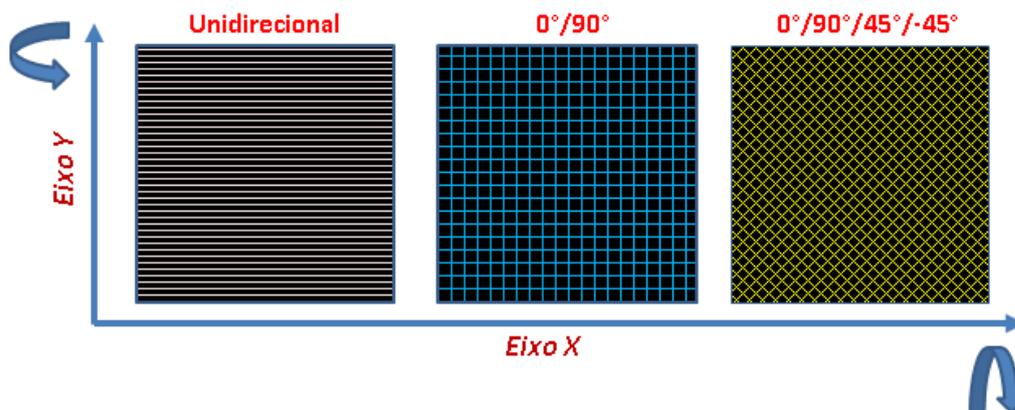


Figura 27 – Representação dos eixos de rotação para cada amostra analisada.

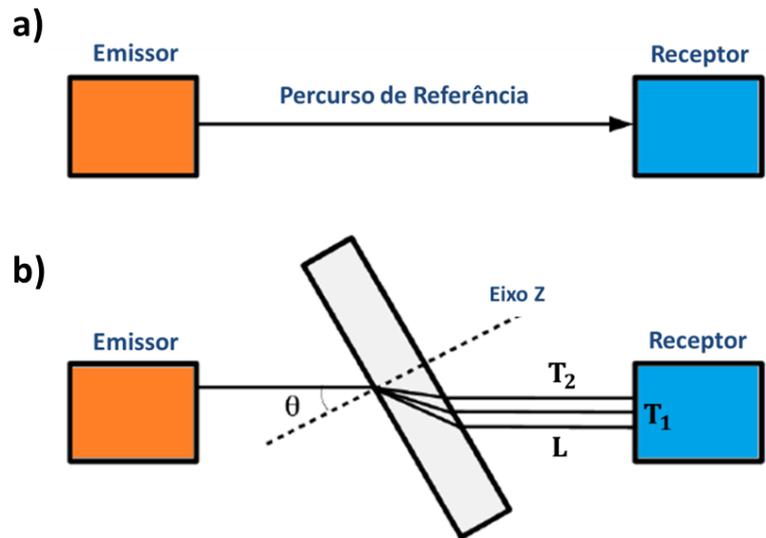


Figura 28 – Representação do teste ultrassônico em transparência: a) Sinal de referência sem amostra; b) com amostra rotatória e os diferentes modos de onda presentes.

### 3.4.2 Cálculo das Velocidades

O cálculo da velocidade foi baseado na determinação da diferença de tempo de voo entre as ondas com e sem a amostra entre os transdutores. Com o conhecimento da espessura do corpo de prova, do ângulo de incidência e da Lei de Snell (Eq. 4) [138], tem-se uma expressão matemática para a velocidade de propagação em função da diferença temporal do pico de chegada para o sinal de referência e para o sinal com a amostra [25]. Como as velocidades são diferentes, o pico de chegada dos modos presentes ocorre em momentos diferentes, facilitando a identificação de cada componente. A expressão matemática para o cálculo das velocidades é exposta na Eq. 52, onde  $\Delta t$  é a diferença de tempo entre o percurso com e sem a amostra,  $V_0$  é a velocidade da água (considerada 1485 m/s para temperatura ambiente),  $h$  é a espessura da amostra e  $\theta_i$  é o ângulo de incidência.

$$V^{-1} = \sqrt{\frac{1}{V_0^2} - \frac{2\Delta t \cos \theta_i}{hV_0} + \frac{\Delta t^2}{h^2}} \quad \text{Eq. 52}$$

É importante uma boa precisão nesta etapa do processo visto que pequenos erros podem acarretar grande falta de acurácia no cálculo da velocidade e das constantes elásticas. Dessa forma, inicialmente removeu-se o *offset* dos sinais para tornar os sinais com linha central zero e aplicou-se um filtro passa-baixa com frequência de corte de 4

MHZ para eliminar qualquer ruído de maior frequência e facilitar a interpretação dos dados.

Posteriormente foram aplicados algoritmos, implementados no software MATLAB, que calculam automaticamente os valores de tempo de interesse para serem utilizados na estimativa das velocidades. Nesse sentido, três metodologias foram testadas, sendo baseadas na diferença entre os tempos de percurso definido por alguma propriedade dos sinais adquiridos com a amostra e sem a amostra (referência). Estas metodologias são:

- Valor absoluto máximo da amplitude: A referência de tempo é o ponto onde ocorre o valor máximo de amplitude do sinal considerando apenas os valores absolutos. Um exemplo do ponto considerado neste método é exposto na Figura 29.

- Valor máximo do envelope superior: Baseado na máxima amplitude do envelope superior gerado a partir do sinal contendo os valores absolutos de amplitude. Os envelopes são determinados usando interpolação de *spline* sobre os máximos locais, separados por um número determinado de amostras. Um exemplo do ponto considerado neste método é exposto na Figura 30.

- Zero Crossing [108]: A referência de tempo é o primeiro ponto onde o sinal cruza o zero após um primeiro pico que tenha amplitude mínima de 10% da amplitude do maior pico observado. O algoritmo realiza uma busca deste primeiro pico em uma região do sinal próxima ao pico de maior amplitude. Um exemplo do ponto considerado neste método é exposto na Figura 31.

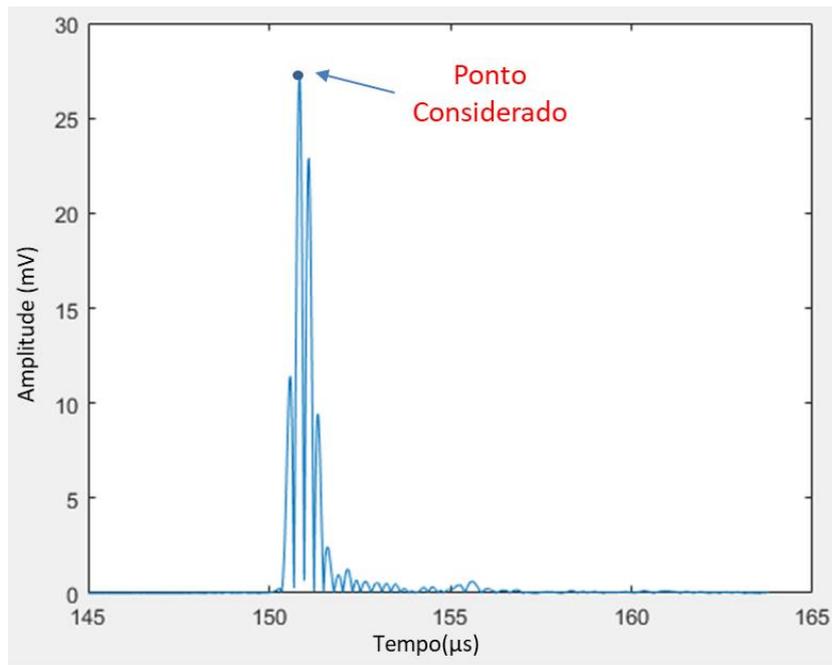


Figura 29 – Exemplo de aplicação do método de máxima amplitude dos valores absolutos do sinal.

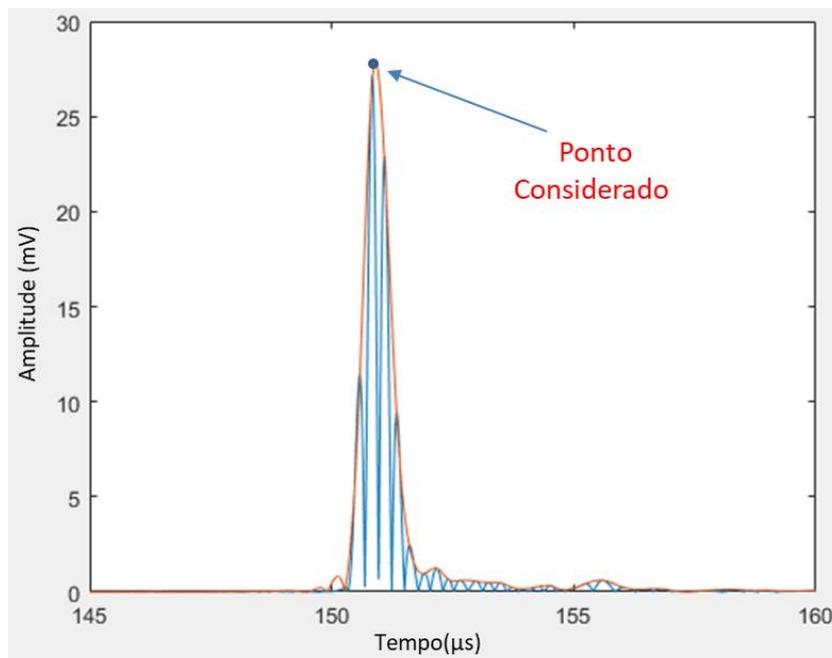


Figura 30 - Exemplo de aplicação do método de máxima amplitude de envelope superior dos valores absolutos do sinal.

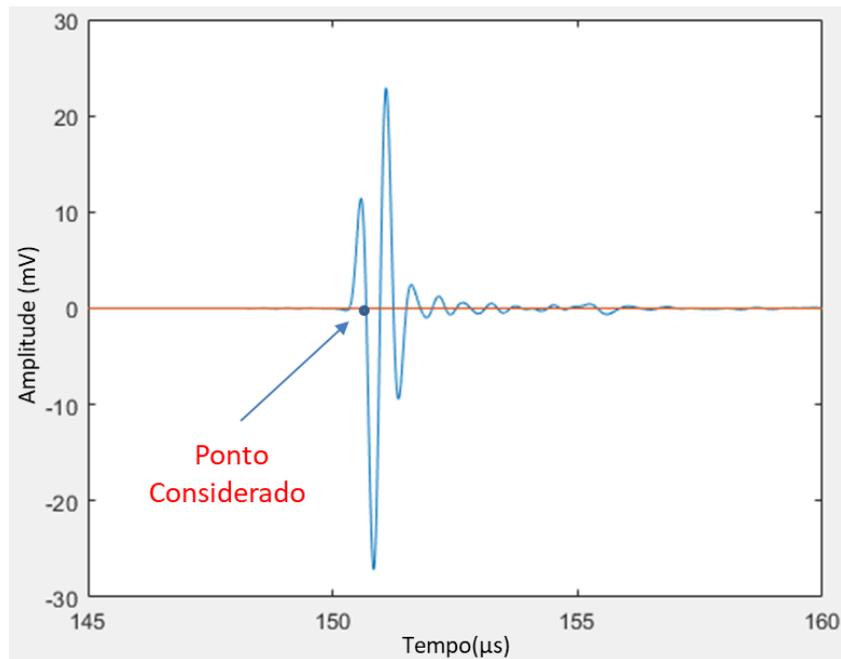


Figura 31 - Exemplo de aplicação do método de máxima amplitude dos valores absolutos do sinal.

Metodologias semelhantes foram utilizadas com sucesso por Benstock e Cegla [69]. O algoritmo de correlação cruzada, tipicamente também utilizado para medição de velocidade sônica em materiais isotrópicos, não foi utilizado pois com a heterogeneidade do material podem ocorrer distorções do sinal. Tal fato, juntamente com a maior complexidade do sinal adquirido pode gerar resultados de diferença de tempo errôneos e, conseqüentemente, valores de velocidades inconsistentes tal forma de cálculo, conforme reportado na literatura [108].

### 3.5 Cálculo das Constantes Elásticas

#### 3.5.1 Cálculo de $C_{11}$ e $C_{22}$ pelo Ângulo Crítico

Visando simplificar o procedimento e o cálculo de outras constantes por algoritmos posteriormente utilizados, os valores das constantes  $C_{11}$  e  $C_{22}$  para cada laminado foram estimadas utilizando o valor médio do primeiro ângulo crítico fornecido considerando as três metodologias de estimativa das velocidades. Este ângulo foi considerado o primeiro ângulo a partir do qual ocorre mudança de patamar no tempo de voo e, conseqüentemente, no valor da velocidade encontrada, denotando uma mudança no regime de propagação de maior energia (Longitudinal ou Cisalhante). Com o valor do

ângulo crítico calculado, utilizou-se a relação da Lei de Snell (Eq. 4) para calcular a velocidade associada a propagação de onda longitudinal no plano do laminado na direção desejada. A partir deste valor de velocidade calculou-se a constante  $C_{11}$  para rotação em torno de Y e  $C_{22}$  para rotação em torno de X. Uma expressão matemática para este procedimento é exposto na Eq. 53, onde  $V_0$  é a velocidade de propagação da onda longitudinal na água (1485 m/s para a temperatura ambiente) e  $\theta_{cr}$  é o ângulo crítico observado.

$$C_{11} \text{ ou } C_{22} = \rho \frac{V_0^2}{(\text{sen}\theta_{cr})^2} \quad \text{Eq. 53}$$

### 3.5.2 Caso Especial: Amostra Unidirecional – Rotação em X

Para o caso do laminado unidirecional com rotação em torno do eixo X, espera-se que praticamente não haja variação da velocidade de propagação em relação ao ângulo de incidência tanto para o caso de ondas longitudinais como para ondas transversais. Isto ocorre porque este tipo de material é transversalmente isotrópico e ao rotacionar a amostra em torno do eixo das fibras qualquer feixe sônico presente incidirá de forma normal a esta direção. Uma representação esquemática desta situação é demonstrada na Figura 32, onde ao rotacionar um vetor 2 em 90° dentro de um plano isotrópico resulta-se em um vetor 3 que é equivalente ao vetor 2, com ambos sendo perpendiculares a direção das fibras.

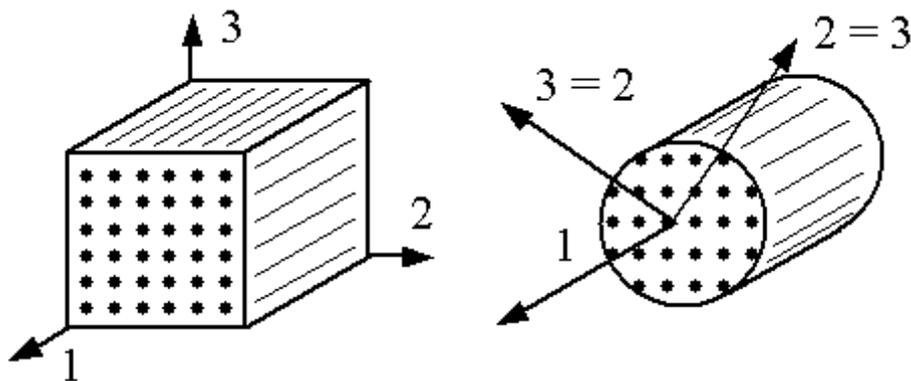


Figura 32 – Representação esquemática da simetria transversalmente isotrópica.

Desta forma, as constantes principais  $C_{22}$  e  $C_{44}$ , associadas a propagação das ondas longitudinais e transversais foram calculadas a partir da velocidade média de ambas para

diversos ângulos de incidência, utilizando as fórmulas expostas nas equações 54 e 55. O valor de  $C_{22}$  pode inclusive ser comparada àquele obtido através do ângulo primeiro ângulo crítico.

Além disto, de acordo com as equivalências de constantes para o caso de laminados transversalmente isotrópicos, o valor da constante  $C_{23}$  foi inferido com base nas constantes  $C_{22}$  e  $C_{44}$ , de acordo com a Eq. 56, que também é exposta na Tabela 2.

$$C_{22} = \rho V_{Long}^2 \quad \text{Eq. 54}$$

$$C_{44} = \rho V_{Transv}^2 \quad \text{Eq. 55}$$

$$C_{23} = C_{22} - 2C_{44} \quad \text{Eq. 56}$$

### 3.5.3 Cálculo do ângulo de Propagação

Conforme previsto na revisão bibliográfica, muitas das formulações utilizadas para calcular as constantes elásticas dependem de componentes trigonométricas relacionadas ao ângulo de propagação sônica na amostra. Este ângulo de propagação foi calculado através da velocidade sônica estimada juntamente com a Lei de Snell (Eq. 4), resultando na expressão exposta na Eq. 57, onde  $\theta_p$  é o ângulo de propagação,  $\theta_i$  é o ângulo de incidência,  $V$  é a velocidade sônica na amostra e  $V_0$  é a velocidade do som na água (1485 m/s para a temperatura ambiente).

$$\theta_p = \arcsen\left(\frac{V}{V_0} \sen\theta_i\right) \quad \text{Eq. 57}$$

### 3.5.4 Cálculo das Constantes por Ajuste Não-Linear

As demais constante calculáveis foram estimadas através de um procedimento matemático de ajuste não-linear. Com um número ( $n$ ) de dados maior que o necessário, foram utilizados algoritmos de ajuste que buscam minimizar a soma dos resíduos quadráticos entre os valores experimentais de  $\rho V^2$  e os valores para o termo calculados pelas equações 22, 23 e 24 considerando um conjunto possível de constantes elásticas, conforme exemplificado na Eq. 58.

$$\text{Mínimo de } \sum_{i=1}^n (\rho V_{Exp.}^2 - \rho V_{Calc.}^2)^2 \quad \text{Eq. 58}$$

Assim sendo, levando em conta os valores de  $C_{11}$  e  $C_{22}$  calculados utilizando o método exposto na seção 3.5.1, inicialmente um conjunto de valores para as constantes restantes ( $C_{13}$ ,  $C_{55}$  e  $C_{33}$ ) é proposto e estes valores são modificados a cada passo de algoritmos iterativos de otimização que buscam encontrar o conjunto de constantes que satisfaça o valor mínimo da expressão exposta na Eq. 58, ajustando os dados obtidos experimentalmente segundo um modelo matemático. Este procedimento foi realizado tanto para o caso de ondas longitudinais como para as ondas transversais e para dados referentes a rotação em ambos os eixos do plano do laminado, sendo considerados dados apenas associados à ângulos de propagação de até  $80^\circ$ . Para o caso de onda longitudinal, foram consideradas apenas os valores do intervalo onde a evolução da velocidade é crescente. Para este processo de ajuste foram utilizados 3 algoritmos de otimização, sendo estes:

- Algoritmo Evolucionário (Heurístico) [139], utilizando o *solver* do software Excel.
- Gradiente Reduzido Generalizado – GRG (Determinístico) [140], utilizando o *solver* do software Excel.
- Método de Levenberg-Marquardt (Determinístico) [141], utilizando a função pré-definida de ajuste não-linear do software MATLAB.

A única condição imposta aos valores das constantes livres nos algoritmos foi a de que estas deveriam ser não negativas. Todas as configurações das metodologias foram mantidas nas opções de fábrica dos softwares utilizados. Os valores iniciais considerados para o processo são próximos àqueles calculados teoricamente de acordo com o que foi proposto na seção 3.3, sendo expostos na Tabela 6.

Tabela 6 – Valores iniciais das constantes  $C_{13}$ ,  $C_{55}$  e  $C_{33}$  utilizados para ajuste não-linear iterativo.

Valores Iniciais das Constante Restantes Calculáveis (em GPa)			
Constante	$C_{13}$	$C_{55}$	$C_{33}$
Valor Inicial	5	5	13

Para os laminados  $[0^\circ/90^\circ]$  e  $[0^\circ/90^\circ/+45^\circ/-45^\circ]$ , teoricamente, a constante  $C_{13}$  é equivalente a  $C_{23}$ , a constante  $C_{55}$  é equivalente a constante  $C_{44}$  e a constante  $C_{11}$  é

equivalente a constante  $C_{22}$ . Por isto, nas tabelas e resultados são utilizados apenas as representações  $C_{11}$ ,  $C_{13}$  e  $C_{55}$ , tanto para a rotação em X como para a rotação em Y para estas amostras.

Um diagrama de blocos explicitando o passo a passo até o cálculo das constantes elásticas por ajuste não-linear é representado na Figura 33.

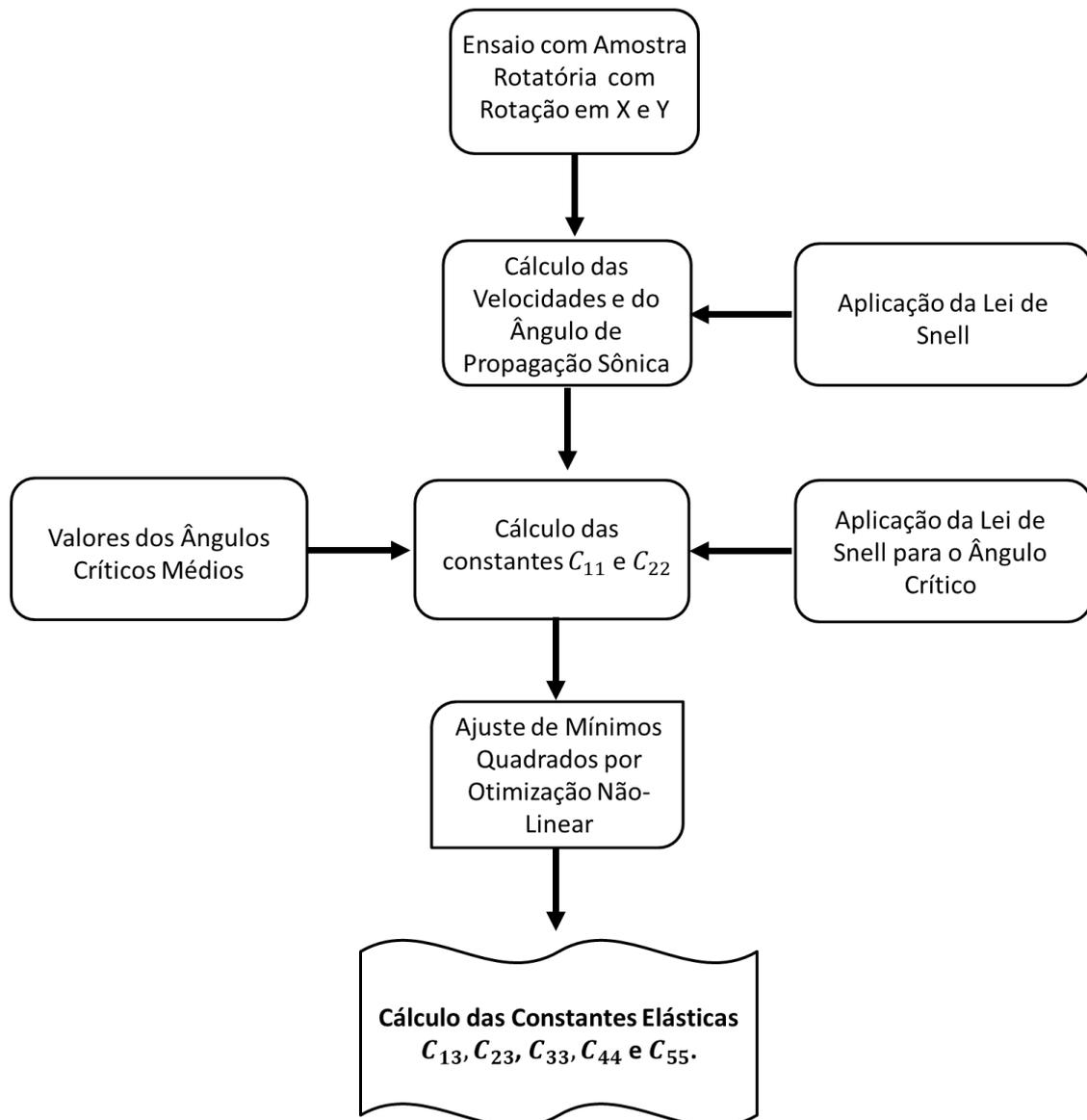


Figura 33 – Diagrama de blocos representando as etapas realizadas até o cálculo das constantes elásticas por ajuste não-linear.

### 3.5.5 Influência do valor inicial para o algoritmo

Com o intuito de avaliar a sensibilidade do resultado em relação aos valores iniciais de algoritmo, foram analisados ajustes considerando 4 conjuntos distintos de valores iniciais para as constantes, expostos na Tabela 7. O processo foi realizado para a amostra unidirecional, considerando a rotação em Y, a propagação de ondas cisalhantes e o valor da constante  $C_{11}$  calculado pela ângulo crítico. Os métodos utilizados nesta análise foram o Gradiente Reduzido Generalizado (GRG) e o de Levenberg-Marquardt.

Tabela 7 – Conjuntos de valores iniciais das constantes utilizados em análise sobre a sensibilidade dos valores iniciais.

Constante	$C_{13}$ (GPa)	$C_{55}$ (GPa)	$C_{33}$ (GPa)
Valor Inicial 1	5	5	13
Valor Inicial 2	40	40	80
Valor Inicial 3	80	80	160
Valor Inicial 4	100	100	200

### 3.5.6 Influência da complexidade do empilhamento

A reconstrução fiel das constantes elásticas a partir das velocidades no material baseada na estrutura toda passa pela etapa de haver valores de velocidades claros e certos, sem ambiguidades e irregularidades. Uma condição importante para que isto seja garantido, é que o feixe sônico enxergue o material como sendo homogêneo, não estratificado, conforme explicado na seção 2.3.2 [46] [53]. Quando esta consideração é satisfeita, a velocidade da onda *Floquet* é igual à da onda plana e não há dificuldade real em descrever a condição esperada do feixe, permitindo calcular tanto as velocidades como as constantes elásticas efetivas do meio [142]. Todavia, visto que, por fatores práticos, nem sempre as condições de ensaio estarão dentro do domínio de homogeneização, os materiais são “vistos” pelo feixe como uma estrutura estratificada, com variabilidade de velocidade e orientação do feixe entre as camadas e fenômenos de reflexão interna no material, o que acarreta em diversos padrões de interferência e transmissão de energia. Este conjunto de fatos, dependentes da frequência e do ângulo de propagação do feixe na amostra, pode acarretar na chegada irregular do feixe sônico no receptor, revelando um sinal confuso e com um padrão de ecos bastante destoante do esperado.

Dada a importância desta condição e a possível influência do regime nos resultados encontrados para as constantes elásticas, foram calculadas as velocidades mínimas de propagação, para vários ângulos de propagação observados, para que os laminados utilizados neste trabalho pertençam ao regime homogêneo, baseando-se na Eq. 5. Estes valores também são dependentes do valor de espessura da célula unitária ( $h_c$ ) dos laminados utilizados, que por sua vez dependem da sua configuração, sendo apresentada na Tabela 8.

Tabela 8 – Configuração da célula unitária de cada laminado utilizado nos ensaios.

Laminado	Célula Unitária ( $h_c$ )
$[0^\circ]_{12s}$	1 camada + 1 interface
$[0^\circ/90^\circ]_{6s}$	2 camadas + 2 interfaces
$[0^\circ/90^\circ/+45^\circ/-45^\circ]_{3s}$	4 camadas + 4 interfaces

Desta forma, ao comparar os resultados das velocidades encontradas experimentalmente e as velocidades mínimas para satisfazer a propagação homogênea, é avaliada a condição de propagação sônica vigente no material para diversos ângulos. Assim sendo, é possível averiguar se possíveis irregularidades nas medidas das velocidades sônica e, conseqüentemente, das constantes elásticas estão associadas a desvios do regime homogêneo de propagação.

## 4 Resultados e Discussões

### 4.1 Caracterização Estrutural

#### 4.1.1 Medição de Densidade

Os valores medidos relacionados ao cálculo da densidade são apresentados na Tabela 9. Nota-se que os valores para as três amostras são próximos, praticamente iguais considerando as incertezas presentes. Além disto, os valores encontrados estão de acordo com aqueles encontrados na literatura para este tipo de material, que estão entre 1,48 e 1,6 g/cm<sup>3</sup> [143] [144] [145].

Tabela 9 – Informações dimensionais de amostras utilizadas para cálculo da densidade

Amostra	Unidirecional [0°] <sub>12s</sub>	[0°/90°] <sub>6s</sub>	[0°/90°/45°/-45°] <sub>3s</sub>
Largura (mm)	60,04 ± 0,36	62,17 ± 0,08	61,78 ± 0,17
Comprimento (mm)	61,34 ± 0,23	63,00 ± 0,07	63,18 ± 0,24
Espessura (mm)	7,331 ± 0,101	7,368 ± 0,064	7,229 ± 0,047
Massa (g)	40,07 ± 0,01	43,17 ± 0,01	42,37 ± 0,01
Densidade (g/cm <sup>3</sup> )	1,507 ± 0,023	1,496 ± 0,013	1,502 ± 0,012

#### 4.1.2 Micrografia em Microscópio Eletrônico de Varredura

Os resultados mais relevantes das análises em MEV estão dispostos nas figuras 34 a 36. Nota-se que, devido ao seu caráter isolante, com a ação do feixe de elétrons as interfaces ricas em resina se destacam nas imagens de elétrons secundários obtidas, com regiões brilhantes bem definidas entre as camadas principais. Isto ocorre devido a ausência de material condutor nestas zonas, o que causa uma ausência do escoamento das cargas e acúmulo destas nas regiões ricas em resina, tornando qualquer dimensionamento destas zonas uma tarefa mais simples devido ao alto contraste de cor exibido.

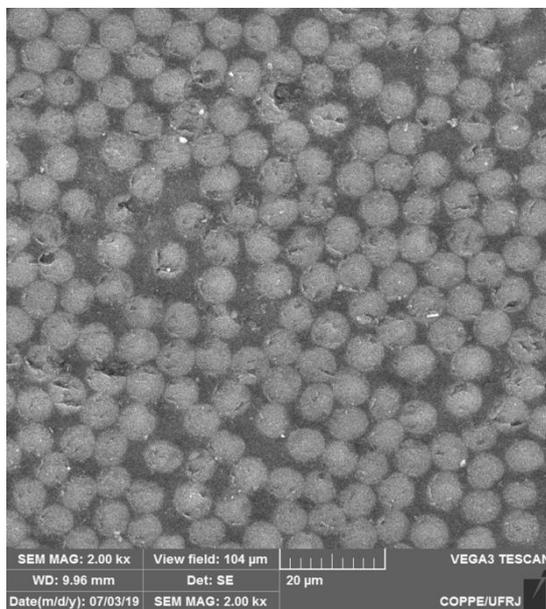
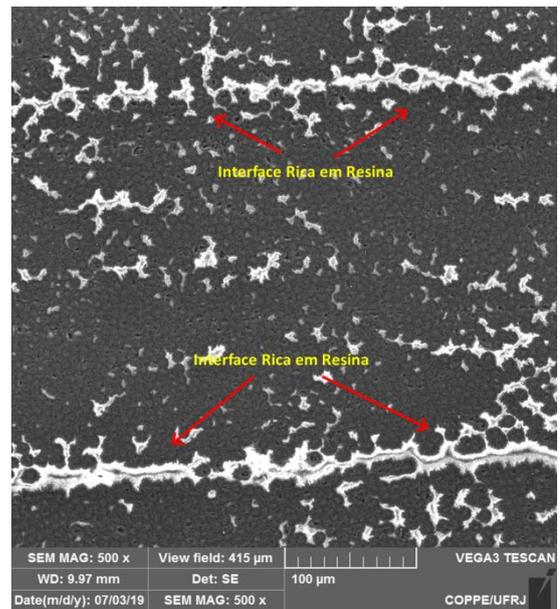
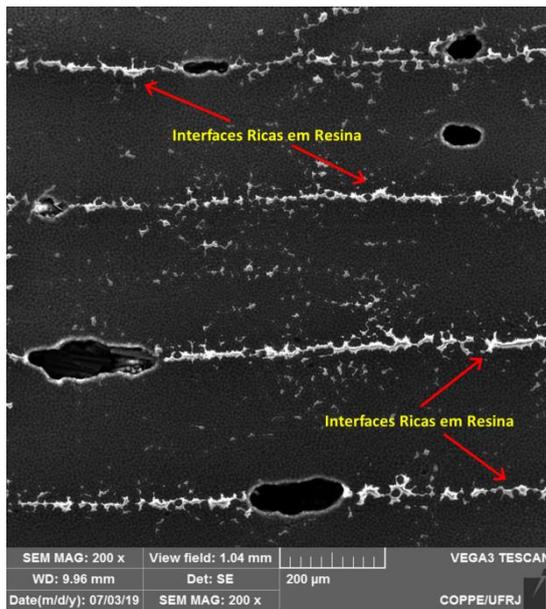


Figura 34 – Imagens MEV com diferentes aumentos (200,500,2000 e 30x) da seção transversal de uma placa do laminado unidirecional  $[0^\circ]_{12s}$ .

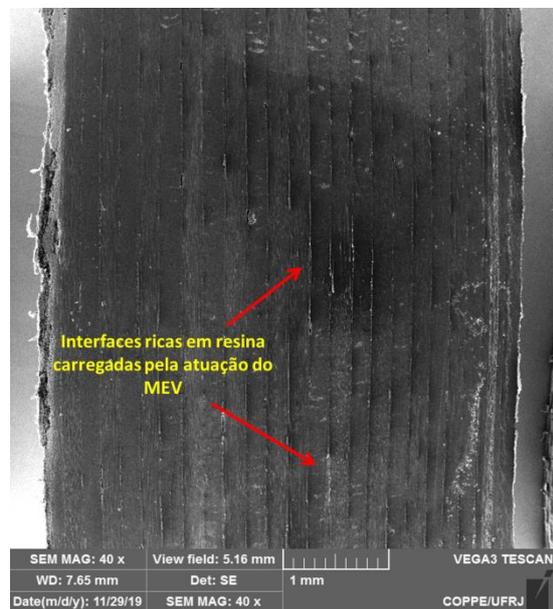
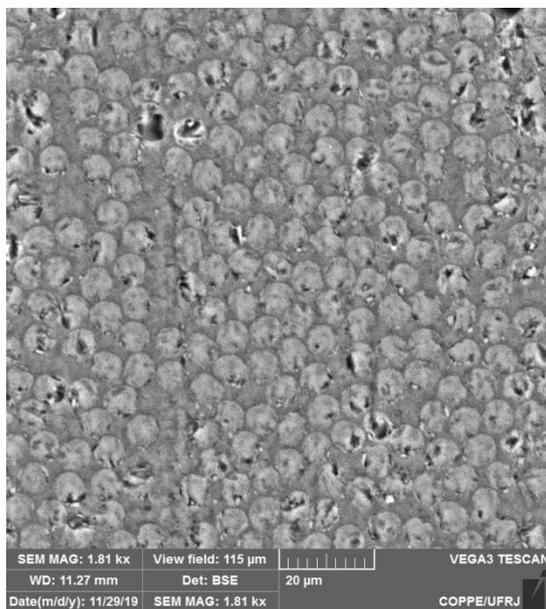
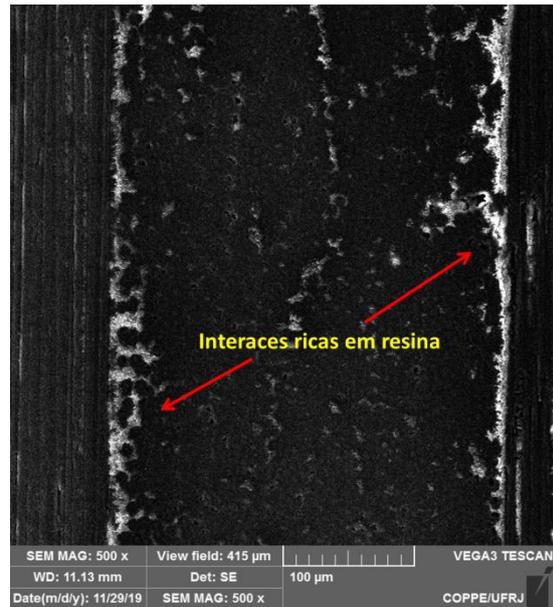
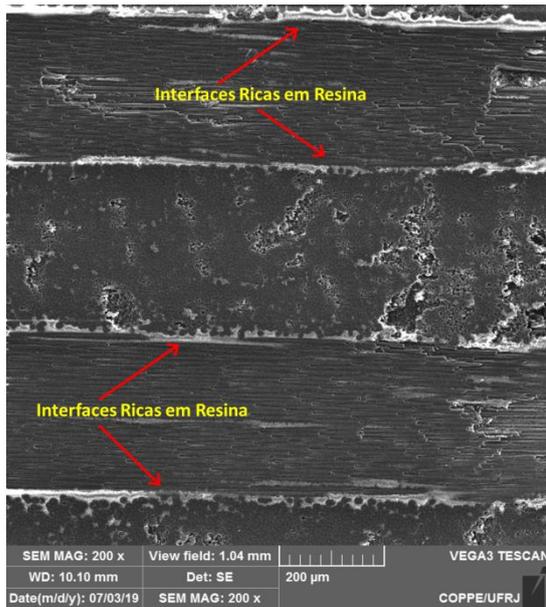


Figura 35 - Imagens MEV com diferentes aumentos (200, 500, 2000 e 30x) da seção transversal de uma placa do laminado unidirecional  $[0^{\circ}/90^{\circ}]_{6S}$ .

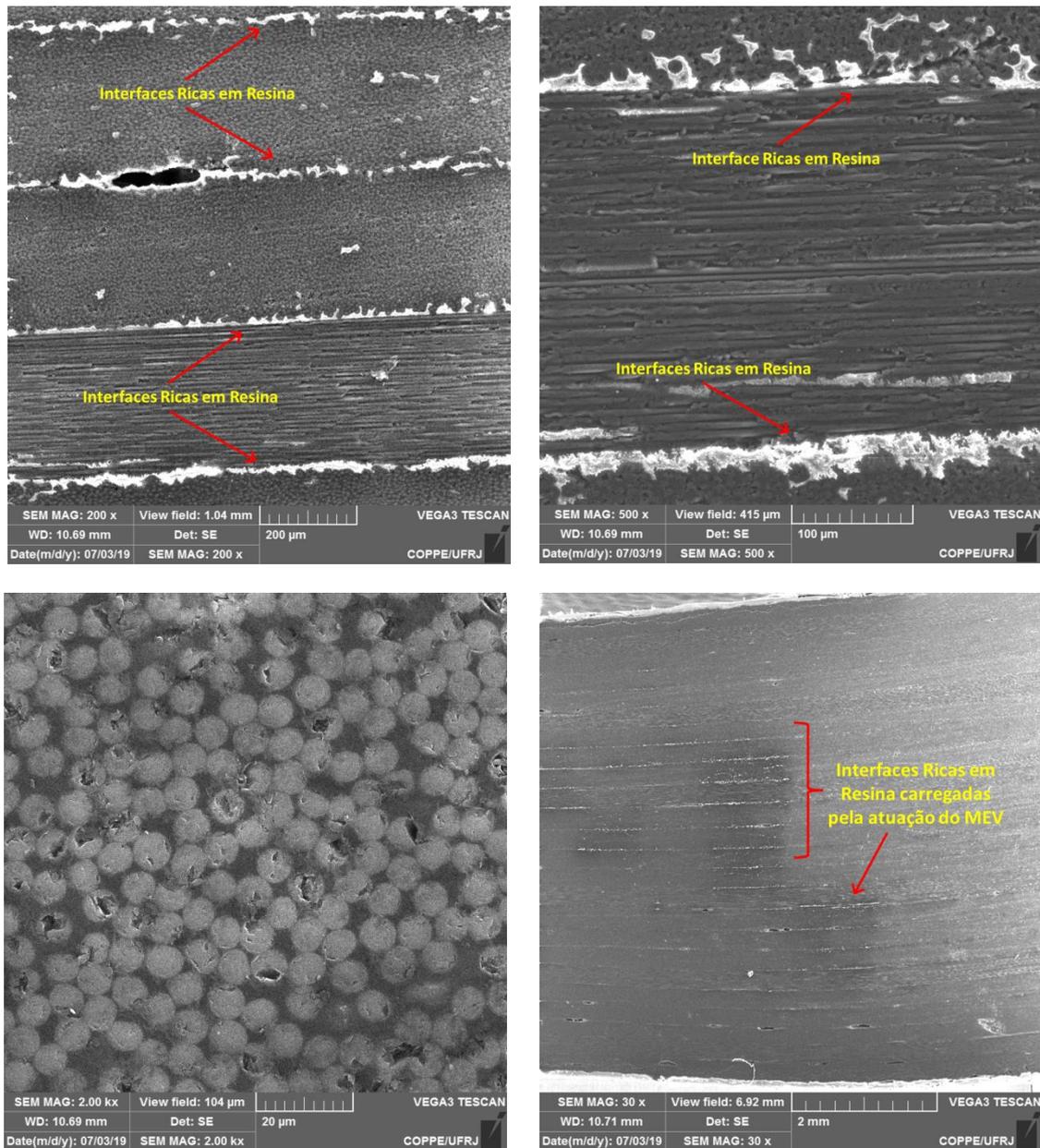


Figura 36 - Imagens MEV com diferentes aumentos (200, 500, 2000 e 30x) da seção transversal de uma placa do laminado unidirecional  $[0^{\circ}/90^{\circ}/45^{\circ}/-45^{\circ}]_{3S}$ .

Os valores das médias e desvios padrões das espessuras de interfaces de resina para cada imagem, apresentados na Tabela 10, revelam valores bastante condizentes com a literatura (Seção 2.3.2), com valores médios variando entre 14 e 19 µm. Para algumas imagens nota-se um valor de desvio padrão alto, o que ocorre devido a expressiva irregularidade de espessura e morfologia destes interfaces. Os valores de média total e desvio padrão total, considerando todas as imagens, são apresentados na última linha da Tabela 10.

Tabela 10 – Valores, em  $\mu\text{m}$ , das médias e desvios padrões das espessuras das interfaces de resina entre as camadas para diversas imagens em dois valores de aumento distintos.

Laminado	$[0^\circ]_{12s}$		$[0^\circ/90^\circ]_{6s}$		$[0^\circ/90^\circ/45^\circ/-45^\circ]_{3s}$	
Aumento do MEV	Média da Imagem	Desvio Padrão da Imagem	Média da Imagem	Desvio Padrão da Imagem	Média da Imagem	Desvio Padrão da Imagem
200x	16,43	2,65	18,52	6,17	16,71	4,53
200x	14,93	2,22	18,36	3,81	15,35	3,62
200x	15,72	2,99	16,93	5,04	17,51	6,10
200x	16,92	3,10	17,57	5,77	16,63	4,29
200x	17,35	2,37	18,43	5,12	18,10	5,91
200x	15,33	3,94	17,27	4,58	17,96	4,13
200x	17,86	3,54	18,68	3,26	17,99	4,44
200x	17,04	2,49	15,91	4,30	17,60	4,93
200x	17,68	3,50	X	X	17,61	3,16
500x	17,73	3,38	14,24	2,80	15,23	1,64
500x	16,97	4,69	14,84	3,181	14,39	2,48
500x	17,642	3,87	16,38	4,01	16,87	2,86
500x	18,27	3,18	13,13	2,75	17,33	3,24
500x	17,51	2,27	X	X	X	X
Média e Desvio Padrão Total	16,95	3,37	16,68	4,71	16,86	4,29

Já as espessuras médias das camadas e suas incertezas, são apresentadas na Tabela 11, demonstrando valores parelhos entre os distintos laminados. Enquanto isso, a Tabela 12 apresenta os resultados dos percentuais médios de fibras no interior das camadas calculado por processamento das imagens obtidas por MEV, assim como os valores considerando o compósito por completo (considerando as interfaces ricas em resina). Os valores encontrados são bastante próximos entre os laminados avaliados, demonstrando uniformidade do procedimento de manufatura utilizado. Além disso, os valores estão bastante condizentes com o intervalo exposto no *datasheet* [133] do material e com valores encontrados na literatura [143] [146] [147].

Tabela 11 – Valores médios das espessuras das camadas fibra-matriz dos laminados.

Laminado	$[0^\circ]_{12s}$	$[0^\circ/90^\circ]_{6s}$	$[0^\circ/90^\circ/45^\circ/-45^\circ]_{3s}$
Espessura Média das Camadas ( $\mu\text{m}$ )	$289,92 \pm 5,22$	$291,71 \pm 5,07$	$285,75 \pm 4,39$

Tabela 12 - Valores médios das frações volumétricas de fibra dos laminados utilizando MEV

Laminado	$[0^\circ]_{12s}$	$[0^\circ/90^\circ]_{6s}$	$[0^\circ/90^\circ/45^\circ/-45^\circ]_{3s}$
Percentual Volumétrico de Fibras (%) – Interior da Camada	$62,83 \pm 1,84$	$63,69 \pm 1,41$	$63,34 \pm 1,36$
Percentual Volumétrico de Fibras (%) – Total	$59,36 \pm 1,86$	$60,25 \pm 1,62$	$59,81 \pm 1,54$

#### 4.1.3 Micro-Tomografia Computadorizada

As imagens contidas na Figura 37 representam fatias da amostra  $[0^\circ/90^\circ]_{6s}$  nos planos XY, XZ e YZ, geradas pelo ensaio de microtomografia. Por estas é possível realizar observações interessantes acerca da mesoestrutura do laminado. Primeiramente, nota-se a presença de pequenos vazios que se concentram nas regiões de transição entre as camadas, geralmente em formatos mais alongados. Além disso, nota-se que ao quantificar os vazios de acordo com o procedimento exposto na seção 3.2.3, tem-se que os valores encontrados para as amostras unidirecional  $[0^\circ]$  e  $[0^\circ/90^\circ/+45^\circ/-45^\circ]$  estão bem próximas, em torno de 1%, enquanto o valor encontrado para a amostra  $[0^\circ/90^\circ]$  aparece maior, próximo a 2%. Estes resultados estão expostos na Tabela 13.

Os resultados indicam que estes valores podem ser um dos fatores responsáveis pela atenuação da energia sônica propagante na amostra, além de possivelmente modificar algumas das constantes do material devido a queda de algumas das constantes elásticas, principalmente aquelas mais ligadas a propriedades da matriz, como a  $C_{33}$ . Além disso, esta porosidade maior reportada em uma das amostras pode ser a responsável pelo

comportamento sônico distinto encontrado na amostra  $[0^\circ/90^\circ]$  e que foi encontrado em menor grau nas outras amostras.

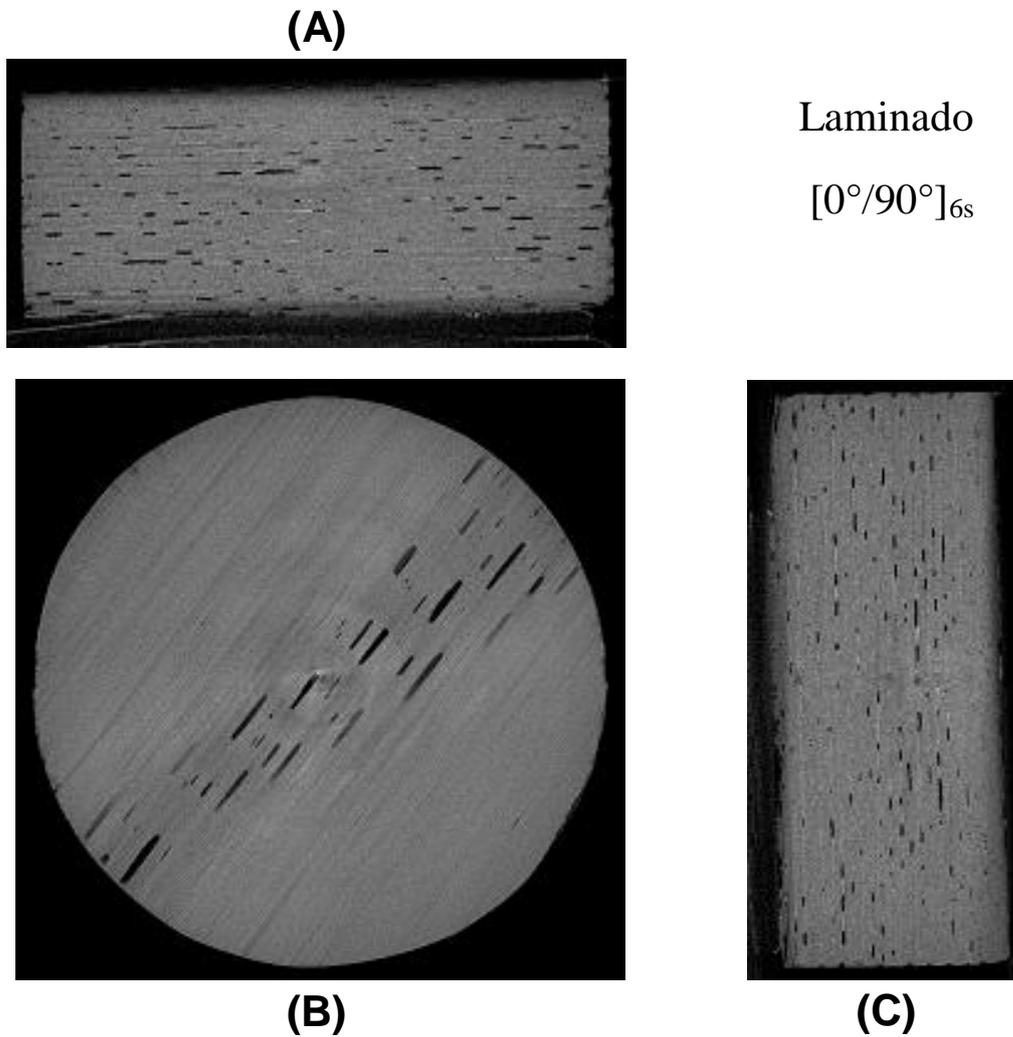


Figura 37 – Vistas axial (B), coronal (A) e sagital (C) da tomografia de amostra retirada do laminado  $[0^\circ/90^\circ]_{6s}$ .

Tabela 13 – Percentuais Volumétricos dos Vazios nas Amostras CFRP

$[0^\circ]_{12s}$	$[0^\circ/90^\circ]_{6s}$	$[0^\circ/90^\circ/45^\circ/-45^\circ]_{3s}$
0,8863 %	1,9820 %	0,8241%

#### 4.1.4 Queima das Amostras

A Tabela 14 resume os dados obtidos com o procedimento de queima descrito no item 3.2.4, enquanto a Tabela 15 apresenta um resumo dos valores obtidos para as duas metodologias utilizadas para quantificação do percentual volumétrico de fibras (MEV e Queima de Amostras). Para os resultados da queima de amostras não são inseridas as incertezas uma vez que as pesagens foram feitas com uma balança de alta precisão (4 casas decimais de grama), fazendo com que os valores de incertezas sejam ínfimos, sendo assim desprezíveis perante o resultado total de percentual de fibras.

Tabela 14 – Resultados do da quantificação volumétrica de fase por processo de queima.

CP	Tipo	Massa Inicial (g)	Massa Após Queima (g)	Percentual Reforço (%)	Percentual Matriz (%)	Percentual Médio Fibra (%)	Percentual Médio Matriz (%)
1	[0°]	6,2861	4,3611	59,35	40,65	61,25	38,75
2		6,0730	4,3761	62,43	37,57		
3		5,4909	3,9353	61,98	38,02		
4	[0°/90°]	4,7065	3,4126	62,96	37,04	61,83	38,17
5		4,5246	3,2935	63,29	36,71		
6		4,7187	3,269	59,24	40,76		
7	[0°/90°/+45°/-45°]	5,5976	3,9950	61,63	38,37	62,12	37,88
8		5,5134	3,981	62,61	37,39		
9		5,8125	4,1729	62,12	37,88		

Tabela 15 – Valores de percentual volumétrica de fibras encontrado para os 3 laminados avaliados utilizando duas técnicas distintas: MEV e Queima de Amostras.

Percentual de Volumétrico de Fibras (%)			
Laminado	[0°] <sub>12s</sub>	[0°/90°] <sub>6s</sub>	[0°/90°/45°/-45°] <sub>3s</sub>
MEV	59,36 ± 1,86	60,25 ± 1,62	59,81 ± 1,54
Queima de Amostras	61,25	61,83	62,12

Os resultados encontrados são condizentes entre os 3 tipos de laminados avaliados e também semelhantes àqueles encontrados pela micrografia, reforçando a aplicabilidade da técnica para estimar percentuais de fase em compósitos e validando o uso das propriedades expostas na Tabela 4 para materiais com a faixa de percentual de fibras citado. Analogamente, os valores estão de acordo com aqueles expostos no *datasheet* [133] do material e também com valores encontrados na literatura. Esta proximidade dos percentuais de fase entre as amostras reportado nesta seção e na seção anterior eliminam a hipótese de haver diferenças consideráveis nos valores das velocidades e das constantes elásticas causadas por diferenças consideráveis no percentual de fibras. Além disso, os resultados validam a possibilidade de utilizar a tabela de propriedades de laminados *prepregs* (Tabela 4) fornecida por Tsai *et al* [134] para percentuais de fibra em torno de 60% como base para o cálculo teórico das constantes elásticas.

A mínima diferença encontrada entre os resultados desta seção e aqueles encontrados pela micrografia pode ser explicado pela análise de diferentes regiões da placa de onde foram retiradas as amostras e também a possibilidade de haver algum resquício de resina não evaporado durante a queima. Como a norma não especifica uma relação entre o tamanho da amostra e o tempo de queima, apenas informando valores mínimos para cada grandeza, é possível que para dado formato e tamanho de amostra o tempo de reação não tenha sido suficiente para evaporar completamente a resina.

#### 4.1.5 Medição da Rugosidade

Os resultados da avaliação da rugosidade superficial dos laminados exposta na Figura 38 revelam anisotropia da textura, possuindo valores de amplitude ( $R_z$ ) e média ( $R_a$ ) estatisticamente distintos entre as direções longitudinal e transversal. Este fenômeno é bastante semelhante ao constatado por Lukaszewicz e Potter para a mesma classe de material [20]. Paralelamente, observa-se que os valores encontrados para  $R_a$  e  $R_z$ , considerando ambas as direções, são extremamente próximos para todos os tipos de laminados avaliados, realçando a reprodutibilidade do processo que insere a rugosidade.

Já a Figura 39 ilustra a razão entre os parâmetros de rugosidade ( $R_z$  e  $R_a$ ) da amostra  $0^\circ$  na direção 1 e o comprimento de onda associado a propagação do som na água. A direção 1 foi considerada pois possui maior valor de rugosidade média, possuindo maior possibilidade de interferência da rugosidade no feixe sônico. Além disso, considerou-se

a propagação em água devido a menor velocidade sônica e,consequentemente, menor comprimento de onda, o que também aumenta a possibilidade de interferência da rugosidade na entrada e propagação do feixe sônico na amostra. Somente o caso da amostra unidirecional ( $[0^\circ]_{12s}$ ) foi exemplificado dado que os valores médios de  $R_a$  para os três laminados são praticamente iguais, fazendo com que a comparação analisada seja válida para todos.

Conforme observado, para a frequência utilizada nas análises (2,25 MHz) tanto as razões entre  $R_a$  e o comprimento de onda como entre  $R_z$  e o comprimento de onda estão abaixo de 0,1, o que elimina a possibilidade de interferência considerável da rugosidade nos sinais adquiridos, segundo aspectos mencionados na seção 2.3.3 da revisão bibliográfica.

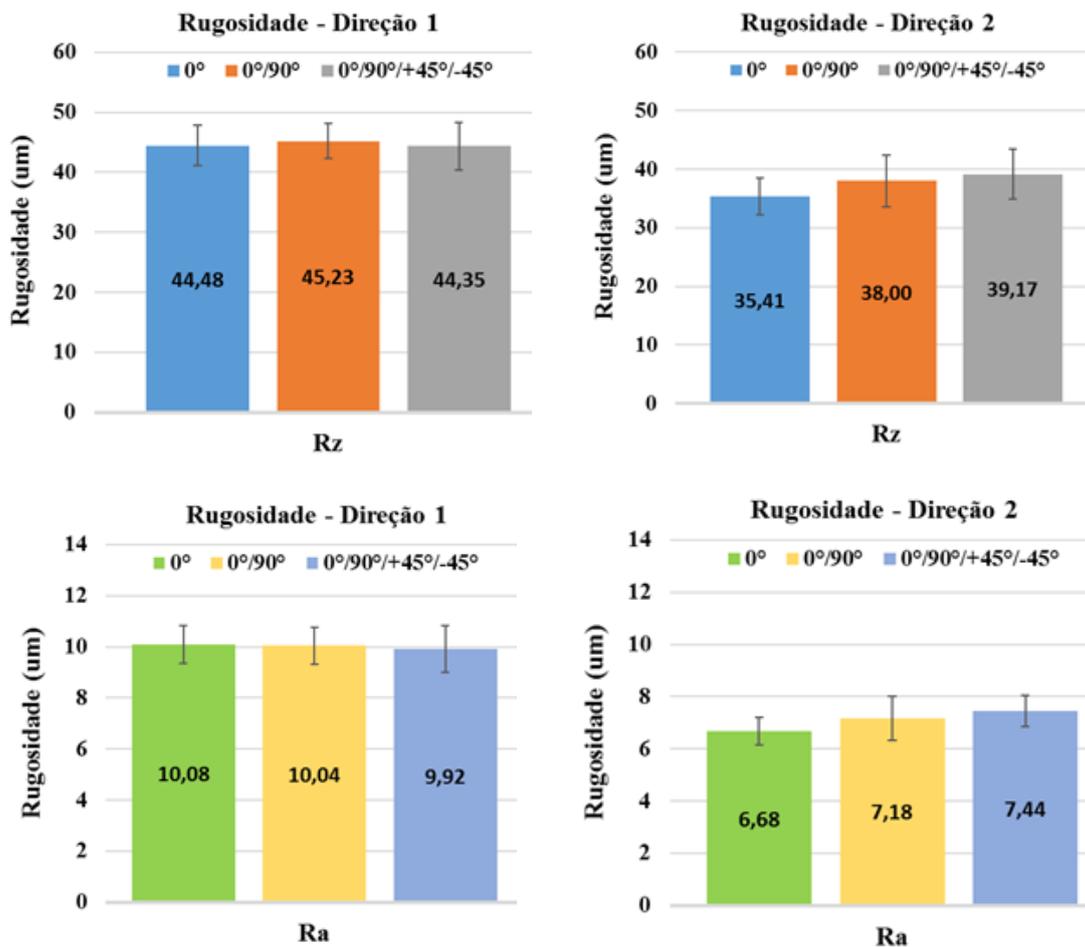


Figura 38 – Gráficos contendo os valores obtidos na avaliação da rugosidade dos laminados.

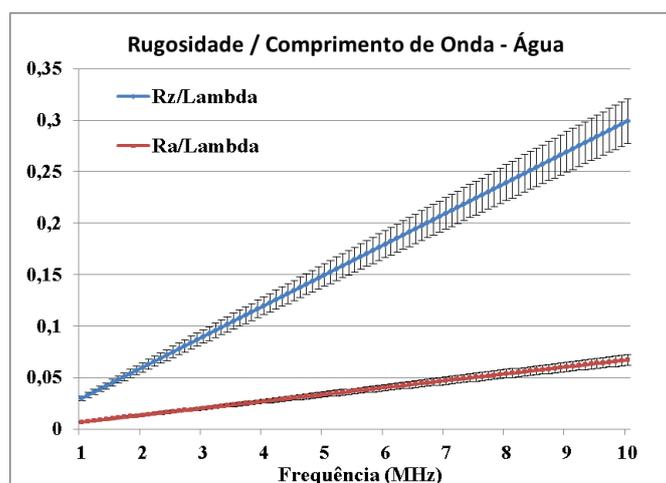


Figura 39 – Razão entre os parâmetros de rugosidade (Rz e Ra) da amostra 0° na direção 1 e o comprimento de onda associado a propagação do som na água.

## 4.2 Cálculo Teórico das Constantes

Os valores dos módulos de elasticidade longitudinal e transversal das camadas foram calculados baseados nas frações volumétricas de cada componente e nos seus respectivos valores de módulo de elasticidade. As equações utilizadas são as da regra das misturas direta (Eq. 39), para o módulo longitudinal ( $E_1$ ), e regra das misturas inversas (Eq. 40), para o módulo transversal ( $E_2$ ). Os valores dos módulos de elasticidade longitudinais e transversal para cada lâmina, considerando o percentual de cada fase observada e suas devidas propriedades são apresentados na Tabela 16.

Nota-se que os valores são próximos para os três tipos de laminados. Isto ocorre devido ao uso das regras das misturas como equações vigentes para modelagem dos módulos elásticos longitudinal e transversal das camadas. Como o resultado obtido por estas equações depende diretamente das frações volumétricas das fases e dos módulos elásticos de cada fase e os valores observados de percentual de fibras na camada é semelhante entre os três casos, que utilizam o mesmo material, têm-se que os módulos calculados são igualmente semelhantes.

Tabela 16 – Valores dos módulos longitudinal e transversal de uma lâmina considerando o percentual de cada fase observado em cada laminado.

Laminado	E <sub>1</sub> (GPa)	E <sub>2</sub> (GPa)
[0°] <sub>12s</sub>	153,49	10,21
[0°/90°] <sub>6s</sub>	155,54	10,44
[0°/90°/45°/-45°] <sub>3s</sub>	154,71	10,35

Em seguida, na Tabela 17, apresentam-se os valores dos componentes das constantes de rigidez para uma lâmina em cada um dos laminados, calculados de acordo com os módulos apresentados anteriormente e valores de referência considerados para outras constantes. Novamente, os valores estão próximo devido a proximidade dos módulos calculados e pelo uso dos mesmos valores de algumas propriedades como referência.

Tabela 17- Valores das constantes de rigidez para uma única lâmina considerando o percentual de fases observado para cada laminado e valores de constantes de referências.

Laminado	[0°] <sub>12s</sub>	[0°/90°] <sub>6s</sub>	[0°/90°/45°/-45°] <sub>3s</sub>
C <sub>11</sub>	157,08	159,17	158,32
C <sub>22</sub> = C <sub>33</sub>	13,33	13,63	13,51
C <sub>12</sub> = C <sub>13</sub>	5,61	5,68	5,65
C <sub>23</sub>	6,38	6,53	6,47
C <sub>44</sub>	3,07	3,07	3,07
C <sub>55</sub> = C <sub>66</sub>	5,57	5,57	5,57

Já na Tabela 18 são apresentados os valores teóricos finais encontrados pela teoria clássica dos laminados (CLPT) para os três laminados utilizados, considerando as propriedades expostas na tabela anterior para uma única lâmina e também a presença das interfaces ricas em resina e suas propriedades. Uma maior diferença entre as propriedades

é observada devido a diferença na sequência de empilhamento, mas respeitando a lógica de grandeza imposta pelas direções de empilhamento presentes.

Tabela 18- Valores teóricos das constantes para cada laminado utilizando CLPT.

Laminado	$[0^\circ]_{12s}$	$[0^\circ/90^\circ]_{6s}$	$[0^\circ/90^\circ/45^\circ/-45^\circ]_{3s}$
$C_{11}$	148,97	82,14	65,19
$C_{22}$	12,85	82,14	65,19
$C_{33}$	12,85	13,14	13,02
$C_{12}$	5,38	5,45	21,77
$C_{13}$	5,38	5,85	5,80
$C_{23}$	6,11	5,85	5,80
$C_{44}$	2,98	4,17	4,17
$C_{55}$	5,35	4,17	4,17
$C_{66}$	5,35	5,36	20,78

### 4.3 Resultados Gerais do Ensaio Rotatório

Os resultados obtidos com o procedimento descrito na seção 3.4.1 são expostos na forma de um compilado de gráficos *A-Scans* para todos os ângulos de incidência avaliados utilizando escala de cores para a amplitude. Uma representação esquemática da construção deste tipo de gráfico é exposta na Figura 40. Já nas figuras 41 a 43, estão expostos estes gráficos compilados de *A-Scans* para os testes realizados nos três laminados avaliados e considerando as três metodologias de medição de intervalo temporal, dispondo inclusive os pontos utilizados para medição das velocidades.

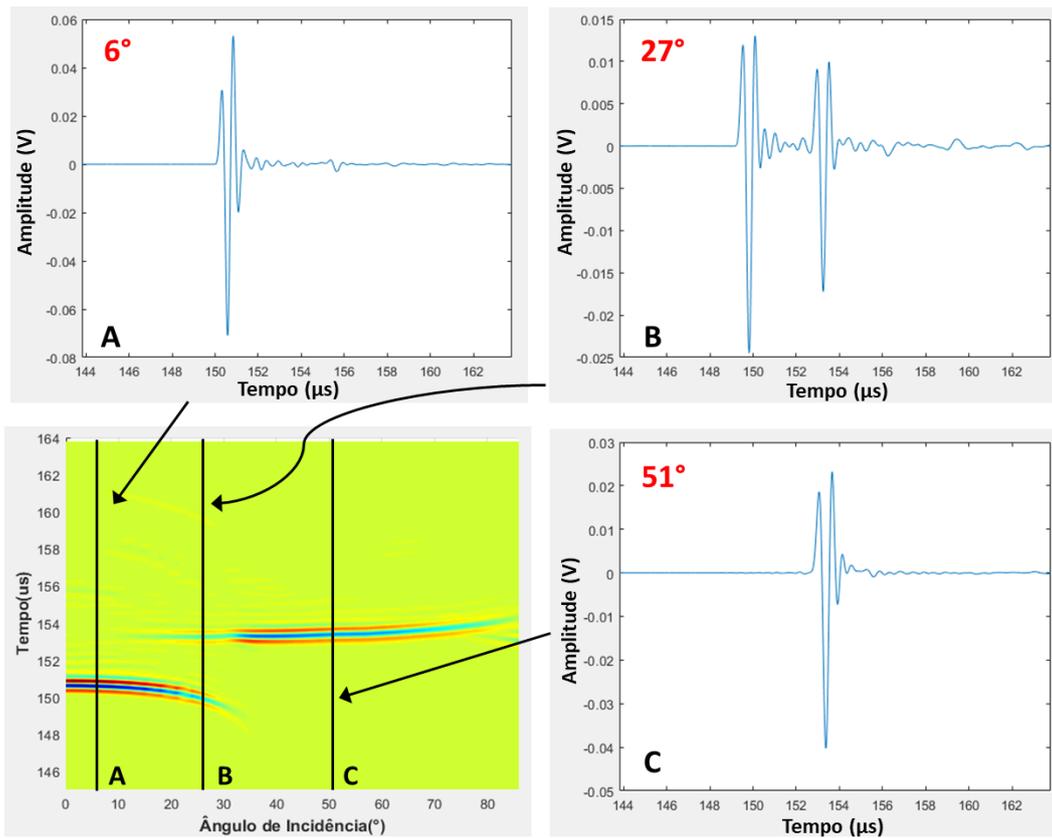
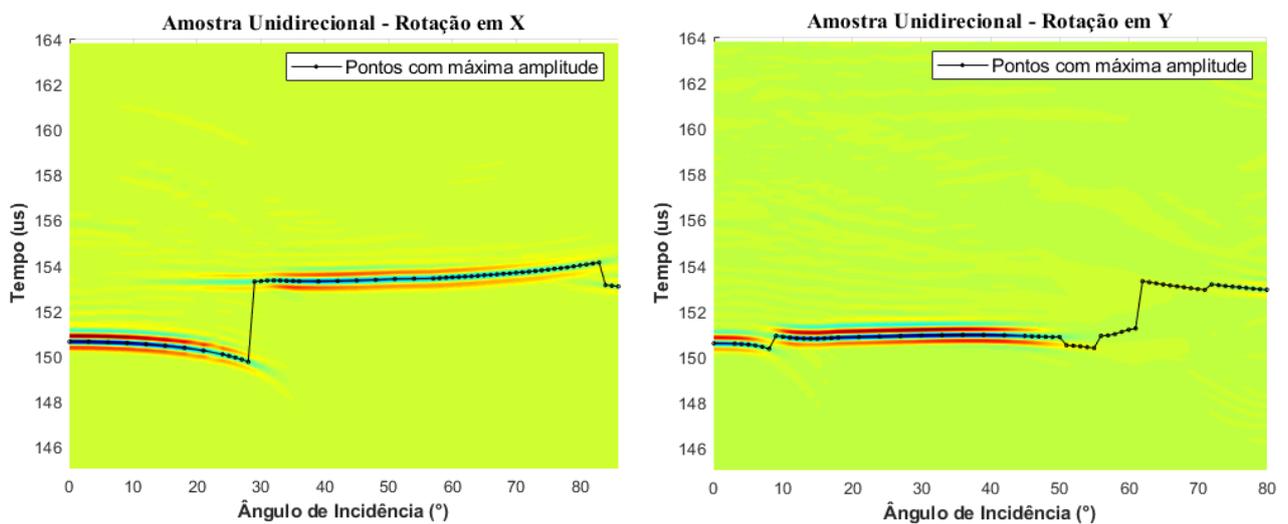


Figura 40 – Representação esquemática da formação do gráfico compilado de *A-Scans* para diversos ângulos de incidência.



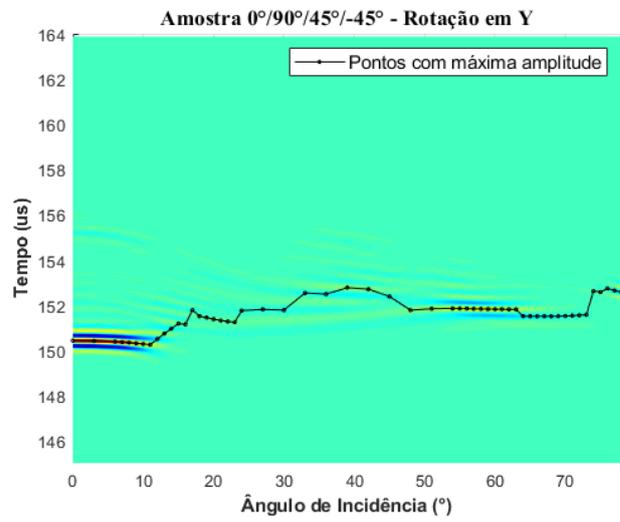
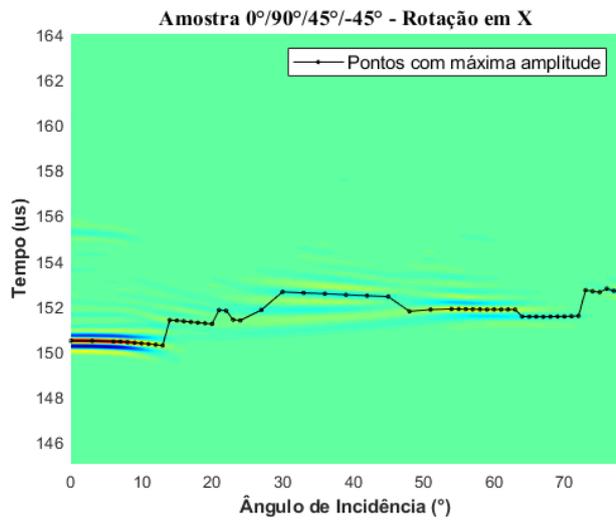
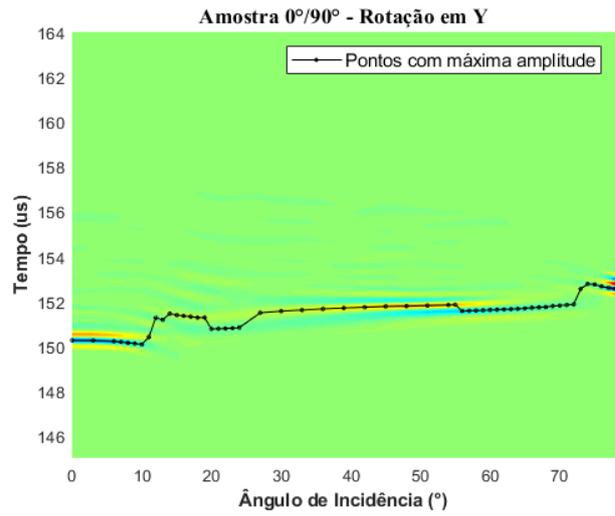
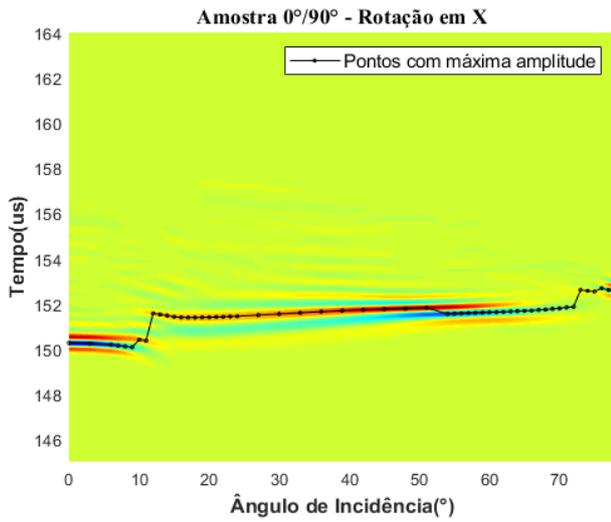


Figura 41 – Disposição do sinal *A-Scan* em escala de cores para diversos ângulos de incidência utilizando o método tradicional de valor máximo de amplitude.

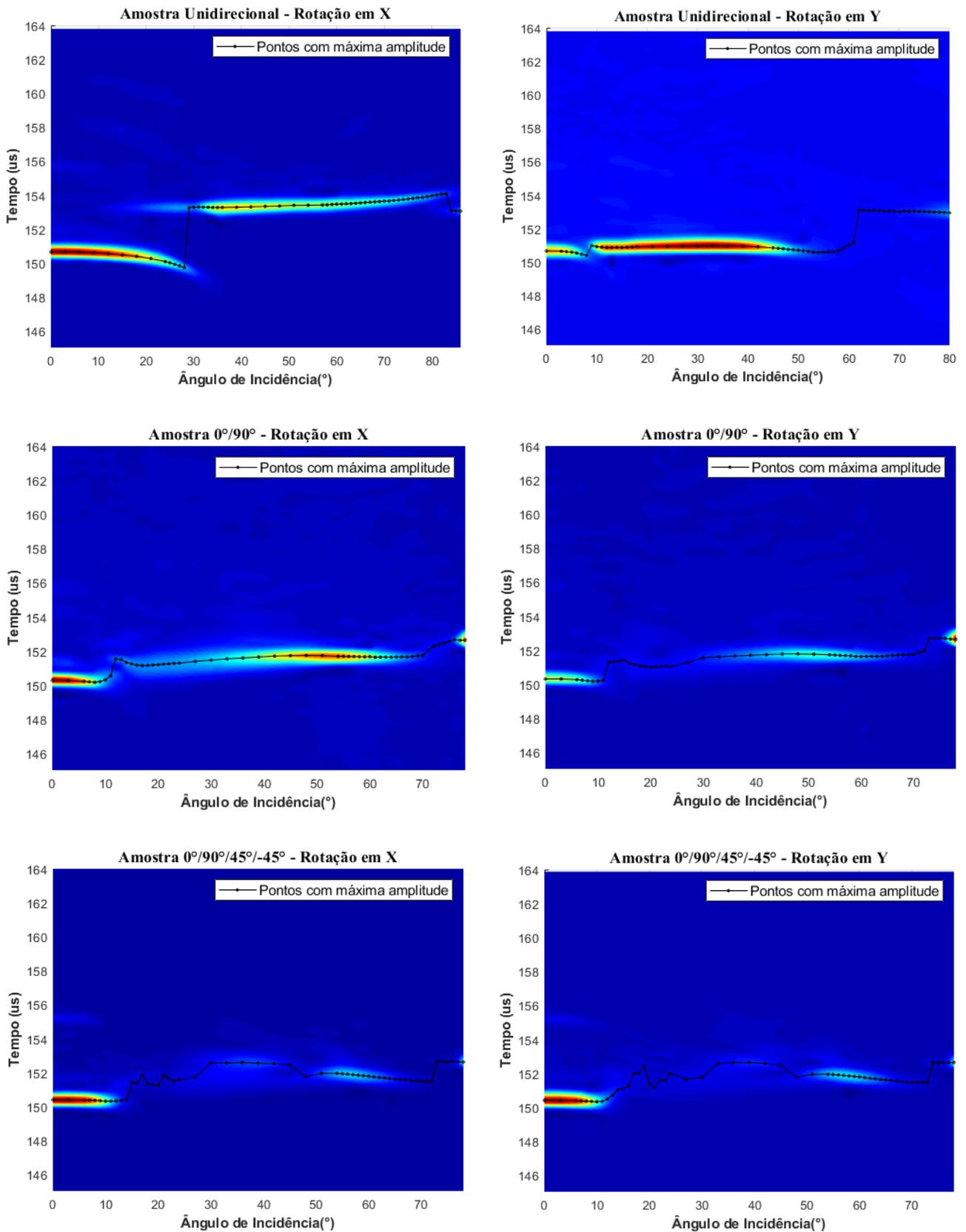


Figura 42 – Disposição do sinal *A-Scan* em escala de cores para diversos ângulos de incidência utilizando o método de valor máximo de amplitude do envelope.

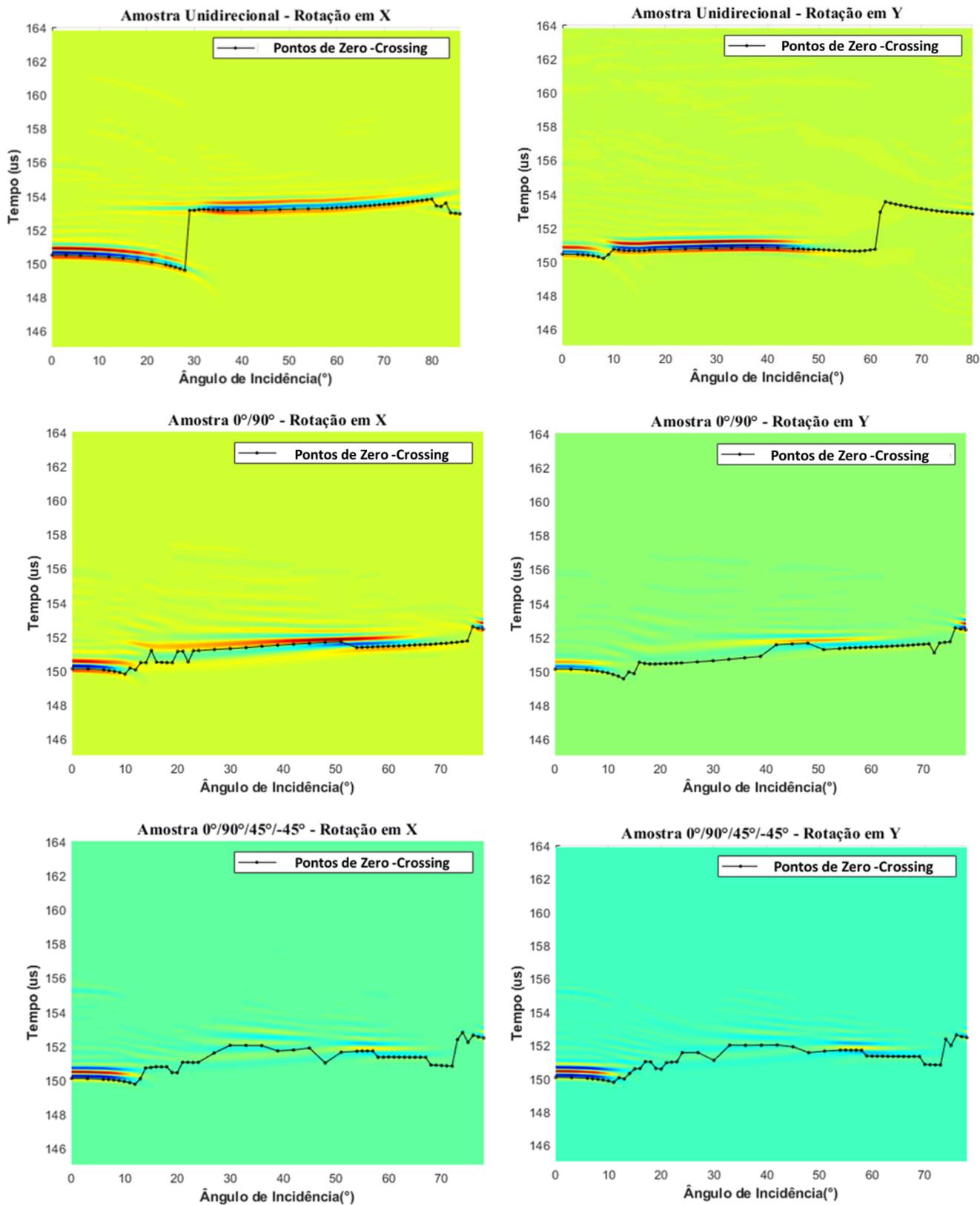
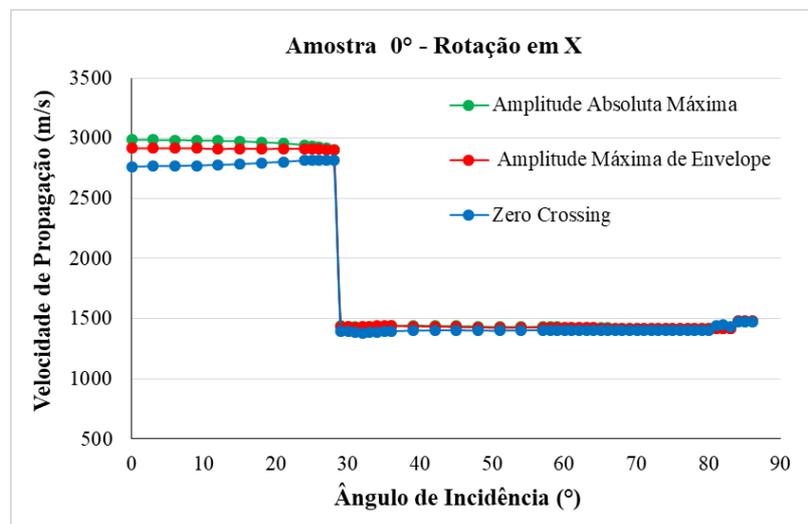


Figura 43 – Disposição do sinal A-Scan em escala de cores para diversos ângulos de incidência utilizando o método de Zero-Crossing.

De acordo com as figuras, nota-se uma mudança gradual no tempo associada a zona de máxima energia do sinal de acordo com o ângulo de incidência utilizado. Isto ocorre devido a mudança de caminho do feixe sônico, que se projeta uma distância distinta no material, e também devido a mudança nos valores das velocidades a depender da direção de propagação. Todavia, isto ocorre de forma distinta para cada laminado utilizado dada as diferentes condições de empilhamento, que geram diferentes velocidades a depender da direção de propagação. Estas diferenças são expostas nas figuras 44, 45 e 46, onde são expostas as velocidades calculadas para cada laminado avaliado.

Nota-se também que a energia sônica das ondas cisalhantes que chega ao receptor é bastante dependente do tipo de laminado e do ângulo de incidência, reduzindo à medida que se foge da normalidade. Laminados mais complexos, com camadas distintas, como o  $[0^\circ/90^\circ]$  e o  $[0^\circ/90^\circ/45^\circ/-45^\circ]$  exibiram valores de amplitude mais baixos para as ondas transversais quando comparados aos unidirecionais, com uma faixa maior de transmissão de energia entre  $50^\circ$  e  $65^\circ$ , conforme previsto na literatura [95].



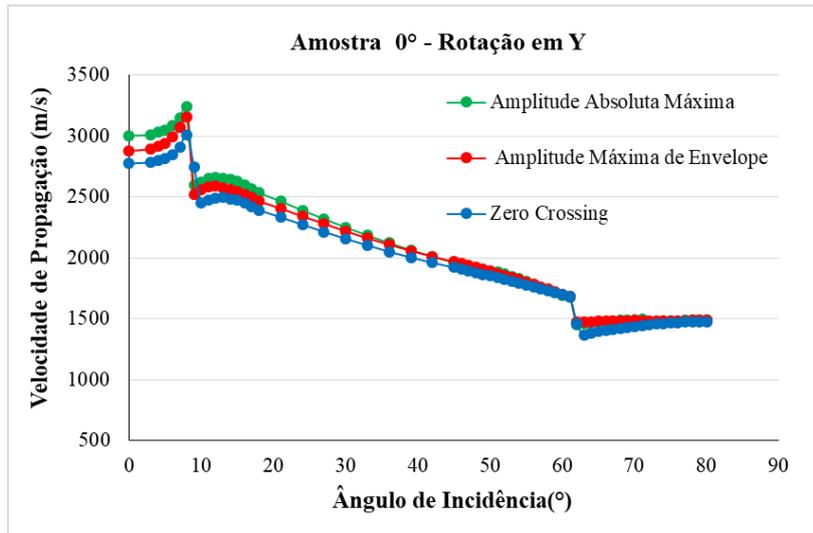
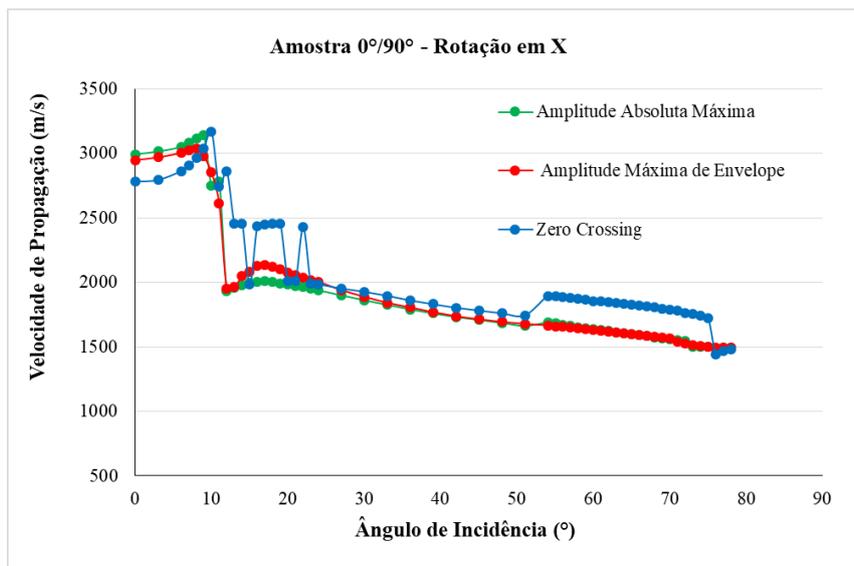


Figura 44 – Variação da velocidade de propagação de acordo com o ângulo de incidência: (a) Rotação em X; (b) rotação em y. (Amostra  $[0^\circ]_{12s}$ )



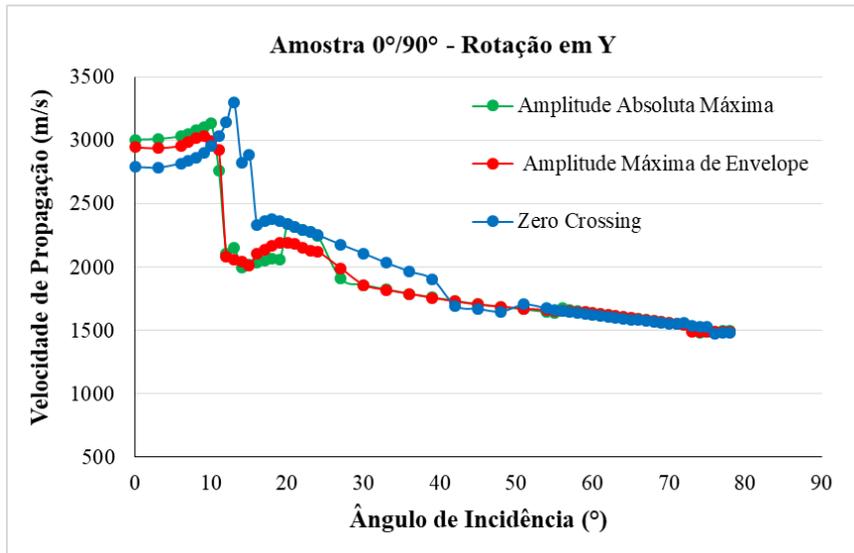
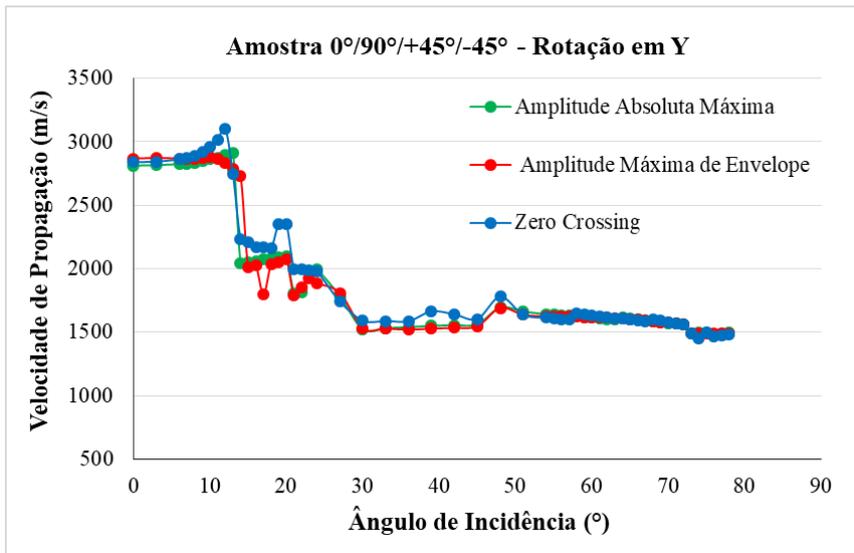


Figura 45 - Variação da velocidade de propagação de acordo com o ângulo de incidência: (a) Rotação em X ; (b) rotação em y.(Amostra [0°/90°]<sub>6s</sub>)



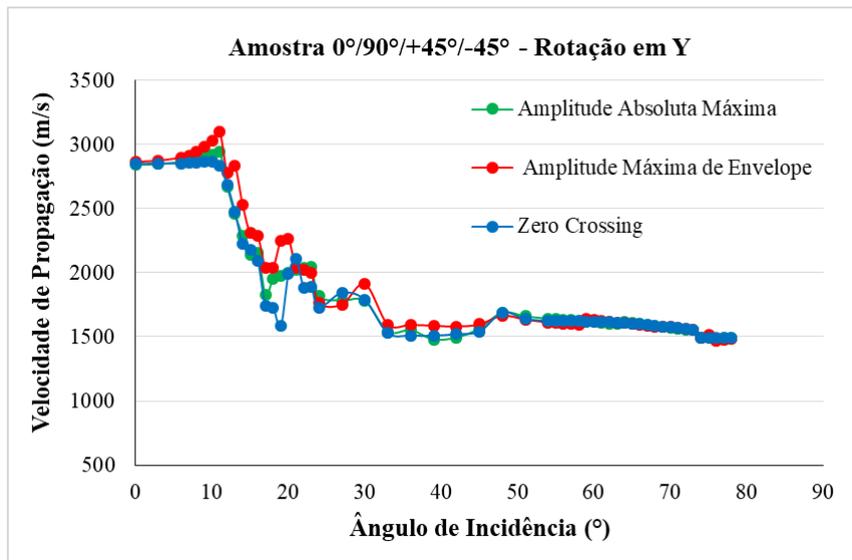


Figura 46- Variação da velocidade de propagação de acordo com o ângulo de incidência: (a) Rotação em X ; (b) rotação em y.(Amostra  $[0^\circ/90^\circ/+45^\circ/-45^\circ]_{3s}$ )

Assim como pode-se observar nos gráficos *A-Scans* projetados (Figuras 41, 42 e 43), há uma existência de 2 patamares diferentes de velocidades. O primeiro deles, com valores maiores de velocidade está associado a propagação de ondas longitudinais. Em seguida, ao aumentar-se o ângulo de incidência, nota-se um valor a partir do qual a energia das ondas longitudinais é anulada e as ondas cisalhantes rápidas se tornam proeminentes, iniciando assim um novo patamar de velocidades. Para os laminados unidirecionais, mais estudados na literatura, as formas e valores dos gráficos obtidos estão muito parelhos com aqueles observados em outros trabalhos [25] [72] [99]. É interessante que para uma rotação em torno do eixo das fibras (eixo rotação em y), exceto por alguns valores ruidosos, as velocidades são praticamente independentes do ângulo de incidência, reforçando caráter transversalmente isotrópico do material unidirecional.

Em alguns casos, à medida que se aumenta a complexidade da sequência de empilhamento, fatores como presença de múltiplos picos com amplitudes próximas e que se alternam em amplitude, assim como a alta atenuação presente, tornam o sinal mais complexo para a interpretação dos algoritmos temporais. Isto gera dificuldade de reconhecimento dos pontos de interesse e possivelmente causa erros de alocação de pontos pelos algoritmos utilizados, assim como também observado na literatura [98] [96] [115]. Por isso, a estimação de velocidades e do ângulo crítico tornam-se mais complicadas principalmente no laminado  $[0^\circ/90^\circ/45^\circ/-45^\circ]$  dado que a escolha da

referência do tempo se torna mais ruidosa, principalmente em uma zona após o primeiro ângulo crítico. Além disso, embora teoricamente se espere duas ondas cisalhantes presentes devido a incidência oblíqua, foi observada apenas uma delas (a cisalhante rápida) assim como ocorrido em outros trabalhos da literatura [95] [136] [148] [149]. Isto é explicado devido a incapacidade de acoplamento da onda cisalhante lenta e o fluido ao realizar o experimento em um plano de simetria [149].

Não menos importante, nota-se que os valores de velocidade são altamente dependentes do método de quantificação utilizado, conforme já comentado por Jarvis e Cegla [69]. Analisando os gráficos com os valores de velocidade para cada ângulo de incidência, é notório que o método da amplitude máxima de envelope, ao mesmo tempo em que gerou resultados condizentes com os outros métodos e com a literatura, também foi o que reportou menor ruído e mudanças bruscas de valores nos dados analisados. Por este motivo, os valores gerados por esta metodologia foram os selecionados para a continuação das análises realizadas neste trabalho.

Feitas todas as observações, anotam-se os ângulos críticos relacionados as ondas longitudinais, dispostos na Tabela 19. Nota-se que para a amostra unidirecional, que possui o sinal mais claro e menos complexo, os valores são idênticos utilizando as 3 metodologias consideradas. Já para os outros laminados, dada maior complexidade do sinal e dificuldade no reconhecimento do ponto de referência temporal, foram observados 2 valores distintos dos demais. Os valores encontrados estão condizentes com aqueles encontrados na literatura.

Tabela 19 – Valores dos ângulos de incidência necessários a conversão de modo.

<b>Ângulos de Transição Longitudinal para Cisalhante (°)</b>						
Método	Amplitude Máxima		Amplitude Máxima de Envelope		Zero-Crossing	
	Rot. em X	Rot. em Y	Rot. em X	Rot. em Y	Rot. em X	Rot. em Y
Laminado						
[0°] <sub>12s</sub>	29	9	29	9	29	9
[0°/90°] <sub>6s</sub>	12	12	12	12	12	14
[0°/90°/45°/-45°] <sub>3s</sub>	14	14	15	14	14	14

#### 4.4 Cálculo das Constantes Elásticas

##### 4.4.1 Cálculo de $C_{11}$ e $C_{22}$ pelo primeiro ângulo crítico

Conforme explicado na seção 3.5.1, os valores calculados das constantes  $C_{11}$  e  $C_{22}$ , associados a propagação da onda longitudinal no plano do laminado nas direções longitudinal e transversal (para o caso unidirecional), podem ser estimadas utilizando os valores de ângulos críticos médios associados e a formulação da Lei de Snell. Os resultados são expostos na Tabela 20. Para os casos não unidirecionais nota-se que a postulação dos eixos X e Y é mera formalidade devido à simetria destes laminados em relação ao eixo Z (direção da espessura).

Tabela 20 – Valores de  $C_{11}$  e  $C_{22}$  calculados de acordo com os valores do primeiro ângulo crítico observados.

Rotação em X			
Amostra	Primeiro Ângulo Crítico (°)	Valor de $C_{22}$ (GPa)	Valor Teórico (GPa)
$[0^\circ]_{12s}$	29°	14,16	13,33
$[0^\circ/90^\circ]_{6s}$	12°	77,03	82,14
$[0^\circ/90^\circ/45^\circ/-45^\circ]_{3s}$	14,33°	54,36	65,19
Rotação em Y			
Amostra	Primeiro Ângulo Crítico – Valor Médio(°)	Valor de $C_{11}$ (GPa)	Valor Teórico (GPa)
$[0^\circ]_{12s}$	9°	136,08	148,97
$[0^\circ/90^\circ]_{6s}$	12,66°	69,33	82,14
$[0^\circ/90^\circ/45^\circ/-45^\circ]_{3s}$	14°	56,90	65,19

Dentre as possibilidades para diferenças dos valores teóricos e aqueles encontrados experimentalmente ressalta-se, em primeiro lugar, a imprecisão do intervalo angular, com variações de 1° próximas ao ângulo crítico, quando variações de 0,5° já acarretariam mudanças consideráveis no valor de  $C_{11}$  para ângulos pequenos. Por exemplo, uma mudança de 9° para 8,5° modificaria o valor de  $C_{11}$  de 136,08 GPa para 152 GPa. Soma-se a isto a presença de porosidade na amostra, que modifica a situação ideal de material perfeito, também podendo causar uma leve redução nas velocidades de propagação e, conseqüentemente, nas constantes elásticas. Portanto, levando em consideração a possibilidade de influência destes fatores, nota-se que há uma sintonia entre os valores calculados teoricamente e aqueles mensurados experimentalmente, com valores razoavelmente próximos e respeitando a ordem crescente em relação ao tipo de laminado avaliado, com maiores valores de  $C_{11}$  para o laminado unidirecional, reduzindo à medida que se aumenta a complexidade do empilhamento. Além disso, os valores de ângulos críticos observados estão condizentes com aqueles reportados na literatura [25] [72] [98] [136] [96] .

Avaliando especificamente o caso da amostra [0°/90°] na rotação em Y a maior variação é explicada pela presença de um ângulo crítico de 14° calculado pela metodologia *Zero Crossing*, valor bastante destoante perante os demais e provavelmente incorreto. Em alguns casos, a transição entre o regime longitudinal e transversal não é muito claro, com alguns valores em zonas intermediárias entre ambas, o que também dificulta uma avaliação clara e precisa do ângulo crítico real. Para o caso da amostra unidirecional com rotação em X, observou-se o único valor experimental acima do teórico, causado provavelmente por uma falha de interpretação na avaliação calculada para o ângulo crítico. O valor considerado em todos os casos foi aquele a partir do qual o regime de propagação transversal possui maior energia perante o longitudinal, possivelmente desprezando neste caso 1° ou 2° para os quais ainda há um resquício de energia transmitida pela propagação longitudinal.

Embora a falta de precisão devido ao passo largo da rotação do corpo de prova e ausência de clareza sobre a mudança de regime de propagação sônica, a medição do ângulo crítico se apresenta com uma ferramenta bastante útil para avaliação das constantes elásticas  $C_{11}$  e  $C_{22}$  de laminados compósitos. Em termos de aprimoramento, este processo deve ser realizado com medições em intervalos angulares menores, possivelmente de 0,1°, para que se obtenham valores mais fidedignos. Paralelamente, uma

boa alternativa é utilizar um critério de transição de regime utilizando como referência a energia da onda longitudinal observada na incidência normal ao invés de um critério comparativo entre as amplitudes constatadas para ambos os tipos de ondas.

#### 4.4.2 Amostra Unidirecional ( $[0^\circ]_{12s}$ )

##### **Rotação em X**

Conforme explicitado na seção 3.5.2, os valores das constantes  $C_{22}$  e  $C_{44}$  foram calculadas para o laminado unidirecional através da estimativa das velocidades médias longitudinal e cisalhante considerando diversos ângulos de incidência. Os resultados estão expostos na Tabela 21.

Tabela 21- Resultado do cálculo das constantes  $C_{22}$  e  $C_{44}$  para amostra unidirecional  $[0^\circ]$ .

Amostra $[0^\circ]$ – Rotação em X		
Tipo de Onda	Velocidade Média (m/s)	Constante Associada - $C_{22}$ e $C_{44}$ (GPa)
Onda Longitudinal	2911,0	12,77
Onda Transversal	1427,4	3,07

Com estes valores utilizando a equação exposta na Tabela 2 (Eq. 56), que relaciona as constantes  $C_{22}$ ,  $C_{44}$  e  $C_{23}$ , é possível estimar esta última. Os valores destas constantes, com a devida comparação a outros valores está disposta na Tabela 22.

Tabela 22 – Comparação entre valores das constantes  $C_{22}$ ,  $C_{44}$  e  $C_{23}$ .

Constante Elástica	$C_{22}$ (GPa)	$C_{44}$ (GPa)	$C_{23}$ (GPa)
Experimental	12,77	3,07	6,63
Modelo Mecânico + Valores Referência	12,85	2,98	6,11

Ao observarmos os resultados, nota-se que os valor de  $C_{22}$  está de acordo com o valor desta constante considerando o valor médio do módulo  $E_2$  estimado e as constantes de referência fornecidas por Tsai *et al* [134] ,conforme explicitado na seção 3.3. Em relação ao valor computado pelo ângulo crítico, os valores ainda são próximos porém é observada uma diferença de cerca de 10%, possivelmente geradas pela imprecisão na medição e no critério de escolha do ângulo crítico, conforme mencionado na seção 4.4.1. Para as outras constantes calculadas os valores estão bastante condizentes com aqueles estimados teoricamente, demonstrando validade da metodologia para este tipo de medição no tipo de amostra considerado.

### **Rotação em Y**

Para rotação em Y, os valores das constantes  $C_{13}$ ,  $C_{55}$  e  $C_{33}$  encontrados para a amostra unidirecional utilizando os três métodos de ajuste propostos e avaliando para o caso das ondas longitudinais e transversais estão expostos na Tabela 23. Os gráficos comparando os valores ajustados pelo modelo e os dados experimentais estão representados nas figuras 47 e 48. Um resumo dos resultados é exposto na Tabela 24.

Tabela 23 – Valores, em GPa, das constantes estimadas com base na propagação de ondas sônicas na amostra unidirecional [0°] considerando a rotação em torno do eixo Y.

[0°] –Rotação em Y		Onda Longitudinal			Onda. Cisalhante		
Constante	$C_{11}$ (Fixada)	$C_{13}$	$C_{55}$	$C_{33}$	$C_{13}$	$C_{55}$	$C_{33}$
Algoritmo Evolucionário	136,080	12,821	0	12,674	4,263	5,007	11,463
GRG		12,821	0	12,674	4,263	5,007	11,463
Levenberg-Marquardt		12,821	0	12,674	4,261	5,007	11,462

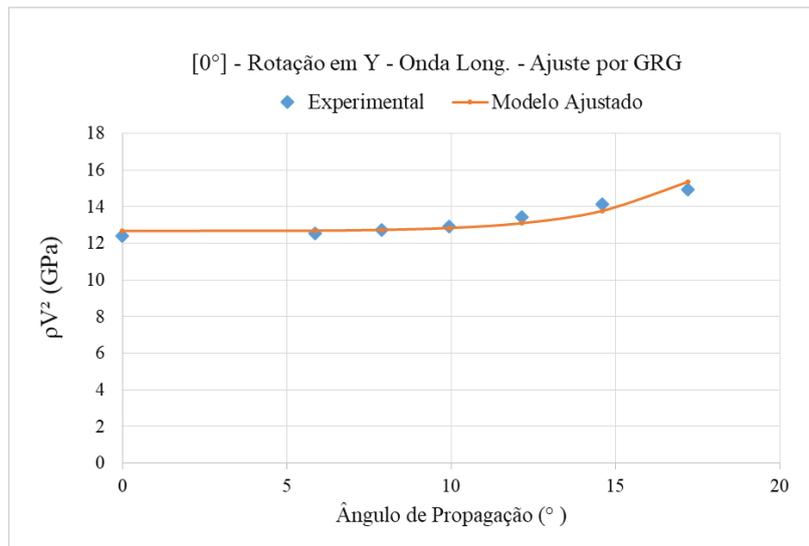


Figura 47 – Gráfico de ajuste do modelo para a amostra unidirecional considerando ondas longitudinais e rotação em Y.

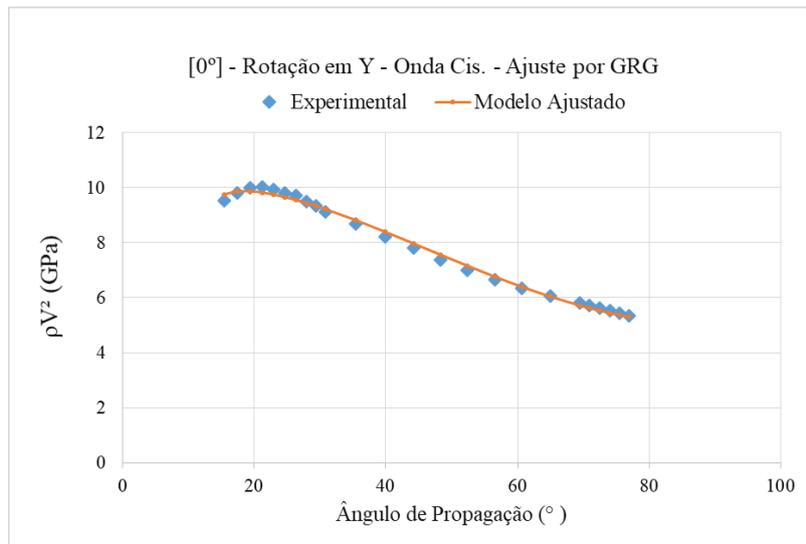


Figura 48 – Gráfico de ajuste do modelo para a amostra unidirecional considerando ondas cisalhantes e rotação em Y.

Tabela 24 – Valores médios, em GPa, das constantes encontradas para a amostra unidirecional baseada no ajuste do modelo físico para cada condição avaliada.

Constante Avaliada	$C_{11}$ (Fixada)	$C_{13}$	$C_{55}$	$C_{33}$
Rotação em Y – Onda Long.	136,08	12,821	0	12,674
Rotação em Y – Onda Cis.		4,262	5,007	11,462

Para o caso de ondas longitudinais, apenas o valor da constante  $C_{33}$  foi constatada como próxima ao esperado, com um valor bem acima do esperado para  $C_{13}$  e um valor ilógico para  $C_{55}$ . Todavia, ao observar o gráfico de ajuste nota-se um bom ajuste entre os valores experimentais e aqueles ajustados pelo modelo. Devido a pequena quantidade de dados, a tendência a acontecer sobreajuste (*overfitting*) é maior, o que pode ter sido a causa das inconsistências observadas. Por exemplo, ao colocar para  $C_{13}$  para um valor plausível, próximo ao esperado (5 GPa), obtém-se valores de constantes  $C_{55}$  e  $C_{33}$  de 2,48 GPa e 12,86 GPa, valores mais próximos dos reais, com um ajuste com resíduo quadrático ainda pequeno, porém um pouco maior que o valor apresentado no caso ótimo. Isto demonstra que para ajustar matematicamente a curva ao máximo para o

número de pontos dispostos, que é pequeno, os valores das constantes acabam se tornando longe dos valores reais no caso de valores de velocidade que não correspondem ao esperado. Uma alternativa plausível é limitar o valor das constantes em intervalos menores no algoritmo de ajuste. Além disso, a literatura [25] [98] [136] reporta um aumento grande e repentino nos valores de velocidade longitudinal na vizinhança próxima ao primeiro ângulo crítico, o que não foi observado para os valores medidos, possivelmente sendo o motivo de resultados para as constantes elásticas em faixa de valores diferente da esperada.

Já para o caso de ondas cisalhantes, os valores das constantes observados estão bem próximos daqueles calculados por modelos teóricos, juntamente com um ótimo ajuste do modelo exposto pela Figura 48. As pequenas diferenças encontradas podem ocorrer devido a fatores como presença de porosidade alterando levemente as velocidades, valor incorreto da constante fixada  $C_{11}$  e imprecisões experimentais e possíveis diferenças de propriedades da amostra em relação aos valores da tabela de referência. De todo modo, os valores observados são bastante satisfatórios e demonstram boa aplicabilidade da técnica, principalmente para o caso de análises comparativas.

#### 4.4.3 Amostra $[0^\circ/90^\circ]_{6s}$

Os valores das constantes  $C_{13}$  ( $C_{23}$ ),  $C_{55}$  ( $C_{44}$ ) e  $C_{33}$  encontrados para a amostra  $[0^\circ/90^\circ]$  utilizando os três métodos de ajuste propostos e avaliando para o caso das ondas longitudinais e transversais estão expostos nas tabelas 25 e 26. Os gráficos comparando os valores ajustados pelo modelo e os dados experimentais estão representados nas figuras 49 a 52. Um resumo dos resultados é exposto na Tabela 27.

#### Rotação em X

Tabela 25- Valores, em GPa, das constantes estimadas com base na propagação de onda longitudinal na amostra  $[0^\circ/90^\circ]$  considerando a rotação em torno do eixo X.

$[0^\circ/90^\circ]$ – Rotação em X		Onda Longitudinal			Onda Cisalhante		
Constante	$C_{11}$ (Fixada)	$C_{13}$	$C_{55}$	$C_{33}$	$C_{13}$	$C_{55}$	$C_{33}$
Algoritmo Evolucionário	77,032	13,926	0	13,163	5,783	3,449	8,473

GRG		13,926	0	13,163	5,783	3,449	8,473
Levenberg-Marquardt		13,926	0	13,163	5,783	3,449	8,473

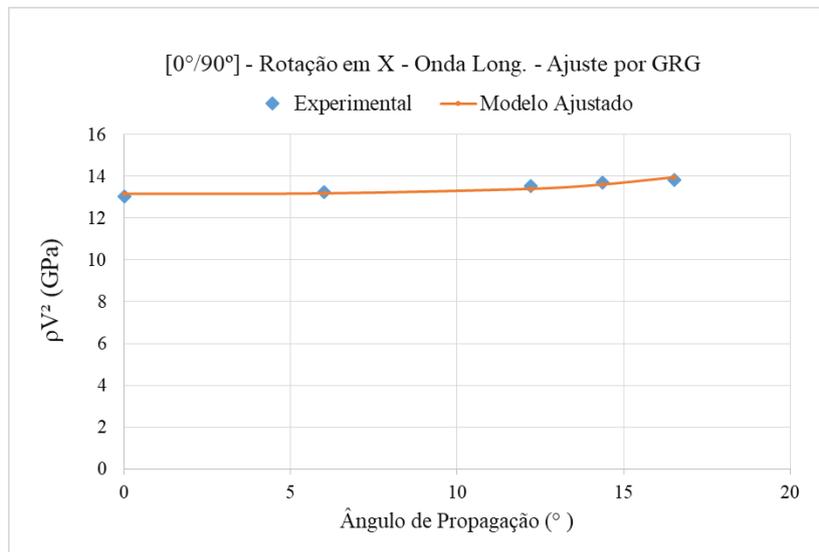


Figura 49 - Gráfico de ajuste do modelo para a amostra [0°/90°] considerando ondas longitudinais e rotação em X.

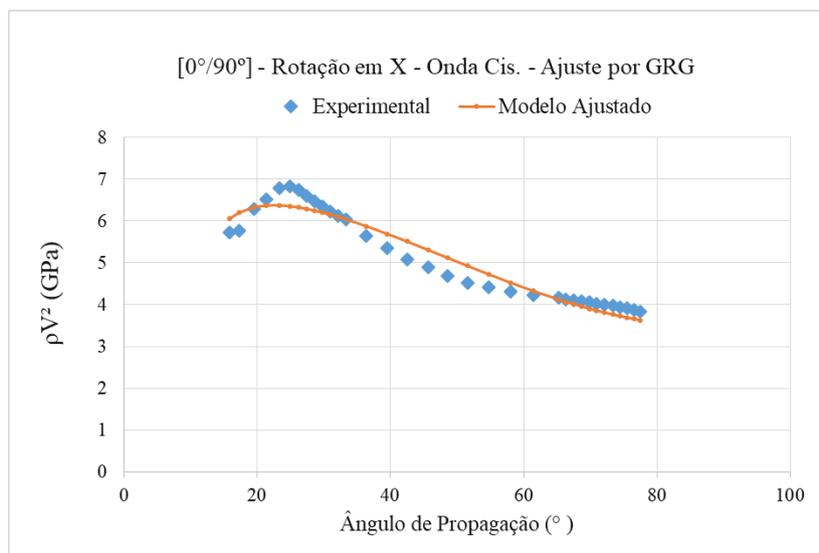


Figura 50 - Gráfico de ajuste do modelo para a amostra [0°/90°] considerando ondas cisalhantes e rotação em X.

### Rotação em Y

Tabela 26 – Valores, em GPa, das constantes estimadas com base na propagação de ondas sônicas na amostra [0°/90°] considerando a rotação em torno do eixo Y.

[0°/90°] – Rotação em Y		Onda Longitudinal			Onda Cisalhante		
Constante	$C_{11}$ (Fixada)	$C_{13}$	$C_{55}$	$C_{33}$	$C_{13}$	$C_{55}$	$C_{33}$
Algoritmo Evolucionário	69,331	13,029	0	13,040	5,110	3,339	8,973
GRG		13,029	0	13,040	5,111	3,340	8,973
Levenberg-Marquardt		13,029	0	13,040	5,111	3,340	8,973

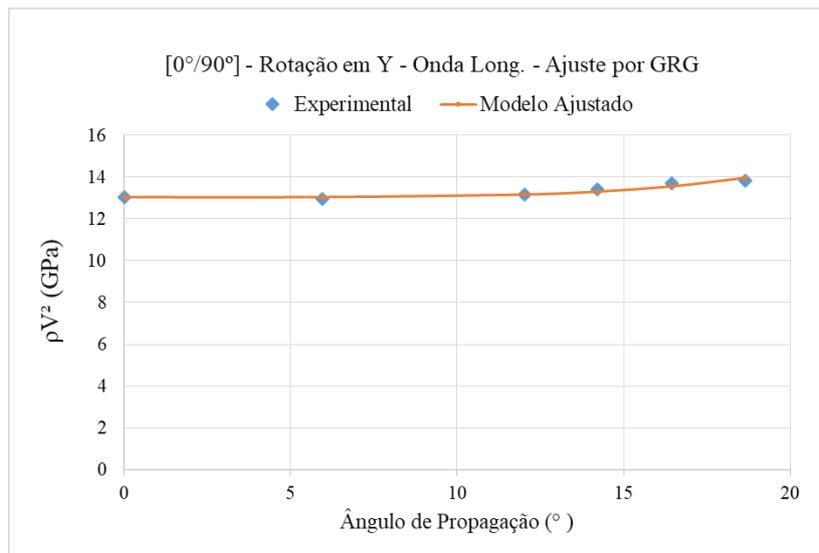


Figura 51 - Gráfico de ajuste do modelo para a amostra [0°/90°] considerando ondas longitudinais e rotação em Y.

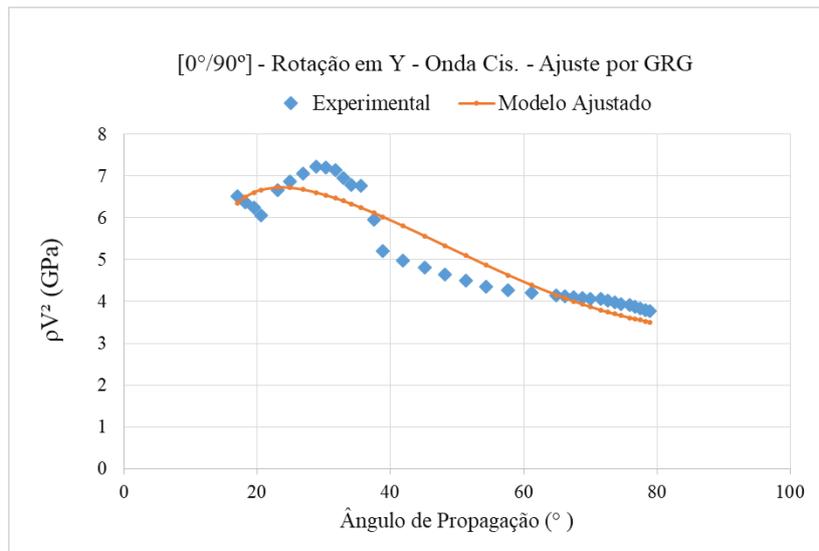


Figura 52 - Gráfico de ajuste do modelo para a amostra [0°/90°] considerando ondas cisalhantes e rotação em Y.

Tabela 27 - Valores médios, em GPa, das constantes encontradas para a amostra [0°/90°] baseada no ajuste do modelo físico para cada condição avaliada.

Constante Avaliada	C <sub>11</sub> (Fixada)	C <sub>13</sub>	C <sub>55</sub>	C <sub>33</sub>
Rotação em X – Onda Long.	77,032	13,926	0	13,163
Rotação em X – Onda Cis.		5,783	3,449	8,473
Rotação em Y – Onda Long.	69,331	13,029	0	13,040
Rotação em Y – Onda Cis.		5,111	3,340	8,973

Analogamente ao que foi observado para a amostra unidirecional, mesmo com um bom ajuste dos dados perante o modelo, a estimativa das constantes calculadas utilizando as ondas unidirecionais demonstraram valores de C<sub>33</sub> plausíveis, com valores de C<sub>13</sub> muito acima do esperado e valores nulos para C<sub>55</sub>, o que é totalmente inconsistente com a realidade. Novamente, dada a pequena quantidade de dados analisadas nesse regime, há

uma tendência maior a ocorrer sobreajuste, o que torna qualquer defasagem experimental muito mais comprometedoras perante os resultados finais. Como exemplo, ao se fixar a constante  $C_{13}$  para um valor próximo do esperado (em torno de 5.5 GPa), os valores das constantes  $C_{55}$  e  $C_{33}$  se tornam 3,850 e 13,195 (para rotação em X) e 3,436 GPa e 13,078 GPa (rotação em Y), mantendo ainda um baixo valor para a norma dos resíduos quadráticos porém um pouco maior que o valor ótimo. Isto demonstra novamente o quão sensível o algoritmo é perante os dados e que as vezes o ajuste máximo com 3 variáveis livres pode levar a valores falhos para o caso de poucos pontos de dados.

Já para as ondas cisalhantes, para as quais há uma maior quantidade de dados, mesmo com um intervalo de valores irregulares de velocidade para o caso de rotação em Y, as constantes observadas apresentaram ordem de grandeza e valores condizentes com a faixa de valores esperados, com valores menores para a constante  $C_{55}$ , seguida da constante  $C_{13}$  e por último a constante  $C_{33}$ . Neste caso especificamente, nota-se uma maior diferença para a constante  $C_{33}$  reduzindo cerca de 25% em relação ao valor teórico. Novamente, é possível que estas defasagens sejam causadas por um conjunto de fatores englobando a presença de um grau considerável de porosidade de forma a modificar os valores das propriedades e as velocidades, imprecisões nas medições, falta de acurácia na determinação da constante fixada  $C_{11}$  e erros na determinação das velocidades envolvidas considerando os algoritmos de cálculo de tempo utilizados.

#### 4.4.4 Amostra $[0^\circ/90^\circ/+45^\circ/-45^\circ]_{3s}$

Os valores das constantes  $C_{13}$  ( $C_{23}$ ),  $C_{55}$  ( $C_{44}$ ) e  $C_{33}$  encontrados para a amostra  $[0^\circ/90^\circ/+45^\circ/-45^\circ]$  utilizando os três métodos de ajuste propostos e avaliando para o caso das ondas longitudinais e transversais estão expostos nas tabelas 28 e 29. Os gráficos comparando os valores ajustados pelo modelo e os dados experimentais estão representados nas figuras 53 a 56. Um resumo dos resultados é exposto na Tabela 30.

#### **Rotação em X**

Tabela 28 – Valores, em GPa, das constantes estimadas com base na propagação de ondas sônicas na amostra [0°/90°/45°/-45°] considerando a rotação em torno do eixo X.

[0°/90°/45°/-45°] - Rotação em X		Onda Longitudinal			Onda Cisalhante		
Constante	C <sub>11</sub> (Fixada)	C <sub>13</sub>	C <sub>55</sub>	C <sub>33</sub>	C <sub>13</sub>	C <sub>55</sub>	C <sub>33</sub>
Algoritmo Evolucionário	54,360	1,134	4,823	12,364	0	3,548	5,815
GRG		1,134	4,823	12,364	0	3,548	5,815
Levenberg-Marquardt		1,134	4,823	12,364	0	3,548	5,815

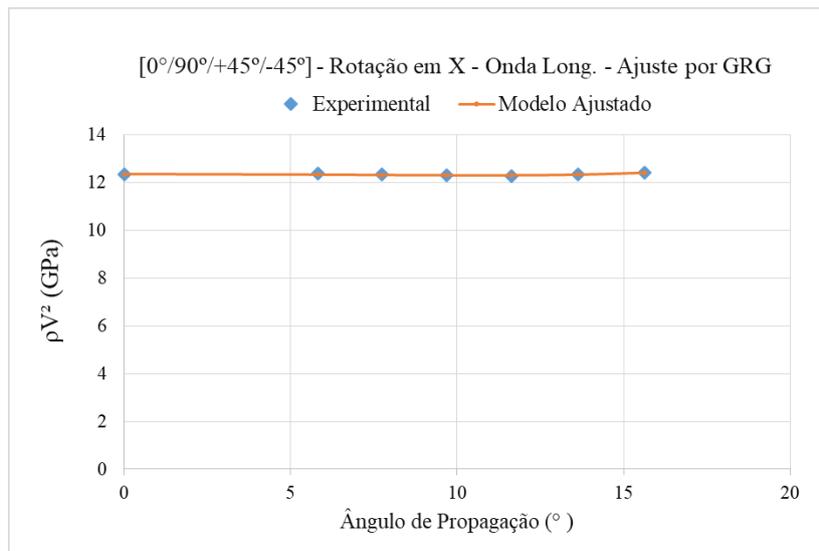


Figura 53 - Gráfico de ajuste do modelo para a amostra [0°/90°/45°/-45°] considerando ondas longitudinais e rotação em X.

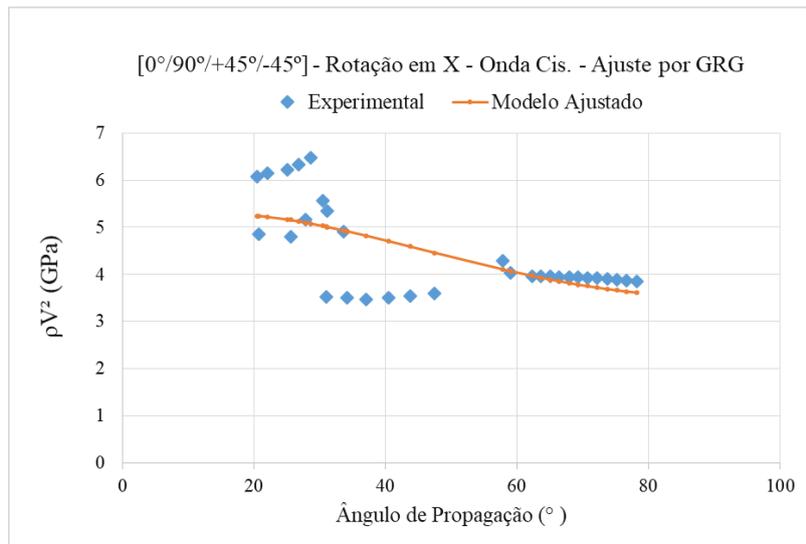


Figura 54 - Gráfico de ajuste do modelo para a amostra [0°/90°/45°/-45°] considerando ondas cisalhantes e rotação em X.

### Rotação em Y

Tabela 29 – Valores, em GPa, das constantes estimadas com base na propagação de ondas sônicas na amostra [0°/90°/45°/-45°] considerando a rotação em torno do eixo Y.

[0°/90°/45°/-45°] – Rotação em Y		Onda Longitudinal			Onda Cisalhante		
Constante	C <sub>11</sub> (Fixada)	C <sub>13</sub>	C <sub>55</sub>	C <sub>33</sub>	C <sub>13</sub>	C <sub>55</sub>	C <sub>33</sub>
Algoritmo Evolucionário	56,902	10,515	0	12,281	0,000	3,612	5,631
GRG		10,515	0	12,281	0,000	3,613	5,630
Levenberg-Marquardt		10,515	0	12,281	0,000	3,613	5,630

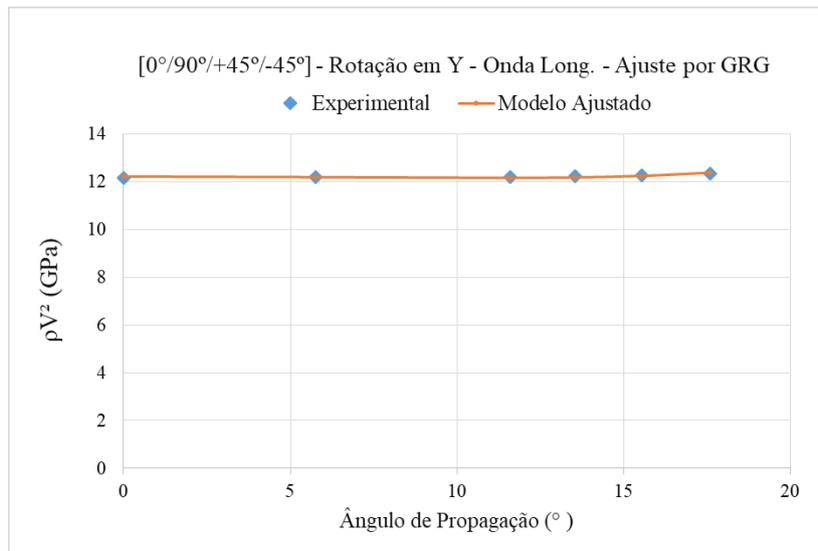


Figura 55 - Gráfico de ajuste do modelo para a amostra [0°/90°/45°/-45°] considerando ondas longitudinais e rotação em Y.

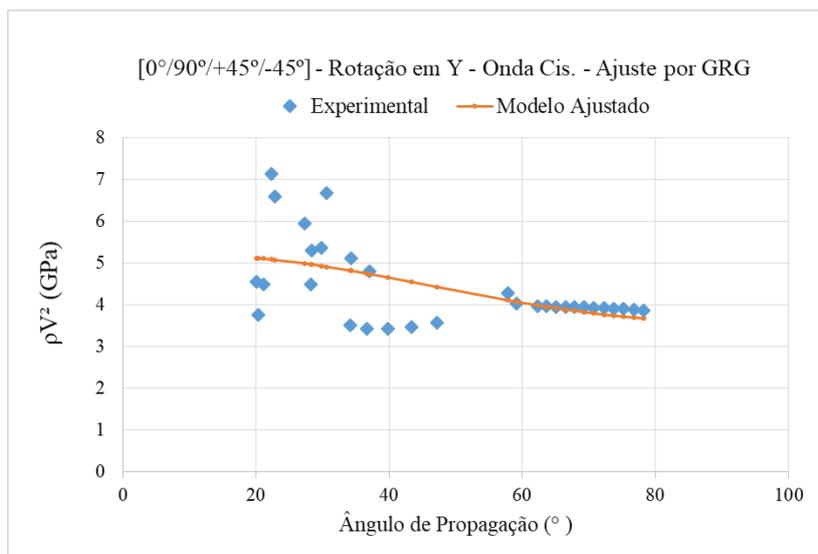


Figura 56 - Gráfico de ajuste do modelo para a amostra [0°/90°/45°/-45°] considerando ondas cisalhantes e rotação em Y.

Para as análises realizadas utilizando as medições das ondas longitudinais, os ajustes considerando a constante  $C_{11}$  conhecida são absurdos, incluindo dois valores de constantes nulos. Isto demonstra que este tipo de onda, inclusive pela menor quantidade de dados e por maior intervalo entre os dados em relação a faixa total, não foi considerado apropriado para a modelagem das constantes elásticas.

Tabela 30 - Valores médios, em GPa, das constantes encontradas para a amostra  $[0^\circ/90^\circ/45^\circ/-45^\circ]$  baseada no ajuste do modelo físico para cada condição avaliada.

Constante Avaliada	$C_{11}$ (Fixada)	$C_{13}$	$C_{55}$	$C_{33}$
Rotação em X – Onda Long.	54,360	1,134	4,823	12,364
Rotação em X – Onda Cis.		0	3,548	5,815
Rotação em Y – Onda Long.	56,900	10,515	0	12,281
Rotação em Y – Onda Cis.		0	3,613	5,630

Para todos os casos avaliados, tanto para onda longitudinal e cisalhante, os valores das constantes encontradas são incoerentes, inclusive com valores nulos para alguns casos, o que é impossível. A única exceção encontrada são os valores da constante  $C_{33}$  para as ondas longitudinais, para as quais o valor encontrado foi satisfatório. Nota-se também que, para as ondas longitudinais no intervalo considerado, a variação é extremamente pequena com o aumento do ângulo de incidência, enquanto se espera um maior aumento, o que pode ter contribuído para os valores ilógicos do conjunto de constantes. Já para o caso das ondas cisalhantes, o ajuste do modelo foi inclusive bastante precário, com alto valor de soma dos resíduos.

Este cenário é causado pela alta irregularidade nos dados de velocidade para estas amostras devido a limitações dos algoritmos estimadores da diferença de tempo em calcular valores apropriados, não havendo uma tendência clara. Visto que os algoritmos em algum momento se baseiam em alguma amplitude presente no sinal, variações espúrias da amplitude de acordo com diferentes ângulos de incidência podem causar diversas ambiguidades nas medições de velocidade, gerando uma sequência de valores totalmente desconexa e errônea, conforme observado para o caso analisado nesta seção. Outro fato interessante é que praticamente com a metade da porosidade encontrada para a amostra  $[0^\circ/90^\circ]$  a amostra  $[0^\circ/90^\circ/+45^\circ/-45^\circ]$  revelou um padrão de sinais sônicos mais

atenuados, irregulares e com diversos picos, demonstrando que a porosidade não é o principal fator de influência na qualidade do sinal.

Por último, nota-se que em todas amostras avaliadas, utilizando como valor inicial valores próximos àqueles estimados teoricamente, todos os algoritmos de ajuste forneceram virtualmente as mesmas respostas, demonstrando flexibilidade em relação à metodologia de otimização utilizada.

#### 4.4.5 Influência do valor inicial para o algoritmo

Um dos fatores importantes a serem considerados é a robustez do algoritmo em relação ao valor inicial escolhido, averiguando se a variação de sua escolha também influencia nos valores finais obtidos. Tomando como exemplo os valores de velocidade da onda cisalhante para o caso de rotação em Y, foram averiguadas diversas condições iniciais de valores para as constantes  $C_{13}$ ,  $C_{55}$  e  $C_{33}$ , averiguando os valores finais obtidos assim como a soma dos resíduos quadráticos obtidos para cada caso. Estes dados estão expostos nas tabelas 31 e 32.

Tabela 31- Valores, em GPa, das constantes  $C_{13}$ ,  $C_{55}$  e  $C_{33}$  calculados pelo método de Levenberg-Marquardt considerando vários pontos de partida para o algoritmo.

Levenberg-Marquardt					
Constantes	$C_{11}$ (Fixada)	$C_{13}$	$C_{55}$	$C_{33}$	Soma dos Resíduos Quadráticos
Valor Inicial	136,080	5	5	13	0,4104
Valor Final		4,259	5,007	11,462	
Constantes	$C_{11}$ (Fixada)	$C_{13}$	$C_{55}$	$C_{33}$	Soma dos Resíduos Quadráticos
Valor Inicial	136,080	40	40	80	0,4104
Valor Final		4,259	5,007	11,462	
Constantes	$C_{11}$ (Fixada)	$C_{13}$	$C_{55}$	$C_{33}$	Soma dos Resíduos Quadráticos
Valor Inicial	136,080	80	80	160	1,0873

Valor Final		1381,456	10,663	14751,215	
Constantes	$C_{11}$ (Fixada)	$C_{13}$	$C_{55}$	$C_{33}$	Soma dos Resíduos Quadráticos
Valor Inicial	136,080	100	100	200	0,9957
Valor Final		1476,392	10,651	16838,578	

Tabela 32- Valores, em GPa, das constantes  $C_{13}$ ,  $C_{55}$  e  $C_{33}$  calculados pelo método de Algoritmo evolucionário considerando vários pontos de partida para o método dos gradientes reduzidos generalizados (GRG).

Gradientes Reduzidos Generalizados					
Constantes	$C_{11}$ (Fixada)	$C_{13}$	$C_{55}$	$C_{33}$	Soma dos Resíduos Quadráticos
Valor Inicial	136,080	5	5	13	0,4101
Valor Final		4,263	5,007	11,463	
Constantes	$C_{11}$ (Fixada)	$C_{13}$	$C_{55}$	$C_{33}$	Soma dos Resíduos Quadráticos
Valor Inicial	136,080	40	40	80	0,4101
Valor Final		4,273	5,006	11,465	
Constantes	$C_{11}$ (Fixada)	$C_{13}$	$C_{55}$	$C_{33}$	Soma dos Resíduos Quadráticos
Valor Inicial	136,080	80	80	160	0,4101
Valor Final		4,272	5,006	11,464	
Constantes	$C_{11}$ (Fixada)	$C_{13}$	$C_{55}$	$C_{33}$	Soma dos Resíduos Quadráticos
Valor Inicial	136,080	100	100	200	0,4101
Valor Inicial		4,270	5,007	11,463	

Nota-se que para o método determinístico de Levenberg-Marquardt, a partir de determinado conjunto de valores iniciais das constantes para execução do algoritmo, os valores finais obtidos são destoantes perante aqueles esperados e calculados com estimativa inicial com valores próximos aos valores teóricos. Encontram-se soluções com baixa soma dos resíduos quadráticos, porém com um valor maior que aquele obtido em outras ocasiões, o que está associado a presença de um mínimo local. Isto ocorre porque o método se baseia no cálculo dos gradientes das funções avaliadas, evoluindo de acordo com passos em direções fornecidas por este gradiente, interrompendo o algoritmo quando a variação dos valores entre iterações é menor que determinado limiar, o que o torna sensível a presença de mínimos locais. Todavia, para o caso da metodologia de Gradientes Reduzidos Generalizados (GRG) os valores finais encontrados para os conjuntos de valores iniciais avaliados foram muito próximos, com diferenças apenas a partir da segunda casa decimal. Isto demonstra robustez do método em relação aos valores iniciais na faixa avaliada (que inclui valores bem distantes do esperado), se mostrando uma alternativa mais propícia em relação ao método de Levenberg-Marquardt.

Uma forma de contornar problemas com valores iniciais é a utilização de algoritmos evolutivos (heurísticos), visto que este se baseia na comparação iterativa entre diversos conjuntos de constantes candidatas ao posto de ótimo dentro de um determinado intervalo, que se modificam a cada iteração do algoritmo. Por isto, se caracteriza como um método mais global, não dependente de valores iniciais e menos sensível a mínimos locais, embora mais custoso computacionalmente. Caso seja optada a utilização dos métodos determinísticos, é importante haver alguma estimativa de valor para as constantes, como por exemplo via modelos teóricos, para que seja inserido como valor inicial de forma a garantir convergência para uma solução mais realista, independentemente do método utilizado.

#### 4.4.6 Influência da complexidade do empilhamento

Os valores das células unitárias, unidades que representam a periodicidade estrutural do laminado, estão expostos na Tabela 33. Uma comparação entre os valores de velocidades observado e os valores mínimos calculados para que valha o regime de homogeneização estão expostos nas figuras 57 a 62, considerando os diversos ângulos de propagação no experimento e as velocidades de propagação cisalhante. Para gerar tal

resultado, foram calculadas as espessuras das células unitárias periódicas de cada laminado avaliado, conforme exposto na Tabela 33.

Tabela 33 – Definições da célula unitária de cada laminado.

Laminado	Célula Unitária ( $h_c$ )	Espessura da Célula Unitária ( $\mu\text{m}$ )
$[0^\circ]_{12s}$	1 camada + 1 interface	$306,87 \pm 6,21$
$[0^\circ/90^\circ]_{6s}$	2 camadas + 2 interfaces	$616,78 \pm 13,84$
$[0^\circ/90^\circ/+45^\circ/-45^\circ]_{3s}$	4 camadas + 4 interfaces	$1210,44 \pm 24,55$

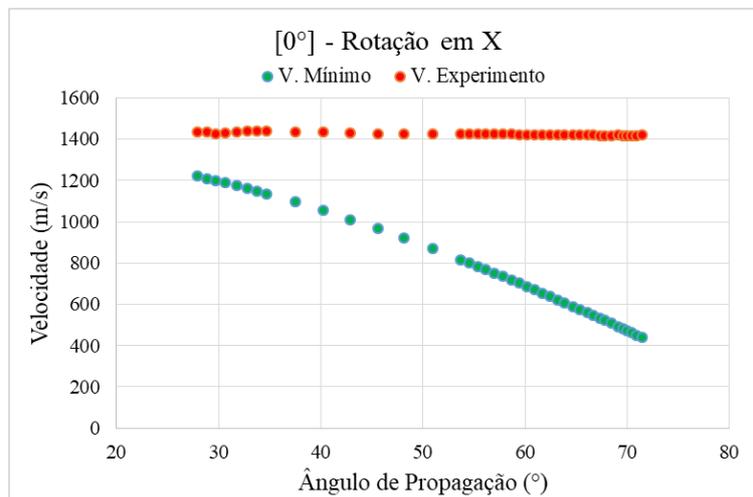


Figura 57 - Comparação dos valores de velocidades experimentais e os valores mínimos para que seja satisfeita a homogeneização: Amostra  $[0^\circ]$  – Rotação em X.

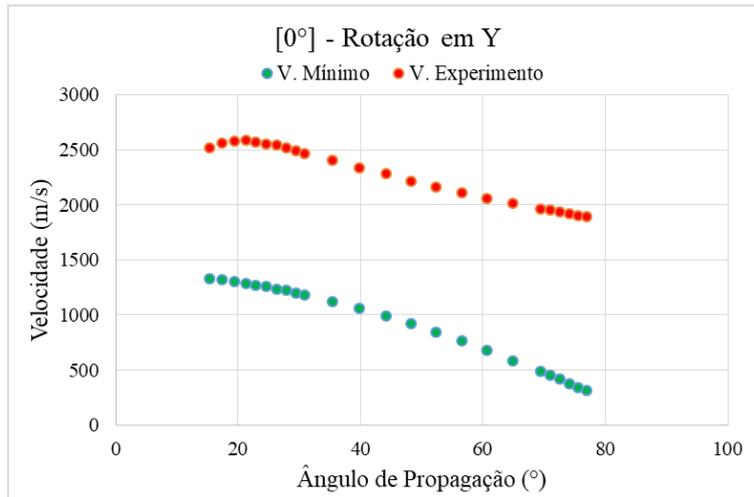


Figura 58 – Comparação dos valores de velocidades experimentais e os valores mínimos para que seja satisfeita a homogeneização: Amostra [0°] – Rotação em Y.

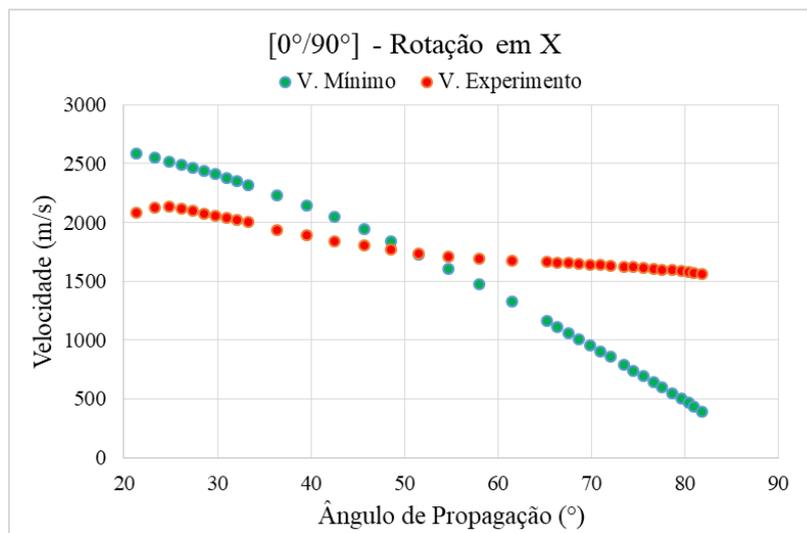


Figura 59 - Comparação dos valores de velocidades experimentais e os valores mínimos para que seja satisfeita a homogeneização: Amostra [0°/90°] – Rotação em X.

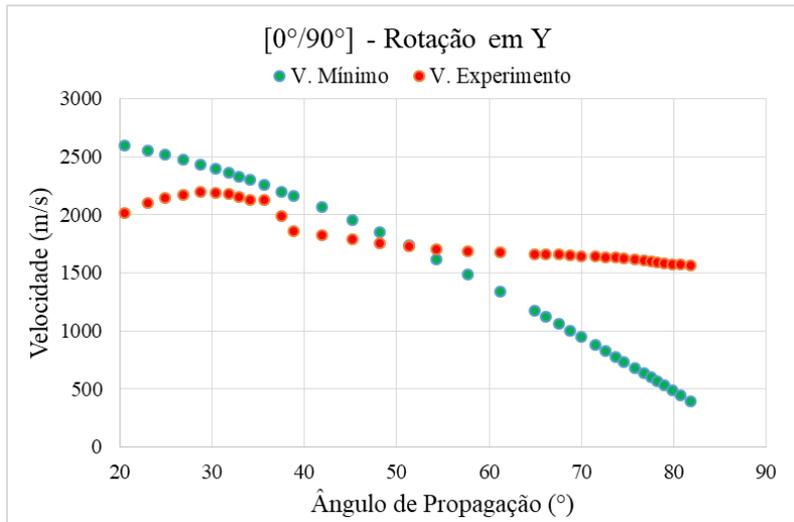


Figura 60 - Comparação dos valores de velocidades experimentais e os valores mínimos para que seja satisfeita a homogeneização: Amostra [0°/90°] – Rotação em Y.

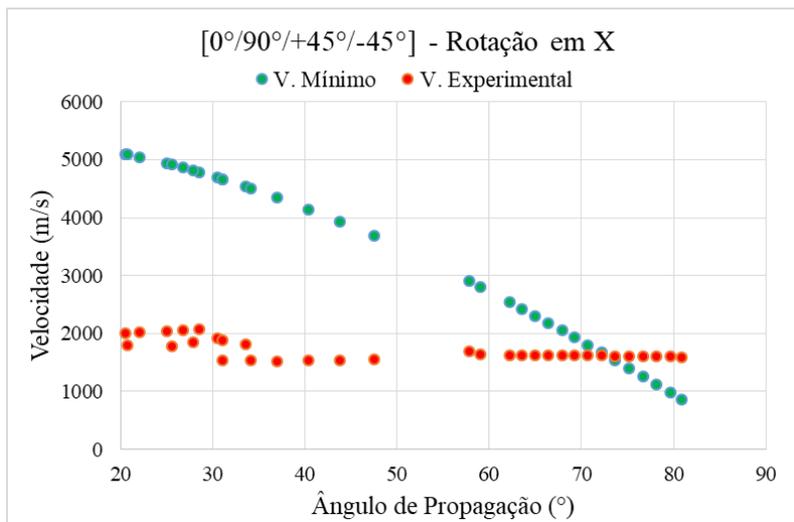


Figura 61 - Comparação dos valores de velocidades experimentais e os valores mínimos para que seja satisfeita a homogeneização: Amostra [0°/90°/+45°/-45°] – Rotação em X.

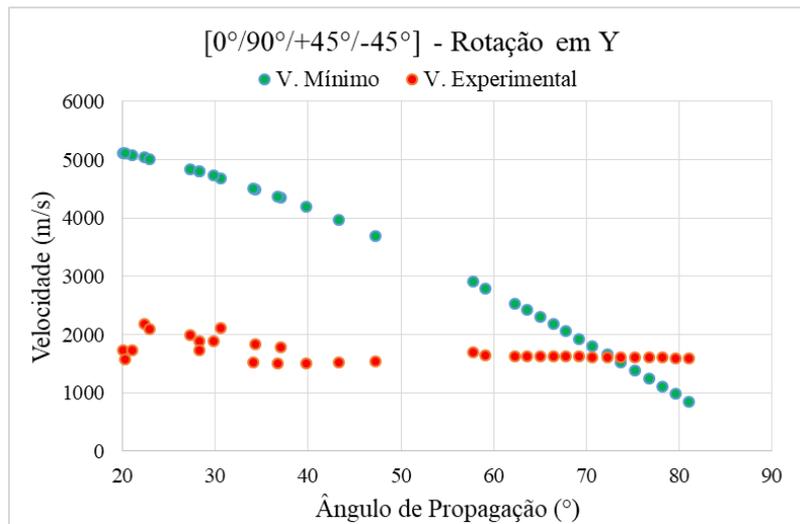


Figura 62 - Comparação dos valores de velocidades experimentais e os valores mínimos para que seja satisfeita a homogeneização: Amostra  $[0^\circ/90^\circ/+45^\circ/-45^\circ]$  – Rotação em Y.

Para o caso unidirecional, devido a menor célula unitária, todos os valores de velocidade mensurados se encontram acima do valor mínimo de homogeneização. Isto faz com que o material seja visto pela onda sônica como uma estrutura unificada, o que gerou resultados bastante regulares e contínuos para as velocidades em diversos ângulos, levando a valores de constantes elásticas fidedignos. Para o caso  $[0^\circ/90^\circ]$ , com valores intermediários de espessura de célula unitária, a faixa de velocidades observada se encontra levemente abaixo daquela de homogeneização para ângulos de propagação, se aproxima do limite à medida que os valores deste ângulo aumentam e entra no regime homogêneo para ângulos maiores que certo limiar. Isto explica algumas irregularidades presentes nas medidas das velocidades sônicas para os ângulos iniciais das ondas cisalhantes. Além disso, ao observar as imagens que compilam a projeção dos *A-Scans* para vários ângulos de incidência (Seção 4.3), observa-se valores de amplitude mais reduzidos para os primeiros ângulos do regime cisalhante, com aumento de valores à medida que se aproxima e insere-se no regime homogêneo. Em comparação com a amostra unidirecional, o padrão de ecos no sinal é um pouco menos claro, com os primeiros ecos mais largos e uma maior quantidade de ecos secundários, principalmente para a região fora da zona de homogeneização. Por último, a amostra  $[0^\circ/90^\circ/45^\circ/-45^\circ]$ , com maior valor de espessura de célula unitária, se demonstra quase que totalmente fora do regime de homogeneização. Isto acarreta em sinais no geral altamente atenuados, com diversos ecos gerados pelas reflexões e interferências dentro do material (Seção 4.3), o

que torna a medição temporal altamente confusa e ambígua. Uma vez que os resultados de velocidade se baseiam em algum momento na amplitude dos ecos principais, os resultados de velocidades se tornaram altamente irregulares, afetando diretamente os valores estimados para as constantes. Neste caso, para contornar este problema recomenda-se o uso de frequências de ensaio mais reduzidas para se aproximar ou se inserir no regime homogêneo, ou a confecção de materiais com menores espessuras de camada e com processo que reduzam ainda mais a espessura das interfaces finas de resina presentes no material. Além disso, a aplicação de algoritmos de detecção temporal menos dependentes das amplitudes do sinal pode ser uma boa alternativa para amenizar os problemas causados na avaliação das velocidades. Por isto, a caracterização sônica desses materiais requer também um avanço conceitual, considerando a não homogeneidade da estrutura e a interferência da onda de camadas [123].

## 5 Conclusões

Foi proposto um processo para estimativa das constantes elásticas de materiais compósitos baseado no cálculo das velocidades sônicas das ondas transmitidas no material sob diversos ângulos de incidência e na densidade do mesmo. Uma base de comparação para as constantes elásticas em cada caso foi criada a partir de cálculos micro e macromecânicos envolvendo o percentual de cada fase na lâmina unitária, a presença de interfaces ricas em resina e a sequência de empilhamento de cada laminado utilizado. Avaliações de rugosidade superficial eliminaram a possibilidade de interferência desta propriedade no feixe sônico. Já a avaliação de porosidade revelou que mesmo com metade do valor de porosidade encontrada para a amostra  $[0^\circ/90^\circ]$  a amostra  $[0^\circ/90^\circ/+45^\circ/-45^\circ]$  revelou um padrão de sinais sônicos mais atenuados, irregulares e com diversos picos, demonstrando que a porosidade não é o principal fator de influência na qualidade do sinal.

Para mensurar as velocidades foram propostas 3 metodologias diferentes dentre as quais a que utiliza a amplitude máxima de envelope se mostrou a mais regular e propícia. A primeira constante elástica ( $C_{11}$ ) foi calculada baseada na estimativa do primeiro ângulo crítico. Os valores encontrados estão na região daqueles previstos teoricamente, porém com possível diferença considerável devido ao alto passo angular ( $1^\circ$ ) e a alta sensibilidade do valor da constante em relação ao valor do ângulo. Posteriormente, considerando o valor da primeira constante, os valores de outras 3 constantes ( $C_{13}$ ,  $C_{55}$  e  $C_{33}$ ) foi estimado de acordo com ajuste não linear dos valores de velocidade longitudinal e cisalhante de acordo com o modelo físico-matemático de propagação e utilizando 3 metodologias diferentes, que forneceram resultados praticamente idênticos. Os valores de  $C_{12}$  e  $C_{66}$  não foram passíveis de cálculo para as amostras  $[0/90^\circ]$  e  $[0^\circ/90^\circ/45^\circ/-45^\circ]$  visto que a onda cisalhante lenta não foi observada nas análises realizadas, exigindo a realização de ensaios complementares para sua estimativa. No que tange ao tipo de onda avaliado, o regime cisalhante se mostrou bastante mais propício para utilização devido a maior quantidade de dados disponíveis e também a menor propensão a sobreajuste, fornecendo resultados bastante plausíveis para os laminados  $[0^\circ/90^\circ]$  e, principalmente, para o unidirecional  $[0^\circ]$ . O método heurístico proposto (Algoritmo Evolutivo) se mostra como uma opção robusta por não necessitar de um valor inicial proposto das constantes para cálculo iterativo tal como os métodos

determinísticos, porém exigiu maior tempo computacional. Assim sendo, uma alternativa atrativa é a utilização do método de Gradientes Reduzidos Generalizados (GRG), que aliou rapidez e robustez, não dependendo de valores iniciais para todos os valores avaliados, diferentemente do método de Levenberg-Marquardt, que exige valores iniciais mais próximos a solução final.

Os resultados demonstraram que o cálculo das constantes é amplamente dependente da qualidade dos dados de velocidade avaliados, gerando valores bastante incoerentes em caso de excesso de valores irregulares e incorretos. Para garantir regularidade dos valores de velocidade, é importante garantir que o regime sônico presente no material seja o de homogeneização, enxergando a estrutura como única, não estratificada. Isto garante sinais mais limpos, com menos ecos e menos ambiguidades na medição dos valores de velocidades. Caso contrário, como observado na amostra  $[0^\circ/90^\circ/+45^\circ/-45^\circ]$ , ocorrem sinais com diversos ecos secundários e alta irregularidades nos valores de velocidades, gerando resultados ilógicos para as constantes tanto para os casos de onda longitudinal como transversal. Os valores de  $C_{12}$  e  $C_{66}$  não foram passíveis de cálculo visto que a onda cisalhante lenta não foi observada nas análises realizadas, exigindo a realização de ensaios complementares para sua estimativa.

## 6 Sugestões para trabalhos futuros

De acordo com a base teórica exposta na revisão bibliográfica e os resultados obtidos, são expostas as seguintes sugestões para o desenvolvimento de trabalhos futuros:

- Automatização do processo de aquisição dos sinais com programa de rotação automática para o braço robótico e captação do sinal do osciloscópio de acordo com a velocidade de rotação.
- Realizar varreduras com menor passo angular, por exemplo  $0,1^\circ$ , principalmente na região do ângulo crítico. Isto aumenta a acurácia do valor da constante  $C_{11}$  calculada e aumenta a base de dados para realização do ajuste do modelo físico-matemático.
- Realizar os ensaios em frequências menores, por exemplo 1 MHz, para avaliar a mudança na condição do sinal devido a maior aproximação do regime homogêneo para os laminados mais complexos.
- Estimar, através do uso de modelos micromecânicos, a redução da velocidade sônica em diversas direções devido à redução nas propriedades mecânicas elásticas.
- Utilizar outras metodologias de medição de atraso temporal para avaliar o desempenho e a robustez perante as interferências e reflexões possivelmente presentes na estrutura do material. Dentre as possibilidades estão os métodos de correlação cruzada, transformada de Hilbert e tempo de chegada até um primeiro ponto em determinado limiar da amplitude máxima.
- Realizar os testes em diversas frequências para avaliar o possível efeito de dispersão de velocidades presente em relação a cada constante estimada.
- Utilizar modelos mecânicos que considerem a porosidade para estimar os valores teóricos das constantes elásticas.
- Realização de testes com rotação em eixos distintos dos eixos de simetria.

## 7 Bibliografia

1. GIBSON, R. F. **Principles of Composite Material Mechanics**. 4. ed. [S.l.]: CRC Press, 2016.
2. ASHBY, M. F. **Materials selection in mechanical design**. 4th Edition. ed. [S.l.]: Elsevier Science & Technology, 2010.
3. VICARI, A. Machine Design, 2015. Disponivel em: <<http://www.machinedesign.com/contributing-technical-experts/will-carbon-fiber-find-widespread-use-automotive-industry>>.
4. ALEMOUR, B.; BADRAN, O.; HASSAN, M. R. A Review of Using Conductive Composite Materials in Solving Lightning Strike and Ice Accumulation Problems in Aviation. **Journal of Aerospace Technology and Management**, v. 11, 2019.
5. NIELSEN, S. A.; TOFTEGAARD, H. Ultrasonic measurement of elastic constants in fiber-reinforced polymer composites under influence of absorbed moisture. **Ultrasonics**, v. 38, p. 242-246, 2000.
6. ASTM D3039 / D3039M-17: Standard Test Method for Tensile Properties of Polymer Matrix Composite Materials. ASTM International. West Conshohocken, PA. 2017.
7. ASTM D5379 / D5379M-19: Standard Test Method for Shear Properties of Composite Materials by the V-Notched Beam Method. ASTM International. West Conshohocken, PA. 2019.
8. ISO 20975-2: Determination of laminate through-thickness properties — Part 2: Determination of the elastic modulus, the strength and the Weibull size effects by flexural test of unidirectional laminate, for carbon-fibre based systems. [S.l.]. 2018.
9. KARBHARI, V. M. **Non-destructive evaluation (NDE) of polymer matrix composites**: Techniques and applications. [S.l.]: Woodhead Publishing Series in Composites Science and Engineering, v. 43, 2013.

10. ALTENBACH, H.; ALTENBACH, J.; KISSING, W. **Mechanics of Composite Structural Elements**. 2nd Edition. ed. [S.l.]: Springer, 2018.
11. MEOLA , C.; TOSCANO, C. Non-Destructive Evaluation of Carbon Fiber Reinforced Polymers with Ultrasonics and Infrared Thermography: An Overview on Historical Steps and Patents. **Recent Patents on Materials Science**, v. 5, p. 48-67, 2012.
12. ROKHLIN , S. I.; CHIMENTI , D. E.; NAGY , P. B. **Physical Ultrasonics of Composites**. New York: Oxford University Press, 2011.
13. YANG, R.; HE, Y.; ZHANG, H. Progress and trends in non destructive testing and evaluation for wind turbine composite blade. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 60, p. 1225–1250, 2016.
14. LACH, M.; PLATTE, M.; RIES, A. Piezoelectric materials for ultrasonic probes. **NDTnet**, v. 1, n. 9, 1996.
15. MARGETAN, F. J.; LECKEY, C. A.; BARNARD, D. Modeling the effects of beam size and flaw morphology on ultrasonic pulse/echo sizing of delaminations in carbon composites. **AIP Conference Proceedings**, v. 1511, n. 955, 2013.
16. CHEEKE, J. D. N. **Fundamentals and Applications of Ultrasonic Waves**. Second Edition. ed. [S.l.]: CRC Press, 2012.
17. PANDEY, D. K.; PANDEY, S. **Ultrasonics: A Technique of Material Characterization**. University of Allahabad. [S.l.].
18. MEHDIKHANI, M. et al. Voids in fiber-reinforced polymer composites: A review on their formation, characteristics, and effects on mechanical performance. **Journal of Composite Materials**, v. 53 , n. 12, p. 1579–1669, 2019.
19. LIN, L. et al. **Experimental investigation on porosity of carbon fiber-reinforced composite using ultrasonic attenuation coefficient**. 17th World Conference on Nondestructive Testing. Shangai, China: [s.n.]. 2008.

20. LUKASZEWICZ, D. H.; POTTER, K. D. The internal structure and conformation of prepreg with respect to reliable automated processing. **Composites: Part A**, v. 42, p. 283–292, 2011.
21. CURTIS, P. T.; WHITEHEAD, D. L. The effect of fabrication-induced surface roughness on the compressive and flexural properties of carbon fibre reinforced plastics. **Composites Manufacturing**, v. 1, n. 4, p. 235-241, 1990.
22. ROKHLIN, S.; CHIMENTI, D.; NAG, P. **Physical Ultrasonics of Composites**. New York: Oxford University Press, 2011.
23. SUMMERSCALES, J. **Non-destructive Testing of Fiber-reinforced Plastics Composites**. New York: Elsevier Applied Science Publications, 1987-1990.
24. HARMON, L. M.; BAAKLINI, G. Y. **Ultrasonic Resonance Spectroscopy of Composite Rings for Flywheel Rotors**. Glenn Research Center. [S.l.]. 2001.
25. MEZA, C. A.; FRANCO, E. E.; EALO, J. L. Implementation of the ultrasonic through-transmission technique for the elastic characterization of fiber-reinforced laminated composite. **Revista DYNA**, v. 86, n. 208, p. 153-161, 2019.
26. HASIOTIS, T.; BADOGIANNIS, E.; TSOUVALIS, N. G. Application of Ultrasonic C-Scan Techniques for Tracing Defects in Laminated Composite Materials. **Journal of Mechanical Engineering**, v. 57, n. 3, p. 192-203, 2011.
27. SEGRETO, T. et al. Full-volume Ultrasonic Technique for 3D Thickness Reconstruction of CFRP Aeronautical Components. **Procedia CIRP**, v. 67, p. 434 – 439, 2018.
28. MINACHI, A.; MARGETAN, F. J.; HSU, D. K. Delamination sizing in composite materials using a Gauss-Hermite beam model. **Ultrasonics**, v. 31, n. 4, 1993. ISSN 237-243.
29. HSU, D. K.; JEONG, H. **Ultrasonic velocity change and dispersion due to porosity in composite laminates**. Iowa State University. [S.l.].

30. BIRT , E. A.; SMITH, R. A. A review of NDE methods for porosity measurement in fibre-reinforced polymer composites. **Insight** , v. 46, n. 11, p. 681-686, 2004.
31. MARTIN, B. G. Ultrasonic wave propagation in fiber reinforced solids containing voids. **Journal of Applied Physics**, v. 48, n. 8, 1977.
32. ISHII , Y.; BIWA , S.; KURAIISHI , A. Influence of porosity on ultrasonic wave velocity, attenuation and interlaminar interface echoes in composite laminates: Finite element simulations and measurements. **Composite Structures**, v. 152, p. 645-653, 2016.
33. KOMSKY, L. N.; DANIEL, L. M.; WOOH , S. C. Characterization of porosity in thick composites using ultrasonic wave velocity measurements. In: THOMPSON , D. O.; CHIMENTI, D. E. **Review of Progress in Quantitative Nondestructive Evaluation**. New York: Plenum Press, v. 12, 1993. p. 1273-1280.
34. SOKOLOVSKAYAA, Y. G.; PODYMOVA, N. B.; KARABUTOV, A. A. Verification of the Kramers-Kronig relations between ultrasonic attenuation and phase velocity in a finite spectral range for CFRP composites. **Ultrasonics**, v. 95, p. 37-44, 2019.
35. REYNOLDS, W. N.; WILKINSON, S. J. The analysis of fibre-reinforced porous composite materials by the measurement of ultrasonic wave velocities. **Ultrasonics**, p. 159-163, 1978.
36. JEONG, H.; HSU, D. K. Experimental analysis of porosity-induced ultrasonic attenuation and velocity change in carbon composites. **Ultrasonics**, v. 33, n. 3, p. 195-203, 1995.
37. BIWA, S.; KAMIYA, T.; OHNO, N. Multiple Scattering Simulation of Ultrasonic Shear Wave in Unidirectional Carbon/Epoxy Composites. **Materials Transactions**, v. 48, n. 6, p. 1196 - 1201, 2007.
38. LU, Y.; ACHENBACH , J. D. Effects of random deviations in interface properties on the propagation of ultrasound in thick composites. **J. Acoust. Soc. Am**, v. 90, n. 5, p. 2578-2585, 1991.

39. SMITH, R. A. et al. **Ultrasonic tracking of ply drops in composite laminates**. AIP Conference Proceedings. [S.l.]: [s.n.]. 2016.
40. SMITH, R. A. **Use of 3D ultrasound data sets to map the localised properties of fiber-reinforced composites.**” University of Nottingham. [S.l.]. 2010.
41. ISHII, Y.; BIWA, S. Ultrasonic wave transmission and bandgap in multidirectional composite laminates with spring-type interlayer interfaces. **Journal of the Acoustical Society of America** **141, 1099 (2017)**, v. 141, 2017.
42. WANG, L.; ROKHLIN, S. I. Ultrasonic wave interaction with multidirectional composites: Modeling and experiment. **J. Acoust. Soc. Am.**, v. 114, n. 5, p. 2582–2595, 2003.
43. SMITH , R. A. et al. Ultrasonic Analytic-Signal Responses From Polymer-Matrix Composite Laminates. **IEEE Transactions On Ultrasonics, Ferroelectrics and Frequency Control**, v. 65, n. 2, 2018.
44. OURAK , M. et al. Characterization of ply boundaries in carbon epoxy composite materials using longitudinal ultrasonic waves. **Review of Progress in Quantitative Nondestructive Evaluation**, v. 17, p. 1147–1154, 1998.
45. ISHIIA, Y.; BIWA, S. Ultrasonic bandgaps in composite laminates: Experimental observation and Floquet-Bloch wave analysis. **Appl. Phys. Lett.**, v. 113, 2018.
46. POTEL, C.; BELLEVAL, J. F.; GARGOURI, Y. Floquet waves and classical plane waves in an anisotropic periodically multilayered medium: Application to the validity domain of homogenization. **Journal of Acoustical Society of America** , v. 97, n. 5, p. 2815-2825, 1995.
47. BRAGA , A. M.; HERRMANN , G. Floquet waves in anisotropic periodically layered composites. **J. Acoust. Soc. Am.** , v. 91, n. 3, 1992.
48. ISHII, Y.; BIWA, S.; KURAIISHI, A. Influence of porosity on ultrasonic wave velocity, attenuation and interlaminar interface echoes in composite laminates: Finite

- element simulations and measurements. **Composite Structures** , v. 152, p. 645-653, 2016.
49. ISHII , Y.; BIWA, S. Transmission of ultrasonic waves at oblique incidence to composite laminates with spring-type interlayer interfaces. **The Journal of the Acoustical Society of America** , v. 138, p. 2800-2810, 2015.
50. POTEL, C.; BELLEVAL, J.; GARGOURI, Y. Floquet waves and classical plane waves in an anisotropic periodically multilayered medium: Application to the validity domain of homogenization. **J. Acoust. Soc. Am.**, v. 97, n. 5, p. 2815 - 2825, 1995.
51. WANG , L.; ROKHLIN, S. I. Floquet wave homogenization of periodic anisotropic media. **Journal of Acoustical Society of America**, v. 112, n. 1, 2002.
52. AMOR, M. B.; GHOZLEN, M. H.; LANCELEUR, P. Frequency-dependant homogenized properties of composite using spectral analysis method. **Materials Science and Engineering**, v. 13, 2010.
53. WANG, L.; ROKHLIN, L. I. Floquet wave ultrasonic method for determination of single ply moduli in multidirectional composites, v. 112, n. 3, 2002.
54. WANG , L.; ROKHLIN, S. I. Ultrasonic wave interaction with multidirectional composites: Modeling and experiment. **J. Acoust. Soc. Am.** , v. 114, n. 5, p. 2582-2595, 2003.
55. PODYMOVA , N. B.; KARABUTOV, A. A. Broadband Laser-Ultrasonic Spectroscopy for Quantitative Characterization of Porosity Effect on Acoustic Attenuation and Phase Velocity in CFRP Laminates. **J Nondestruct Eval** , v. 33, p. 141-151, 2014.
56. SHIN, Y. C.; OH, S. J.; COKER, S. A. Surface Roughness Measurement by Ultrasonic Sensing for In-Process Monitoring. **Journal of Engineering for Industry**, v. 117, p. 439-447, 1995.

57. BLESSING, G. V.; EITZEN, D. G. Ultrasonic Measurements of Surface Roughness. In: HOLLER, P., et al. **Nondestructive Characterization of Materials**. [S.l.]: Springer-Verlag, 1988. p. 763-770.
58. AMBARDAR, R. et al. **Effect of surface roughness on ultrasonic echo amplitude in aluminium-copper alloy castings**. Proceedings of the 14th World Conference on Non-Destructive Testing. New Delhi: [s.n.]. 1996. p. 981-984.
59. BLESSING, G. V. et al. Ultrasonic measurements of surface roughness. **Applied Optics**, v. 32, n. 19, p. 3433-3437, 1993.
60. OH, S. J.; SHIN, Y. C.; FURGASON, E. S. Surface Roughness Evaluation Via Ultrasonic Scanning. **IEEE Transactions On Ultrasonics, Ferroelectrics and Frequency Control**, v. 41, n. 6, p. 863-871, 1994.
61. RODRIGUEZ, E.; FRAUDITA, F.; AMORER, L. Effect of surface roughness in ultrasonic testing (pulse-echo by direct contact) in AISI/SAE 4340 steel samples. **NDT.net**, v. 8, n. 11, 2003.
62. WANG, Z. et al. Effect of Surface Roughness on Ultrasonic Testing of Back-Surface Micro-Cracks. **Applied Sciences**, v. 8, 2018.
63. SALAZAR, A. J.; RODRÍGUEZ, E. C. Studies of the effect of surface roughness in the behaviour of ultrasonic signals in AISI-SAE-4340 steel: spectral and wavelets analysis. **Int. J. Microstructure and Materials Properties** , v. 6, p. 224-234, 2011.
64. GINZEL, E. Ultrasonic Inspection 2: Training For Nondestructive Testing - Variables Affecting Test Results. **NDT.net** , v. 4, n. 6, 1999.
65. ISLEYCI, U. **Effect of surface roughness on ultrasonic testing**. Middle East technical University. Ankara. 2005.
66. NAGY, P. B.; ADLER , L. Surface roughness induced attenuation of reflected and transmitted ultrasonic waves. **The Journal of the Acoustical Society of America**, v. 82, n. 1, p. 193–197, 1987.

67. NAGY , P. B.; ROSE, J. H. Surface roughness and the ultrasonic detection of subsurface scatterers. **Journal of Applied Physics** , v. 73, n. 2, p. 566-580, 1993.
68. BILGEN, M. **Effects of randomly rough surfaces on ultrasonic inspection**. Iowa State University. [S.I.]. 1993.
69. BENSTOCK , D.; CEGLA, F. The influence of surface roughness on ultrasonic thickness measurements. **J. Acoust. Soc. Am.**, v. 136, n. 6, p. 3028-3039, 2014.
70. OGILVY, J. A. Model for the ultrasonic inspection of rough defects. **Ultrasonics**, v. 27, p. 69-79, 1989.
71. ZIMMER, J. E.; COST, J. R. Determination of the Elastic Constants of a Unidirectional Fiber Composite Using Ultrasonic Velocity Measurements. **The Journal of Acoustical Society of America**, p. 79-803, 1969.
72. SHASHIDHARA REDDY, S. S. et al. Ultrasonic goniometry immersion techniques for the measurement of elastic moduli. **Composite Structures** , v. 67, p. 3–17, 2005.
73. GIBSON, R. F. **Principles of Composite Materials Mechanics**. Third Edition. ed. [S.I.]: CRC Press.
74. CHU , Y. C.; ROKHLIN, S. I. Determination of macro- and micromechanical and interfacial elastic properties of composites from ultrasonic data. **Journal of Acoustical Society of America**, v. 92, n. 2, p. 920-931, 1992.
75. HAMANN, R. et al. An Iterative Eshalby Method to Calculate Taverage Stress Fields and Elastic Moduli of Composite and Multi-Phase Materials. **Scripta Metallurgica et Materiala**, v. 26, n. 6, p. 269–282, 1992.
76. NIELSEN, L. F. Elastic Properties of Two-Phase Material. **Mat. Sci. Eng.**, v. 52, 39-62 , p. 39-62, 1982.
77. DESCHAMPS , M.; BESCOND, C. Numerical method to recover the elastic constants from ultrasound group velocities. **Ultrasonics** , v. 33, n. 3, p. 205-211, 1995.

78. CHAMIS, C. C.; SENDECKYJ, G. P. Critique on Theories Predicting Thermoelastic Properties of Fibrous Composites, v. 2, n. 3, p. 332-358, *Journal of Composite Materials*.
79. ABOUDI, J.; ARNOLD, S. M.; BEDNARCYK, B. A. The Generalized Method of Cells. In: \_\_\_\_\_ **Micromechanics of Composite Materials**. [S.l.]: [s.n.], 2013. p. 227-350.
80. WILLIAMS JR., J. H.; HASHEMI, H. N.; LEE, S. S. Ultrasonic Attenuation and Velocity in AS/3501-6 Graphite Fiber Composite. **Journal of Nondestructive Evaluation**, v. 1, n. 2, p. 137-148, 1980.
81. LIU, X.; CHEN, F. A Review of Void Formation and its Effects on the Mechanical Performance of Carbon Fiber Reinforced Plastic. **Engineering transactions**, v. 64, n. 1, p. 33-51, 2016.
82. HOSTEN , B.; CASTAINGS, M. Transfer matrix of multilayered absorbing and anisotropic media. Measurements and simulations of ultrasonic wave propagation through composite materials. **Journal of the Acoustical Society of America** **9**, v. 94, 1993.
83. HASHIN, Z. On elastic behaviour of fibre reinforced materials of arbitrary transverse phase geometry. **Journal of the Mechanics and Physics of Solids**, v. 13, n. 3, p. 119-134, 1965.
84. HASHIN, Z. Analysis of Properties of Fiber Composites With Anisotropic Constituents.. **Journal of Applied Mechanics**, v. 46, n. 3, 1979.
85. HUANG, H.; TALREJA, R. Effects of void geometry on elastic properties of unidirectional fiber reinforce. **Composites Science and Technolog**, v. 65, n. 13, p. 1964–1981, 2005.
86. RUBIN , A. M.; JERINA , K. L. The effect of porosity on elastic-constants of representative aircraft laminates. **Journal of Advanced Materials**, v. 25, p. 21-30, 1994.

87. GRANDE, D. H. et al. **Effects of intra- and inter-laminar resin content on the mechanical properties of toughened composite materials**. NASA Langley Research Center. [S.l.].
88. TAN, W. et al. The role of interfacial properties on the intralaminar and interlaminar damage behaviour of unidirectional composite laminates. **Composites Part B: Engineering**, v. 138, p. 206-221, 2018.
89. ITIN, Y.; HEHL, F. W. The constitutive tensor of linear elasticity: Its decompositions, Cauchy relations, null Lagrangians, and wave propagation. **Journal of Mathematical Physics**, v. 54, 2013.
90. CANEVAROLO, S. V. **Ciência dos Polímeros**. 2ª. ed. [S.l.]: Artliber, 2007.
91. WRÓBEL, G.; STABIK, J.; ROJEK, M. Non-destructive diagnostic methods of polymer matrix composites degradation. **Journal of Achievement in Materials and Manufacturing Engineering**, v. 31, n. 1, p. 53-59, 2008.
92. LI, ; XU, C.; CHO, Y. Characterization of Degradation Progressive in Composite Laminates Subjected to Thermal Fatigue and Moisture Diffusion by Lamb Waves. **Sensors**, v. 16, 2016.
93. JIA, D. et al. Investigation of Stress and Temperature Effect on the Longitudinal Ultrasonic Waves in Polymers. **Research in Nondestructive Evaluation**, v. 25, n. 1, 2013.
94. KIM, H. et al. Stress Measurement of a Pressurized Vessel Using Ultrasonic Subsurface Longitudinal Wave With 1–3 Composite Transducers. **IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics and Frequency Control**, v. 67, n. 1, p. 158 - 166, 2020.
95. ROKHLIN , S. I.; WANG, L. Ultrasonic waves in layered anisotropic media: characterization of multidirectional composites. **International Journal of Solids and Structures** , v. 39, p. 4133–4149, 2002.
96. MUNOZ, V. et al. Determination of the elastic properties in CFRP composites: comparison of different approaches based on tensile tests and ultrasonic

- characterization. **Advances in Aircraft and Spacecraft Science**, v. 2, n. 3, p. 249-260, 2015.
97. PATERSON, D. et al. Ultrasonic bulk wave measurements on composite using fiber from recycled CFRP. **AIP Conference Proceedings**, v. 1949, 2018.
98. VISHNUVARDHAN , J.; KRISHNAMURTHY , C. V.; BALASUBRAMANIAM, K. Genetic algorithm reconstruction of orthotropic composite plate elastic constants from a single non-symmetric plane ultrasonic velocity data. **Composites: Part B** , v. 38, p. 216-227, 2007.
99. SU, H. et al. Improve methods for elastic constants ultrasonic characterization accuracy of carbon fiber reinforced plastic, 2016. ISSN DOI: 10.13801/j.cnki.fhclxb.20160315.013.
100. MARKHAM, M. F. Measurement of the elastic constants of fibre composites by ultrasonics. **Composites**, p. 145-149, 1970.
101. BALASUBRAMANIAM , K.; WHITNEY, S. C. Ultrasonic through-transmission characterization of thick fibre-reinforced composites. **NDT&E International**, v. 29, n. 4, p. 225-236, 1996.
102. MOUCHTACHI, A. et al. Ultrasonic Study of Elastic Anisotropy of Material Composite. **Applied Composite Materials**, v. 11, p. 341-351, 2004.
103. MINACHI, A.; HSU, D. K.; THOMPSON, R. B. Single-sided determination of elastic constants of thick composites using acoustoultrasonic technique. **Journal of Acoustical Society of America**, v. 96, n. 1, 1994.
104. ZHAN, Y. et al. Measurement of fiber reinforced composite engineering constants with laser ultrasonic. **Applied Acoustics**, v. 139, p. 182-188, 2018.
105. PÉREZ, N. et al. Evaluation of Multiple Reflections in the Characterization of Anisotropic Materials by Through Transmission Ultrasonic Technique. **Physics Procedia**, v. 70, p. 402 – 405, 2015.

106. PATERSON, D. A.; IJOMAH, W.; WINDMILL, J. F. Elastic constant determination of unidirectional composite via ultrasonic bulk wave through transmission measurements: A review. **Progress in Materials Science**, v. 97, p. 1-37, 2018.
107. WOOH , S. C.; DANIEL, I. M. Mechanical characterization of a unidirectional composite by ultrasonic methods. **Journal of Acoustical Society of America**, v. 90, n. 6, 1991.
108. MEZA, C. A.; FRANCO, E. E.; EALO, J. L. Implementation of the ultrasonic through-transmission technique for the elastic characterization of fiber-reinforced laminated composite. **Revista DYNA**, v. 86, n. 208, p. 153-161, 2019.
109. HOSTEN, B. Stiffness matrix invariants to validate the characterization of composite materials with ultrasonic methods. **Ultrasonics** , v. 30, n. 6, p. 365-371, 1992.
110. FRANCO, E. E.; MEZA, J. M.; BUIOCHI, F. Measurement of elastic properties of materials by the ultrasonic through transmission technique, 2010.
111. DEGTYAR, A. D.; ROKHLIN, S. I. Comparison of elastic constant determination in anisotropic materials from ultrasonic group and phase velocity data. **Journal of Acoustical Society of America**, v. 102, n. 6, 1997.
112. ASTM E494-10: Standard practice for measuring ultrasonic velocity in materials. ASTM Stand. [S.l.], p. 1-15. 2011. (doi:10.1520/E0494-10.).
113. CUARTAS, M.; AL, E. Determination of the elastic properties in CFRP composites: comparison of different approaches based on tensile tests and ultrasonic characterization. **Advances in Aircraft and Spacecraft Science**, v. 2, n. 3, 2015. ISSN 249-260.
114. JARVIS , A. J.; CEGLA , F. B. Application of the distributed point source method to rough surface scattering and ultrasonic wall thickness measurement. **Journal of Acoustical Society of America**, v. 132, n. 3, p. 1325-35, 2012.

115. HOSTEN, B.; HUTCHINS, D. A.; SCHINDEL, D. W. Measurement of elastic constants in composite materials using air-coupled ultrasonic bulk waves. **Journal of Acoustical Society of America**, v. 99, n. 4, 1996.
116. BARAZANCHY, D.; ROTH, W.; GIURGIUTIU, V. A non-destructive material characterization framework for retrieving a stiffness matrix using bulk waves. **Composite Structures**, v. 185, p. 27-37, 2018.
117. MARGUÈRES, P.; MERAGHNI, F. Damage induced anisotropy and stiffness reduction evaluation in composite materials using ultrasonic wave transmission. **Composites: Part A**, v. 45, p. 134-144, 2013.
118. AUDOIN, B.; ROUX, J. Traitement de signal ultrasonore adapté à l'évaluation non destructive de matériaux dispersifs. **Revue Phys. Appl.**, v. 25, p. 1011-1017, 1990.
119. OPPENHEIM, A. V.; SCHAFER, R. W.; BUCK, J. R. **Discrete-time signal processing**. 2nd ed. ed. New Jersey, USA: Prentice Hall, 1999.
120. WANG, L.; LAVRENTYEV, A. I.; ROKHLIN, S. I. Beam and phase effects in angle-beam-through-transmission method of ultrasonic velocity measurement. **Journal of Acoustical Society of America**, v. 113, n. 3, p. 1551-1559, 2003.
121. CASTAINGS, . **Evaluation non destructive par ultrasons de matériaux composites**. Institut de Mécanique et d'Ingénierie de Bordeaux. Bourdeaux. 2017.
122. HOLLMAN, K. W.; FORTUNKOZ, C. M. An accurate method for measurement of transverse elastic-wave velocities. **Measurements Science Technology**, v. 9, p. 1721–1727, 1998.
123. DAHMEN, S.; AMOR, M. B.; BEN GHOZLEN, M. H. An inverse procedure for determination of material constants of a periodic multilayer using Floquet wave homogenization. **Composite Structures**, v. 92, p. 430–435, 2010.
124. WOOLF, A. An Interactive Computer Program for Analysis of Ultrasonic Modulus Data on Anisotropic Materials. **Polymer Testing**, v. 5, p. 375-397, 1985.

125. CHU, Y. C.; DEGTYAR, A. D.; ROKHLIN, S. On determination of orthotropic material moduli from ultrasonic velocity data in nonsymmetry planes. **The Journal of the Acoustical Society of America**, v. 95, n. 6, p. 3191-3203, 1994.
126. CHU , Y. C.; ROKHLIN, S. I. A method for determination of elastic constants of unidirectional lamina from ultrasonic bulk velocity measurements on [0/90] cross-ply composites. **Journal of Acoustical Society of America**, v. 96, n. 1, p. 342-352, 1994.
127. CHU , Y. C.; ROKHLIN, S. I. Stability of determination of composite moduli from velocity data in planes of symmetry for weak and strong anisotropies. **Journal of Acoustical Society Of America**, v. 95, n. 1, p. 213-225, 1994.
128. BALASUBRAMANIAM, K.; RAO, N. S. Inversion of composite material elastic constants from ultrasonic bulk wave phase velocity data using genetic algorithms. **Composites Part B**, v. 29, p. 171-180, 1998.
129. CAMPBELL, F. C. Curing: It's a Matter of Time (t), Temperature (T) and Pressure (P). In: \_\_\_\_\_ **Manufacturing Processes for Advanced Composites**. [S.l.]: Elsevier Advanced Technology, 2004. Cap. 6, p. 175-221.
130. FRITZ, N. K. **Micro-Computed Tomography for Interlaminar Analysis, Void Quantification, and Feature Localization in Carbon Fiber Composite**. Massachusetts Institute of Technology. [S.l.]. 2018.
131. JINTAO, Z. et al. Geometric Parameters Estimation and Calibration in Cone-Beam Micro-CT. **Sensors**, v. 15, n. 9, 2015.
132. Standard Test Methods for Constituent Content of Composite Materials. ASTM International. [S.l.]. 2015.
133. GURIT. **SE 84LV - Low Temperatura Cure Epoxy Prepreg**. Datasheet. [S.l.].
134. TSAI, S. W. et al. **Composite Laminates: Theory and practice of analysis, design and automated layup**. Stanford: [s.n.], 2017.

135. SUN, M. **Optimal recovery of elastic properties for anisotropic materials through ultrasonic measurement**. PhD thesis, University of Maine. Orono, Maine, USA. 2002.
136. ADAMOWSKI, J. C. et al. **A Large Aperture Ultrasonic Receiver for Through-Transmission Determination of Elastic Constants of Composite Materials**. IEEE International Ultrasonics Symposium Proceedings. [S.l.]: [s.n.]. 2008. p. 1524-1527.
137. STIJNMAN, P. W. Determination of the elastic constants of some composites by using ultrasonic velocity measurements. **Composites**, v. 26, n. 8, p. 597-604, 1995.
138. BRYANT, F. Snell's Law of Refraction. **Physics Bulletin**, v. 9, n. 12, 1958.
139. BACK, T. **Evolutionary Algorithms in Theory and Practice: Evolution Strategies, Evolutionary Programming, Genetic Algorithms**. 1. ed. [S.l.]: Oxford University Press, 1996.
140. LASDON, L. S.; FOX, R. L.; RATNER, M. W. Nonlinear optimization using the generalized reduced gradient method. **Revue française d'automatique, informatique, recherche opérationnelle**, v. 3, p. 73-104, 1974.
141. GAVIN, H. P. **The Levenberg-Marquardt algorithm for nonlinear least squares curve-fitting problems**. Duke University. [S.l.], p. 1-20. 2019.
142. DAHMEN, S.; AMOR, M. B.; GHOZLEN, M. H. An inverse procedure for determination of material constants of a periodic multilayer using Floquet wave homogenization. **Composite Structures**, v. 92, p. 430-435, 2010.
143. HEXCEL. **HexPly Prepreg Technology**. [S.l.]. 2013.
144. SHAHDIN, A.; MORLIER, J.; GOURINAT, Y. Significance of Low Energy Impact Damage on Modal Parameters of Composite Beams by Design of Experiments. **Journal of Physics Conference Series**, v. 181, n. 1, 2009.

145. SHIN, K. C.; LEE, J. J. Bond Parameters Affecting Failure of Co-Cured Single and Double Lap Joints Subjected to Static and Dynamic Tensile Loads. **European Structural Integrity Society**, v. 32, p. 373-384, 2003.
146. Space engineering: Structural materials handbook - Part 1: Overview and material. European Cooperation for Space Standardization. Noordwijk, Netherlands. 2011.
147. PARK, S. Y. et al. A Comparison of the Properties of Carbon Fiber Epoxy Composites Produced by Non-autoclave with Vacuum Bag Only Prepreg and Autoclave Process. **Applied Composite Materials**, v. 26, p. 187–204, 2019.
148. BOERI, D. V. **Caracterização de materiais compostos por ultrassom**. Universidade de São Paulo. São Paulo. 2006.
149. ROKHLIN , S. I.; WANG, W. Double through-transmission bulk wave method for ultrasonic phase velocity measurement and determination of elastic constants of composite materials. **Journal of Acoustical Society of America**, v. 91, n. 6, p. 3303-3312, 1992.
150. PERALTA, M. **Propagation Of Errors: How To Mathematically Predict Measurement Errors**. 2. ed. [S.l.]: CreateSpace Independent Publishing Platform, 2012.