

OBTENÇÃO DOS MÓDULOS DE ELASTICIDADE DE UM TUBO COMPÓSITO POR ULTRASSOM¹

Felipe Alves Koops²
 Thomas Gabriel Rosauo Clarke³

Resumo

Este trabalho apresenta a técnica de ensaio não-destrutivo (END) por ultrassom realizado a partir do método de pulso-eco, para a determinação das constantes elásticas de um tubo compósito de resina epóxi reforçada com fibra de vidro produzido pelo processo de enrolamento filamental. Com as medidas de ultrassom se obtém as velocidades ultrassônicas longitudinais e transversais em cinco direções para o cálculo das constantes elásticas e a partir destas, o módulo de elasticidade nas três direções do material. Essa técnica foi adotada pela dificuldade de se obter as variáveis das constantes elásticas por ensaios mecânicos e por se tratar de uma técnica destrutiva. Os experimentos são realizados com amostras de fibra de vidro/epóxi considerados transversalmente isotrópicos para simplificação do modelo. Utilizou-se transdutores com frequências de 2 MHz e 4 MHz para a determinação das velocidades longitudinais e 1 MHz para as velocidades transversais com sapatas de 45 e 60° para o aço, com ângulos corrigidos para compósito de 19,1° e 44°, respectivamente. Para o cálculo das constantes elásticas também é necessária a determinação da densidade do compósito que foi realizada por picnometria a hélio. Os módulos de elasticidade na direção x, y e z foram 16,90 GPa, 16,90 GPa e 13,82 GPa, respectivamente.

Palavras-chave: Compósito; Ultrassom; Módulo de elasticidade.

OBTAINING OF ELASTIC MODULUS OF A COMPOSITE PIPE BY ULTRASOUND

Abstract

This paper presents a technique for non-destructive testing (NDT) carried by ultrasound from the pulse-echo method for the determination of elastic constants of a composite tube of epoxy resin reinforced with glass fiber produced by filament winding process. With ultrasound measurements obtained by the longitudinal and transverse ultrasonic velocities in five directions for calculating the elastic constants and from these, the elastic modulus of the material in three directions. This technique was adopted by the difficulty of obtaining the variables of the elastic constants for mechanical testing and it is a destructive technique. The experiments are performed with specimens of glass fiber / epoxy considered transversely isotropic model for simplification. Was used transducers with frequencies of 2 MHz and 4 MHz for determining longitudinal speed of 1 MHz and transverse velocities for the shoes 45 and 60 to the steel, fixed to composite angles of 19.1 and 44, respectively. For calculation of the elastic constants is also necessary to determine the density of the composite was performed by the helium pycnometry. The modulus of elasticity in the x, y and z were 16.90 GPa, 16.90 GPa and 13.82 GPa, respectively.

Key words: Composite; Ultrasound; Elastic modulus.

¹ *Contribuição técnica ao 68º Congresso Anual da ABM - Internacional, 30 de julho a 2 de agosto de 2013, Belo Horizonte, MG, Brasil*

² *Engenheiro de Materiais, Analista Técnico. Laboratório de Metalurgia Física, UFRGS, Porto Alegre, RS, Brasil.*

³ *Engenheiro de Materiais, Dr. Pesquisador e Professor. Laboratório de Metalurgia Física, UFRGS, Porto Alegre RS, Brasil.*

1 INTRODUÇÃO

Os materiais compósitos poliméricos possuem diversas vantagens quando comparados aos materiais metálicos utilizados normalmente na engenharia. Sua resistência a ambientes corrosivos, associada à sua alta resistência e módulo de elasticidade específicos, aliada à sua baixa densidade, impulsionaram a aplicação destes materiais em estruturas que exigem baixa massa específica sem sacrifício das propriedades mecânicas.

Para se ter um efetivo aproveitamento do desempenho dos compósitos poliméricos em tubulações dadas as diversas variáveis do processo de enrolamento filamentar se faz necessária a determinação das propriedades mecânicas. O conhecimento da matriz de rigidez elástica é essencial para se garantir o comportamento mecânico desses materiais sob condições elásticas. Entre as técnicas convencionais usadas para a obtenção das propriedades elásticas desses materiais, os mais utilizados são os ensaios mecânicos. Mas estes apresentam desvantagens, tais como: (a) algumas constantes dos materiais são de difícil obtenção, (b) são destrutivos (c) custos altos envolvidos na produção e preparação de amostras, entre outros. Utilizando-se técnicas de ensaios não destrutivos por ultrassom em materiais pode-se determinar as constantes elásticas do material através das velocidades de propagação das ondas elásticas que se propagam no material.

Com considerações de simetria, o número de constantes elásticas no material é reduzido para cinco (material transversalmente isotrópico). A determinação das constantes elásticas da matriz de rigidez de materiais compósitos é feita a partir da medição das velocidades de propagação das ondas elásticas em diferentes orientações de propagação, pois estas estão relacionadas com as constantes elásticas e a densidade do material.

O presente trabalho apresenta um estudo de tubos compósitos de resina epóxi reforçada com fibra de vidro do tipo E, produzidos por enrolamento filamentar, determinando-se as propriedades mecânicas para o material através de ensaios mecânicos e ensaios por ultrassom.

Um material é chamado transversalmente isotrópico quando um de seus planos principais é um plano de isotropia, isto é, a cada elemento infinitesimal há um plano em que as propriedades mecânicas são idênticas em todas as direções. Muitos materiais compósitos unidirecionais podem ser considerados transversalmente isotrópicos, com o plano 1-2 (normal às fibras) sendo o plano de isotropia (Figura 1). Este é o caso de materiais compostos unidirecionais de fibra de vidro/epóxi com frações volumétricas relativamente altas.

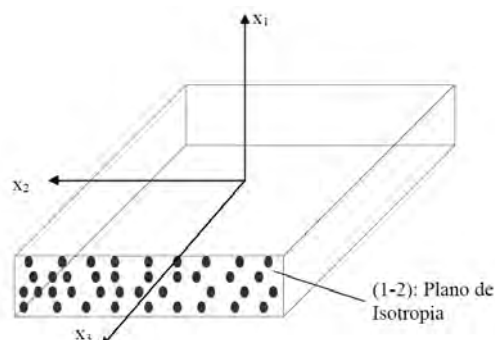


Figura 1. Material Ortotrópico com isotropia transversal.⁽¹⁾

As relações tensão-deformação para um material transversalmente isotrópico são simplificadas em:

$$C_{22} = C_{11}; C_{23} = C_{13}; C_{55} = C_{44}; C_{66} = (C_{11} - C_{12})/2$$

Portanto as relações tensão-deformação para um material transversalmente isotrópico reduzem-se a:⁽¹⁾

$$\begin{bmatrix} \sigma_1 \\ \sigma_2 \\ \sigma_3 \\ \sigma_4 \\ \sigma_5 \\ \sigma_6 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} C_{11} & C_{12} & C_{13} & 0 & 0 & 0 \\ C_{12} & C_{11} & C_{13} & 0 & 0 & 0 \\ C_{13} & C_{13} & C_{33} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & C_{44} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & C_{55} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & C_{66} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} S_1 \\ S_2 \\ S_3 \\ S_4 \\ S_5 \\ S_6 \end{bmatrix}$$

Equação 1

As relações acima mostram que um material ortotrópico com isotropia transversal é caracterizado por cinco constantes elásticas independentes. No caso de materiais transversalmente isotrópicos, é possível considerar que as propriedades mecânicas nas direções 1 e 2 são idênticas, já que, como mostrado na Figura 1, estas direções são direções perpendiculares a direção 3. Nestes casos, a matriz de rigidez ou flexibilidade se simplifica, e consequentemente:⁽²⁾

$$\begin{bmatrix} S_1 \\ S_2 \\ S_3 \\ S_4 \\ S_5 \\ S_6 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1/E_1 & -\nu_{12}/E_1 & -\nu_{23}/E_1 & 0 & 0 & 0 \\ -\nu_{12}/E_1 & 1/E_2 & -\nu_{23}/E_1 & 0 & 0 & 0 \\ -\nu_{32}/E_1 & -\nu_{32}/E_2 & 1/E_3 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1/G_{32} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1/G_{32} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1/G_{12} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \sigma_1 \\ \sigma_2 \\ \sigma_3 \\ \sigma_4 \\ \sigma_5 \\ \sigma_6 \end{bmatrix}$$

Equação 2

O modelo de material transversalmente isotrópico foi adotado para relacionar as velocidades ultrassônicas com as constantes elásticas.

As propriedades elásticas de um compósito transversalmente isotrópico podem ser avaliadas através de medidas das velocidades das ondas longitudinais e transversais propagadas no material em diferentes direções de acordo com a direção das fibras.

Para o sistema cartesiano de coordenadas x, y e z no qual z coincide com a direção das fibras no material como mostrado na Figura 2.

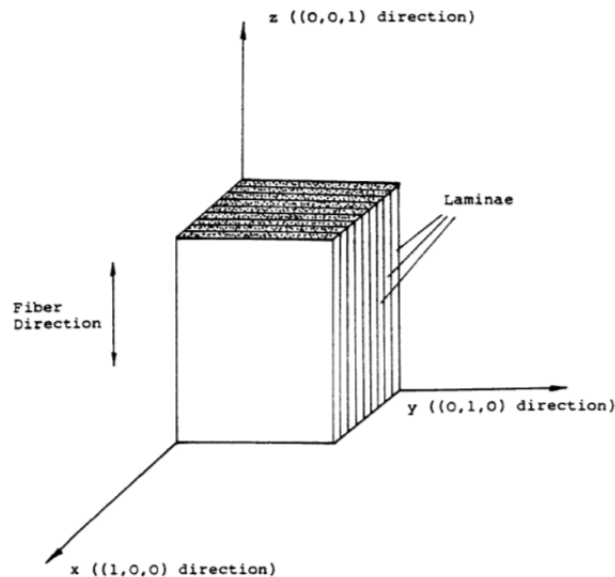


Figura 2. Material compósito com as principais direções das fibras.⁽³⁾

As relações entre as constantes elásticas da rigidez da matriz e as velocidades estão apresentadas na Tabela 1. Nela estão descritas a direção de propagação, tipo de onda, onde L é a onda longitudinal e T é a cisalhante ou transversal, e a equação. Os ângulos descritos na Tabela 1 são relação ao eixo z.

Tabela 1. Relações entre constantes elásticas de rigidez da matriz e as velocidades ultrassônicas⁽³⁾

Direção de Propagação	Tipo de Onda	Equação
X	L	$C_{11} = \rho v^2$
X	T	$C_{66} = \rho v^2$
Z	T	$C_{44} = \rho v^2$
Z	L	$C_{33} = \rho v^2$
30°	L	$C_{13} = [(1/3)(3C_{33} + C_{44} - 4\rho v^2)(3C_{44} + C_{11} - 4\rho v^2)]^{1/2} - C_{44}$
30°	T	$C_{66}(3)^{1/2} + C_{44} = 2\rho v^2$
45°	L	$C_{13} = [(C_{11} + C_{44} - 2\rho v^2)(C_{44} + C_{33} - 2\rho v^2)]^{1/2} - C_{44}$
45°	T	$C_{66}(3)^{1/2} + C_{44} = 2\rho v^2$
60°	L	$C_{13} = [(1/3)(C_{33} + 3C_{44} - 4\rho v^2)(C_{44} + 3C_{11} - 4\rho v^2)]^{1/2} - C_{44}$
60°	T	$C_{66}(3)^{1/2} + C_{44} = 2\rho v^2$

As constantes C_{11} , C_{33} , C_{44} e C_{66} podem ser determinados pela medida direta das velocidades das ondas apropriadas propagando nas mas direções principais x, y e z. A constante C_{13} deve ser determinada com a onda propagando numa direção intermediária entre os eixos x e z. A constante C_{12} pode ser calculada a partir das constantes C_{11} e C_{66} ($C_{12} = C_{11} - 2C_{66}$).

No modelo homogêneo, existe a correspondência entre as constantes elásticas de rigidez da matriz e os módulo de elasticidade. Essas relações estão apresentadas na Tabela 2.⁽³⁾

Tabela 2. Relações entre as constantes elásticas e propriedades para material transversalmente isotrópico⁽³⁾

Propriedades
$E_x = (C_{11}-C_{12}) (C_{11}C_{33} + C_{12}C_{33} - 2C_{13}^2) / (C_{11}C_{33} - C_{13}^2)$
$E_y = E_x$
$E_z = (C_{11} C_{33} + C_{12} C_{33} - 2C_{13}^2) / (C_{11} + C_{12})$

2 MATERIAL E MÉTODOS

Para o desenvolvimento deste trabalho utilizou-se um tubo compósito feito com resina epóxi reforçado com fibra de vidro do tipo E, produzido pelo processo de enrolamento filamentar da empresa EDRA de diâmetro nominal de 6,0 polegadas (152,4 mm) e comprimento de 2,0 m.

A densidade das amostras foi determinada em um multi picnômetro a gás hélio Quantachrome, modelo MVP-1. O gás hélio é utilizado por ser inerte e por possuir um pequeno diâmetro, o que facilita que penetre nos poros abertos da amostra. As amostras foram retiradas do tubo compósito em formato de cubos de aproximadamente 1mm³.

O picnômetro a gás possui duas câmaras de volume conhecido: a da amostra e a de expansão, ambas conectadas por uma válvula. Depois de submetida à pressão atmosférica, a câmara de expansão é fechada e o gás hélio é pressurizado na câmara contendo a amostra de massa conhecida previamente. Então a câmara de expansão é aberta ocorrendo queda de pressão na câmara com a amostra e aumento de pressão na câmara de pressão. O equipamento fornece assim a densidade das amostras.

Para as medidas de velocidades sônicas se fez necessária a usinagem de corpos de prova para que se tivesse uma maior interação entre o transdutor e o material compósito. As medidas foram feitas em três direções, no sentido radial, axial e circunferencial como estão apresentadas na Figura 3.

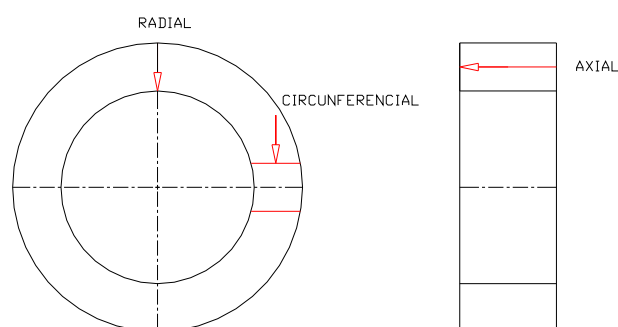


Figura 3. Direções das medidas de velocidade ultrassônica.

No Corpo de Prova do Tipo I (CP-I) foram medidas as velocidades longitudinais no sentido radial do tubo (cálculo da constante C_{11}), a velocidade transversal no sentido axial do tubo (C_{44}) e a velocidade longitudinal intermediária (C_{13}) entre os eixos x e z. Esse corpo de prova foi retirado no sentido longitudinal do tubo.

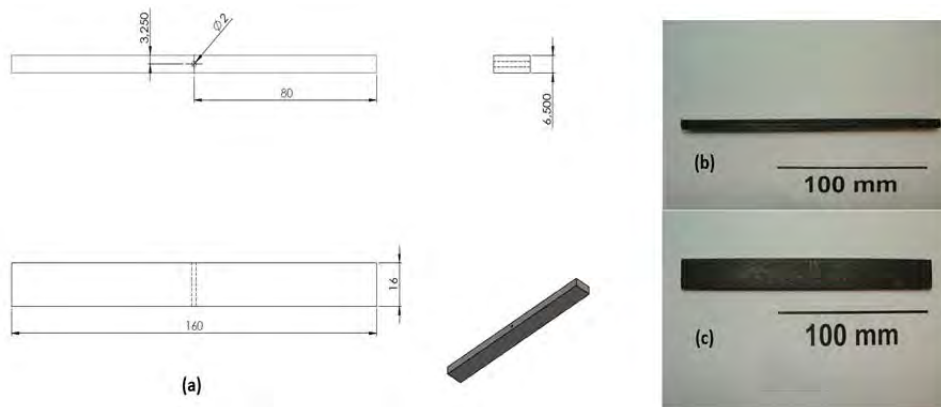


Figura 4. Corpo de Prova do tipo I. (a) Desenho com as dimensões do corpo de prova. (b) Vista Lateral. (c) Vista Frontal.

A técnica de ultrassom utilizada para as medidas de velocidades sônicas foi o pulso-eco com o aparelho da empresa Olympus modelo Epoch XT. Para as velocidades longitudinais no sentido radial do tubo foi utilizado um cabeçote normal (ou reto) de frequência de 2 MHz, com diâmetro de 6,0mm, modelo DS6 da marca Olympus. A escolha desse transdutor se deve ao melhor sinal obtido e maior interação com o material entre os transdutores testados. Como agente acoplante foi utilizada vaselina líquida para que se tivesse uma melhora de sinal.

A velocidade transversal no sentido axial do tubo foi determinada através de medidas de ultrassom com a técnica pulso-eco utilizando um transdutor angular de 1 MHz de frequência e uma sapata de 45° da empresa Krautkramer. Como o transdutor angular é projetado para medidas das velocidades sônicas no aço, ela deve ser corrigida para se obter o ângulo correto de saída do feixe sônico. Essa correção foi feita utilizando a Lei de Snell apresentada na Equação 3:

$$\frac{v_i}{v_r} = \frac{\text{sen}\alpha_i}{\text{sen}\alpha_r} \quad \text{Equação 3}$$

Onde:

- v_i = velocidade de incidência; v_r = velocidade de refração; α_i = ângulo de incidência; e
- α_r = ângulo de refração.

Primeiramente foi calculado para o aço o ângulo incidente α_i para os cabeçotes de 45, 60 e 70° com as velocidades de incidência e refração de 2730 e 3240m/s, respectivamente. Esses valores dos ângulos de incidência estão apresentados na tabela abaixo.

Tabela 3. Valores dos ângulos de incidência calculados para o aço

Aço	
Ar	Ai
45 °	36,56 °
60 °	46,87 °
75 °	54,47 °

Posteriormente ao cálculo dos ângulos de incidência, foi calculado o ângulo refratado para o material compósito em questão, admitindo a velocidade do compósito de 1.400m/s. Os resultados encontrados estão descritos na Tabela 4.

Tabela 4. Valores dos ângulos refratados para compósito

Compósito	
α_i	α_r
36,56 °	19,10 °
46,87 °	23,64 °
52,35 °	25,78 °

Após a correção dos ângulos foram calculadas as distâncias projetadas (DP) e percurso sônico (PS) a partir das medidas da distância da superfície até o furo (h) e o ângulo de refração corrigida (α_r) por uma relação trigonométrica como apresentado na figura esquemática (Figura 5).

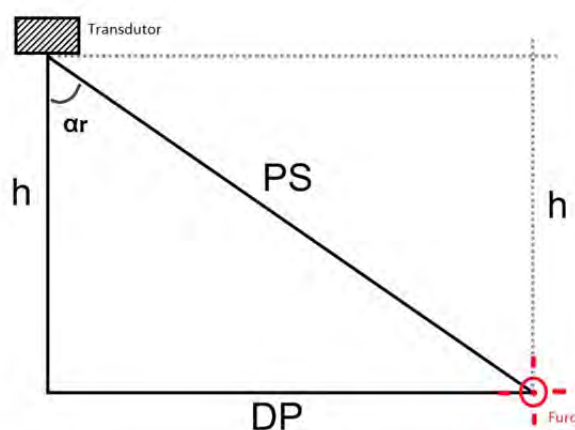


Figura 5. Desenho esquemático apresentando as variáveis DP (Distância Projetada), PS (Percurso Sônico), α_r (Ângulo de refração corrigida) e h (Distância entre a Superfície da amostra e o furo) no interior da amostra.

Com os cálculos para cada ângulo de refração se concluiu que seria mais coerente à utilização do ângulo de 19,1° a partir das distâncias medidas entre a superfície e o furo. Os resultados estão apresentados na Tabela 5.

Tabela 5. Valores de h medido, DP, PS

Corpo de Prova	h (mm)	PS (mm)	DP (mm)
I	2,90	3,06	1,00
II	3,30	3,49	1,14
III	3,20	3,38	1,10
IV	3,20	3,38	1,10

Nessas condições foram medidas as velocidades transversais dos corpos de prova, agora utilizando um transdutor de 1MHz e uma sapata de 45° (para o aço) com ângulo refratado corrigido de 19,10° (para compósito) para se obter as velocidades corrigidas. Foi utilizado como artifício um fio de aço dentro do furo da amostra servindo como um refletor e amplificador do sinal medido.

Para a velocidade longitudinal intermediária a 45° entre os eixos x e z (utilizada no cálculo da constante C_{13}) se utilizou um transdutor da empresa Krautkramer com sapata de 60° (para o aço), com ângulo corrigido para o material compósito de aproximadamente 45°.

Com os ângulos de incidência, foi calculado o ângulo refratado para o material compósito, admitindo a velocidade longitudinal do compósito de 2900m/s. Os resultados encontrados estão descritos na Tabela 6.

Tabela 6. Valores dos ângulos refratados para compósito

Compósito	
α_i	α_r
36,56 °	34,45 °
46,87 °	44,08 °
52,35 °	48,76 °

A sapata de 60° foi selecionada, pois ela tem um ângulo de refração de 44,08°, se aproximando dos 45° que se deve ter para se obter a velocidade longitudinal na direção intermediária entre os eixos x e z.

Com os ângulos corrigidos foram calculadas as distâncias projetadas (DP) e percurso sônico (PS) a partir das medidas da distância da superfície até o furo (h) e o ângulo de refração corrigida (α_r) por uma relação trigonométrica como apresentado na Figura 5. A Tabela 7 apresenta os valores de h, PS e DP

Tabela 7. Valores de h medido e DP e PS calculados

h (mm)	PS (mm)	DP (mm)
2,80	3,89	2,70

O Corpo de Prova do Tipo II (CP-II) foi produzido para medidas das velocidades longitudinais no sentido axial para o cálculo da constante C_{33} . O CP-II foi obtido a partir de um corte transversal no sentido do tubo. As dimensões estão apresentadas na Figura 6.

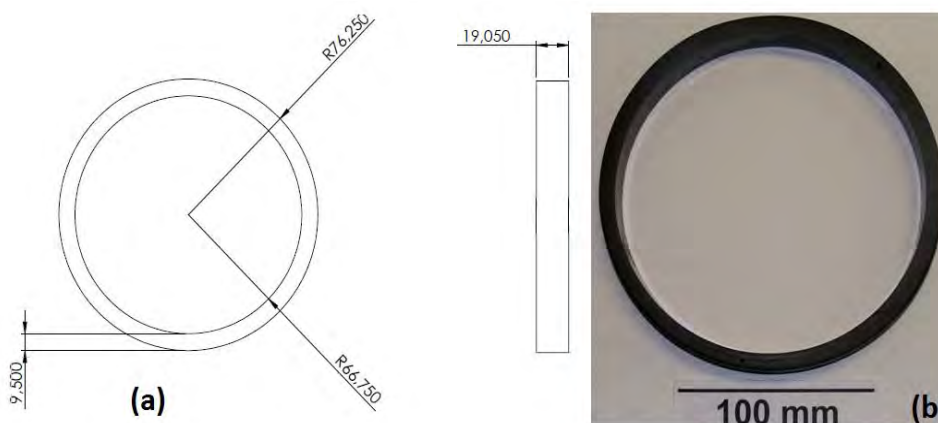


Figura 6. Corpo de Prova do Tipo II. (a) Desenho com as dimensões do corpo de prova. (b) Vista superior.

As medidas da velocidade transversal no sentido radial para a determinação de C_{66} . Foi desenvolvido o Corpo de Prova do Tipo III (CP-III), que tem suas dimensões apresentadas na Figura 7.

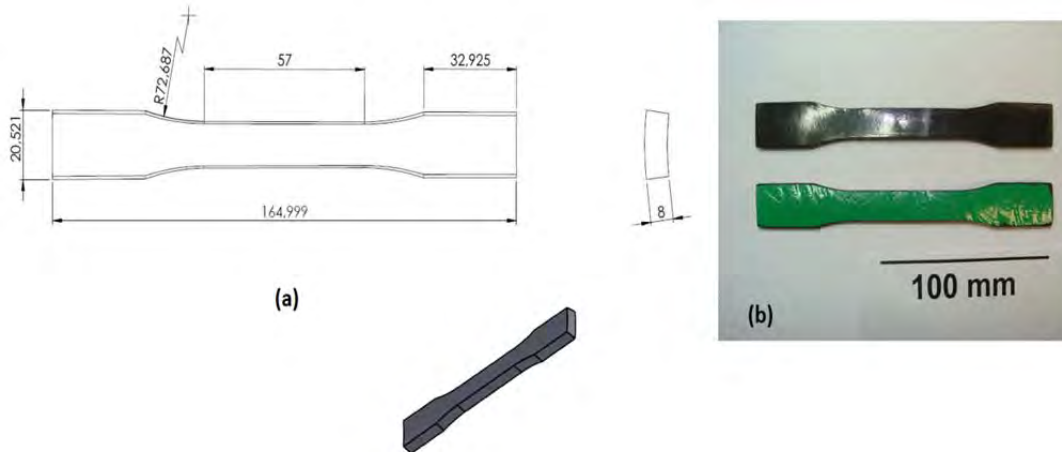


Figura 7. Corpo de Prova do Tipo III. (a) Desenho com as dimensões do corpo de prova. (b) Vista superior.

3 RESULTADOS

A densidade medida pela análise de picnometria a hélio teve valor médio de $1,640 \text{ g/cm}^3$.

As medidas de ultrassom para a determinação da constante C_{11} foram obtidas através das velocidades no sentido radial do tubo no CP-I, com valor médio de 3250 m/s .

A velocidade transversal no sentido axial do tubo foi determinada a partir de medidas com ângulo de incidência corrigido de 19° e frequência de 1 MHz no CP-I. A média da velocidade transversal medida foi de 1.500 m/s . Apesar de haver ruído entre os picos, os valores medidos da distância projetada, profundidade da superfície ao furo e o percurso sônico coincidem com os valores medidos e calculados. Para se ter certeza da medida do pico a ser analisado, se movimentou o fio de aço (utilizado como refletor) e o pico mais alto também se movimentou. Essas medidas tiveram um desvio padrão de 1 m/s .

Para a velocidade longitudinal na direção intermediária entre os eixos x e z utilizou-se um transdutor de 60° com ângulo corrigido de 44° para o material compósito. A velocidade média foi de 2024 m/s no CP-I com desvio padrão de 15 m/s .

O CP-II foi utilizado para se obter a constante C_{33} medindo a velocidade longitudinal no sentido circunferencial do tubo compósito. Para isso utilizou-se uma frequência de $2,00 \text{ MHz}$. A velocidade média obtida desse ensaio foi de 2958 m/s com desvio padrão de 40 m/s .

A velocidade transversal no sentido radial do tubo foi determinada com o objetivo de se obter a constante C_{66} . Para essa medida se utilizou o CP-III e o transdutor de 30° para o aço com ângulo corrigido de 19° para material compósito. A velocidade média medida foi de 2200 m/s com desvio padrão de 7 m/s .

A constante C_{12} pode ser calculada a partir das constantes C_{11} e C_{66} ($C_{12} = C_{11} - 2C_{66}$) e não precisa de medida de velocidade ultrassônica. Na Tabela 8 se tem um resumo das velocidades, sentido de propagação, tipo de onda e a constante que é determinada a partir da velocidade medida.

Tabela 8. Resumo das velocidades medidas

Velocidade (m/s)	Sentido de propagação no tubo	Tipo de Onda	Constante
3250	Radial	Longitudinal	C ₁₁
1500	Axial	Transversal	C ₄₄
2024	Intermediária	Longitudinal	C ₁₃
2958	Circunferencial	Longitudinal	C ₃₃
2200	Radial	Transversal	C ₆₆

O cálculo das constantes elásticas foi feito baseado nas equações descritas na Tabela 1 e com os resultados das velocidades medidas por ultrassom e com a densidade do material (1.640 kg/m³) obtidos pela picnometria a hélio. A Tabela 9 apresenta os resultados das constantes elásticas calculadas.

Tabela 9. Valores das constantes elásticas da matriz

Constante	Valores Experimentais (GN/m ²)
C ₁₁	17,322
C ₄₄	3,690
C ₃₃	14,350
C ₆₆	7,937
C ₁₃ (45°)	2,215
C ₁₂	1,447

Com a obtenção das constantes elásticas pode-se determinar os módulos de elasticidade de acordo com a Tabela 2. O resultado dessas propriedades é apresentado na Tabela 10 nas suas respectivas direções.

Tabela 10. Valores de módulo de elasticidade e coeficiente de Poisson

Módulo de Elasticidade e Coeficiente de Poisson	Valores Experimentais
E _x =E _y	16,90 GPa
E _z	13,82 GPa

4 DISCUSSÃO

Com os ensaios realizados a partir do ultrassom foi possível determinar as velocidades sônicas no material, as constantes elásticas e posteriormente as propriedades mecânicas que tiveram os valores de 16,90 GPa para o módulo de elasticidade na direção x e y, 13,82 GPa na direção z. Segundo o fabricante do material os módulos de elasticidade na direção x e y é de 20,04 Gpa e 14,95 Gpa na direção z. Essa diferença pode ser explicada por alguns fatores como falta de acoplamento entre a amostra e o transdutor do equipamento de ultrassom. Outro fator que pode gerar essa diferença são os ângulos corrigidos das sapatas projetadas para medidas em aço. E o principal fator que ocasionou essa diferença foi o número de camadas de fibras do tubo compósito que podem aumentar a atenuação do sinal do ultrassom e gerado uma velocidade ultrassônica menor do que a real.

5 CONCLUSÃO

O método para a medida dos módulos de elasticidade tiveram resultados satisfatórios comparados com os do fabricante, pois apesar de se ter uma diferença entre os módulos medidos e os dados do fornecedor pode-se ter uma aproximação dos valores.

Agradecimentos

Agradecimentos especialmente a Rubem Manoel Braga que sem ele esse trabalho não seria possível e ao LAMEF que deu todo o suporte estrutural.

REFERÊNCIAS

- 1 NYE, J. F. (1993). Physical Properties of Crystals: Their Representation by Tensors. New York: Oxford University Press.
- 2 PEREIRA, J. C. (2012). Curso de projeto estrutural com materiais compostos. Florianópolis: Universidade Federal de Santa Catarina.
- 3 Marques, E. R., & Williams Jr., J. H. (Dezembro de 1986). Ultrasonic Determination of the Elastic Constants of the Stiffness Matrix for Unidirectional Fiberglass Epoxy Composites. (Massachusetts Institute of Technology).