

# UTILIZAÇÃO DA TÉCNICA DE ULTRASSONOGRRAFIA INDUSTRIAL COMO POTENCIAL MEIO DE INFERÊNCIA PARA A CARACTERIZAÇÃO MICROESTRUTURAL DE AÇOS COM DIFERENTES TEORES DE CARBONO\*

Ana Cláudia Azevedo Dias<sup>1</sup>  
Antenor Soares Moreira Neto<sup>1</sup>  
Antônio Marcos da Rocha<sup>1</sup>  
Elexander da Costa Junior<sup>1</sup>  
Alex Rodrigues Borges<sup>2</sup>  
David Hebert Vieira<sup>3</sup>  
Eric Bartulici<sup>3</sup>

## Resumo

Este artigo busca avaliar a viabilidade de inferência quanto aos tipos de fases e/ou constituintes microestruturais obtidos em amostras com e sem tratamentos térmicos através da medição da velocidade de ondas nelas propagadas nos ensaios, com diferentes níveis de atenuação sônica. As técnicas do ensaio não destrutivo de ultrassom vêm se tornando uma importante alternativa para caracterização de materiais de forma mais rápida numa linha de produção, buscando antecipar comportamentos mecânicos ou características intrínsecas dos materiais e, assim, visando reduzir custos de inspeção e também o *lead time* de produção, mantendo ou elevando o grau de confiabilidade da inspeção, e atendendo as especificações técnicas exigidas pelos clientes. Os testes indicam que as ondas ultrassônicas incidentes nos aços baixo carbono apresentam pequena variação de velocidade antes e após a realização de tratamentos térmicos. Em aços de maior teor de carbono e, portanto, em maiores níveis de resistência mecânica e dureza, maior espalhamento e atenuação sofre o feixe sônico, reduzindo a velocidade de propagação da onda sônica, permitindo melhor correlação com a microestrutura, de acordo com o tratamento sofrido e as fases e/ou constituintes presentes, sendo de grande potencial para o método de caracterização quanto às propriedades do material através de inspeções via ultrassonografia industrial.

**Palavras-chave:** Ultrassom; Microestrutura; Velocidade sônica.

## USE OF THE INDUSTRIAL ULTRASOUND TECHNIQUE AS A POTENTIAL INFERENCE FOR THE MICROSTRUCTURAL CHARACTERIZATION OF STEELS WITH DIFFERENT CARBON CONTENTS

### Abstract

This article aims to evaluate the probability of inference for the types of microstructural phases and / or constituents in samples with and without the heat treatment media by measuring the velocity of waves propagated in the tests with different levels of sonic attenuation. The techniques of non-destructive ultrasound testing have become an important alternative for the characterization of materials more quickly in a production line, seeking to anticipate mechanical behavior or intrinsic characteristics of materials and aiming to reduce inspection costs and also the production lead time, maintaining or increasing the degree of maintenance, and serving as the rules required by customers. The tests indicate that ultrasonic waves passage in the low-carbon steel present a small variation of velocity before and after the accomplishment of heat treatments. In the case of steels higher carbon content and, so, in higher levels of mechanical strength and hardness, higher scattering and attenuation of the sonic frequency, decreasing the propagation velocity of the sonic wave, the improvement with the microstructure, according to the heat treatment

accomplished and the phases and / or constituents presents, being of great potential for the characterization method by the properties of the material through inspections by industrial ultrasonography.

**Keywords:** Ultrasound; Microstructure; Sonic speed.

- <sup>1</sup> *Estudante de Engenharia Metalúrgica, Instituto Federal de Minas Gerais, Ouro Branco, Minas Gerais, Brasil.*
- <sup>2</sup> *Engenharia Metalúrgica, Técnico, Departamento de Engenharia Metalúrgica, Instituto Federal de Minas Gerais, Ouro Branco, MG, Brasil.*
- <sup>3</sup> *Engenharia Metalúrgica, MSc, Professor, Departamento de Engenharia Metalúrgica, Instituto Federal de Minas Gerais, Ouro Branco, MG, Brasil.*

## 1 INTRODUÇÃO

A caracterização e otimização das microestruturas e das propriedades do material são uma necessidade primordial para garantir o desempenho e a vida útil dos componentes.

A utilização do ensaio não destrutivo pelo método de ultrassom é amplamente explorada em indústrias siderúrgicas e estruturas em geral para verificação da existência de descontinuidades internas.

Na demanda de novas metodologias de caracterização e avaliação, técnicas ultrassônicas mostraram um bom potencial para caracterizar as microestruturas e propriedades mecânicas de uma ampla variedade de materiais {1,2}, bem como na diminuição de custos de produção com as reduções do *lead time* e das despesas de amostragem com a inspeção de produtos.

Medições de parâmetros ultrassônicos, como velocidade e atenuação, podem fornecer informações sobre as variações estruturais e microestruturais dos materiais que foram submetidos ao procedimento de tratamento térmico {3}. Na técnica pulso-eco podemos calcular a velocidade da onda ultrassônica e o coeficiente de atenuação ( $\alpha$ ) utilizando as Equações 1 e 2 a seguir:

$$Velocidade = \frac{2 \cdot espessura}{tempo} \text{ (m / s)} \quad (\text{Eq. 1})$$

$$\alpha = \frac{10 \log\left(\frac{A_1}{A_2}\right)}{espessura}, \text{ (dB / mm)} \quad (\text{Eq. 2})$$

sendo A1 e A2 as amplitudes (dB) de duas ondas consecutivas medidas após a reflexão na distância de uma espessura da amostra.

Vários trabalhos demonstram a influência de diversas variáveis no nível de atenuação sônica {1} como tamanho de grão, tipo e frações de fases e constituinte, presença de inclusões, utilização de tratamentos térmicos, tensões residuais, etc.

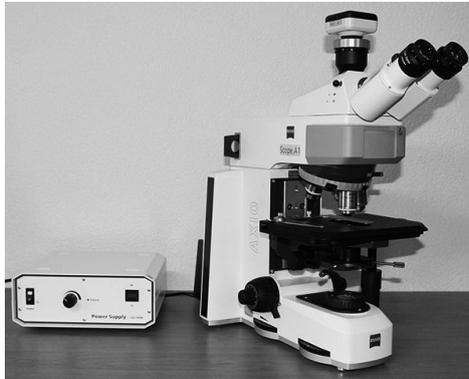
Entre as diversas aplicações da técnica, podemos citar a determinação de propriedades mecânicas como módulo de elasticidade ou dureza, verificação de existência de tensões residuais em materiais soldados, nível de recristalização dos materiais tratados ou processados termo mecanicamente,

Para se realizar a inspeção de materiais utilizando esse método devem ser consideradas variáveis principalmente as do material inspecionado. Neste trabalho pretende-se avaliar através de pesquisa exploratória de cunho qualitativo e quantitativo como essas variáveis interferem nos ensaios. As fases e/ou constituintes presentes no aço também influenciam a velocidade de propagação das ondas, sendo que fases mais dúcteis, como a ferrita, facilitam a propagação e geram maiores velocidades nos testes.

## 2 MATERIAIS E MÉTODOS

Para identificação da velocidade de propagação das ondas ultrassônicas foram utilizadas nove (9) amostras de material laminado (chapa e tubo) constituído de aço carbono comercial com diferentes microestruturas e teores de carbono. Algumas amostras sofreram tratamento térmico (têmpera em água e revenimento nas temperaturas de 640 e 670 °C) para avaliação da influência de diferentes fases/constituintes na velocidade sônica {4}.

A preparação metalográfica procedeu-se com lixamento utilizando lixas de carvão de silício (SiC) com granulometrias de #180 a #1200, seguida de polimento com pasta de diamante com granulometrias de 0,5 e 1,0  $\mu\text{m}$ . Foi realizado ataque com Nital 3% para análise no microscópio ótico *Axio Scope Zeiss* (Figura 1). As composições encontradas pela análise microestrutural das amostras estão apresentadas na Tabela 1.



**Figura 1.** Microscópio ótico *Axio Scope Zeiss* utilizado para análise microestrutural.

**Tabela 1.** Composição das Amostras

IDENTIFICAÇÃO	% C	MICROESTRUTURA		TRATAMENTO TÉRMICO
Amostra 1	0,10	14%	Perlita	-
		85%	Ferrita	-
Amostra 2	0,25	32%	Perlita	Normalizado
		67%	Ferrita	
Amostra 3	0,60	22%	Perlita	-
		77%	Ferrita	-
Amostra 4	0,45	100%	Martensita	-
Amostra 5	0,45	63%	Perlita	-
		37%	Ferrita	-
Amostra 6	0,80	35%	Ferrita	-
		65%	Bainita	-
Amostra 7	0,30	95%	Martensita	Têmpera em água
		60%	Martensita	Revenido 640 °C / 30 min
		40%	Cementita	
		40%	Martensita	Revenido 670 °C / 30 min
Amostra 8	0,06	60%	Cementita	Revenido 670 °C / 30min
		90%	Bainita	
		10%	Martensita	Têmpera em água
		90%	Bainita	
		6%	Martensita	Revenido 640 °C / 30 min
		4%	Cementita	
		90%	Bainita	Revenido 670 °C / 30min
3%	Martensita			
7%	Cementita			
Amostra 9	0,45	100%	Martensita	Têmpera em água

As espessuras dos corpos de prova utilizados na aferição da velocidade ultrassônica foram medidas em mm com o auxílio de um paquímetro digital da marca *Kingtools* e de um medidor de espessura tipo DM5E (vide Figuras 2 e 3).



**Figura 2.** Paquímetro digital utilizado para medição dos corpos de prova.



**Figura 3.** Medidor de espessura tipo DM5E.

As medições foram realizadas através da técnica pulso eco utilizando um aparelho de ultrassom do tipo EPOCH 600 da marca Olympus (vide Figura 4) calibrado com blocos padrão de 12,5 mm e 25 mm, um transdutor duplo cristal de efeito piezoelétrico com frequência de 5 MHz, um cabo coaxial e como, acoplante, foi usada uma mistura de carboximetilcelulose com água e álcool etílico. A direção de propagação da onda é no sentido da espessura do corpo de prova {5}.



**Figura 4.** Aparelho de ultrassom do tipo EPOCH 600.

### 3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

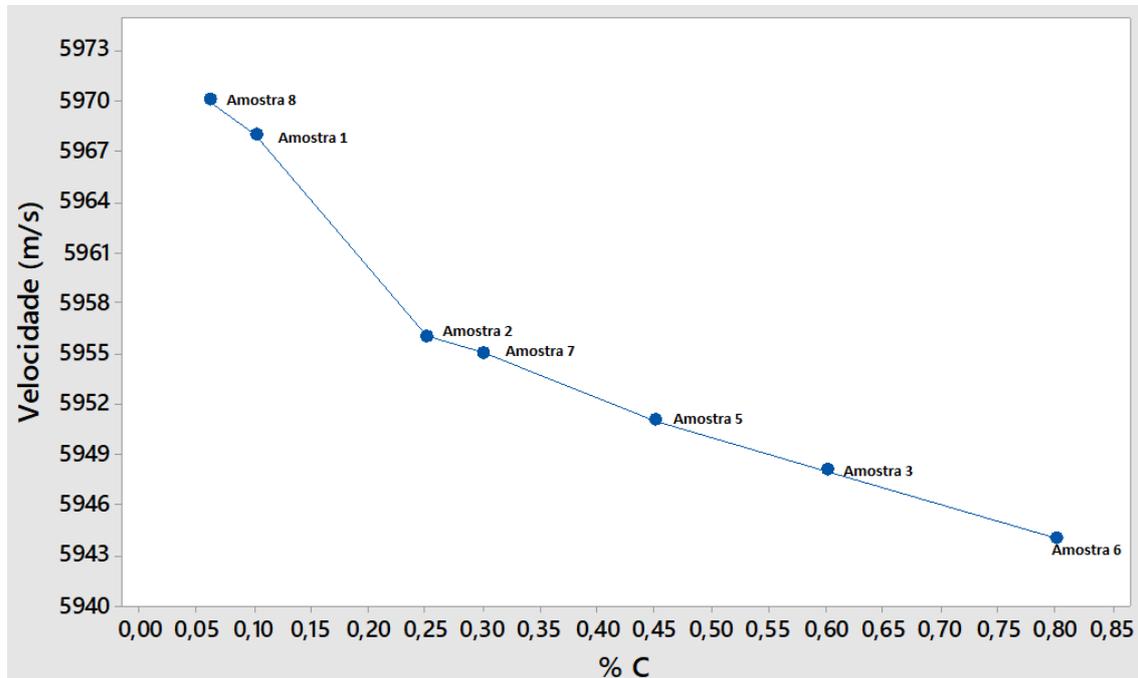
Para verificar a influência da velocidade sônica nos resultados das medições e a confiabilidade do processo foram especificadas as espessuras das amostras e, em cada ciclo de medição, foi usado um corpo de prova como referência para calibração do aparelho de ultrassom e, dessa forma, verificar as alterações de velocidades. A

Tabela 2 mostra os ciclos de medições com as respectivas médias dos valores aferidos e as velocidades sônicas encontradas. Estão ainda destacados os corpos de prova utilizados como referência em cada um dos ciclos.

**Tabela 2:** Ciclos de medições das espessuras com as respectivas médias dos valores aferidos e as velocidades sônicas encontradas

	BLOCO PADRÃO	AMOSTRA 1	AMOSTRA 2	AMOSTRA 3	AMOSTRA 4	AMOSTRA 5	AMOSTRA 6	VELOCIDADE (m/s)
Medição Padrão	25,00 / 12,50	10,90	15,60	13,47	13,10	9,15	6,65	5962,00
Medição 1	25,00 / 12,48	10,90	15,61	13,42	13,07	9,14	6,65	5968,00
Medição 2	25,00 / 12,52	10,87	15,60	13,45	13,11	9,16	6,64	5956,00
Medição 3	25,00 / 12,54	10,86	15,57	13,47	13,12	9,16	6,66	5948,00
Medição 4	25,00 / 12,50	10,85	15,58	13,43	13,10	9,15	6,63	5821,00
Medição 5	25,00 / 12,50	10,86	15,56	13,43	13,11	9,15	6,62	5951,00
Medição 6	25,00 / 12,53	10,87	15,58	13,43	13,12	9,15	6,65	5944,00

Os aços estudados são produzidos na indústria de laminados com distintas aplicações e submetidos a diferentes estados de tensão, temperatura e esforço mecânico. Entre as amostras temos aços de baixo, médio e alto teor de carbono com constituintes e tratamentos térmicos diversos, permitindo detectar a variação e a sensibilidade do teste de ultrassom para efeito da inferência da microestrutura. De maneira geral, o teor de carbono pode ser utilizado como variável de análise no teste. Pode-se observar que quanto maior o conteúdo de carbono na microestrutura, maior o efeito da atenuação sônica e menor a velocidade de medição. Este efeito pode ser observado na Figura 5.



**Figura 5.** Influência do teor de carbono na atenuação sônica e velocidade de medição.

A presença de diferentes constituintes também é um importante variável de análise no teste. O arranjo das fases na microestrutura pode favorecer ou dificultar a passagem da onda sônica pelo material, mostrando-se uma alternativa para inferência quanto ao tipo de microestrutura. Dentre as amostras analisadas

constituídas de ferrita, perlita e bainita, a presença e quantidade das fases e constituintes demonstraram resultados satisfatórios como efeito de comparação das distintas velocidades visando uma inferência mais precisa da amostra.

Nas amostras 1, 2 e 3 foi analisada a relação da microestrutura ferrita/perlita com a resposta da velocidade sônica e verificou-se que quanto maior a presença de Ferrita maior o valor da velocidade. Estes resultados estão registrados na Figura 6 e se devem ao fato da Ferrita ser um constituinte mais maleável e com maiores interstícios na matriz, favorecendo a passagem da onda sônica com menores níveis de atenuação.

Como também se pode verificar na Figura 6, a amostra 6, composta de Perlita e Bainita, obteve um comparativo de velocidade distinto dos teores de Perlita das outras amostras (1, 2 e 3), indicando que a bainita, como uma estrutura de ferrita com carbonetos dispersos, com outro padrão de atenuação a ser estudado nestas microestruturas, em função da variação do seu teor junto à perlita presente nestas, favorecendo também a velocidade sônica.

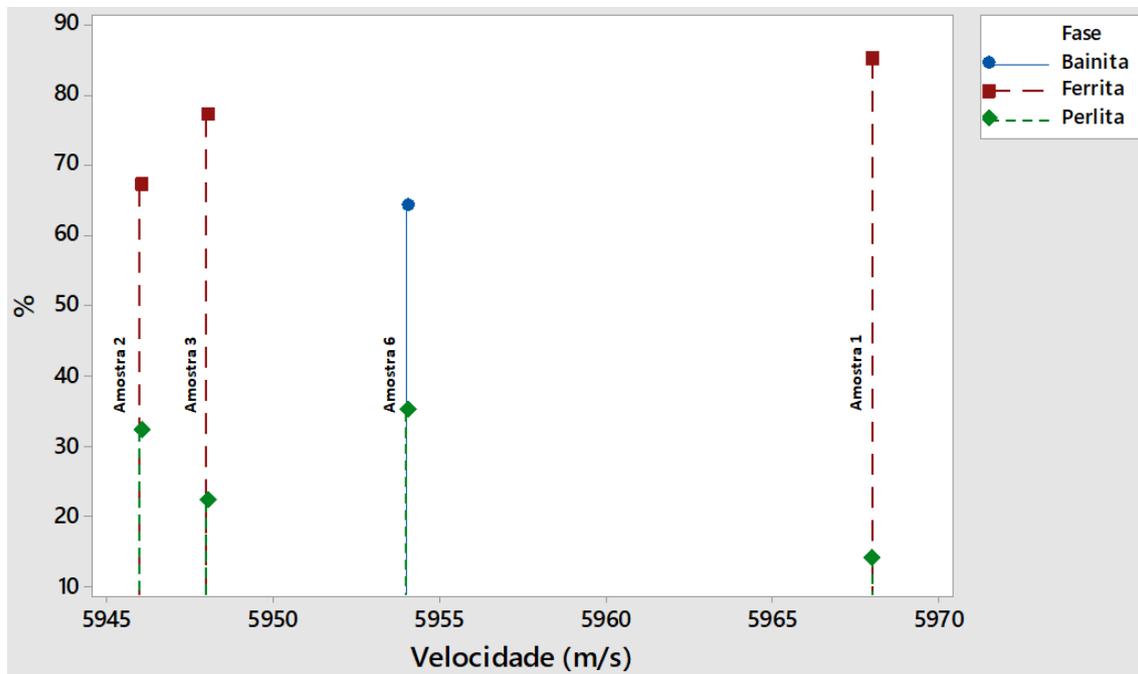


Figura 6. Relação da microestrutura com a velocidade sônica.

Outra análise de constituintes que se mostrou bastante relevante nos testes foi a aplicação de tratamentos térmicos como forma de atenuar a tensão da microestrutura e assim obter ganhos na velocidade sônica.

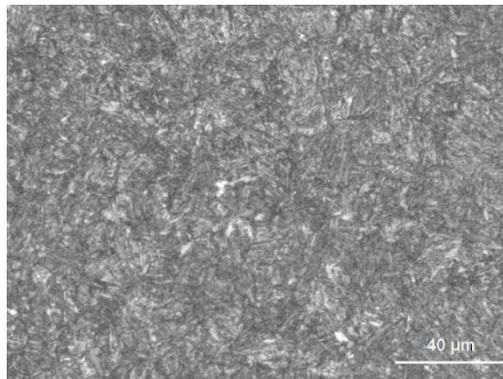
As amostras 4, 7, 8 e 9, com teores de carbono e constituintes definidos conforme especificado na Tabela 3, foram submetidos a tratamentos térmicos para verificar a influência destes na microestrutura e conseqüentemente na velocidade sônica.

**Tabela 3:** Tratamentos Térmicos aos quais as amostras foram submetidas e valores de velocidades encontradas

IDENTIFICAÇÃO	% C	FASES		TRATAMENTO TÈRMICO	VELOCIDADE (m/s)
Amostra 4	0,45	100%	Martensita		5821,00
Amostra 7	0,30	95%	Martensita	Têmpera em água	5925,00
		60%	Martensita	Revenido 640 °C / 30min	5955,00
		40%	Cementita		
		40%	Martensita	Revenido 670 °C / 30 min	5970,00
		60%	Cementita		
Amostra 8	0,06	90%	Bainita	Têmpera em água	5970,00
		10%	Martensita		
		90%	Bainita	Revenido 640 °C / 30 min	5975,00
		6%	Martensita		
		4%	Cementita		
		90%	Bainita	Revenido 670 °C / 30 min	5980,00
		3%	Martensita		
7%	Cementita				
Amostra 9	0,45	100%	Martensita	Têmpera em água	5880,00

A martensita por si só demonstrou uma grande atenuação da onda sônica devido a sua estrutura distorcida supersaturada de carbono e de maior tensão, gerando os menores valores de velocidade sônica dentre todos analisados.

As amostras 4 e 9 possuíam a mesma composição (100% martensita) e foram analisadas para verificar a influência do tratamento térmico na velocidade de propagação das ondas ultrassônicas. A amostra 4 não foi submetida a nenhum tratamento térmico, como mostra a Figura 7. Já a amostra 9 mostra a estrutura martensítica após têmpera em água, indicando um ganho de velocidade sônica após o tratamento e, conseqüente, redução das tensões e favorecimento da passagem das ondas.



**Figura 7.** Microestrutura da Martensita sem tratamento - Amostra 4.

A Figura 8 (a) mostra a microestrutura da amostra 7 no estado como temperado com presença de 95% de Martensita. A Figura 8 (b) exhibe a amostra 8 com indicação basicamente de bainita em estado também como temperado. Os testes indicaram um considerável ganho de velocidade após os tratamentos de têmpera em água e revenimento a 640 e 670 °C, principalmente no aço de maior teor de carbono, indicando o tratamento empregado como atenuador das tensões intrínsecas à microestrutura e a difusão de parte do carbono para fora da martensita e precipitado na forma de cementita. O tipo de tratamento e a temperatura empregada no processo devem ser considerados como fator de grande relevância na inferência da microestrutura por teste de ultrassom.

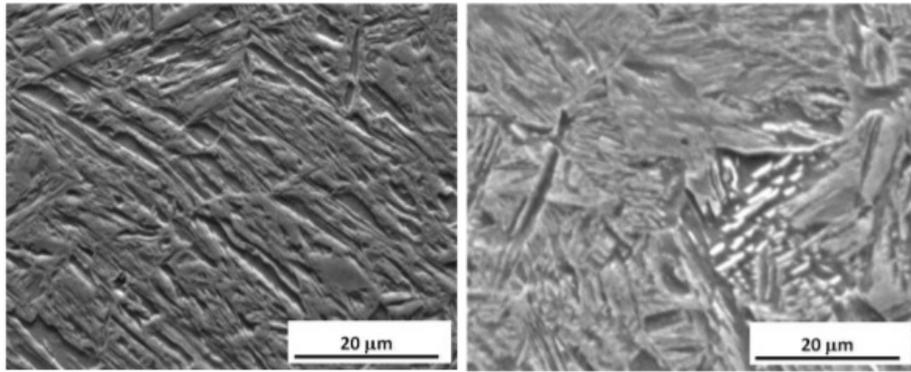


Figura 8. (a) Amostra 7 pós-têmpera; (b) Amostra 8 pós-têmpera.

A Figura 9 expõe os resultados dos diferentes tratamentos empregados nas amostras analisadas e também o fator teor de carbono como efeito na velocidade sônica.

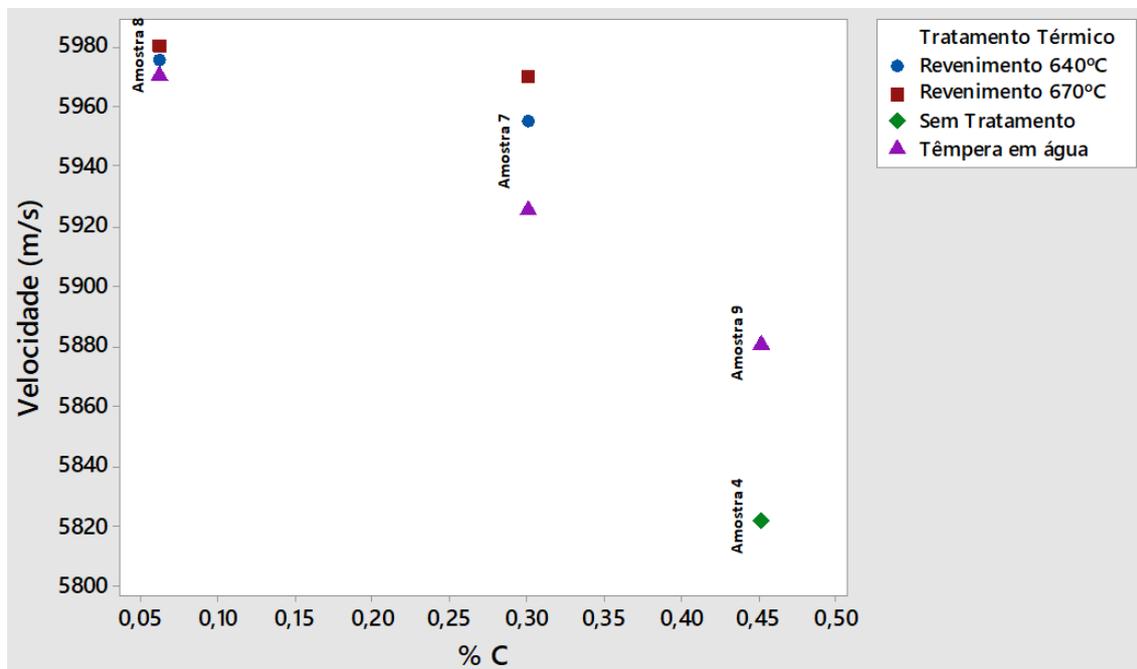


Figura 9. Influência dos diferentes tratamentos e teores de carbono na velocidade sônica.

#### 4 CONCLUSÃO

O resultado do teste por ultrassom depende do tempo de resposta, ou seja, a razão entre a velocidade e a distância percorrida pela onda dentro do material. Todavia, se tratando de uma distância conhecida (2 vezes a espessura da amostra), é possível verificar a real velocidade de propagação das ondas sônicas em um determinado tipo de material. Os testes indicaram um grande potencial da técnica de ultrassom como forma de ganho de tempo e custo para uma linha de produção na determinação microestrutural e mecânica do aço trabalhado como forma de avaliação para uma possível aprovação ou rejeição de peças conforme especificação desejada.

De maneira geral, pode-se dizer que a variação da velocidade ultrassônica em um aço médio e alto carbono com diferentes microestruturas pode ser de relevância para uma inferência tanto mais precisa quanto mais sensível seja a variação da velocidade da onda em relação à microestrutura apresentada pelo aço. Já em um

aço baixo carbono, a variação da velocidade ultrassônica é muito pequena, necessitando de melhores análises para minimizar os ruídos na medição e inferência de propriedades dos aços obtidos no processo.

O trabalho mostra um grande potencial para estudos futuros e mais precisos como forma de aplicar industrialmente a técnica a partir de um banco de dados após inúmeros testes para confiabilidade e repetibilidade dos resultados.

## REFERÊNCIAS

- 1 Toozandehjani, Meysam; Matori, Khamirul Amin; Ostovan, Farhad; Mustapha, Faizal; Zahari, Nur Ismarrubie; Oskoueian, Arshin. On the correlation between microstructural evolution and ultrasonic properties: a review. *J Mater Sci* (2015) 50:2643–2665 DOI 10.1007/s10853-015-8855-x.
- 2 Gür, C. Hakan; Tuncer, B. Orkun. Characterization of microstructural phases of steels by sound velocity measurement. *Materials Characterization* 55 (2005) 160 – 166.
- 3 Wan, Tao; Naoe, Takashi; Wakui, Takashi; Futakawa, Masatoshi; Obayashi, Hironari; Sasa, Toshinobu. Effects of grain size on ultrasonic attenuation in type 316l stainless steel. *Materials* 2017, 10, 753; doi:10.3390/ma10070753. Disponível em: [www.mdpi.com/journal/materials](http://www.mdpi.com/journal/materials).
- 4 Yoshimoto, Tatsuya; Horikawa, Hideki; Sugioka, Takumi; Wada, Yoji; Yamaguchi, Tomiko; Nishio, Kazumasa. Method to calculate ultrasonic wave velocity by using chemical composition of austenitic stainless steels. *Weld World* (2013) 57:457–465 DOI 10.1007/s40194-013-0028-4.
- 5 Rivelli, Bruna Fernandes; Dias, Ana Cláudia Azevedo; Costa Junior, Elexander da; Ferreira, Carlos Roberto; Marques, Fagner de Paula; Filho, Vicente Braz da Trindade. Influência da microestrutura na velocidade de ondas ultrassônicas em aços C-Mn, In: *72nd ABM Annual Congress*, São Paulo, 2017. p. 2541-2547. ISSN: 2594-5327, DOI 10.5151/1516-392X-30718.