Uso de ultrassom para análise das propriedades de uma haste cobreada de aterramento

https://doi.org/10.56238/levv15n39-183

Álvaro Barbosa de Carvalho Júnior
E-mail: alvaro.junior@unimontes.br

Ana Cristina Vieira Amaral
E-mail: cristinaamaral859@gmail.com

Maurílio José Inácio
E-mail: maurilio.inacio@unimontes.br

Adalto Soares da Fonseca Júnior
E-mail: adalto.junior@unimontes.br

Maria Helena Teles Lopes
E-mail: mariahelenatl23@gmail.com

Vera Lúcia Alves
E-mail: vera.alves@unimontes.br

RESUMO
Este trabalho teve como principal objetivo utilizar valores de ondas ultrassônicas e densidade para analisar as propriedades elásticas e físicas de uma haste cobreada usada para aterramento. Para isso, foi utilizado um sistema eletrônico de ultrassom com transdutores piezoelétricos de 2 MHz e modelos matemáticos que estão em função das velocidades de propagação das ondas ultrassônicas. As velocidades ultrassônicas foram determinadas com o método da transmissão utilizando vaselina em pasta como material acoplante. Assim, por meio das equações específicas para os materiais isotrópicos foi possível estimar algumas propriedades elásticas, tais como os módulos de elasticidade, cisalhamento e compressibilidade, coeficiente de Poisson e fator de anisotropia, além da propriedade física de impedância acústica. As propriedades da haste de aterramento foram avaliadas antes e após um ataque químico com ácido nítrico para remoção da camada de cobre. Como resultado, foi constatada a viabilidade no uso do ultrassom como técnica não destrutiva, capaz de detectar pequenas mudanças nas propriedades da haste após o ataque químico. Os resultados foram comparados com o teste de resistividade elétrica e discutidos em função dos valores das propriedades físicas e mecânicas relatados na literatura para as hastes de aterramento.

Palavras-chave: Ondas Ultrassônicas, Cobre, Barra, Aterramento.

1 INTRODUÇÃO

Sabe-se que nas edificações o aterramento proporciona não apenas a estabilidade e segurança da instalação elétrica, mas também a segurança de seus usuários. Isto porque a principal função do aterramento é colocar as instalações em um mesmo potencial elétrico, mantendo próximo de zero a diferença de potencial elétrico entre a terra e os equipamentos (ABNT NBR 5410:2008).

Sabe-se que o aterramento elétrico residencial pode ser feito com o uso de hastes fabricadas em núcleo de aço trefilado com revestimento de cobre eletrolítico. Estas características favorecem uma maior resistência e rigidez mecânica, permitindo que as hastes possam ser cravadas no solo sem a necessidade prévia de furos. A haste de aço revestida com cobre comporta-se mecanicamente como um único metal, cujo revestimento em cobre elimina a possibilidade de corrosão do aço (ABNT NBR 5410:2008). Além disso, a extremidade pontiaguda da haste é trabalhada a frio, aumentando a dureza e a tenacidade da haste

As hastes de aterramento podem ser definidas como sendo um eletrodo de aterramento, que consiste em uma barra cilíndrica rígida de aço revestido de cobre por eletrodeposição. Adicionalmente, também são encontrados alguns requisitos para o uso das hastes e seus acessórios, tais como conector de aterramento e luva de emenda, que devem ser produzidos com materiais que suportem as condições elétricas, mecânicas e químicas, provenientes dos diferentes locais de instalação (ABNT NBR 13571:2024).

As propriedades mecânicas dos aços usados como núcleo das hastes são geralmente determinadas com ensaios destrutivos convencionais, entre os quais destacam-se os ensaios de tração, compressão, cisalhamento e flexão. Alguns autores relatam que estes ensaios demandam tempo e custo com a preparação de várias amostras que serão inutilizadas pela ruptura ou por algum dano, não havendo a possibilidade de repetição de medidas (CARVALHO JR et al., 2022; LOPES et al., 2024). Além disso, para uma caracterização mecânica mais abrangente é necessária a realização de vários tipos de ensaios mecânicos.

Por outro lado, o ensaio por ultrassom surge como uma alternativa viável que permite a estimativa de várias propriedades do aço sem a necessidade de destruí-lo ou danificá-lo. Esta possibilidade resulta em menor tempo e custo em comparação com os ensaios destrutivos convencionais (CARVALHO JR et al., 2021; CARVALHO JR et al., 2022; LOPES et al., 2024). É importante destacar que a vantagem no uso do ultrassom para caracterização do aço consiste no cálculo das propriedades por meio de modelos matemáticos que estão descritos em função da densidade e dos valores das velocidades de propagação de ondas ultrassônicas longitudinal e transversal (ASTM E494-95, 1995; ERAIAH; GEETHA; ANAVEKAR, 2008).

Embora tenha-se notícia de que o ensaio por ultrassom seja utilizado por muitas empresas de grande porte, acredita-se que pelo desconhecimento das técnicas ultrassônicas e pela consolidação dos

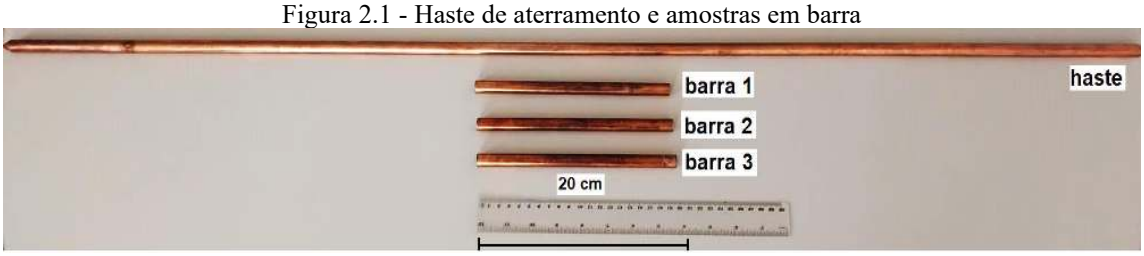
ensaios destrutivos convencionais, muitas empresas de médio e pequeno porte não utilizam o ensaio por ultrassom para caracterização de seus produtos em aço. Portanto, este trabalho teve como objetivo utilizar o ensaio por ultrassom para calcular as propriedades elásticas e físicas de uma haste de aterramento em aço revestido de cobre, a qual foi submetida a um ataque químico com ácido nítrico para análise comparativa entre os resultados.

2 MATERIAIS E MÉTODOS

2.1 CARACTERÍSTICAS DAS AMOSTRAS

Para a realização deste estudo foi adquirida comercialmente uma haste comum para aterramento elétrico. De acordo com a especificação do fabricante, trata-se de uma haste com núcleo em aço carbono SAE 1020, revestida por uma camada mínima de 0,254 milímetros de cobre eletrolítico de alta pureza (99,9%) sem traços de zinco. A haste, cujas dimensões eram de 2,40 metros de comprimento e 12,20 mm de diâmetro, foi cortada com o auxílio de uma serra circular e disco diamantado em três barras menores com comprimentos de 0,20 m. Na Figura 2.1 encontra-se a haste de aterramento e as amostras de barras cortadas.

Figura 2.1 - Haste de aterramento e amostras em barra



Fonte: autores (2024)

A densidade (ρ) das barras foi calculada com a Equação 2.1, que consiste na razão entre massa e volume. Para isso, as dimensões efetivas foram obtidas com o auxílio de um paquímetro digital, sendo o volume calculado por meio da Equação 2.2. Para a estimativa da massa foi utilizada uma balança analítica com resolução de 0,001 g.

$$\rho = \frac{m}{Vol} \qquad (2.1)$$

$$Vol = \pi . \frac{d^2}{4} . c \qquad (2.2)$$

Em que:

ρ = densidade (kg/m^3);

m = massa (kg);

Vol = volume (m^3);

d = diâmetro da barra (m);

c = comprimento da barra (m).

Neste estudo foram considerados para o cálculo da densidade das barras com a Equação 2.1, valores de inércia constante atribuídos a seção transversal circular e distribuição de massa homogênea ao longo do comprimento das barras.

2.2 DETERMINAÇÃO DAS VELOCIDADES ULTRASSÔNICAS

Para calcular as velocidades das ondas ultrassônicas propagadas através das barras foram medidos os tempos de percurso das ondas longitudinais com um sistema eletrônico de ultrassom utilizado previamente em aços pelos autores Carvalho Jr et al. (2021), Carvalho Jr et al. (2022) e Lopes et al. (2024). O sistema eletrônico para determinação da velocidade ultrassônica longitudinal (V_L) com o método da transmissão está mostrado na Figura 2.2. No método da transmissão os transdutores de ondas ultrassônicas são alinhados nas extremidades das barras para as medidas. O material utilizado como acoplante entre os transdutores e as extremidades das barras foi a vaselina em pasta.

Figura 2.2 - Sistema eletrônico para o ensaio por ultrassom

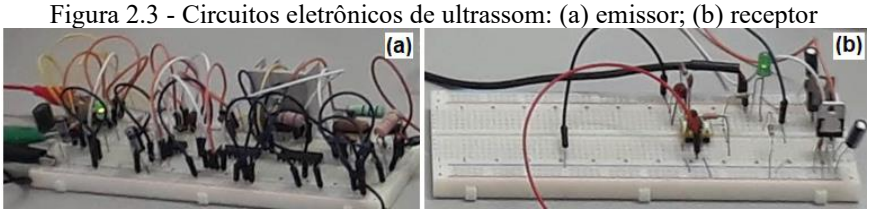


Fonte: autores (2024)

Os circuitos emissor e receptor foram alimentados com fontes simétricas de 30 V e 12 V, respectivamente. No circuito emissor foram produzidos pulsos com amplitude de 60 V com duração de 400 ns (nanosegundos), em intervalos de tempo de 5 ms (milissegundos). Os pulsos foram produzidos com um transdutor piezoelétrico gerador de ondas longitudinais, modelo AW190, com diâmetro de 2 cm frequência de 2 MHz. Estas descrições podem ser encontradas em mais detalhes no estudo do aço 1020 realizado por Carvalho Jr. et al. (2021).

Na recepção dos sinais foi utilizado outro transdutor piezoelétrico do mesmo modelo e frequência. Para amplificar o sinal recebido no circuito receptor foi utilizado um amplificador operacional, modelo THS4271D, projetado para funcionar com valores de tensões de alimentação entre ± 5 V a ± 15 V. Uma imagem ilustrativa dos circuitos eletrônicos emissor e receptor de ultrassom encontra-se na Figura 2.3.

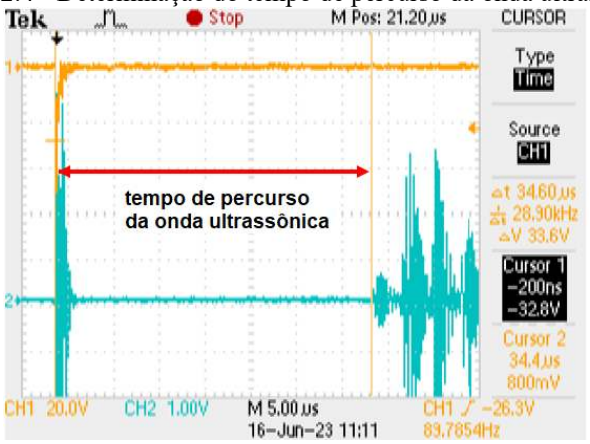
Figura 2.3 - Circuitos eletrônicos de ultrassom: (a) emissor; (b) receptor



Fonte: autores (2024)

As medidas dos sinais fornecidos na saída do circuito receptor foram observadas diretamente na tela do osciloscópio digital, da marca Tektronix, modelo TBS1062. O osciloscópio conectado ao computador possibilitou a exportação dos dados e captura das imagens dos sinais com o programa OpenChoice Desktop. Assim, foi possível determinar a medida de tempo em microssegundos (µs) entre o sinal ultrassônico emitido e recebido através das barras. Na Figura 2.4 encontra-se ilustrado um exemplo da medida de tempo. A distância entre as linhas verticais foi utilizada para estimar o tempo médio gasto pela onda ultrassônica, calculado com três medidas realizadas com a remoção e o reposicionamento dos transdutores nas barras.

Figura 2.4 - Determinação do tempo de percurso da onda ultrassônica



Fonte: autores (2024)

Para calcular a velocidade média de propagação da onda longitudinal (V_L), a partir de três medidas de tempo, foi utilizada a relação proposta na Equação 2.3 que consiste na razão entre comprimento da barra e tempo estimado de propagação da onda ultrassônica.

$$V_L = \frac{c}{t} \qquad (2.3)$$

Em que:

V_L = velocidade da onda ultrassônica longitudinal (m/s);

c = comprimento da barra (m);

t = tempo de percurso (s).

Alguns autores relatam que a razão entre as velocidades ultrassônicas de modo transversal (V_L) e longitudinal (V_T) é de aproximadamente 0,55 no aço carbono (KRAUTKRAMER; KRAUTKRAMER, 1990, p. 14). Esta relação também foi utilizada com sucesso por Waag, Hoff e Norli (2012) para a determinação da velocidade ultrassônica transversal no aço inox. Portanto, para estimar o valor de V_T foi utilizada a Equação 2.4 obtida a partir dos valores de referências mostrados na Tabela 2.1 para o aço 1020.

$$V_T = 0{,}55V_L \qquad (2.4)$$

Tabela 2.1 - Valores de referência para o aço 1020

Referências	V_L (m/s)	V_T (m/s)	V_T/V_L
Gur e Keles (2003, p. 617)	5.899	3.237	0,549
Olympus (2019, p. 48)	5.890	3.240	0,550

Fonte: autores (2024)

2.3 ESTIMATIVA DAS PROPRIEDADES ELÁSTICAS E FÍSICAS

Sabe-se que muitas propriedades elásticas e físicas dos materiais isotrópicos podem ser expressas em função da densidade e dos valores das velocidades de propagação das ondas ultrassônicas. Entre as propriedades que podem ser calculadas para materiais isotrópicos, como vidro e aço, destacam-se: módulos de elasticidade (E), cisalhamento (G) e compressibilidade (B); impedância acústica (Z), coeficiente de Poisson (v) e fator de anisotropia (A_0) (ASTM-E494-95, 1995; BUDI; HUSSIN; SAHAR, 2002; ALAZOUMI et al., 2017; PALANI; SELVARASI, 2017). Estas propriedades podem ser calculadas utilizando valores de V_L, V_T e ρ, conforme apresentado nas equações para materiais isotrópicos da Tabela 2.2.

Tabela 2.2 - Equações para o cálculo das propriedades

Propriedade	Unidade	Equação
$E = \rho V_T^2 \left(\frac{3V_L^2 - 4V_T^2}{V_L^2 - V_T^2}\right)$	GPa	(2.5)
$G = \rho V_T^2$	GPa	(2.6)
$B = \rho \left(V_L^2 - \frac{4V_T^2}{3}\right)$	GPa	(2.7)
$Z = \rho V_L$	10^6 kg/m^{2}s	(2.8)
$v = \frac{(V_L^2 - 2V_T^2)}{2(V_L^2 - V_T^2)}$	-	(2.9)

$A_0 = 3^{1/2}\left(\frac{V_T^2}{V_L^2}\right)^{1/2}$	-	(2.10)

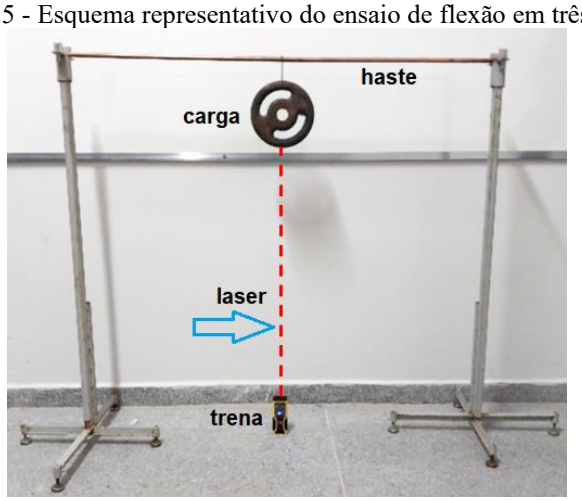
Fonte: autores (2024)

De acordo com a norma ASTM-E494-95 (1995), medidas de velocidades ultrassônicas são muito úteis para o cálculo de propriedades importantes dos materiais, sendo destacadas algumas vantagens no uso das equações para materiais isotrópicos tais como: (a) não danifica a amostra; (b) resultados são semelhantes aos ensaios destrutivos; (c) repetibilidade de medidas; (d) possibilidade de uso em diferentes tipos de materiais; (e) possibilidade de detecção de falhas; (f) rapidez nos resultados; (g) existência de equipamentos portáteis. Essas características estão entre as motivações para o uso do ultrassom como metodologia não destrutiva para a investigação da haste de aterramento.

2.4 DETERMINAÇÃO DO MÓDULO DE ELASTICIDADE ESTÁTICO

Para calcular o módulo de elasticidade estático da haste cobreada foi realizado um ensaio de flexão em três pontos adaptado dos procedimentos descritos por Garcia, Spim e Santos (2012, p. 173). A flexão da haste foi provocada com um haltere de massa igual a 2,921 kg (28,626 N), o qual foi instalado no meio do comprimento da haste. O comprimento útil da haste instalada entre dois apoios verticais foi de 1,150 m. Para calcular a deflexão provocada pelo haltere uma trena a laser foi posicionada no ponto médio da haste. A deflexão foi determinada por meio da diferença entre os valores observados na trena, antes e após o posicionamento do haltere na metade do comprimento útil. Este procedimento foi repetido três vezes para o cálculo da deflexão média. Na Figura 2.5 encontra-se ilustrado o ensaio de flexão em três pontos adaptado.

Figura 2.5 - Esquema representativo do ensaio de flexão em três pontos



Fonte: autores (2024)

De acordo com Garcia, Spim e Santos (2012, p. 186), a deflexão provocada por uma carga concentrada no meio do comprimento útil pode ser determinada por meio da Equação 2.11. Esta

equação pode ser reformulada e utilizada para a determinação do módulo de elasticidade estático, como pode ser observado pelas Equações 2.12 e 2.13.

$$\Delta = \frac{P.L^3}{48.E.I} \qquad (2.11)$$

$$E = \frac{P.L^3}{48.I.v} \qquad (2.12)$$

$$I = \frac{\pi.d^4}{64} \qquad (2.13)$$

Em que:

Δ = deflexão da haste (mm);

P = carga proveniente da massa do haltere (N);

L = comprimento útil entre os apoios (mm);

E = módulo de elasticidade estático (N/mm^2 ou MPa);

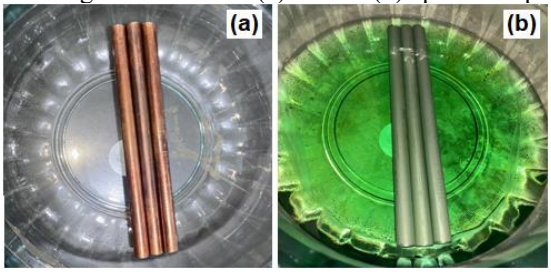
I = momento de inércia da seção circular (mm^4);

d = diâmetro da haste (mm).

2.5 ATAQUE QUÍMICO DAS BARRAS

Para a realização do ataque químico as amostras em barras foram mergulhadas em um recipiente contendo uma solução de ácido nítrico (HNO_3) com teor de concentração de 65% P.A, como ilustrado na Figura 2.6(a). As barras permaneceram mergulhadas em períodos de 24, 48 e 144 horas. O ataque químico promove uma reação exotérmica com dissolução rápida, na qual a camada de cobre reage com o ácido nítrico formando nitrato de cobre (II) ($Cu(NO_3)_2$), liberando na sequência óxido de nitrogênio (NO_2) e água (H_2O). Geralmente, a formação do $Cu(NO_3)_2$ é indicada pela presença de uma coloração esverdeada, conforme ilustrado na imagem da Figura 2.6(b).

Figura 2.6 – Imagens das barras: (a) antes e (b) após o ataque químico



Fonte: autores (2024)

O ataque químico foi realizado com o intuito de analisar a influência da camada de cobre sobre as propriedades elásticas e físicas das barras investigadas com ensaios de ultrassom e resistividade elétrica, que neste trabalho será representado por *R*. O ensaio de resistividade foi realizado na temperatura ambiente de 20,3 ± 1,0 °C e umidade relativa do ar de 49,0 ± 5,0%. A instrumentação utilizada para as medidas elétricas foram um Multímetro Digital, da marca MINIPA, e uma Década Resistiva Padrão, da marca INSTRUTEMP. Os resultados experimentais de *R* foram obtidos no Laboratório de Medição da Empresa MSMI - Medições Metrológicas Integradas.

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1 DENSIDADE DAS AMOSTRAS

Os resultados calculados da densidade para as barras estão apresentados na Tabela 3.1. Antes do ataque químico, a densidade média das barras foi de 7.898 ± 16 kg/m³. O valor adotado como densidade do aço 1020 é 7.860 kg/m^3 (EUN, 2020, pág. 329). Entretanto, este valor pode variar entre 7.840 e 7.870 kg/m^3, devido aos diferentes processos utilizados na obtenção deste tipo de aço (FREITAS et al., 2010; MEZA; FRANCO; EALO, 2019). Por outro lado, Callister Jr., (2012, pág. 640) relata que a densidade do cobre eletrolítico de alta pureza é de 8.890 kg/m^3. Isto pode explicar porque a densidade da barra cobreada, que consiste em aço 1020 revestido de cobre, possui um valor mais alto do que a densidade do aço 1020.

Tabela 3.1 - Densidade das barras antes e após ataque químico

Antes do ataque químico			
Massa (kg)	Volume (10^{-5}m^3)		ρ (kg/m^3)
0,18635 ± 0,00034	2,35933 ± 0,00883		7.898 ± 16
Após ataque químico			
Tempo (h)	Massa (kg)	Volume (10^{-5}m^3)	ρ (kg/m^3)
24	0,18541 ± 0,00039	2,34966 ± 0,00914	7.891 ± 14
48	0,18530 ± 0,00027	2,35039 ± 0,00430	7.884 ± 8
144	0,18520 ± 0,00034	2,35748 ± 0,00692	7.856 ± 9

Fonte: autores (2024)

A densidade das barras diminui com o tempo de permanência em solução de HNO_3. Isto ocorre devido a remoção da camada de cobre em função do tempo de ataque químico. A camada de cobre foi totalmente removida após 144 horas de ataque químico, reduzindo a densidade de 7.898 ± 16 kg/m^3

para 7.856 ± 9 kg/m^3. Este resultado aproxima-se do valor adotado para a densidade do aço 1020 (ρ = 7.860 kg/m^3), reforçando a influência da camada de cobre na densidade das barras.

3.2 VELOCIDADES ULTRASSÔNICAS NAS BARRAS

Na Tabela 3.2 estão apresentados os resultados calculados para as velocidades ultrassônicas. Nas barras 1 e 2 os resultados foram os mesmos, quais sejam: V_L = 5.872 m/s e V_T = 3.230 m/s. Entretanto, na barra 3 foram obtidos menores resultados, sendo V_L = 5.838 m/s e V_T = 3.211 m/s. Isto ocorreu devido ao maior tempo de propagação do sinal ultrassônico medido através da barra 3.

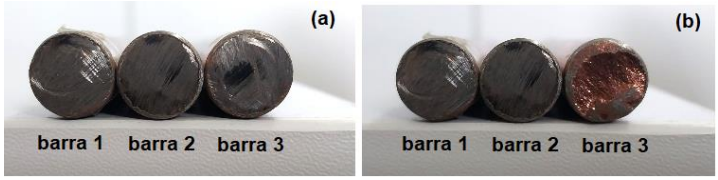
Tabela 3.2 – Resultados de V_L e V_T para as barras cobreadas

Barra	Comprimento (m)	Tempo (10^{-6} s)	V_L (m/s)	$V_T = 0{,}55V_L$ (m/s)
1	0,202	34,40	5.872	3.230
2	0,202	34,40	5.872	3.230
3	0,202	34,60	5.838	3.211
Média	0,202	34,47 ± 0,12	5.861 ± 20	3.224 ± 11

Fonte: autores (2024)

Uma explicação para o maior tempo encontrado na barra 3 pode ser encontrada analisando as faces das extremidades das barras (Figura 3.1). As extremidades utilizadas para o posicionamento dos transdutores emissor e receptor estão ilustradas nas Figuras 3.1(a) e (b), respectivamente. Comparando as extremidades das barras 1 e 2 nota-se a presença do núcleo de aço carbono 1020 revestido por uma pequena camada externa em cobre. Por outro lado, na face da extremidade utilizada para receber o sinal ultrassônico na barra 3 percebe-se uma camada de cobre, não sendo possível observar com clareza o núcleo de aço. Isto indica que a barra 3 foi cortada a partir da extremidade pontiaguda da haste cobreada, justificando o atraso no sinal ultrassônico, que diminuiu os resultados de V_L e V_T. Assim, admitiu-se neste estudo os resultados de V_L = 5.872 m/s e V_T = 3.230 m/s para as barras cobreadas.

Figura 3.1 – Seção transversal das barras: (a) extremidades utilizadas para emissão do ultrassom e (b) para recepção do ultrassom, destacando a camada de cobre na face da barra 3



Fonte: autores (2024)

Gur e Keles (2003) encontraram com ondas ultrassônicas os seguintes valores de referência para o aço 1020: V_L = 5.899 m/s e V_T = 3.237 m/s. Estes valores também concordam com as informações do catálogo técnico da Olympus (2010, p. 49), que adota para o aço 1020 valores de V_L =

5.890 m/s e V_T = 3.240 m/s. Portanto, nota-se que os resultados calculados de V_L e V_T para as barras estão próximos dos valores relatados na literatura para o aço 1020.

Na Tabela 3.3 estão apresentados os resultados de V_L e V_T após o ataque químico. O ataque químico não influencia na propagação do sinal ultrassônico, sendo encontrados os mesmos valores com a remoção e o reposicionamento dos transdutores nas barras. Este fato reforça a hipótese de que o maior tempo de propagação encontrado na barra 3 (Tabela 3.2) está de fato associado a presença da camada de cobre em uma das extremidades.

Tabela 3.3 – Resultados de V_L e V_T obtidos após ataque químico

Barra	Tempo (horas)	V_L (m/s)	$V_T = 0{,}55.V_L$ (m/s)
1	24	5.872 ± 0,1	3.230 ± 0,1
2	48	5.872 ± 0,1	3.230 ± 0,1
3	144	5.872 ± 0,1	3.230 ± 0,1
Média	-	5.872 ± 0,1	3.230 ± 0,1

Fonte: autores (2024)

3.3 PROPRIEDADES ELÁSTICAS E FÍSICAS DAS BARRAS

Na Tabela 3.4 estão os resultados obtidos para o módulo de elasticidade com o ensaio de flexão. A deflexão média da haste calculada com três medidas foi de 4,00 ± 0,10 mm. Inserindo os dados da tabela na Equação 2.12 encontrou-se um resultado aproximado de E = 200,30 ± 5,47 GPa. Alguns autores relatam que os aços apresentam uma proporcionalidade entre a tensão aplicada e a deformação observada nos ensaios de tração e flexão (CALLISTER JR, 2012, p. 103; GARCIA; SPIM; SANTOS, 2012, p. 11, 173). Na Lei de Hooke, o módulo de elasticidade é a constante que representa essa proporcionalidade e que fornece informações importantes sobre a rigidez do aço.

Tabela 3.4 – Dados experimentais para o cálculo do módulo de elasticidade

Medidas	E (GPa)	Δ (mm)	P (N)	L (mm)	I (mm^4)
1	203,46	4,10	28,63	1150,00	1087,44
2	203,46	4,10			
3	193,98	4,00			
Média ± desvio	200,30 ± 5,47	4,07 ± 0,06			

Fonte: autores (2024)

Para Callister Jr. (2012, p. 642), o módulo E adotado para o aço carbono é de 207 GPa. Logo, nota-se que o resultado encontrado com o ensaio de flexão (E = 203,30 GPa) concorda com o valor de referência adotado para o aço 1020. Freitas et al. (2010) utilizaram o ensaio de ultrassom no aço 1020 e encontraram valores do módulo E variando entre 210 a 212 GPa. Utilizando os valores médios de V_L = 5.872 m/s, V_T = 3.230 m/s e ρ = 7.898 ± 16 kg/m³, obtidos antes do ataque químico das barras,

encontrou-se um resultado aproximado de E = 211,45 GPa (Tabela 3.5). Este resultado está de acordo com o valor obtido no ensaio de flexão e também com os valores de referência para o aço 1020.

Tabela 3.5 – Propriedades elásticas para as barras antes do ataque químico

Propriedade	Resultado calculado	Valores de referência
E (GPa)	211,45	207-212
G (GPa)	82,40	80-82
B (GPa)	162,46	160-163
v	0,28	0,28 - 0,33
A_0	0,95	0,90 -1,20

Fonte: autores (2024)

Na Tabela 3.5 também estão apresentadas outras propriedades elásticas calculadas antes do ataque químico das barras. Entre estas propriedades, o módulo G destaca-se por ser importante para a análise do comportamento elástico das barras de aço quando solicitadas mecanicamente pela seção transversal (GARCIA; SPIM; SANTOS, 2012, p. 19). Para alguns autores, o valor do módulo G no aço 1020 é de 80 GPa (DEWANGAN et al., 2019). Este valor de referência é compatível com resultado de 82,10 GPa encontrado no aço 1020 com o ensaio por ultrassom industrial (FREITAS *et al.,* 2010). Carvalho Jr *et al*. (2021) investigaram com ondas ultrassônicas o aço 1020 normalizado e encontrou um valor de G = 81,68 GPa. Portanto, o resultado calculado de G = 82,40 GPa está dentro da faixa de valores esperados para o aço 1020.

O módulo B é uma propriedade que está diretamente relacionada com os módulos elásticos E e G, representando a rigidez à deformação volumétrica do aço (GARCIA; SPIM; SANTOS, 2012, p. 19). De maneira geral, o valor adotado do módulo B para os aços com baixo teor de carbono está entre 160 e 163,10 GPa (FUKUHARA; SANPEI, 1993; KIM; JOHNSON, 2007). Neste caso, o resultado calculado de B = 162,46 GPa também está dentro da faixa de valores relatados na literatura.

O coeficiente v é uma propriedade utilizada para estabelecer a relação entre as deformações longitudinal e transversal nos materiais isotrópicos. Para a maioria das ligas de aço carbono adota-se v = 0,30 (CALLISTER JR., 2012, p. 645). Por outro lado, o coeficiente v dos aços medido na temperatura ambiente de 25°C pode variar entre 0,28 a 0,33 (FUKUHARA; SANPEI, 1993; KALPAKJIAN; SCHMID, 2009, p. 86). Assim, o resultado calculado de v = 0,28 está de acordo com o esperado para a maioria dos aços carbono.

Nos materiais considerados perfeitamente isotrópicos adota-se um valor de anisotropia A_0 = 1 (GARCIA; SPIM; SANTOS, 2012, p. 46). No presente estudo, o resultado calculado para as barras foi de A_0 = 0,95. Este resultado confirma as tendências isotrópicas do aço carbono observadas por

Kalpakjian e Schmid (2009, p. 409). Estes autores também destacam que os aços com baixo teor de carbono e alta resistência à tração podem apresentar valores de A_0 entre 0,90 e 1,20.

Conforme discutido anteriormente, o ataque químico com HNO_3 não alterou os resultados calculados V_L e V_T, embora a remoção da camada de cobre tenha diminuído a densidade de 7.898 kg/m^3 para 7.856 kg/m^3. Assim, influência do ataque químico nas propriedades elásticas pode ser analisada comparando os resultados da Tabela 3.6. De maneira geral, nota-se pequenas reduções nos módulos elásticos (E, G e B), que ainda permaneceram dentro da faixa de valores esperados para os aços carbono. Por outro lado, os resultados de v e A_0 permaneceram inalterados.

Tabela 3.6 – Propriedades elásticas das barras antes e após o ataque químico

Propriedade	Antes	Após
E (GPa)	211,45	210,32
G (GPa)	82,40	81,96
B (GPa)	162,46	161,60
v	0,28	0,28
A_0	0,95	0,95

Fonte: autores (2024)

A remoção da camada de cobre também reduziu a impedância acústica (Z). Esta propriedade física pode ser compreendida como uma dificuldade que o aço oferece à propagação das ondas ultrassônicas, sendo dependente da rigidez do material (KRAUTKRAMER; KRAUTKRAMER, 1990, p. 23). Como o ataque químico provocou pequenas reduções nos resultados dos módulos elásticos associados à rigidez do aço (E, G e B), também era esperada uma pequena alteração do resultado de Z, como observa-se na Tabela 3.7. Os resultados encontrados, antes e após o ataque químico, estão próximos do valor de referência de Z = 45,56 x 10^6 kg/m^{2}s, relatado por outros autores que utilizaram o método ultrassônico da transmissão no aço 1020 (GINZEL; TURNBULL, 2016).

Tabela 3.7 – Propriedades elásticas antes e após ataque químico

Propriedade	Antes	Após	Valor de referência
Z (10^6 kg/m^{2}s)	46,380	46,130	45,560
R (10^{-7} Ω.m)	0,083	0,168	0,160

Fonte: autores (2024)

Por outro lado, a resistividade elétrica medida após o ataque químico aumentou de forma significativa, passando de R = 0,083 x 10^{-7} Ω.m para R = 0,168 x 10^{-7} Ω.m. No presente estudo, o resultado de R representa a oposição ao fluxo da corrente de energia elétrica através do aço (CALLISTER JR., 2012, pág. 490, 491). É importante ressaltar que o revestimento em cobre tem por

finalidade proteger as hastes de aterramento contra corrosão e também direcionar ao solo qualquer corrente elétrica que possa danificar os equipamentos. Segundo Callister Jr. (2012, pág. 661), a resistividade elétrica do cobre eletrolítico é muito baixa, sendo da ordem de $R = 1{,}72 \times 10^{-8}$ Ω.m. Logo, a remoção da camada de cobre aumentou a resistividade da barra, estando de acordo com o valor de referência de $R = 0{,}160 \times 10^{-7}$ Ω.m adotado para o aço 1020 (CALLISTER JR. 2012, pág. 660).

4 CONCLUSÃO

Os resultados desse estudo permitiram concluir que o sistema eletrônico de ultrassom pode ser utilizado para determinar propriedades elásticas e físicas de hastes aterramento em aço revestidas com cobre. Esta afirmativa está fundamentada nos resultados encontrados dos módulos de elasticidade (E), cisalhamento (G) e compressibilidade (B); coeficiente de Poisson (v), fator de anisotropia (A_0), impedância acústica (Z) e resistividade elétrica (R), cujos resultados calculados com as equações para materiais isotrópicos descritas em função de VL, VT e ρ, foram compatíveis com os valores de referência adotados na literatura para o aço 1020. Entretanto, outros estudos devem ser realizados com um número maior de hastes buscando aprimorar a metodologia não destrutiva e os dispositivos eletrônicos utilizados.

REFERÊNCIAS

ALAZOUMI, S. H., SIDEK, H. A. A., HALIMAH, M. K., MATORI, K. A., ZAID, M. H. M. & ABDULBASET, A. A (2017). 2017 Synthesis and elastic properties of ternary ZnO-PbO-TeO_2 glasses. Chal. Let., *14*(8), 303–320, Disponível em: <http://www.chalcogen.ro/303_AlazoumiSH.pdf > Acesso em: 04/09/2024.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 5410: Instalações elétricas de baixa tensão. Rio de Janeiro, 2008.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 13571: Haste de aterramento de aço revestida de cobre – Especificação. Rio de Janeiro, 2024.

ASTM E494-95, STANDARD PRACTICE FOR MEASURING VELOCITY IN MATERIALS, ASTM International. Pennsylvania, 1995.

BUDI, A. S., HUSSIN, R. & SAHAR, M. R (2002). 2002 Study of fractal bond connectivity of neodymium phosphate glasses by ultrasonic technique. Jurnal Tektologi, *37*, 11–20. Disponível em: <https://dx.doi.org/10.11113/jt.v37.529>. Acesso em: 04/09/2024.

CALLISTER JR, W. D. Ciência e engenharia dos materiais: uma introdução. 7 ed. Rio de Janeiro: LTC, 2012.

CARVALHO JR, Á, B., INÁCIO, M. J., DIAS, M. P. A., LOPES, M. H. T., CARVALHO, A. C. N. M. & RAMOS, S. G (2021). 2021 Caracterização das propriedades elásticas e mecânicas do aço 1020 com a técnica ultrassônica da transparência. IJAERS, *8*(10), 227–234. Disponível em: <https://dx.doi.org/10.22161/ijaers.810.26>. Acesso em: 01/09/2024.

CARVALHO JR, Á, B., LOPES, M. H. T., INÁCIO, M. J., RAMOS, S. G., RODRIGUES, D. S., FROES, G. D., FONSECA, V. M. B. & OLIVEIRA, J. A. V (2022). 2022 Determination of elastic and mechanical properties in CA-50 steel by using ultrasonic. IJAERS, *9*(9), 249–255. Disponível em: <https://dx.doi.org/10.22161/ijaers.99.25>. Acesso em: 02/09/2024.

DEWANGAN, S., MAINWAL, N., KHANDELWAL, M. & JADHAV, P. S (2019). 2019 Performance analysis of heat treated AISI 1020 steel samples on the basis of various destructive mechanical testing and microstructural behaviour. Australian Journal of Mechanical Engineering, *20*(1), 74–87. Disponível em: <https://doi.org/10.1080/14484846.2019.1664212>. Acesso em: 02/09/2024.

ERAIAH, B., GEETHA, D. & ANAVEKAR, R. V (2008). 2008 Elastic properties of lead-phosphate glasses doped with erbium trioxide. Canadian Journal of Physics. Canadian Journal of Physics, *86*(11), 1349–1352. Disponível em: <https://doi.org/10.1139/p08-10>. Acesso em: 02/09/2024.

EUN, T. J. Handbook of engineering practice of materials and corrosion. 1° ed. Houston: Springer, 2020.

FREITAS, V. L. D. A., ALBUQUERQUE, V. H. C. D., SILVA, E. D. M., SILVA, A. A. & TAVARES, J. M. R. S (2010). 2010 Nondestructive characterization of microstructures and determination of elastic properties in plain carbon steel using ultrasonic measurements. Materials Science and Engineering A, *527*, 4431–4437. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.msea.2010.03.090>. Acesso em: 02/09/2024.

FUKUHARA, M. & SANPEI, A (1993). 1993 Elastic moduli and internal friction of low carbon and stainless steels as a function of temperature. Isij International, *33*(4), 508–512. Disponível em: <https://doi.org/10.2355/isijinternational.33.508>. Acesso em: 04/09/2024.

GARCIA, A., SPIM, J. A. & SANTOS, C. A. Ensaios dos materiais. 2 ed. Rio de Janeiro: LTC, 2012.
GINZEL, E. & TURNBULL, B (2016). 2016 Determining approximate acoustic properties of materials. e-Journal of Nondestructive Testing (NDT), 1–10. Disponível em: <https://www.ndt.net/article/ndtnet/2016/17_Ginzel.pdf>. Acesso em: 04/09/2024.

GUR, C. H. & KELEŞ, Y (2003). 2003 Ultrasonic characterisation of hot-rolled and heat-treated plain carbon steels. Insight-Non-Destructive Testing and Condition Monitoring, *45*(9), 615–620. Disponível em: <https://doi.org/ 10.1784/insi.45.9.615.52936>. Acesso em: 04/09/2024.

KALPAKJIAN, S. & SCHMID, S. R. Manufacturing engineering and Technology. 6. ed. Upper Saddle River: Prentice Hall, 2009.

KIM, S. A. & JOHNSON, W. L (2007). 2007 Elastic constants and internal friction of martensitic steel, ferritic-pearlitic steel, and α-iron. Materials Sciences and Engineering: A, *452-453*, 633–639. Disponível em: < https://doi.org/10.1016/j.msea.2006.11.147>. Acesso em: 03/09/2024.

KRAUTKRÄMER, J. & KRAUTKRÄMER, H. Ultrasonic Testing of Materials. 4. ed. Berlin: Springer, 1990.

LOPES, M. H. T., de CARVALHO JR, Á, B., INÁCIO, M. J., GOMES, S. C. S., GUIMARÃES, T. C. & da FONSECA JR, A. S (2024). 2024 Utilização de ondas ultrassônicas para caracterização não destrutiva de vergalhões de aço com diferentes tratamentos térmicos. Contribuciones a Las Ciencias Sociales, *17*(6), 1–15. Disponível em: <https://dx.doi.org/10.55905/revconv.17n.6-221>. Acesso em: 03/09/2024.

MEZA, C. A., FRANCO, E. E., & EALO J. L (2019). 2019 Implementation of the ultrasonic through-transmission technique for the elastic characterization of fiber-reinforced laminated composite. Dyna, *86*(208), 153–161. Disponível em: <https://doi.org/10.15446/dyna.v86n208.70279>. Acesso em: 03/09/2024.

OLYMPUS. Panametrics – Ultrasonic Transducers (2010). Disponível em: <https://www.olympus-ims.com/data/File/panametrics/panametrics-UT.en.pdf>. Acesso em: 03/09/2024.

PALANI, R. & SELVARASI, J (2017). 2017 Elastic and structural properties of potassium and calciumdoped borate lithium glasses. Int J Curr Res Rev, *9*, 71–79. Disponível em: <https://ijcrr.com/uploads/1145_pdf.pdf>. Acesso em: 03/09/2024.

WAAG, G., HOFF, L. & NORLI, P (2012). 2012 Air-coupled Thickness Measurements of Stainless Steel. ArXiv preprint arXiv:1210.0428, *1*(1), 1–4. Disponível em: <https://doi.org/10.48550/arXiv.1210.0428>. Acesso em: 04/09/2024.