

ESTUDO DAS PROPRIEDADES FÍSICAS DOS FERROS FUNDIDOS VERMICULARES ATRAVÉS DE ENSAIOS NÃO DESTRUTIVOS – FREQUÊNCIA DE RESSONÂNCIA E ULTRASSOM*

Laura Pires Ribeiro Martins¹
Wilson Luiz Guesser²
Luiz Veriano Oliveira Dalla Valentina³
Ailton Luiz Müller⁴
Hugo dos Santos⁵

Resumo

Para a produção de peças e componentes automobilísticos, a utilização de ensaios não destrutivos é de grande importância, tanto para a detecção de defeitos como para a estimativa de propriedades físicas e mecânicas. Este estudo tem como objetivo avaliar dois métodos de ensaios não destrutivos (frequência de ressonância e ultrassom) através da determinação do módulo de elasticidade e do amortecimento de vibrações, em ferros fundidos vermiculares de classe FV 450. Estas técnicas também foram avaliadas para identificar a presença de microporosidades de contração na solidificação. Verificou-se que estas metodologias permitem estimar valores de módulo de elasticidade com bastante precisão, superior à obtida com ensaios de tração. Comprovou-se ainda que a capacidade de amortecimento de vibrações, avaliada pela taxa de atenuação da oscilação, é sensível à presença de interfaces na microestrutura do material, bem como à presença de pequenas porosidades.

Palavras-chave: Ensaios não destrutivos; Propriedades físicas; Microporosidades; Ferro fundido vermicular.

EVALUATION OF PHYSICAL PROPERTIES OF COMPACTED GRAPHITE IRON BY NON DESTRUCTIVE TESTING METHODS: RESONANT FREQUENCY AND ULTRASOUND

Abstract

The non-destructive testing has huge importance for the production of automotive parts and components, specially for the detection of defects and to estimate the physical and mechanical properties. The research's aims to evaluate two methods of non-destructive testing (frequency of resonant and ultrasound). The modulus of elasticity and the damping capacity for compacted graphite iron grade CGI 450 were quantified. These techniques were also used for the identification of microporosities formed during solidification. These ND tests estimate the elastic modulus with more accuracy than tensile test. It was shown that the vibration damping capacity, measured by oscillation decay rate, is sensitive to the presence of interfaces on the microstructure of the material as well as the presence of small porosities.

Keywords: Non-destructive testing; Physical properties; Microporosities; Compacted graphite iron.

¹ Mestranda em Ciência em Engenharia dos Materiais, UDESC, Joinville, SC, Brasil.

² Professor Doutor, UDESC e TUPY, Joinville, SC, Brasil.

³ Professor Doutor, UDESC, Joinville, SC, Brasil.

⁴ Engenheiro Metalúrgico, TUPY, Joinville, SC, Brasil.

⁵ Mestre em Ciência e Engenharia de Materiais, TUPY, Joinville, SC, Brasil..

1 INTRODUÇÃO

A crescente demanda por alto desempenho, baixos níveis de emissão de poluentes e, maior economia de combustível, exige materiais mais resistentes e leves para a construção de blocos e cabeçotes de motor. Para o setor de diesel, o aumento da pressão de explosão resulta em níveis de tensão para os quais ferros fundidos cinzentos e as ligas de alumínio não conseguem mais satisfazer os critérios de desempenho e durabilidade. Deste modo, dentro do setor automotivo cresce a aplicação dos ferros fundidos vermiculares [1]. A morfologia complexa da grafita vermicular, juntamente com suas bordas arredondadas e superfícies irregulares, resulta em forte adesão entre a grafita e a matriz. Por isso, têm-se propriedades e características intermediárias entre os ferros fundidos cinzentos e nodulares, por exemplo: boa fundibilidade atrelada a elevada resistência e ductilidade [1-3].

As propriedades físicas dos materiais estão relacionadas com as forças e interações atômicas, de acordo com o tipo de ligação química de cada material [4]. O módulo de elasticidade, ou módulo de Young, E , é uma propriedade intrínseca do material que descreve sua rigidez [5]. A literatura define o módulo de elasticidade como uma propriedade mecânica independente da estrutura, uma vez que alterações microestruturais, promovidas por tratamentos térmicos ou processamento mecânico, não alteram significativamente seu valor e comportamento. Contudo, isso não é verificado para os ferros fundidos, porque estes são dependentes tanto do volume de grafita quanto de sua morfologia [2,3,5,6]. O amortecimento às vibrações, propriedade característica e apreciável nos ferros fundidos, é resultado do atrito entre a grafita e a matriz [2]. Essa é uma das propriedades mais sensíveis às características dos materiais e de suas estruturas, tanto em escala macro quanto microscópica, sendo particularmente sensível à presença de trincas e microtrincas [7].

Os métodos clássicos de caracterização das propriedades físicas apresentam dificuldades em expressar seus valores reais, uma vez que esses métodos são destrutivos, trabalhosos e demorados. Por isso, o desenvolvimento de ensaios não destrutivos permite a identificação do material, análise de suas propriedades físicas, bem como a determinação da presença de defeitos.

Este estudo avalia dois métodos de ensaios não destrutivos: frequência de ressonância e ultrassom, e seus comportamentos para a análise das propriedades físicas (módulo de elasticidade e amortecimento) e ainda a presença de defeitos em ferro fundido vermicular. Neste trabalho será ainda estudada a sensibilidade dos métodos na detecção de defeitos e a influência destes sobre as propriedades.

2 MATERIAIS E MÉTODOS

Este trabalho realizou-se em parceria UDESC-Tupy, com a utilização conjunta de laboratórios e instalações.

2.1 Materiais

O material em análise foi o ferro fundido vermicular, fundido em forno de indução a cadinho com a composição indicada na Tabela 1. Adicionalmente, foi produzido um ferro fundido vermicular com 0,3% Mo, de modo a aumentar a tendência à formação de microporosidades de solidificação, para poder examinar o potencial de detecção de defeitos de cada técnica experimental.

Foram vazados blocos Y de 1 pol [8], em molde de areia ligada com resina. Este corpo de prova permite a obtenção de amostras isentas de porosidades de solidificação, em sua parte inferior. As amostras foram desmoldadas a frio. Os blocos foram seccionados em duas regiões, sendo a identificação “inferior” para a seção útil do bloco, isenta de defeitos e a “superior” para uma região correspondente ao massalote, a qual pode apresentar microporosidades. Posteriormente, foram usinados com a geometria de uma barra de seção quadrada de 20 mm de lado por 120 mm de comprimento, Figura 1. As dimensões e geometria selecionadas seguem as normas ASTM E1876-01 [9] e ASTM E2001-13 [10] e, além disso, permitem realizar, facilmente, o ensaio de ultrassom para a detecção de defeitos.

Tabela 1. Composição química das amostras de ferro fundido vermicular. Percentagem em peso.

amostra	CE (C+(Si/3))	Mn	S	Ti	Cueq. (Cu+10*Sn)	Mo
11	4,37	0,375	0,007	0,005	1,847	0,003
XII	4,50	0,360	0,05	0,007	0,976	0,324

Fonte: Dados fornecidos pela Tupy



Figura 1. Corpos de prova para caracterização das propriedades físicas e estudos dos defeitos.
Fonte: Autoria própria

2.2 Análises

2.2.1 Metalografia e ensaio de tração

As amostras metalográficas foram extraídas juntamente com os corpos de prova para o ensaio de tração. Deste modo, geraram-se quatro amostras a serem avaliadas. Os procedimentos para a preparação das amostras segue a norma NBR-13284 e o processo de caracterização realizou-se segundo norma VDG P441, equivalente à norma ISO-945.

Os ensaios de tração realizaram-se na máquina universal de ensaio EMIC de 50 toneladas com auxílio de extensômetro [8].

2.2.2 Ensaios não destrutivos: ultrassom e frequência de ressonância

O ensaio de ultrassom mediu a velocidade longitudinal dos corpos de prova e separadamente calculou-se o módulo elástico pela equação presente em [5,11]:

$$V_L = \sqrt{\frac{E(1-\mu)}{\rho(1+\mu)(1-2\mu)}} \quad (1)$$

no qual V_L é a velocidade da onda longitudinal no material (m/s), E é o módulo de Young (N/m²), μ é o coeficiente de Poisson e ρ é a densidade do material (kg/mm³).

Ainda, através desse ensaio (técnica de pulso-eco) realizaram-se a detecção de defeitos. Esses ensaios seguem as normas ASTM E494-10 [12] e ASTM E114-10 [13].

O ensaio de frequência de ressonância foi realizado por meio do método de excitação por impulso. A técnica, ilustrada na Figura 2, utiliza o software Sonelastic® [14]. Este consiste em um analisador de vibrações transitórias, da qual extrai as frequências para o cálculo dos módulos de elasticidade e as respectivas taxas de atenuação para a realização do cálculo dos amortecimentos [14]. Este equipamento está de acordo com a norma ASTM E1876-01 [9] e, ainda permite medir as frequências: de flexo-torção, de flexão e longitudinal, as quais avaliam um ou mais módulos durante o mesmo ensaio, sem a necessidade de cálculos posteriores. Neste estudo utilizou-se somente, as frequências de flexão e longitudinal para a determinação do módulo de Young, E , e a caracterização do amortecimento.

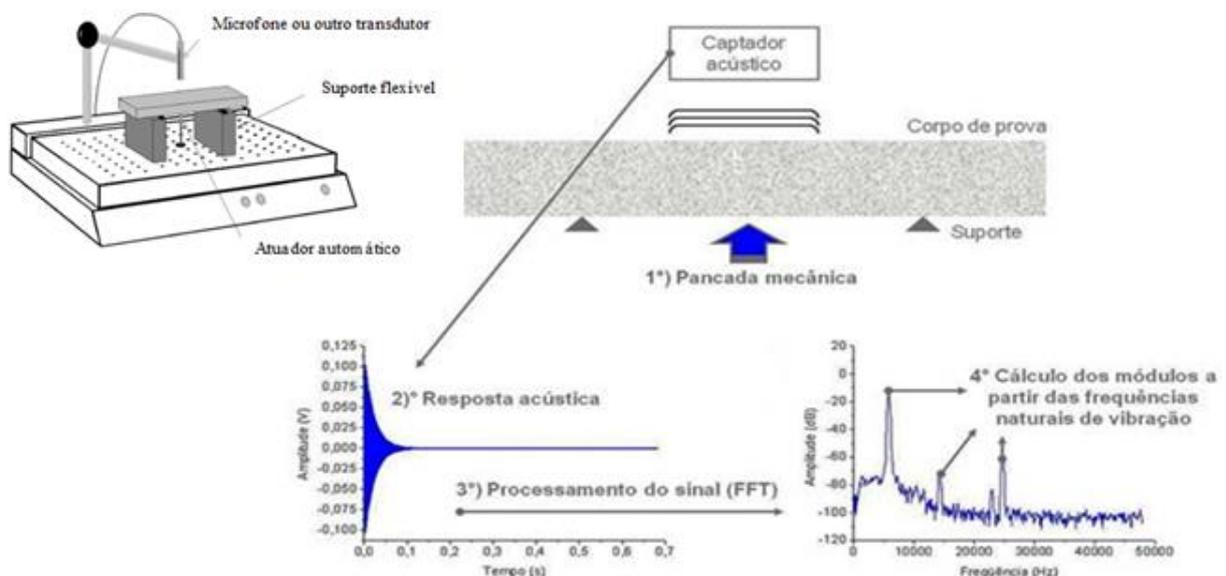


Figura 2. Esquema do aparato experimental utilizado no ensaio de frequência de ressonância.
Fonte: Adaptação de [7,15].

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1 Caracterização Metalográfica

Os resultados das avaliações realizadas encontram-se na Tabela 2, para as duas ligas (sem e com Mo, 11 e XII, respectivamente). As micrografias dos materiais estudados são apresentadas na Figura 3. Pode-se observar a grafita predominantemente vermicular (5-7% de nodularidade) com matriz perlítica (98% de perlita). Através da Tabela 2 e das Figuras 3 e 4, pode-se verificar o efeito do molibdênio e da velocidade de resfriamento no refinamento da matriz perlítica.

Tabela 2. Análise metalográfica das amostras de ferro fundido vermicular.

Amostra	11 inf.	11 sup.	XII inf.	XII sup.
Forma da grafita	III	III	III	III
Tamanho da grafita	(7)-(6)	(7)-(8)	(7)-(8)	(7)-(8)
Nodularização (%)	6	5	7	6
Nº de parículas de grafita/mm ²	508	490	502	489
Espaçamento interlamelar da perlita (µm)	0,32	0,38	0,25	0,29
Nível de rechupe	N1	N1	N1	N1

3.2 Avaliação das Propriedades Mecânicas e Elásticas

A Tabela 3 apresenta os resultados dos ensaios de tração. Verifica-se que os resultados de limite de resistência e de módulo de elasticidade são um pouco superiores na posição inferior do bloco Y, o que parece ser o resultado da maior nodularidade da grafita e do menor espaçamento interlamelar da perlita encontrada nestes locais, comparativamente à verificada em regiões mais acima (Tabela 2). A presença de molibdênio resultou em aumento dos valores de resistência (limite de resistência e limite de escoamento).

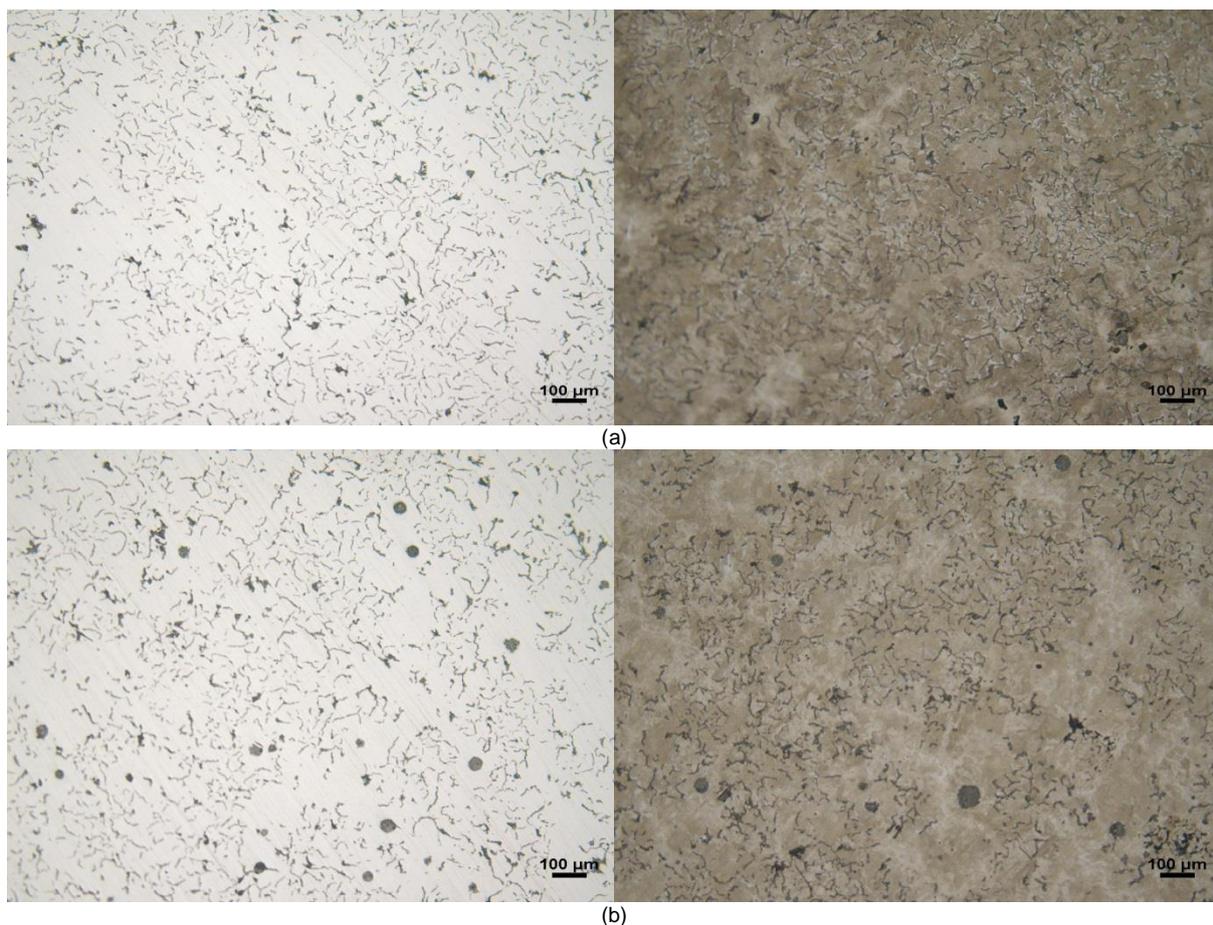


Figura 3. Micrografias da grafita vermicular e da matriz perlítica para as amostras (a)11 e (b) XII. Aumento de 100x. Ataque químico: Nital 3%.

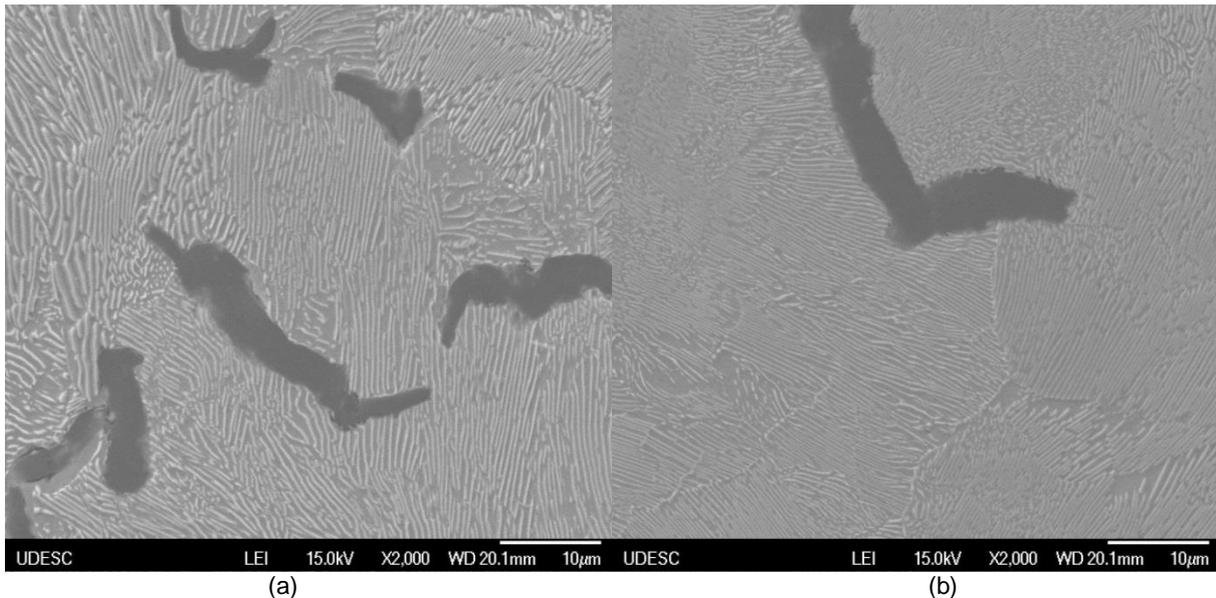


Figura 4. Microscopia eletrônica de varredura. Amostras (a)11 inferior e (b) XII inferior. Aumento de 2000x.

Os resultados dos ensaios de ultrassom são apresentados na Tabela 4 e os valores calculados para o módulo de elasticidade são próximos aos encontrados na literatura [6,16,17]. A Tabela 5 destaca os valores obtidos através do ensaio de frequência de ressonância pelo método de excitação por impulso. Este mensurou os módulos de elasticidade por meio das frequências longitudinal (FL) [18] e flexional (FF) [9], sendo a primeira a mais utilizada, pois permite a comparação direta com os valores encontrados pelo ensaio de ultrassom. Para o coeficiente de Poisson foram utilizados os valores normalizados [8], pois o ensaio para obter a frequência flexo-torcinal apresentou dificuldades quanto à análise, por conta da sobreposição com o segundo modo de vibração dos corpos de prova.

Segundo Cech [11], a medição com a frequência de ressonância produz valores mais baixos que o ultrassom, uma vez que esta medição não cobriria todo o volume do material. Entretanto, isso não condiz com técnica de frequência de ressonância, pois a vibração natural de um corpo é dependente do módulo de elasticidade, massa e dimensões do corpo [9], o que indica a completa avaliação da estrutura e suas imperfeições. Estatisticamente a Figura 5 ilustra que essa diferença não é significativa e, ambos os métodos apresentam valores superiores ao ensaio de tração, como o esperado, devido à precisão e método de caracterização.

Tabela 3. Resultados do ensaio de tração para as amostras de ferro fundido vermicular.

	11 inf.	11 sup.	XII inf.	XII sup.
LR (MPa)	458,0	450,0	530,0	514,0
LE (MPa)	361,0	353,0	412,0	413,0
A (%)	1,3	1,2	1,2	1,1
E (GPa)	122,7	121,4	140,9	137,2

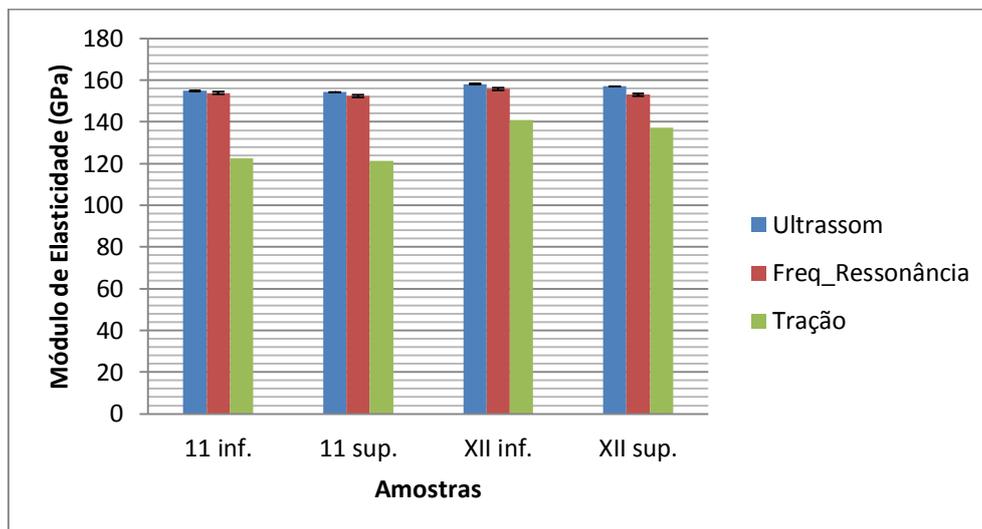
*Calculado pelo método da secante à 25% LR.

Tabela 4. Resultados para o ensaio de ultrassom das amostras de ferro fundido vermicular.

	V (m/s)		E (GPa)	
	χ	s	χ	s
11 inf.	5185	10	155	0,00
11 sup.	5175	10	154	0,00
XII inf.	5240	10	158	0,00
XII sup.	5220	10	157	0,00

 χ – média; s – desvio padrão**Tabela 5.** Resultados da frequência de ressonância para as amostras de ferro fundido vermicular.

	E - FL (GPa)		E - FF (GPa)		μ	
	χ	s	χ	s	χ	s
11 inf.	153,80	0,60	155,56	0,88	0,26	0,05
11 sup.	152,45	0,57	153,34	0,63	0,26	0,05
XII inf.	155,79	0,60	155,92	0,80	0,26	0,05
XII sup.	153,04	0,55	154,64	0,62	0,26	0,05

 χ – média; s – desvio padrão**Figura 5.** Relação entre os módulos de elasticidade medidos pelo ultrassom, frequência de ressonância e ensaio tração.

3.3 Análise do Amortecimento

O amortecimento, ou atrito interno, é uma das propriedades mais sensíveis de materiais e estruturas, tanto em escala macro quanto microscópica, e é sensível à presença de trincas e microtrincas [19]. O amortecimento determina a amplitude de vibração na ressonância e o tempo de persistência da vibração depois de cessada a excitação [19]. Deste modo, para a avaliação do amortecimento ou fator de amortecimento ou capacidade de amortecimento, Ψ , considera-se a corresponde taxa de atenuação da oscilação. Para a avaliação desses parâmetros utilizaram-se as duas frequências vibracionais, através do equipamento Sonelastic® e, estão presentes na Tabela 6, na qual a designação FL destina-se a análise pela frequência longitudinal e FF flexional.

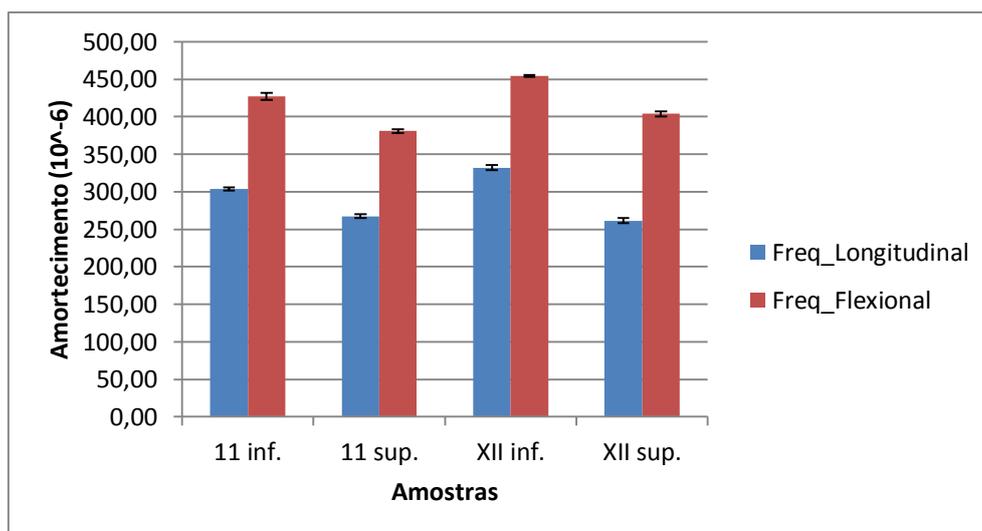
Tabela 6. Resultados para o amortecimento através do método de frequência de ressonância.

		F(Hz)*		Ψ (E-6)	
		χ	s	χ	s
FL	11 inf.	19274,49	0,06	303,62	2,20
	11 sup.	19189,05	0,22	267,34	2,34
	XII inf.	19344,39	0,31	332,04	3,24
	XII sup.	19276,72	0,18	261,36	3,25
FF	11 inf.	6044,02	0,02	427,08	4,99
	11 sup.	6085,82	0,02	380,78	2,39
	XII inf.	6067,48	0,01	454,7	1,29
	XII sup.	6015,07	0,04	403,70	3,37

*Frequência de ressonância das amostras.

 χ – média; s – desvio padrão

Os valores encontrados para o amortecimento estão de acordo com o mencionado na literatura [3]. Observa-se que o amortecimento é uma grandeza sensível tanto às condições microestruturais quanto à técnica de ensaio, pois o sistema de apoios utilizado para a medição da frequência longitudinal não representa adequadamente a condições de livre apoio [19]. A análise dos resultados da Tabela 6, juntamente com a Figura 6, mostra a sensibilidade do amortecimento, principalmente, às condições microestruturais do material. Para ambas as ligas, as amostras da posição “inferior” apresentam valores maiores para o amortecimento. Nesta posição é a de maior nodularidade, o que deveria resultar em menor capacidade de amortecimento. Entretanto, é maior o número de partículas de grafita, o que pode ter conduzido a esta maior capacidade de amortecimento. Além disso, o refino da perlita também é maior nestas posições inferiores do bloco Y, e o aumento do teor de molibdênio também implicou em menor espaçamento interlamelar da perlita, resultando em maior capacidade de amortecimento de vibrações. Este conjunto de resultados mostra que, de um modo geral, o aumento da quantidade de interfaces resulta em aumento da capacidade de amortecimento de vibrações.

**Figura 6.** Amortecimento de vibrações (Ψ) através do ensaio de frequência de ressonância, para amostras com diferentes níveis de porosidades. Amostras da posição inferior – isentas de porosidades. Amostras da posição superior – algumas microporosidades.

3.4 Estudo da Detecção de Defeitos

O estudo dos defeitos iniciou-se através da caracterização e comparação das amostras 11 e XII, nas quais a determinação “inferior” corresponde aos corpos de provas isentos de defeitos (seção útil do bloco y) e, “superior” indica as amostras com possíveis defeitos. As análises realizadas foram: a detecção de defeitos pelo método pulso-eco [13] e a medição da velocidade longitudinal de ultrassom para avaliação do módulo de elasticidade na presença desses defeitos, bem como a determinação do módulo de elasticidade, amortecimento e, a detecção de defeitos pela frequência de ressonância [9,10].

Para a detecção de defeitos, somente através do ultrassom conseguiu-se verificar a presença desses. Contudo esses são muito pequenos e encontram-se bem dispersos nos materiais. A sensibilidade do módulo de elasticidade às microporosidades não foi observada, uma vez que não houve alteração nos valores dos módulos de elasticidade. Isso pode indicar que o módulo seja menos sensível a presença de defeitos, principalmente os de escala reduzida. Em contra partida, o amortecimento mostra-se sensível à essas pequenas perturbações. Entretanto, seria interessante confirmar este comportamento em amostras contendo maiores quantidades de porosidades.

4 CONCLUSÃO

Através do estudo realizado foi possível verificar que:

- Os métodos de ensaio não destrutivos permitem maior precisão na avaliação das propriedades físicas em relação aos métodos clássicos de análise;
- As determinações de módulo de elasticidade pelo ensaio de tração (método secante) resultaram em valores entre 121-141 GPa, e são sensíveis ao limite de resistência do material, portanto à forma da grafita (grau nodulização) e à presença de molibdênio.
- Os métodos de velocidade ultrassônica e de frequência de ressonância forneceram valores de módulo de elasticidade em faixas estreitas (153-158 GPa). Estes valores não parecem se correlacionar com a resistência do material, em particular com a microestrutura da matriz. Alguma relação existe com a forma da grafita, avaliada através da nodularidade.
- A capacidade de amortecimento de vibrações é sensível ao número de partículas de grafita e ao espaçamento interlamelar da perlita. O amortecimento de vibrações aumenta à medida que aumenta o número de interfaces presentes na microestrutura.
- O amortecimento mostrou-se mais sensível à presença de defeitos e, também, a técnica de ensaio que o módulo de elasticidade.
- O método de frequência de ressonância permite melhores avaliações do módulo de elasticidade e amortecimento, contudo requer corpos de prova com elevada precisão dimensional e acabamento superficial, limitando assim a sua utilização quando comparado com o ultrassom.

REFERÊNCIAS

- 1 S. Dawson, “Compacted graphite iron: mechanical and physical properties for engine design,” Dresden, Germany, 1999.
- 2 W. L. Guesser, Propriedades Mecânicas dos Ferros Fundidos, 1a ed., São Paulo,

- SP: Blucher, 2009.
- 3 G. M. Goodrich, Iron Castings Engineering Handbook, Des Plaines: AFS, 2003.
 - 4 W. D. Callister Jr, Materials science and engineering : an introduction, 7a ed., New York, NY: John Wiley & Sons,, 2007.
 - 5 A. Likhite, D. R. Peshwe e S. U. Pathak, "Effect of graphite morfology on mudulus of elasticity of low carbon equivalent ductile iron," Trans. Indian. Inst. Met., vol. 61, pp. 491-501, Dezembro 2008.
 - 6 J. Belan, "Identification of cast iron type with using of NDT methods," Archives of foundry engeering, vol. v. 10, pp. 103-106, Março 2010.
 - 7 L. C. Cossolino e A. H. Pereira, "Módulos elásticos: visão geral e métodos de caracterização," 2012. [Online]. Available: www.atcp.com.br. [Acesso em 10 Setembro 2013].
 - 8 ISO16112, "Compacted (vermicular) graphite cast irons - classification". 01 08 2006.
 - 9 ASTM E1876, "Standard Test Method for Dynamic Young's Modulus, Shear Modulus, and Poisson's Ratio by Impulse Excitation of Vibration". Fevereiro 2001.
 - 10 ASTM E2001, "Standard Guide for Resonant Ultrasound Spectroscopy for Defect Detection in Both Metallic and Non-metallic Parts". 2013.
 - 11 J. Cech, "Measuring the mechanical properties os cast irons by NDT methods," NDT International, pp. 93-102, Abril 1990.
 - 12 ASTM E494, "Standard practice for measuring ultrasonic velocity in materials". 2010.
 - 13 ASTM E114, "Standard practice for ultrasonic pulse-echo straight-beam contact testing". 2010.
 - 14 E. F. ATCP, "ATCP - Engenharia Física," 2011. [Online]. Available: www.atcp.com.br. [Acesso em 29 Setembro 2013].
 - 15 G. Roebben, B. Bollen, A. Brebels, J. V. Humbeeck e O. V. d. Biest, "Impulse excitation apparatus to measure resonant frequencies, elastic," American Institute of Physics, pp. 4511-4515, Dezembro 1997.
 - 16 D. N. Collins e W. Alcheikh, "Ultrasonic Non-destructive evaluation ofthe matrix structure and graphite shape in cast iron," Journal of Materials Processing Technology, vol. 55, pp. 85-80, 1995.
 - 17 C. H. Gür e B. Aydinmakina, "Ultrasonic investigation of graphite nodularity in ductile cast irons," Zerstörungsfreie Materialprüfung, 23 Maio 2001.
 - 18 S. Spinner e W. Tefft, "A Method For Determining Mechanical Resonance Frequencies And For Calculating Elastic Moduli From These Frequencies," Proceedings ASTM, vol. 61, 1961.
 - 19 L. C. Cossolino e A. H. A. Pereira, "Amortecimento: classificação," São Carlos, 2010.