

DETERMINAÇÃO DO MÓDULO DE YOUNG DE MATERIAIS SÓLIDOS POR ULTRA-SOM

Edmara Marques Rodrigues da Silva*

Nelson Snellaert Tavares**

A possibilidade de se utilizar o ensaio de ultra-som em materiais sólidos deve-se ao fato de que a passagem de uma onda elástica pelo meio de propagação faz com que as partículas que compõem este meio executem um movimento de oscilação em torno de sua posição de equilíbrio, cuja amplitude irá diminuindo gradativamente com a perda de energia.

O ultra-som é um sistema típico de teste não destrutivo. Permite medir espessuras, detectar descontinuidades internas e mesmo analisar a estruturas dos materiais. Como a propagação da onda sonora depende da estrutura interna e das descontinuidades existentes no material, pode-se associar a velocidade de propagação da onda às suas propriedades mecânicas e físicas.

O objetivo do trabalho é determinar o módulo de Young de alguns materiais não-ferrosos por ultra-som e comparar com os valores obtidos por ensaios mecânicos convencionais e ou dados de literatura.

A avaliação das incertezas dos resultados causadas pelo processo metrológico e pela amostragem laboratorial é feita através de técnicas estatísticas considerando o grau de confiabilidade de 95%. Os resultados evidenciaram que o ensaio não-destrutivo por ultra-som, além de ser uma ferramenta de controle de qualidade, é uma técnica alternativa para a caracterização de materiais.

Palavras-Chaves: módulo de Young, ultra-som

53° Congresso Anual da ABM;

** M. Sc., Bolsista de Doutorado (CNPq) IPEN-CNEN/SP e-mail: emsilva@net.ipen.br*

*** Engenheiro Mecânico, IAE/CTA. e-mail: snell@uol.com.br*

1. INTRODUÇÃO

A degradação de um material submetido a alguma solicitação reflete-se em suas propriedades mecânicas, como módulo de Young, que podem ser obtidas por métodos destrutivos (ensaio de tração) ou por um métodos não-destrutivos (ultra-som).

O ensaio de tração é bastante conhecido na área de caracterização de materiais. As propriedades obtidas através da curva tensão *versus* deformação e das alterações dimensionais dos corpos de prova permitem avaliar o estado atual do material relacionando-o às condições de carregamento. ⁽¹⁾

Já a técnica de ultra-som é muito aplicada na medição de espessuras e na detecção de descontinuidades de peças ou componentes. Como a propagação da onda sonora depende da estrutura interna e das descontinuidades existentes nos materiais em geral, pode-se associar a velocidade de propagação da onda às suas propriedades mecânicas e físicas.

O ensaio de ultra-som é vantajoso economicamente por ser um ensaio não-destrutivo e por não se usinar corpos de prova como no ensaio de tração. É um ensaio rápido, de alta sensibilidade e sendo o equipamento de ultra-som leve e portátil, as determinações podem ser realizadas em campo. A técnica depende da habilidade e qualificação do operador, já que alguns cuidados na calibração do equipamento e na interpretação dos seus sinais devem ser tomados para garantir uma maior confiabilidade e precisão dos resultados. ⁽²⁾

Conhecendo-se a massa específica de um material é possível determinar algumas propriedades físicas e elásticas em função das velocidades ultra-sônicas características de cada material.

Para verificar a confiabilidade do valor do módulo de Young obtido utilizando o ultra-som fez-se uma comparação com os valores obtidos por ensaio de tração convencional e com o seu valor teórico. Os resultados foram obtidos sob uma abordagem estatística com nível de confiança de 95%. ⁽³⁾

2. MATERIAIS

Para a realização do trabalho experimental foram selecionados três metais não-ferrosos:

a) Titânio Comercialmente puro (grau2)

O titânio grau 2 é um metal de importância comercial e vem despertando muito interesse dos projetistas devido a suas notáveis características, tais como: elevada resistência mecânica associada a uma baixa densidade, ótima resistência à corrosão, tendência decrescente nos custos de produção. É utilizado em equipamentos de processamentos químicos. ⁽⁴⁾

b) Alumínio

É um metal que se oxida facilmente, formando uma camada passivadora que impede a oxidação contínua. Essas características, além da abundância do seu minério principal, vem tornando a alumínio o metal mais importante, após o ferro.

O alumínio é utilizado como condutor elétrico, embalagem para proteção de alimentos, de pastas dentais, fabricação de instrumentos ópticos (alto poder de reflexão), fabricação de ligas metálicas (de baixa densidade, grande maleabilidade, ductilidade, tenacidade e resistência à corrosão), fabricação de explosivos, isolante térmico, agente redutor e com grande aplicação na aviação. ⁽⁵⁾

c) Nióbio

O depósito de Pirocloro, em Araxá-MG, é a maior reserva de nióbio conhecida mundialmente. Sua principal aplicação é como elemento na produção de aços especiais e nas chamadas superligas. É de interesse da área de energia atômica devido ao seu alto ponto de fusão (2468 °C), excelente compatibilidade com urânio, boa resistência à alta temperatura e propriedades físicas e mecânicas convenientes. ⁽⁵⁾

2. ENSAIO DE TRAÇÃO

Os corpos de prova destinados ao ensaio de tração foram usinados conforme as especificações da norma ASTM E08, lixados para eliminar concentradores de tensão e tiveram suas dimensões medidas através do projetor de perfis CARL ZEISS modelo 320. Os corpos de prova foram ensaiados em uma máquina INSTRON modelo 1132 com uma velocidade de deformação de 2,0 mm/min.

As figuras 1 e 2 apresentam as dimensões dos corpos de prova do titânio e do alumínio, respectivamente.

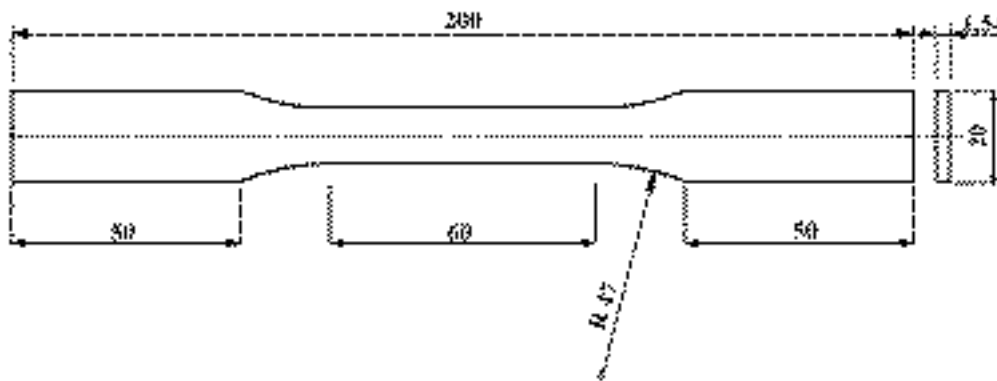


Figura 1 – Dimensões do corpo de prova para ensaio de tração do titânio (cotas em mm).

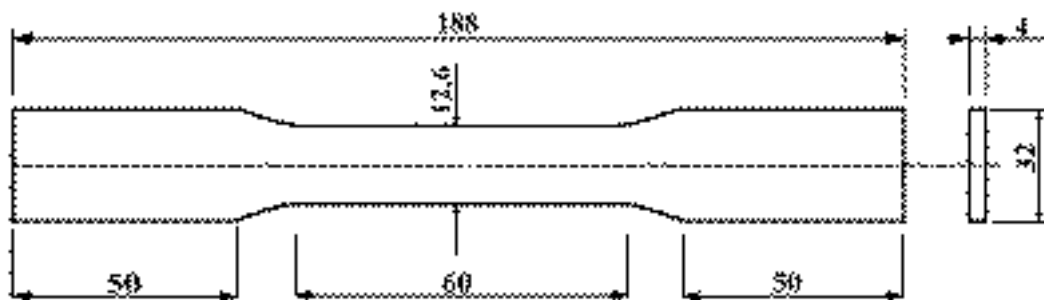


Figura 2 – Dimensões do corpo de prova para ensaio de tração do alumínio (cotas em mm).

4. ENSAIO DE ULTRA-SOM

O ensaio não destrutivo de ultra-som, além de ser uma ferramenta de controle de qualidade, é uma alternativa para a avaliação de propriedades físicas e mecânicas de materiais, se a massa específica desses é conhecida. A determinação dessa propriedade seguiu a Norma CEN/TC 184 n 64.

Utilizou-se um equipamento NORTEC™ modelo NDT 131, transdutores de ondas longitudinais (NORTEC KD-4-5) e de ondas transversais (ULTRAN 5MHz). Como acoplante do ensaio, utilizou-se mel de abelha.

Obtiveram-se as velocidades longitudinal e transversal conforme procedimentos da norma ASTM E494.

Calculou-se o módulo de Young, considerando o nível de confiança de 95% e a propagação de erros, em função da massa específica e dos valores das velocidades ultra-sônicas do material segundo a equação (1):

$$E = \rho \times \frac{V_s^2 (3 V_l^2 - 4 V_t^2)}{V_l^2 - V_s^2} \quad (1)$$

onde E é o módulo de Young, ρ é a massa específica, V_l é a velocidade longitudinal e V_s é a velocidade transversal.

A equação (1) foi também utilizada para calcular o módulo de Young considerando as velocidades ultra-sônicas teóricas ^(2,9) de cada material utilizado neste trabalho.

As figuras 3, 4 e 5 apresentam as dimensões das peças utilizadas no ensaio de ultra-som do titânio, alumínio e nióbio, respectivamente.

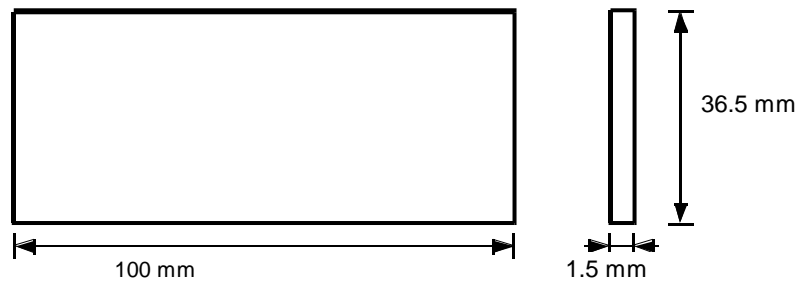


Figura 3 – Dimensões da peça de titânio utilizada no ensaio de ultra-som.

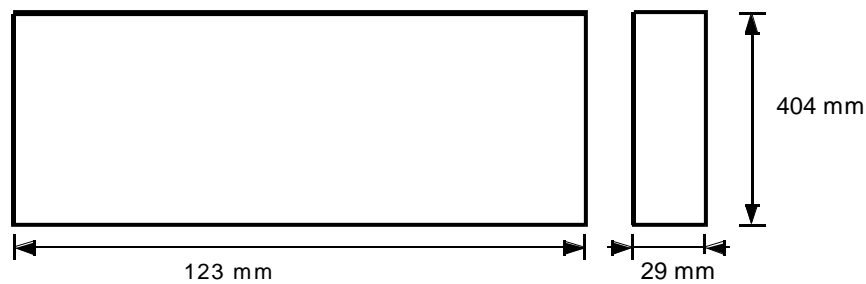


Figura 4 – Dimensões da peça de alumínio utilizada para ensaio de ultra-som.

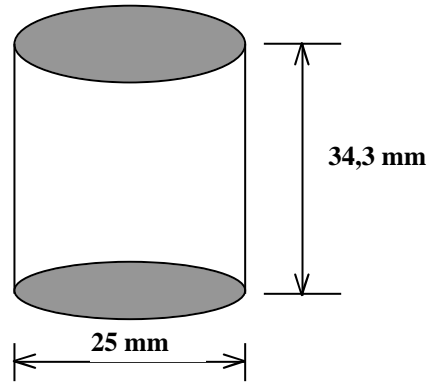


Figura 5 – Dimensões da peça de nióbio utilizada para ensaio de ultra-som.

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

a) Titânio Comercialmente puro (grau 2)

O valor da massa específica do Ti encontrado na literatura ⁽²⁾ é 4,5 Mg/m³. O valor médio da massa específica encontrado experimentalmente foi:

$$\text{Massa específica do Ti-CP (grau 2): } 4,53 \pm 0,06 \text{ Mg/m}^3$$

Seja:

E_1 = Módulo de Young obtido através da equação 1 utilizando massa específica e velocidades ultra-sônicas teóricas. ⁽²⁾

E_2 = Módulo de Young obtido pelo ensaio de ultra-som.

E_3 = Módulo de Young obtido diretamente da literatura.

E_4 = Módulo de Young obtido pelo ensaio de tração

A tabela 1 apresenta os valores do módulo de Young encontrados para o titânio comercialmente puro (grau 2) nas condições citadas acima.

Tabela 1 – Valores do módulo de Young encontrados para o titânio.

| Módulo de Young do Ti-CP (grau 2) | | | |
|-----------------------------------|-------------------|-----------------------|-------------------|
| E_1 | E_2 | E_3 ⁽¹⁰⁾ | E_4 |
| 116 GPa | $113 \pm 8,7$ GPa | 115 GPa | $111 \pm 3,9$ GPa |

b) Alumínio

O valor da massa específica do Al encontrado na literatura ⁽²⁾ é 2,71 Mg/m³. O valor médio da massa específica encontrado experimentalmente foi:

$$\text{Massa específica do Alumínio: } 2,86 \pm 0,02 \text{ Mg/m}^3$$

A tabela 2 apresenta os valores do módulo de Young encontrados para o alumínio.

Tabela 2 – Valores do módulo de Young encontrados para o alumínio.

| Módulo de Young do Alumínio | | | |
|-----------------------------|----------------|--------------------------------|----------------|
| E ₁ | E ₂ | E ₃ ⁽¹¹⁾ | E ₄ |
| 70 GPa | 76 ± 0,49 GPa | 69 GPa | 75 ± 2,6 GPa |

c) Nióbio

O valor da massa específica do Nb encontrado na literatura ⁽¹¹⁾ é 8,58 Mg/m³. O valor médio da massa específica encontrado experimentalmente foi:

$$\text{Massa específica do Nb: } 8,4 \pm 0,06 \text{ Mg/m}^3$$

A tabela 3 apresenta os valores do módulo de Young encontrados para o nióbio.

Tabela 3 – Valores do módulo de Young encontrados para o nióbio.

| Módulo de Young do Nióbio | | | |
|---------------------------|----------------|--------------------------------|----------------|
| E ₁ | E ₂ | E ₃ ⁽¹¹⁾ | E ₄ |
| 105 GPa | 109 ± 7,7 GPa | 103 GPa | - |

A tabela 4 apresenta a diferença relativa aos resultados do módulo de Young obtidos para cada material utilizando métodos diferentes. A figura 6 ilustra graficamente esses resultados.

Tabela 4 – Diferenças percentuais dos resultados do módulo de Young encontrados para o titânio, alumínio e nióbio.

| | Titânio | Alumínio | Nióbio |
|--------------------------------|---------|----------|--------|
| E ₁ -E ₂ | 2,57 % | 8,6 % | 3,81 % |
| E ₁ -E ₃ | 0,87 % | 1,43 % | 1,92 % |
| E ₁ -E ₄ | 4,31 % | 7,2 % | - |
| E ₂ -E ₃ | 1,74 % | 9,0 % | 5,82 % |
| E ₂ -E ₄ | 1,78 % | 1,32 % | - |
| E ₃ -E ₄ | 3,48 % | 8,7 % | - |

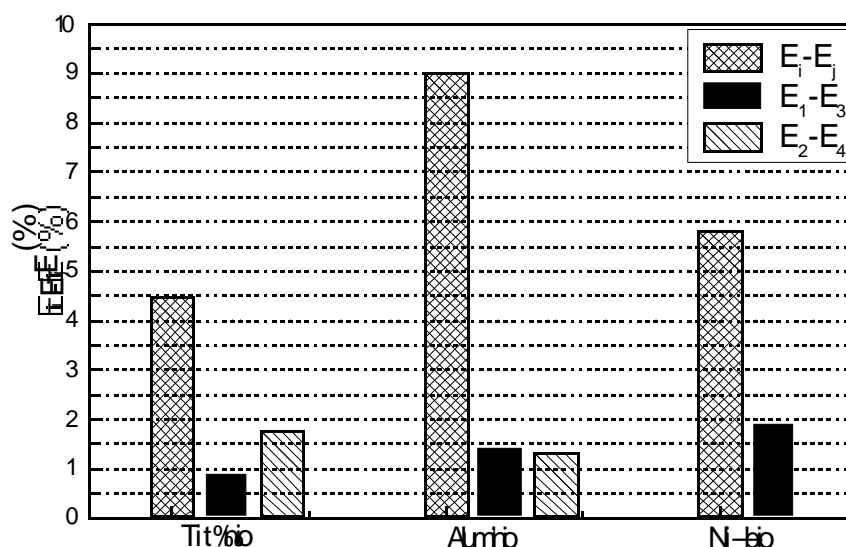


Figura 6 – Gráfico ilustrativo das diferenças percentuais dos resultados do módulo de Young encontrados para o titânio, alumínio e nióbio.

Embora os valores do módulo de Young obtidos por ultra-som, ensaio de tração e pela literatura quando comparados tenham evidenciado uma diferença menor que 9%, é conveniente fazer algumas considerações importantes. Primeiramente sabe-se que o valor teórico de uma grandeza pode apresentar variações de acordo com a literatura pesquisada. Além disso, diferenças no processo de fabricação de um material podem acarretar alterações de muitas propriedades intrínsecas do mesmo. O alumínio utilizado neste trabalho, por exemplo, é um material proveniente de uma extrusão, por isso constata-se uma diferença

maior dos valores teóricos em relação aos valores experimentais do seu módulo de Young. Desta forma, deve-se dar maior relevância às comparações feitas entre dois valores teóricos e entre dois valores experimentais. Verifica-se que a diferença entre os valores teóricos foi menor que 1% e entre os valores experimentais foi menor que 2 %.

4. CONCLUSÃO

O ensaio não-destrutivo por ultra-som, além de ser uma ferramenta de controle de qualidade, é uma técnica alternativa para a caracterização mecânica de materiais. Além do módulo de Young, é possível calcular propriedades como módulo de cisalhamento, módulo Volumétrico, coeficiente de Poisson, coeficiente de transmissão, coeficiente de reflexão e impedância acústica, utilizando-se o ensaio de ultra-som.

5. AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem à Divisão de Materiais AMR/IAE/CTA, especialmente ao Major Cosme R. M. da Silva e ao M. Sc. Rodolfo de Queiroz Padilha, e ao Departamento de Engenharia de Materiais DEMAR/FAENQUIL.

6.REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. HERTZBERG, R., *Deformation and fracture mechanics of engineering materials*, USA: John Wiley & Sons, 1976, p. 3-6.
2. ASM Handbook. 8 ed. Metals Park, Ohio: ASM International, 1989. v.17, p. 235.
3. STEMPIAK, R.A, *Noções básicas sobre medições Físicas*, CTA, S. J. dos Campos, 1996.
4. GILBERT, J. R. B., *The uses of Titanium, Materials Science and Technology*, 1985. v.1, p.257-262.
5. BRESCIANI, F.E., *Seleção de Metais não Ferrosos*, Campinas, SP: Editora da UNICAMP, 1992.
6. ANSI/ASTM. ASTM E08-95a. *Standard test methods for tension testing of metallic materials*. Philadelphia, 1995. 19p.
7. CEN. CEN/TC 184. *Determinação de Massa Específica de Materiais Metálicos*, n. 64, 1991. 10p.

8. ANSI/ASTM. ASTM E494. *Standard recommended practice for measuring ultrasonic velocity in materials*, Philadelphia, 1975.11p.
9. [on line] available from internet <URL:<http://www.ultrasonic.com/tables.solids.htm>>
10. DONACHIE Jr, M. J. *Titanium: A Technical Guide*. Metals Park, Ohio: ASM International, 1988.
11. Metals Handbook. 9 ed. Metals Park, Ohio: ASM International, 1979. v.2.

DETERMINATION OF THE YOUNG'S MODULUS OF SOLID MATERIALS BY ULTRASONIC TESTING

ABSTRACT

As an elastic wave passes through a medium of propagation, there is an oscillation movement of particles around its equilibrium position. This movement is around its equilibrium position and the width of this oscillation decreases gradually as the energy is lost. Consequently, the ultrasonic testing provides information about solid materials.

The ultrasonic test is a typical system of nondestructive one used to measure thickness of pieces and to detect internal discontinuities of them. Sound wave propagation depends on the internal structure and on the discontinuities existent in material. Then, the wave propagation speed can be associated to its mechanical and the physical properties.

The objective of this work is to compare the Young's modulus of some nonferrous metals measured by ultrasonic and tensile testing and/or present in literature data. Confiability level of 95% was used.

Word-keys: Young's modulus, ultrasound