

Éder dos Reis Silva

**ESTUDO DA INFLUÊNCIA DA MATRIZ E DA
MORFOLOGIA DA GRAFITA NAS PROPRIEDADES
ELÁSTICAS DOS FERROS FUNDIDOS NODULAR E
CINZENTO**

Joinville
2018

Éder dos Reis Silva

**ESTUDO DA INFLUÊNCIA DA MATRIZ E DA
MORFOLOGIA DA GRAFITA NAS PROPRIEDADES
ELÁSTICAS DOS FERROS FUNDIDOS NODULAR E
CINZENTO**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-graduação em Engenharia e Ciências Mecânicas, da Universidade Federal de Santa Catarina para a obtenção do grau de Mestre em Engenharia e Ciências Mecânicas.

Orientador: Prof. Dr. Alexandre Mikowski

Coorientador: Prof. Dr. Thiago Antonio Fiorentim

Joinville
2018

Ficha de identificação da obra elaborada pelo autor
através do Programa de Geração Automática da Biblioteca Universitária da
UFSC.

A ficha de identificação é elaborada pelo próprio autor

Maiores informações em:

<http://portalbu.ufsc.br/ficha>

Éder dos Reis Silva

**ESTUDO DA INFLUÊNCIA DA MATRIZ E DA MORFOLOGIA
DA GRAFITA NAS PROPRIEDADES ELÁSTICAS DOS
FERROS FUNDIDOS NODULAR E CINZENTO**

Esta Dissertação foi julgada adequada para obtenção do Título de Mestre em Engenharia e Ciências Mecânica e aprovada em sua forma final pelo Programa de Pós-Graduação em Engenharia e Ciências Mecânicas da Universidade Federal de Santa Catarina.

Joinville, 22 de fevereiro de 2018

Prof. Breno Salgado Barra, Dr. Eng.
Coordenador do Programa de Pós-Graduação
em Engenharia e Ciências Mecânicas

Banca Examinadora

Prof. Alexandre Mikowski, Dr. Fís.
Presidente da Banca Examinadora e Orientador
Universidade Federal de Santa Catarina

Prof. Kleber Viera de Paiva, Dr. Eng.
Universidade Federal de Santa Catarina

Prof. Claudimir Antonio Carminatti, Dr. Eng.
Universidade Federal de Santa Catarina

Prof. Paulo César Soares Júnir, Dr. Eng.
Pontífica Universidade Católica do Paraná

“Este trabalho é dedicado aos meus pais Helenice e Edson.”

AGRADECIMENTOS

Um trabalho de pesquisa embora seja de natureza individual, os percursos que levam ao seu término englobam a contribuição de inúmeras pessoas que não devem deixar de ser citadas. Dessa forma, quero expressar meus sinceros agradecimentos e gratidão.

À Tupy S.A. pela parceria neste trabalho e pelas oportunidades.

À Universidade Federal de Santa Catarina pela qualidade de ensino e pela oportunidade de estudo.

Ao Dr. Alexandre Mikowski pelo constante incentivo e interesse manifestado pelo trabalho. Pela paciência que sempre depositou em mim e principalmente por nunca ter deixado de acreditar na minha capacidade. Por estar sempre disponível e aberto às discussões e pela referência de organização e metodologia.

Ao Dr. Thiago Antonio Fiorentim pela coordenação e apoio no trabalho e pela realização dos ensaios de excitação por impulso.

A PUCPR, em especial ao Professor Dr. Paulo César que tornou possível a realização da difração de Raios X e da avaliação do material via MEV.

Ao Laboratório de Modelagem e Análise de Dados (LabMAD) onde foi possível realizar o tratamento e análise dos dados experimentais.

Ao Especialista de Processos da Tupy S.A., Sr. Ivo Baumer, pela contribuição nas análises metalográficas e pelo estudo em paralelo sobre a estabilidade da perlita dos ferros fundidos cinzentos e pelo exemplo de raciocínio claro e objetivo.

Ao técnico do Laboratório Metalúrgico da Tupy S.A., Moacir José Bento, que tornou possível a realização da análise metalográfica das amostras de maneira confiável e rápida.

Ao técnico do Laboratório Químico da Tupy S.A., Osmar Brunch, que tornou possível realizar os tratamentos térmicos das amostras.

Aos meus queridos pais, Helenice de Fátima dos Reis e Edson Lima da Silva, por todo amor, dedicação e apoio em todas as horas, pela paciência, amor e amizade e por toda ajuda até aqui.

“A ignorância alimenta a confiança mais frequentemente do que o conhecimento: são aqueles que sabem pouco, e não aqueles que sabem muito, os que tão confiantemente assumem que esse ou aquele problema nunca será resolvido pela ciência.”

Charles Darwin, *Descent of Man* (1871)

RESUMO

A indústria de fundição vem sofrendo nas últimas décadas, maiores pressões para a redução do índice de refugo, aumento da produtividade e atendimento as especificações cada vez mais exigentes. O controle de qualidade dos ferros fundidos é uma ferramenta importante, pois pequenas variações de processo podem influenciar diretamente na microestrutura e nas propriedades mecânicas. O presente estudo tem por objetivo avaliar o ensaio não destrutivo de frequência de ressonância utilizando a técnica de excitação por impulso segundo a Norma ASTM E 1876, através da determinação dos módulos de elasticidade e cisalhamento dos ferros fundidos nodulares e cinzentos para amostras com variação de morfologia de grafita e de matriz metálica. Foi proposto também, investigar e estabelecer uma expressão analítica experimental de propagação dos erros nos resultados das medidas do módulo de elasticidade. Verificou-se que a metodologia do ensaio de excitação por impulso permite estimar valores do módulo de elasticidade com precisão e sensíveis a variação da microestrutura. O modelo analítico proposto contribuiu ao preencher uma lacuna nos estudos que é a interferência aos resultados dos módulos de elasticidade com a estimativa do erro para as medidas determinadas. Sua aplicação em espécimes selecionados com geometria conhecida e padronizada demonstrou resultados satisfatórios e ligeiramente superiores quando comparados com os erros determinados pela geometria descritiva.

Palavras-chave: ferros fundidos, propriedades elásticas, frequência de ressonância, excitação por impulso.

ABSTRACT

The foundry industry has been suffering in the last decades, greater pressures for the reduction of the refuse index, increase of the productivity and meeting the specifications more and more demanding. The quality control of the cast iron is an important tool, because small variations of process can directly influence the microstructure and the mechanical properties. The present study aims to evaluate the non destructive resonance frequency assay using the impulse excitation technique according to ASTM E 1876 by determining the modulus of elasticity and shear strength of nodular and gray cast irons for samples with morphological variation of graphite and of metallic matrix. It was also proposed to investigate and establish an experimental analytical expression of propagation of errors in the results of the modulus of elasticity. It was verified that the impulse excitation test methodology allows to estimate elastic modulus values with precision and sensitive to the variation of the microstructure. The proposed analytical model contributed by filling a gap in the studies that is the interference to the results of the moduli of elasticity with the estimation of the error for the determined measures. Its application in selected specimens with known and standardized geometry demonstrated satisfactory results and slightly superior when compared with the errors determined by the descriptive geometry.

Keywords: cast irons, elastic properties, resonance frequency, impulse excitation.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 - Peças de ferro fundido que necessitam de ensaios não-destrutivos. (a) Sapata de freio em ferro fundido nodular ferrítico/perlítico. (b) Disco de freio em ferro fundido cinzento. (c) Carcaça de turnina em ferro fundido vermicular Silício-Molibdênio e (d) Conexões hidráulicas em ferro fundido maleável.	27
Figura 2 - Diagrama Fe-C.	32
Figura 3 - Microestrutura do ferro fundido nodular, classe Si-Mo 4.1. (a) Morfologia da grafita sem ataque. Ampliação: 100X e (b) Estrutura da matriz com ataque. Ampliação: 100X.	34
Figura 4 - Microestrutura do ferro fundido cinzento, classe FC-300. (a) Morfologia da grafita sem ataque. Ampliação: 100X e (b) Estrutura da matriz com ataque. Ampliação: 100X.	36
Figura 5 - Tipos de grafitas estabelecidos pela norma ASTM A247. Tipo I e II – grafita nodular, III – maleável, IV – vermicular, V – sem definição, VI – grafita explodida e VII – grafita lamelar.	39
Figura 6 - Classificação da grafita em ferros fundidos cinzentos. Ampliação: 100X.	40
Figura 7 - Estrutura hexagonal da grafita mostrando possíveis direções de crescimento no eixo a e c.	42
Figura 8 - Excitação de barra delgada para medição da frequência flexional.	51
Figura 9 - Excitação de barra delgada para medição da frequência torcional.	52
Figura 10 - Barra retangular produzida pelo processo de fundição contínua.	56
Figura 11 - Forno tipo Mufla utilizado no tratamento térmico das amostras: (a) forno fechado durante aquecimento (b) forno aberto aguardando o carregamento das amostras.	60
Figura 12 - Componentes do aparato utilizado no sistema de medição para determinação da frequência de ressonância.	63
Figura 13 - Ilustração do ensaio de excitação por impulso evidenciando o posicionamento do acelerômetro, local da excitação e o posicionamento dos apoios no corpo de prova.	64
Figura 14 - DRX da amostra bruta de fusão com as fases identificadas pelo banco de dados do equipamento (a) Ferro fundido nodular (FFN) e	

(b) Ferro fundido cinzento (FFC).....	68
Figura 15 - Resultados das medições da espessura (t) dos corpos de prova no estado bruto (EB) e tratado termicamente (TT). a) Ferro fundido nodular (FFN) e b) Ferro fundido cinzento (FFC).	69
Figura 16 - Resultados das medições da largura (w) dos corpos de prova no estado bruto (EB) e tratado termicamente (TT). a) Ferro fundido nodular (FFN) e b) Ferro fundido cinzento (FFC).	70
Figura 17 - Resultados das medições do comprimento (L) dos corpos de prova no estado bruto (EB) e tratado termicamente (TT). a) Ferro fundido nodular (FFN), e b) Ferro fundido cinzento (FFC).	71
Figura 18 - Resultado da medição da massa (m) dos corpos de prova nos estados brutos (EB) e tratado termicamente (TT). a) Ferro fundido nodular (FFN), e b) Ferro fundido cinzento (FFC).	72
Figura 19 - Resultados do cálculo da densidade (ρ) dos corpos de prova no estado bruto (EB) e tratado termicamente (TT). a) Ferro fundido nodular (FFN) e b) Ferro fundido cinzento (FFC).	73
Figura 20 - Morfologia da grafita de ferro fundido nodular (FFN), sem ataque. Ampliação: 100X.....	76
Figura 21 - Estrutura da matriz das amostras de ferro fundido nodular (FFN), com ataque. Ampliação: 100X. (a) Bruto de fundição (EB) e (b) Tratado termicamente (TT).	78
Figura 22 - MEV da estrutura da matriz das amostras de ferro fundido nodular (FFN) no estado bruto de fusão (EB).	79
Figura 23 - Micrografia do ferro fundido cinzento (FFC) com grafita lamelar do Tipo A e C, sem ataque. Ampliação: 100X.....	81
Figura 24 - Estrutura da matriz das amostras de ferro fundido cinzento (FFC), com ataque. Ampliação: 100X. (a) Bruto de fundição (EB) e (b) tratado termicamente (TT).....	82
Figura 25 - Estrutura da matriz das amostras de ferro fundido cinzento (FFC), com ataque. Ampliação: 1000X. (a) Bruto de fundição (EB) e (b) Tratado termicamente (TT).	84
Figura 26 - MEV da estrutura da matriz das amostras de ferro fundido cinzento (FFC) no estado bruto de fusão (EB).	85
Figura 27 - Frequência flexional (f_f) para as amostras no estado bruto de fusão (EB) e tratado termicamente (TT). a) Ferro fundido nodular (FFN), e b) Ferro fundido cinzento (FFC).....	86
Figura 28 - Amplitude característica de cada material obtida no ensaio	

de excitação por impulso na frequência de 0 a 900 Hz.	87
Figura 29 - Parâmetro geométrico T_l calculado através da Equação 4.	89
Figura 30 - Módulo de elasticidade para cada amostra obtido pelo método de Excitação por Impulso.	90
Figura 31 - Módulo de cisalhamento calculado para cada amostra.	91
Figura 32 - Módulo de elasticidade determinado com as Equações 20 e 21.	98
Figura 33 - Módulo de elasticidade médio com o respectivo erro padrão determinados pela metodologia de propagação de erros proposta e pela estatística descritiva.	99
Figura 34 - Módulo de cisalhamento médio com o respectivo erro padrão determinados pela metodologia de propagação de erros proposta e pela estatística descritiva.	100

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Módulo de elasticidade para diferentes classes de ferro fundido nodular.....	46
Tabela 2 - Valores de módulo de elasticidade para as classes de ferro fundido cinzento, barras com 30 mm de diâmetro.....	47
Tabela 3 - Lista das amostras do estado bruto de fusão obtidas na parte experimental deste estudo.....	58
Tabela 4 - Composição química dos ferros fundidos nodular (FFN) e cinzento (FFC), percentual em peso das amostras de ferro líquido do vazamento.....	67
Tabela 5 - Resultados das dimensões médias dos corpos de prova (t , w e L), e os respectivos desvios padrões.....	71
Tabela 6 - Resultados da densidade média das amostras de ferro fundido nodular (FFN) e cinzento (FFC) nos estados bruto de fusão (EB) e tratado termicamente (TT).....	74
Tabela 7 - Análise metalográfica para as amostras de ferro fundido nodular.....	75
Tabela 8 - Análise metalográfica das amostras de ferro fundido cinzento (FFC).....	80
Tabela 9 - Frequência flexional obtida no ensaio de excitação por impulso.....	88
Tabela 10 - Parâmetro geométrico adimensional T_1	89
Tabela 11 - Resultados dos módulos de elasticidade e cisalhamento médios obtidos através do Ensaio de Frequência de Ressonância pelo método de Excitação por Impulso.....	92

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ARL – Applied Research Laboratories

ASTM – American Society for Testing and Materials

BCIRA – British Cast Iron Research Association

CCC – Cúbico de Corpo Centrado

DRX – Difração de Raios X

ISO – International Organization for Standardization

MEV – Microscopia Eletrônica de Varredura

PUCPR – Pontífica Universidade Católica do Paraná

UFSC – Universidade Federal de Santa Catarina

SUMÁRIO

1.	INTRODUÇÃO	26
1.1	OBJETIVOS	28
1.1.1	Objetivo Geral	28
1.1.2	Objetivos Específicos	28
2.	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	30
2.1	FERRO FUNDIDO.....	30
2.2	CLASSIFICAÇÃO DOS FERROS FUNDIDOS	31
2.2.1	Ferro Fundido Nodular	33
2.2.2	Ferro Fundido Cinzento.....	35
2.3	COMPONENTES ESTRUTURAIS	37
2.4	PROPRIEDADES FÍSICAS.....	43
2.5	MÓDULO DE ELASTICIDADE.....	44
2.6	FREQUÊNCIA DE RESSONÂNCIA	49
2.6.1	Modos de Vibração.....	49
2.6.2	Vibração Longitudinal de Barras.....	50
2.6.3	Vibração Flexional de Barras	50
2.6.4	Vibração Torcional de Barras.....	52
2.6.5	Propriedades Elásticas Segundo a Norma ASTM E 1876	53
3.	MATERIAIS E MÉTODOS	55
3.1	PROCESSO DE PRODUÇÃO DO MATERIAL.....	55
3.2	ANÁLISE QUÍMICA.....	57
3.3	OBTENÇÃO DAS AMOSTRAS	57
3.4	TRATAMENTO TÉRMICO DE RECOZIMENTO	59
3.5	CARACTERIZAÇÃO MICROESTRUTURAL	61
3.6	PARÂMETROS GEOMÉTRICOS E DENSIDADE	62
3.7	CARACTERIZAÇÃO MECÂNICA.....	62
3.8	DESENVOLVIMENTO DE MODELO MATEMÁTICO PELA PROPAGAÇÃO DE ERROS.....	65
4.	RESULTADOS E DISCUSSÕES	66

4.1	CARACTERIZAÇÃO QUÍMICA E FÍSICA.....	66
4.1.1	Análise Química	66
4.1.2	Difração de Raios X	67
4.1.3	Parâmetros geométricos e densidade	68
4.2	CARACTERIZAÇÃO MICROESTRUTURAL	75
4.2.1	Ferro Fundido Nodular	75
4.2.2	Ferro Fundido Cinzento.....	80
4.3	CARACTERIZAÇÃO MECÂNICA.....	86
4.3.1	Frequência de Ressonância Flexional.....	86
4.3.2	Propriedades Elásticas	88
4.4	MODELO MATEMÁTICO DE PROPAGAÇÃO DE ERROS...	93
4.4.1	Desenvolvimento dos Modelos de Propagação de Erros.....	93
4.4.2	Aplicações dos Modelos de Propagação de Erros	97
5.	CONCLUSÃO	102
6.	SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.....	104
	REFERÊNCIAS	105

1. INTRODUÇÃO

Antes considerados como materiais de pouca aplicação em engenharia em função de suas baixas propriedades mecânicas e fragilidade, os ferros fundidos atualmente são indispensáveis à humanidade, possuindo vasto campo de aplicação nos mais diversificados segmentos industriais (hidráulico, automotivo, eólico e ferroviário) devido ao menor custo de produção e uma série satisfatória de propriedades. Isso ocorre em função dos avanços nos campos da pesquisa científica e tecnológica, que proporcionaram o desenvolvimento de novas ligas, diversificados métodos de sua obtenção e alteração de sua microestrutura.

O produto fundido é básico na maioria das cadeias produtivas. A sua essencialidade é indiscutível e, é fundamental nas indústrias Automotiva, Ferroviária, Bens de Capital, Eletrodomésticos, etc. Há necessidade que os investimentos continuem e que estes proporcionem a expansão da produção e o atendimento crescente ao mercado externo. Desta forma, o Brasil, além de exportar as matérias-primas de fundição, se transformará também em um grande fornecedor mundial de peças fundidas.

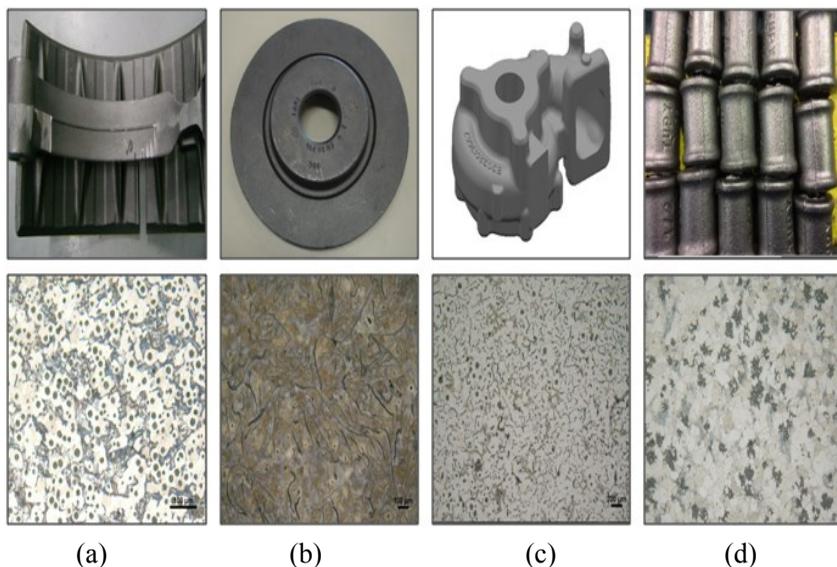
As indústrias de fundição têm sofrido nas últimas décadas maiores pressões para diminuição dos índices de refugo, aumento de produtividade e atendimento as especificações cada vez mais exigentes dos clientes quanto às propriedades mecânicas das peças e, principalmente, nível de defeitos. O controle de qualidade dos ferros fundidos é importante, pois pequenas variações de processo influenciam diretamente na microestrutura e conseqüentemente nas propriedades mecânicas.

Além disso, existe a crescente demanda por materiais de maior desempenho mecânico como, por exemplo, os ferros fundidos nodulares resistentes a alta temperatura e os endurecidos por solução sólida com matriz ferrítica, e também os ferros fundidos cinzentos de alta resistência. Diante desses desafios surge a necessidade de aprimorar os controles de processo, particularmente no controle de qualidade do produto final.

Assim, o desenvolvimento de ensaios não destrutivos permite a identificação e separação de materiais, que no caso dos ferros fundidos é possível avaliar a forma da grafita e o grau de

nodularização, tornando o controle de qualidade mais eficiente (GUESSER, 2009). A Figura 1 mostra alguns exemplos de ferros fundidos e alguns produtos fundidos que necessitam de ensaios não destrutivos exigidos no processo de controle de qualidade de fabricação.

Figura 1 - Peças de ferro fundido que necessitam de ensaios não-destrutivos. (a) Sapata de freio em ferro fundido nodular ferrítico/perlítico. (b) Disco de freio em ferro fundido cinzento. (c) Carcaça de turnina em ferro fundido vermicular Silício-Molibdênio e (d) Conexões hidráulicas em ferro fundido maleável.



Fonte: Autor (2016).

Deste modo, o parâmetro fundamental para a caracterização das propriedades mecânicas são as propriedades elásticas, pois estão intrinsicamente correlacionadas com o comportamento mecânico dos materiais,

uma vez que são dependentes da composição química, microestrutura e dos defeitos presentes. A caracterização dessas propriedades podem ser determinadas por métodos quase-estáticos ou dinâmicos. Os métodos

quase-estáticos ou isotérmicos são baseados em ensaios mecânicos usualmente destrutivos e os dinâmicos ou adiabáticos em técnicas não destrutivas, como a frequência de ressonância (COSSOLINO e PEREIRA, 2012).

O presente trabalho propõe a avaliação dos módulos de elasticidade dos ferros fundidos nodular e cinzento pelo ensaio não destrutivo de frequência de ressonância, através da medição de sinais acústicos em barras de seção retangular. Será possível também avaliar a influência da morfologia da grafita e da matriz metálica nas propriedades elásticas determinadas pela técnica. Também foi criada uma metodologia que tornou possível a determinação da incerteza do modelo matemático do ensaio, uma vez que não existe na literatura o desenvolvimento dessas equações baseadas na norma ASTM E1876 (2001).

1.1 OBJETIVOS

A seguir, serão apresentados o objetivo geral e os objetivos específicos do presente estudo.

1.1.1 Objetivo Geral

Avaliar o método de ensaio não destrutivo de excitação por impulso, através da caracterização e correlação das propriedades elásticas (módulo de elasticidade e cisalhamento) para os ferros fundidos nodular e cinzento com variação de morfologia da grafita e matriz metálica. A técnica escolhida visa aplicação direta na indústria.

1.1.2 Objetivos Específicos

- Analisar a influência da morfologia da grafita dos ferros fundidos nodular e cinzento sobre as propriedades elásticas, através de corpos de prova retirados a meio raio de barras retangulares;
- Analisar a influência da microestrutura dos ferros fundidos nodular e cinzento – variação da matriz metálica a partir do tratamento térmico de recozimento sobre as propriedades elásticas;
- Determinar os parâmetros geométricos, massa e densidades dos

corpos de prova bruto de fundição e tratados termicamente.

- Desenvolver modelos matemáticos baseados na teoria de propagação de erros a partir das expressões para determinação de propriedades elásticas pela técnica de excitação por impulso, conforme norma ASTM E1876;
- Validar o modelo matemático baseado na determinação dos erros através da confrontação com dados experimentais;
- Comparar os erros determinados pelo modelo matemático das propriedades elásticas com o erro determinado pela distribuição gaussiana.

2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Este capítulo tem como objetivo fornecer elementos para compreensão dos capítulos subsequentes.

2.1 FERRO FUNDIDO

O termo ferro fundido não se refere a um simples material, mas a uma família de materiais no qual o principal constituinte é o ferro, com quantidades importantes de carbono e silício. As propriedades mecânicas dos ferros fundidos são determinadas por sua microestrutura, constituída de fases estáveis e metaestáveis, formadas durante a solidificação ou tratamento térmico subsequente.

As ligas ferrosas representam um dos mais complexos sistemas de ligas metálicas. O ferro fundido é uma liga à base de ferro, carbono e silício. Com carbono a partir de 2,11%, silício usualmente de 1 a 3%, e que pode conter outros elementos químicos (Mn, S e P em baixos teores), permitindo, ainda a adição de elementos como Ti, Sb, Sn, Cu, Cr, Mo. O ferro fundido designa uma classe de materiais com certas particularidades, onde pequenas alterações de composição química e processo de fundição afetam as suas propriedades mecânicas e metalúrgicas (GUESSER, 2009; STEFANESCU, 1998).

Com base na precipitação do carbono, os ferros fundidos podem ser divididos em cinco tipos genéricos: branco, maleável, cinzento, nodular e vermicular. Os tipos de ferros fundidos não são classificados segundo sua composição química, uma vez que os intervalos de análise se sobrepõem. No entanto, a forma com que o excesso de carbono se precipita (grafita ou carboneto) resulta em características peculiares como aparência de fratura, morfologia da grafita, etc. (GOODRICH, 2003; GUESSER, 2009; STEFANESCU, 1998).

A presença de traços de elementos químicos, a adição de elementos de liga, a modificação da velocidade de solidificação e o uso de tratamentos térmicos após a solidificação são processos utilizados para alterar a microestrutura dos ferros fundidos e assim obter os diversos tipos e classes, com uma ampla faixa de propriedades mecânicas (GUESSER, 2009; STEFANESCU 1998).

Devida a ampla faixa de propriedades mecânicas e físicas, por exemplo, o módulo de elasticidade e cisalhamento, e o custo competitivo fazem do ferro fundido, em suas diversas classes, o mais importante material fundido, com uma participação acima de 70% da tonelagem total dos materiais processados mundialmente (STEFANESCU, 2005).

Devido às várias combinações de fluidez, usinabilidade, dureza, resistência mecânica e resistência ao desgaste, acompanhada por boa condutividade térmica e amortecimento, apresenta uma ampla e crescente utilização na maioria dos países (WESSEN; SVENSSON, 2004).

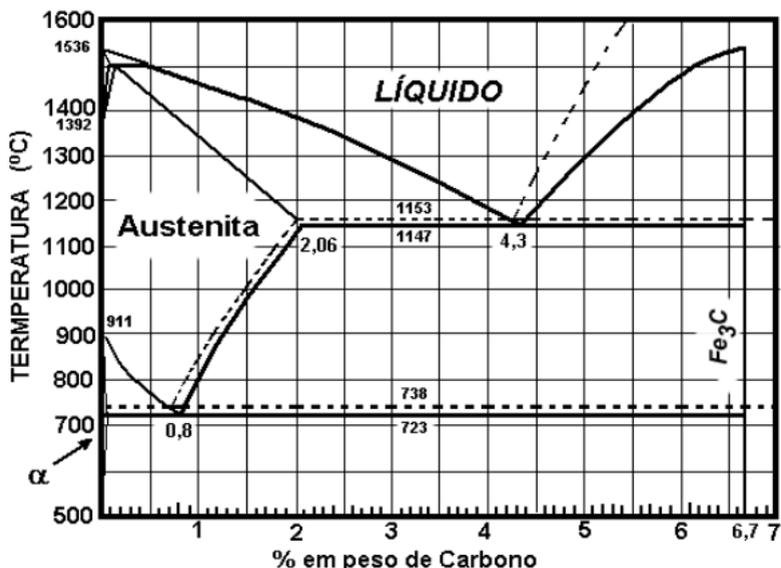
Como o presente estudo busca a determinação das propriedades elásticas para os ferros fundidos cinzento e nodular, ressalta-se a importância de um conhecimento sobre os mesmos, envolvendo suas classes, microestrutura e propriedades.

2.2 CLASSIFICAÇÃO DOS FERROS FUNDIDOS

Os ferros fundidos possuem microestrutura e propriedades específicas que se diferem das demais ligas metálicas, pois ocorre a precipitação da grafita ou cementita durante a solidificação.

A solidificação dos ferros fundidos em condições de equilíbrio pode ser analisada utilizando o diagrama Fe-C. Este sistema apresenta dois eutéticos, provenientes da existência de dois equilíbrios: estável e metaestável. O estável (linha contínua) é formado por austenita + grafita e o metaestável (linha tracejada) por austenita + cementita, conforme mostra a Figura 2 (METALS HANDBOOK, 1961).

Figura 2 - Diagrama Fe-C.



Fonte: Adaptado de METALS HANDBOOK.

De acordo com o diagrama, os dois sistemas apresentam diferenças de temperatura e porcentagem de carbono na reação eutética. Observa-se que a diferença entre as temperaturas dos dois eutéticos é pequena, portanto existe uma facilidade da liga solidificar-se segundo o diagrama metaestável formando cementita (Fe_3C). Para aumentar este intervalo, utilizam-se altos teores de silício, cujo principal efeito é aumentar a diferença do intervalo entre as temperaturas do eutético estável e do eutético metaestável (BENZ e ELLIOT, 1961).

A formação dessas fases depende da natureza e do tratamento que é empregado ao metal líquido, como por exemplo, o potencial de grafitação, tratamento de inoculação e a taxa de resfriamento (GUESSER, 2009; WESSEN e SVENSSON, 2004; ELLIOT, 1998).

Esse grupo de ligas, historicamente, começou a ser classificado através da coloração apresentada pela fratura, que podia ser branca ou acinzentada, ainda havia a mescla dessas. O complemento da classificação dos ferros fundidos foi possível com

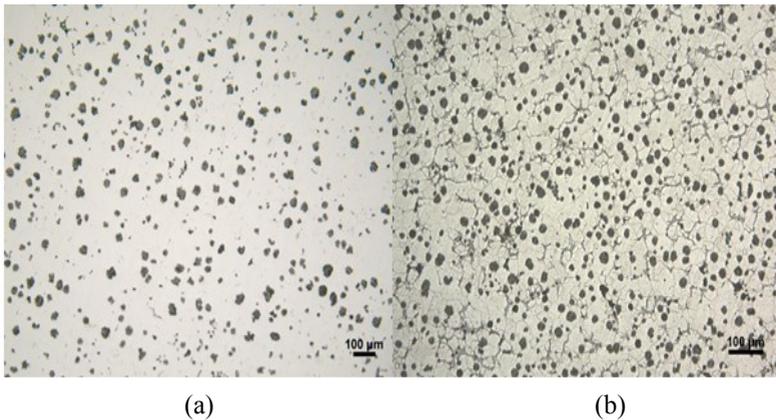
o auxílio da microscopia, permitindo avaliar a morfologia da grafita, correlacionando com as propriedades mecânicas observadas (STEFANESCU, 1998).

2.2.1 Ferro Fundido Nodular

O ferro fundido nodular é uma liga ternária de Fe-C-Si, cujas concentrações típicas de carbono e silício variam entre 3,0 a 3,9% e 1,8 a 4,3% (em peso), respectivamente. As composições químicas destes materiais contemplam ainda a presença de outros elementos, tais como cobre, manganês, estanho e molibdênio, de acordo com as características e propriedades requeridas da peça a serem atingidas.

Nesta classe de ferros fundidos a grafita apresenta-se na forma de nódulos ou esferóides no estado bruto de fusão. A obtenção dessa morfologia da grafita ocorre em decorrência da adição de certos elementos químicos, sendo o magnésio e o cério os mais comuns. A presença de enxofre no metal líquido faz com que o mesmo seja absorvido pelos planos basais da grafita, tornando a velocidade de crescimento destes planos mais lentos que a dos piramidais (laterais), resultando na morfologia lamelar. A adição de magnésio no metal líquido faz com que este reaja com o enxofre, resultando em sulfeto de magnésio que tende a se incorporar na escória, favorecendo a formação da grafita nodular (GOODRICH, 2003). A Figura 3 mostra um exemplo de ferro fundido nodular.

Figura 3 - Microestrutura do ferro fundido nodular, classe Si-Mo 4.1. (a) Morfologia da grafita sem ataque. Ampliação: 100X e (b) Estrutura da matriz com ataque. Ampliação: 100X.



Fonte: Autor (2017).

Devido à forma esferoidal da grafita, as propriedades desse material são principalmente dependentes da estrutura da matriz, e em menor grau do teor de carbono e silício. A grafita produzida comercialmente nem sempre são esferas perfeitas e, naturalmente, grandes degenerações de forma podem influenciar as propriedades mecânicas. A diferença entre as várias classes de ferro fundido nodular é devido à variação microestrutural da matriz (GUESSER, 2009; GOODRICH, 2003).

A matriz pode variar com a composição química, processamento e taxa de resfriamento. Todas as formas de matriz são obtidas através de um tratamento térmico ou através da adição de elementos de liga. Uma ampla faixa de propriedades mecânicas pode ser obtida através da variação da matriz, com valores superiores a 900 MPa com até 2% de alongamento para matrizes perlíticas e bainíticas (GOODRICH, 2003).

A composição química, o processamento do metal fundido, incluindo o tratamento de nodularização e inoculação, e a taxa de resfriamento têm efeito direto sobre as propriedades mecânicas, o que influencia no tipo de grafita e da estrutura da matriz que é formada para o ferro fundido nodular. O ferro fundido nodular tem

menor sensibilidade ao efeito da seção (espessura de parede) do que outros tipos de ferros fundidos. No entanto, seções muito finas podem se solidificar segundo o sistema metaestável, com formação de carbonetos, a menos que as precauções de alimentação, temperatura e inoculação do metal líquido sejam tomadas. A matriz e a estrutura da grafita podem ser afetadas em seções espessas devido ao resfriamento lento (GOODRICH, 2003).

As típicas aplicações do ferro fundido nodular incluem eixos de comando de válvulas, girabrequins, coletores de escape, carcaças de turbinas e turbocompressores, peças de suspensão e de sistemas de transmissão, dentre outras (GUESSER, 2009).

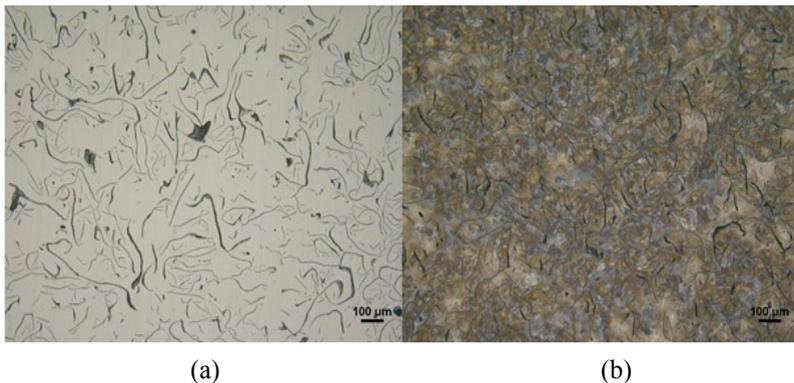
2.2.2 Ferro Fundido Cinzento

Os ferros fundidos cinzentos são essencialmente ligas Fe-C-Si, caracterizadas por apresentarem microestrutura bruta de fusão constituída de veios de grafita em uma matriz predominantemente perlítica. Estes tipos de ferros fundidos apresentam uma grande variedade de propriedades mecânicas, através de variação de composição química, inoculação, tratamento térmico e condições de resfriamento (GUESSER, 2009).

Sua denominação está associada à coloração acinzentada e escura que esse tipo de material apresenta em uma superfície fraturada. A grafita por sua vez, apresenta-se como partículas isoladas, porém configura-se na forma de um esqueleto em cada célula eutética (ELLIOT, 1998).

As propriedades mecânico-físicas são determinadas pelo tamanho, forma, distribuição e quantidade de grafita lamelar. Estas características são determinadas tanto pela composição química quanto pelas taxas de resfriamento (GOODRICH, 2003; ELLIOTT, 1998). A Figura 4 evidencia um exemplo de ferro fundido cinzento, onde a grafita se apresenta na forma de lamelas.

Figura 4 - Microestrutura do ferro fundido cinzento, classe FC-300. (a) Morfologia da grafita sem ataque. Ampliação: 100X e (b) Estrutura da matriz com ataque. Ampliação: 100X.



Fonte: Autor (2017).

O ferro fundido cinzento tem ductilidade quase desprezível devido à presença das lamelas de grafita. Por outro lado tem capacidade excelente de absorver energia de vibração. A grafita possui baixa resistência mecânica e dureza, ocasionando a diminuição das propriedades da matriz metálica. O formato agulhado age como um ponto concentrador de tensões. Em termos de engenharia, sua capacidade de amortecimento é alta. Este tipo de grafita atua como lubrificante natural na usinagem, garantindo boa usinabilidade. A forma da grafita aumenta a estabilidade dimensional sobre o aquecimento, como em tambores de freios, blocos e cabeçotes de motor (GUESSER, 2009; WESSÉN e EVENSSON, 2004).

A maior parte do carbono está presente na forma de grafita, seu aumento em quantidade na estrutura diminui o limite de resistência e a dureza do material, porém aumenta outras características desejáveis citadas anteriormente. A adição de silício é necessária para promover a precipitação da grafita e para reduzir a incidência de coquilhamento (formação de cementita Fe_3C , fase de alta dureza e que tem profundo efeito sobre a usinabilidade) em seções finas. O silício contribui também para melhorar as propriedades mecânicas e aumentar a resistência em temperaturas

elevadas (GOODRICH, 2003).

A espessura da peça e conseqüentemente as taxas de resfriamento são fatores que devem ser observados. A solidificação mais lenta produz maiores tamanhos e comprimentos de grafita, reduzindo as propriedades de resistência. As longas lamelas tornam-se propagadores mais acentuados de trincas. As peças fundidas com consideráveis diferenças de espessura podem apresentar variações de tamanho de grafita e dureza da matriz entre as seções, produzindo diferentes propriedades mecânicas (GOODRICH, 2003).

A determinação da composição química do ferro fundido cinzento que será utilizado em um determinado componente deve observar três requisitos estruturais básicos: a forma e a distribuição da grafita, a estrutura dos carbonetos livre e a matriz exigida.

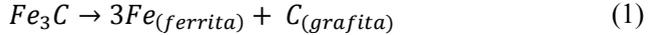
As aplicações mais tradicionais dos ferros cinzentos são discos e tambores de freios, cabeçotes de motor, moldes para indústria de vidro e cilindro de camisas automotivas, devido à elevada condutividade térmica. Devido a capacidade de amortecimento às vibrações, são bastante utilizados em bases de máquinas. O uso acentuado em blocos de motor e carcaças é motivado pela sua resistência à fadiga (GUESSER, 2009).

2.3 COMPONENTES ESTRUTURAIS

Uma vez que a velocidade de resfriamento e a composição química determinarão a forma, distribuição e quantidade de grafita, ferrita, cementita, perlita, ledeburita e steadita presentes no ferro fundido, é importante conhecer os componentes estruturais que serão formados, a fim de prever as propriedades mecânicas do material.

As propriedades mecânicas dos ferros fundidos são dependentes de sua microestrutura. Esta se forma a partir de duas etapas distintas: (i) primeiramente, ocorre à formação da grafita durante a solidificação, e (ii) o desenvolvimento da matriz ocorre na transformação no estado sólido. O formato adquirido pela estrutura da grafita é considerado o fator de maior importância na determinação de propriedades, uma vez que a sua morfologia não pode ser alterada significativamente após o seu desenvolvimento (WESSÉN e SVENSSON, 2004).

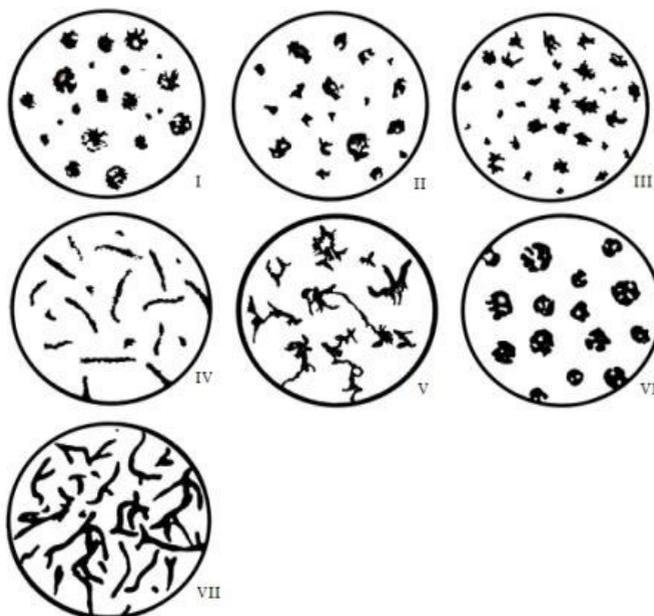
A grafita é o principal componente estrutural do ferro fundido sendo influenciada, principalmente, pelo carbono e silício. O carbono determina a quantidade de grafita que pode formar, já o silício, é essencial para a decomposição da cementita em ferrita, conforme Equação 1.



A Equação 1 representa a formação da grafita e da ferrita em ferro fundido a partir da decomposição da cementita, devido ao carboneto de ferro Fe_3C não ser estável, somente metaestável. Sua instabilidade é acentuada pela adição de silício e prolongada exposição a temperaturas elevadas.

A diferença da morfologia da grafita é um dos fatores mais importantes na caracterização entre as propriedades dos ferros fundidos. A melhor forma de compreender os ferros fundidos é estudar a grafita, e como esta interage com a sua matriz, para avaliar as propriedades e suas correlações. As várias formas da grafita nos ferros fundidos são classificadas em sete tipos segundo ASTM A 247, conforme apresentado na Figura 5 (GOODRICH, 2003).

Figura 5 - Tipos de grafitas estabelecidos pela norma ASTM A247. Tipo I e II – grafita nodular, III – maleável, IV – vermicular, V – sem definição, VI – grafita explodida e VII – grafita lamelar.



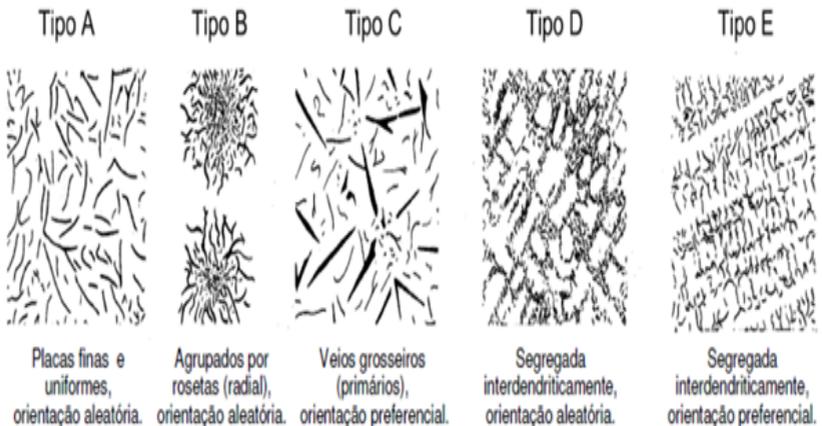
Fonte: Goodrich (2017).

A grafita, devido à sua condição estrutural, possui resistência mecânica muito baixa, e a forma com que se precipita influi diretamente nas propriedades mecânicas e físicas do ferro fundido, pois essa pode ser entendida como uma descontinuidade da matriz, a qual age como concentrador de tensões. As formas esféricas, ou próximas, apresentam um menor efeito sobre esse fator, ao contrário da grafita lamelar que possui a forma próxima à de agulhas. Contudo, outras propriedades são influenciadas positivamente por essa forma agulhada, como a condutividade térmica, amortecimento de vibrações e usinabilidade (GUESSER, 2009; STEFANESCU, 1988).

A grafita lamelar é classificada de acordo com a sua

morfologia, conforme apresentado na Figura 6, sendo a grafita tipo “C” uma grafita primária e que caracteriza uma liga hipertética. Já as grafitas tipo “A”, “B”, “D” e “E” são grafitas eutéticas. A grafita tipo “A” é a mais distribuída e a mais uniforme, logo a mais homogênea. Na grafita tipo “B”, observa-se que no núcleo há grafita fina e pequena e ao seu redor uma grafita maior, logo uma distribuição homogênea. Na grafita tipo “D”, é composta de uma estrutura com lamelas de grafita finas, com pequenos espaçamentos interlamelares, orientadas aleatoriamente e já a grafita do tipo “E”, é característica de ferros fundidos fortemente hipoeutéticos, que apresentam grande super-resfriamento para a solidificação, caracterizado por lamelas finas e orientado entre os braços da dendrita (LOPER; HEINE; CHAUDARI, 1974).

Figura 6 - Classificação da grafita em ferros fundidos cinzentos. Ampliação: 100X.



Fonte: Adaptado de ASTM A247 (2006).

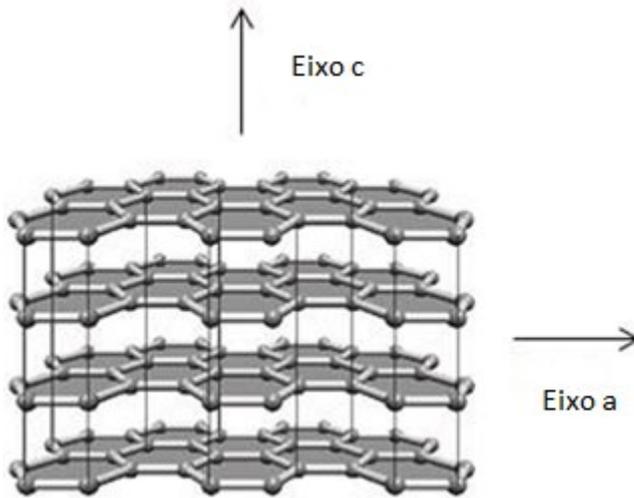
Um das principais características das grafitas de super-resfriamento (tipos “D” e “E”) são a de apresentar lamelas finas e muito ramificadas, que acabam expondo as extremidades do plano basal da grafita. Nestas regiões pode ocorrer a deposição preferencial do carbono durante a reação eutetóide, promovendo a formação de ferrita na microestrutura (CABEZAS; FUOCO;

GOLDENSTEIN, 2001).

A microestrutura apresentada pela matriz dos ferros fundidos é similar à dos aços, porém apresenta a presença de partículas de grafitas. Alguns constituintes estruturais dos ferros fundidos são apresentados a seguir:

- (i) **Ferrita** é a solução sólida do carbono em ferro alfa, de estrutura CCC;
- (ii) **Cementita** é o carboneto de ferro (Fe_3C), de estrutura ortorrômbica e de alta dureza;
- (iii) **Perlita** é a estrutura formada por ferrita e cementita em forma laminar;
- (iv) **Austenita** é uma solução sólida de carbono em ferro gama. Somente é estável em temperaturas superiores a $723\text{ }^\circ\text{C}$, desdobrando-se por reação eutetóide, a temperaturas inferiores, em ferrita e cementita.
- (v) **Grafita** é a forma mais estável do carbono sob condições padrão. A estrutura é representada na Figura 7, conforme abordado anteriormente, o ferro fundido pode ser classificado em três tipos: lamelar, esferoidal e vermicular. No ferro fundido de grafita lamelar, a direção do crescimento dominante da grafita ocorre ao longo de um eixo a e a condutividade térmica é alta. No ferro fundido de grafita vermicular, não há nenhuma direção de crescimento preferencial. No ferro fundido de grafita esferoidal, o crescimento da grafita ocorre de forma radial ao longo do eixo c e a condutividade térmica é baixa (HOLMGREN, 2005).

Figura 7 - Estrutura hexagonal da grafita mostrando possíveis direções de crescimento no eixo a e c.



Fonte: Adaptado de HOLMGREN (2005).

Os átomos de carbono são ligados por uma ligação química covalente aos três átomos adjacentes, enquanto as monocamadas de carbono estão ligadas por forças fracas de Van der Waals de longa distância (WILLIAMS; MORRIS; BALL, 1997).

A estrutura da matriz se desenvolve como um resultado da transformação da austenita durante o resfriamento. As estruturas que se formam dependem da composição da austenita, a forma, tamanho, distribuição do excesso de carbono (grafita ou carboneto) e a taxa de resfriamento através da região de temperatura crítica. Essa estrutura tem grande influência sobre as propriedades mecânicas, como tensão de escoamento, limite de resistência e deformação (GUESSER, 2009; GUZIK, 2010).

Um número de processos térmicos tem sido desenvolvido para modificar a estrutura da matriz e assim garantir melhores propriedades.

2.4 PROPRIEDADES FÍSICAS

As propriedades físicas dos ferros fundidos, e também as propriedades mecânicas, são dependentes da forma com que o carbono se precipita e da estrutura da matriz. A precipitação do carbono durante a reação eutética não é o fator de maior influência na resistência mecânica, mas é responsável por algumas propriedades específicas que não são encontradas nas demais ligas ferrosas. As propriedades mecânicas são fortemente influenciadas pela estrutura apresentada pela matriz, deste modo são frequentemente descritas em função dessas (GUESSER, 2009; ELLIOTT, 1998).

As propriedades físicas são caracterizadas pelo estado do sistema, no qual as mudanças nessas podem ser usadas para descrever suas transformações ou evoluções entre os seus estados momentâneos. Dentre essas propriedades se podem citar: densidade, expansão e condutividade térmica, propriedades elétricas e magnéticas e propriedades elásticas e acústicas (CALLISTER JR, 2007; GUTHRIE E JONAS, 1990).

A densidade é uma importante propriedade diferencial para os ferros fundidos, pois esta propriedade é menor que a dos aços, resultando em substituição de peças de aço forjado, reduzindo o peso do componente. A densidade típica do aço é de aproximadamente $7,88 \text{ g/cm}^3$ (CALLISTER, 2007). A densidade de um ferro fundido depende da quantidade relativa de microconstituintes presentes (GUESSER, 2009). A densidade para os ferros fundidos nodulares pode variar entre $7,1$ a $7,3 \text{ g/cm}^3$ (ISO 1083, 2004) e de $7,0$ a $7,3 \text{ g/cm}^3$ para os ferros fundidos cinzentos (ISO 185/2005). A densidade pode variar com a composição química do material e apresenta uma relação com o limite de resistência mecânica à tração. A densidade ainda diminui com o aumento da temperatura, devido à expansão térmica e devido a transformações que podem acontecer. A precipitação da grafita que ocorre em tratamentos térmicos pode reduzir a densidade (PALMER, 1987).

Diversos são os estudos para a avaliação dessas propriedades. Nessas abordagens os ferros fundidos passam a ser tratados como materiais compostos, a fim de melhor caracterizar e modelar suas propriedades. Contudo esse procedimento torna-se bastante complexo, principalmente quando se trata dos ferros fundidos cinzentos. Como a ampla faixa de propriedades existentes

é decorrente da variedade morfológica da grafita e da maneira com que essa se precipita, isso interfere diretamente nesse processamento matemático (WESSÉN e SVENSSON, 2004; COOPER, ELLIOT e YOUNG, 2004).

A influência da morfologia de grafita sobre as propriedades mecânicas e térmicas, bem como melhores métodos de avaliação, têm sido amplamente estudados, principalmente referente a ferros fundidos. Os primeiros trabalhos são da década de 1950, serão destacados os trabalhos que buscam, não somente, compreender a interação entre a morfologia da grafita e matriz, mas também, analisá-los através de ensaios não destrutivos para o estudo das propriedades mecânicas. Após esse período, outras pesquisas tentaram mensurar as propriedades mecânicas através de ensaios não destrutivos, onde a maioria utilizou o método de ultrassom para a caracterização do módulo de elasticidade. A técnica de ressonância acústica ou excitação por impulso vem sendo utilizada nas últimas décadas para determinação das propriedades elásticas e, principalmente, na detecção de descontinuidades e variações de grafita em peças fundidas.

2.5 MÓDULO DE ELASTICIDADE

As propriedades elásticas mais usuais são o módulo de elasticidade (E), de cisalhamento (G) e o coeficiente de Poisson (ν), que mede a interação entre esses parâmetros, para um material homogêneo e isotrópico (CALLISTER JR, 2007).

O módulo de elasticidade está diretamente ligado à energia de separação dos átomos, sendo uma propriedade intrínseca do material e essa condição remete ao tipo de ligação química existente em cada material. Dessa forma, é considerado parâmetro fundamental de engenharia, processo e aplicação dos materiais, pois outras propriedades podem ser descritas através desta (LORD e MORRELL, 2006).

A quantidade e a morfologia da grafita controlam em grande parte as propriedades resultantes do ferro fundido. O estudo do módulo de elasticidade permite observar sua dependência à morfologia da grafita, de modo a ter seu comportamento alterado conforme o arredondamento da grafita (LIKHITE, PESHWE e PATHAK, 2008).

O módulo de elasticidade, tanto para os ferros fundidos nodular ou cinzento, é dependente do tanto do volume de grafita quanto da morfologia. Esta afeta diretamente o comportamento elástico do material, pois nesse caso a curva tensão-deformação (ensaio mecânico de tração) não apresenta linearidade da região elástica, indicando que a deformação plástica ocorre simultaneamente (GUESSER, 2009).

Os ferros fundidos nodulares apresentam uma relação tensão-deformação aproximadamente linear, diferentemente do ferro fundido cinzento. Deste modo, comumente aplica-se o método tradicional de avaliação do módulo de elasticidade, isto é, pela inclinação da reta na região elástica (GUESSER, 2009). O módulo de elasticidade é influenciado não apenas pela quantidade de grafita, mas também pela perfeição dos nódulos. Os tratamentos térmicos também influenciam na interação da grafita com a matriz, o que provoca uma redução no módulo (GUESSER, 2009).

O ferro fundido nodular apresenta uma relação de tensão-deformação semelhante a do aço, mas que é limitada pelo aparecimento gradual de deformações plásticas. O módulo de elasticidade para o ferro fundido nodular varia de 162 a 170 GPa (RIO TINTO IRON & TITANIUM, INC, 1980).

Na Norma ISO 1083 (2004), que trata da classificação dos ferros fundidos nodulares, a especificação dos valores de módulo de elasticidade e do coeficiente de Poisson é apresentada para diversas classes de ferro fundido nodular com variação de matriz metálica, conforme apresentado na Tabela 1.

Tabela 1 - Módulo de elasticidade para diferentes classes de ferro fundido nodular.

Classe (ISO 1803/JS)	Matriz	Módulo de Elasticidade (GPa)	Coef. Poisson
350-22	Ferrítica	169	0,275
400-18	Ferrítica	169	0,275
450-10	Ferrítica	169	0,275
500-7	Ferrítica/Perlítica	169	0,275
550-5	Ferrítica/Perlítica	172	0,275
600-3	Ferrítica/Perlítica	174	0,275
700-2	Perlítica	176	0,275
800-2	Perlítica ou Martensita Revenida	176	0,275
900-2	Martensita Revenida	176	0,275

Fonte: Adaptação de ISO 1083 (2004).

De acordo com a Tabela 1, são usuais valores entre 169 GPa (classes ferríticas) e 176 GPa (classes perlíticas), ou ainda de 160 a 180 GPa (BCIRA, 1974; HACHENBERG et al, 1988).

Para os ferros fundidos cinzentos, a morfologia típica da grafita reduz seu módulo de elasticidade para valores abaixo dos aços com matrizes similares, causada pela interrupção da matriz devido a presença de grafita lamelar (BCIRA, 1974). A relação entre tensão e deformação para os ferros fundidos cinzentos não é constante, devido à interrupção da grafita na matriz (LIKHITE, PESHWE e PATHAK, 2008). A histerese associada, juntamente com o comportamento não linear, é causada em parte pela energia absorvida pela fricção entre as partículas de grafita e a matriz, assim como pela microplasticidade nas redondezas das partículas de grafita (GUESSER, 2009; GOODRICH, 2003).

O módulo de elasticidade pode ser afetado pela estrutura, composição e processamento do ferro cinzento. O aumento do carbono equivalente torna a grafita mais grosseira e com maior comprimento, reduzindo as propriedades mecânicas. O módulo de elasticidade também decresce com o aumento da seção da peça (devido ao aumento do tamanho das partículas de grafita). É suscetível também aos efeitos dos elementos de liga na composição, assim como o limite de resistência à tração tende a ser aumentado (GUESSER, 2009).

Em ferros fundidos cinzentos o módulo de elasticidade aumenta com a diminuição do tamanho das partículas, o que é alcançado com o aumento de células eutéticas (CZIKEL e HUMMER, 1992).

A Norma ISO 185 (2005) apresenta, a título informativo, faixas de valores de módulo de elasticidade para cada classe de ferro fundido cinzento em barras de 30 mm de diâmetro, conforme mostrado na Tabela 2.

Tabela 2 - Valores de módulo de elasticidade para as classes de ferro fundido cinzento, barras com 30 mm de diâmetro.

Classe (ISO 1805/J L)	Matriz	Módulo de Elasticidade (GPa)	Tensão de Escoamento (MPa)	Coef. Poisson
150	Ferrítica/ Perlítica	78 - 103	150 - 250	0,26
200	Perlítica	88 - 103	200 - 300	0,26
225	Perlítica	95 - 115	225 - 325	0,26
250	Perlítica	103 - 118	250 - 350	0,26
275	Perlítica	105 - 128	275 - 375	0,26
300	Perlítica	108 - 137	300 - 400	0,26
350	Perlítica	123 - 143	350 - 450	0,26

Fonte: Adaptação de ISO 185 (2005).

Ferros fundidos cinzentos com alto módulo de elasticidade são aplicados para estruturas onde a rigidez é importante e devem ser minimizadas deformações devido ao carregamento mecânico. Ferros fundidos com baixo módulo de elasticidade são preferidos para aplicações onde o amortecimento de vibrações é importante, onde existe solicitação de choque térmico severo (WALTON e OPAR, 1981).

É possível obter dados de boa qualidade do módulo de elasticidade a partir do ensaio de tração, mas isto requer geralmente um ensaio separado e dedicado à medição de alta qualidade, com o objetivo de avaliar apenas a parte inicial da curva tensão-deformação. O ensaio de tração é sensível às condições de fabricação dos corpos de prova e o modo de ajuste da máquina de ensaio (LORD e MORREL, 2006). Os métodos quase-estáticos são destrutivos, o que os torna desvantajosos, já que muitos dos materiais testados devem voltar às condições normais de serviço após a realização do ensaio. Além disso, a imprecisão das medidas é um fator que deve ser levado em consideração (COSSOLINO e PEREIRA, 2010).

Os métodos dinâmicos (ultrassom e ressonância), que são não-destrutivos, apresentam resultados mais precisos do que aqueles alcançados pelos métodos quase-estáticos, além de permitirem a investigação repetitiva do material e possibilidade de realizar testes em função da temperatura do material (COSSOLINO e PEREIRA, 2010).

Os métodos dinâmicos, além de caracterizar propriedades elásticas, são utilizados em larga escala para a detecção de defeitos do material e para realizar medidas comparativas, sendo particularmente sensível a presença de trincas, microtrincas e variações da morfologia de grafita na estrutura (COSSOLINO e PEREIRA, 2010).

A técnica utilizada no presente estudo será baseada na Norma ASTM E 1876 (2002) que abrange a determinação dos módulos elásticos dinâmicos de materiais elásticos pelo método de excitação por impulso. A formulação proposta padroniza os procedimentos experimentais necessários para a determinação do módulo de elasticidade dinâmico, pela medição das frequências fundamentais longitudinal dos corpos de prova. O ensaio consiste basicamente na utilização de um excitador, um sensor e um analisador digital de sinais.

2.6 FREQUÊNCIA DE RESSONÂNCIA

A Técnica de Excitação por Impulso é um ensaio não destrutivo para a determinação dos módulos de elasticidade dinâmicos e do amortecimento de materiais através das frequências naturais de vibração. O procedimento de caracterização de materiais empregando a Técnica de Excitação por Impulso consiste em excitar o corpo de prova com um leve impulso mecânico e em calcular os módulos elásticos e o amortecimento a partir das frequências (RIO TINTO IRON & TITANIUM, INC, 1980).

Essa técnica também é conhecida pelo método da frequência de ressonância, que possui como característica fundamental a medição das frequências naturais de vibração, obtidas através da técnica de excitação por onda e por impulso (MAYNARD, 1996).

O ensaio de excitação por impulso é baseada na Norma ASTM E1876 (2002). O método descrito na norma abrange a determinação das propriedades elásticas a temperatura ambiente. O módulo de elasticidade pode ser determinado através das frequências de ressonância no modo flexão ou longitudinal de vibração. O módulo de cisalhamento ou rigidez pode ser obtido através dos modos de vibração torcionais. O coeficiente de Poisson é calculado através dos módulos de elasticidade e de cisalhamento.

As seções seguintes apresentam os conceitos básicos de vibração para compreensão e aplicação do método, bem como a descrição e a interação com as propriedades físicas.

2.6.1 Modos de Vibração

O princípio para a realização das medições consiste em calcular os módulos elásticos a partir das frequências naturais de vibração do corpo de prova e de seus parâmetros geométricos. A metodologia pode ser dividida em duas fases: a primeira consiste da excitação, detecção e obtenção das frequências de ressonância, e a segunda, na aplicação dos cálculos e dos procedimentos computacionais para determinação dos módulos elásticos (COSSOLINO e PEREIRA, 2010).

A determinação dos modos depende de como e onde o corpo de prova é suportado, e o local em que a vibração é excitada.

Os modos de vibração são controlados por diferentes condições, sendo que a vibração longitudinal, flexional e torcional são aplicadas para determinação dos módulos elásticos (LORD e MORREL, 2006).

2.6.2 Vibração Longitudinal de Barras

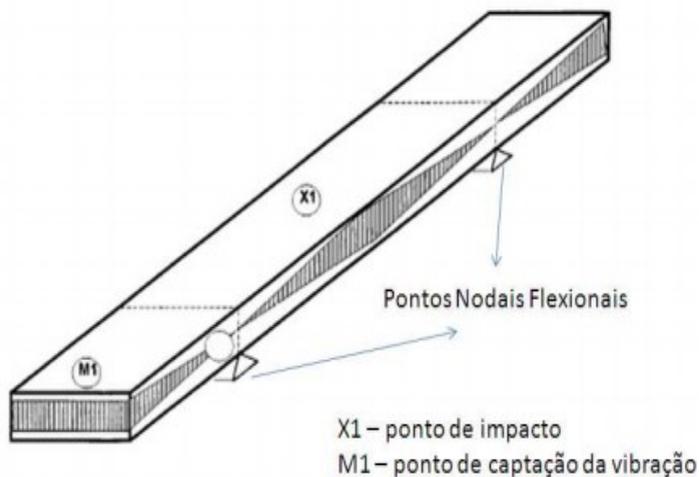
As ondas longitudinais são aquelas em que a vibração ocorre no mesmo sentido do movimento das ondas. As ondas longitudinais são recomendadas para barras de seção quadrada ou circular, devido à maior precisão na determinação do módulo de elasticidade. Caso a seção se afaste muito da geometria quadrada, os erros envolvidos no cálculo das propriedades elásticas podem ser grandes. Neste caso, utiliza-se a vibração flexional, a qual permite uma maior precisão de dados (COSSOLINO e PEREIRA, 2012; LORD e MORREL, 2006).

2.6.3 Vibração Flexional de Barras

As ondas de flexão são aquelas que vibram no sentido perpendicular ao de propagação. É o modo mais complexo dos três modos, pois leva em consideração a razão existente entre o comprimento e a seção da amostra. No caso de barras delgadas, é mais fácil excitar a vibração flexional do que a vibração longitudinal. Sendo assim, a vibração flexional é a mais recomendada na determinação do módulo de elasticidade de barras delgadas (LORD e MORREL, 2012).

Ao longo do comprimento de uma barra apoiada livremente há uma série de nós (ponto de amplitude zero, interferência destrutiva) e anti-nós ou ventres (máxima de amplitude, interferência construtiva). Na frequência fundamental (frequência de ressonância) os pontos nodais estão localizados a $0,224L$ de cada extremidade, com os anti-nós no centro e em cada extremidade, sendo L o comprimento da barra, como se observa na Figura 8 (COSSOLINO E PEREIRA, 2010).

Figura 8 - Excitação de barra delgada para medição da frequência flexional.



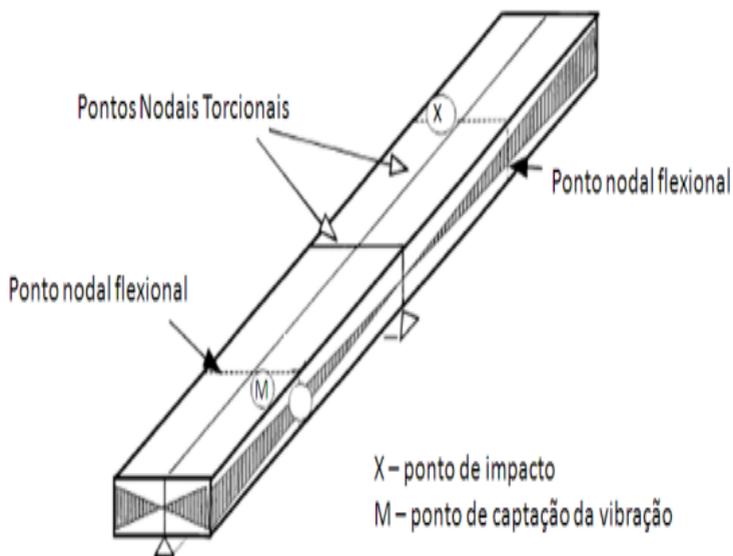
Fonte: Adaptado de ASTM E1876 (2002).

As linhas nodais ou os pontos mínimos de amplitude se encontram nas extremidades e os pontos de máxima amplitude no centro da barra e nas suas extremidades. Dessa forma, verifica-se que o modo fundamental flexional surge durante um impacto em que a barra esteja apoiada em seus pontos nodais e que o mesmo seja aplicado na posição de ventre (centro).

2.6.4 Vibração Torcional de Barras

O modo de vibração torcional permite calcular o modo de cisalhamento e o coeficiente de Poisson. Para a obtenção das frequências torcionais o impacto deve ocorrer fora do centro da barra, onde existe um ponto nodal. Essa condição está ilustrada na Figura 9 (COSSOLINO e PEREIRA, 2012).

Figura 9 - Excitação de barra delgada para medição da frequência torcional.



Fonte: Adaptado de ASTM E1876 (2002)

A Figura 9 apresenta o esquema onde deve ser posicionado o corpo de prova e os locais de excitação e de captação desse tipo de vibração. Observa-se que o nó para o modo fundamental de vibração torcional está localizado a $\frac{1}{2} L$ das extremidades, sendo L o comprimento da barra (COSSOLINO e PEREIRA, 2010).

2.6.5 Propriedades Elásticas Segundo a Norma ASTM E 1876

Há diferentes modelos matemáticos para cada tipo de excitação aplicada ao corpo de prova. Os modelos utilizados no presente estudo estão descritos a seguir, segundo a norma ASTM E-1876 (2002).

A obtenção do módulo de elasticidade pelo método flexional para barras retangulares pode ser obtido através da Equação 2:

$$E = 0,9465 \left(\frac{mf_f^2}{w} \right) \left(\frac{L^3}{t^3} \right) T_1 \quad (2)$$

Em que E é o módulo de elasticidade (GPa), m é a massa do corpo de prova (g), f_f é a frequência (Hz), w é a largura (mm), L é o comprimento (mm), e t é a espessura (mm). O parâmetro T_1 é um fator de correção para o modo fundamental flexional dado por:

$$T_1 = 1 + 6,585 (1 + 0,0752\nu + 0,8109\nu^2) \left(\frac{t}{L} \right)^2 - 0,868 \left(\frac{t}{L} \right)^4 - \left[8,340 \frac{(1 + 0,2023\mu + 2,173\nu^2) \left(\frac{t}{L} \right)^4}{1,000 + 6,338(1 + 0,1408\nu + 1,536\nu^2) \left(\frac{t}{L} \right)^2} \right] \quad (3)$$

Em que ν é o coeficiente de Poisson. Dependendo das dimensões dos corpos de prova, têm-se as seguintes simplificações:

a) Se $L/t \geq 20$, o fator de correção T_1 da Equação 3 pode ser simplificada para:

$$T_1 = \left[1,000 + 6,585 \left(\frac{t}{L} \right)^2 \right] \quad (4)$$

b) Se $L/t < 20$ e o coeficiente de Poisson é conhecida, então T_1 pode ser calculado diretamente da Equação 3.

c) Se $L/t < 20$ e o coeficiente de Poisson não é conhecido,

então um processo iterativo deve ser usado para calcular o coeficiente de Poisson, baseando nos módulos de elasticidade e cisalhamento experimentais (explicado mais a frente).

A obtenção do módulo de cisalhamento pode ser obtido pelo método torcional para barras retangulares, através da Equação 5.

$$G = \frac{4Lmf_t^2}{wt} [B/(1 + A)] \quad (5)$$

Em que G é o módulo de cisalhamento (GPa), f_t é a frequência de ressonância fundamental torcional (Hz) e A e B são fatores dependentes da relação entre largura e espessura da amostra dados por:

$$B = \left[\frac{\frac{w}{t} + \frac{t}{w}}{4 \left(\frac{t}{w}\right) - 2,52 \left(\frac{t}{w}\right)^2 + 0,21 \left(\frac{t}{w}\right)^6} \right] \quad (6)$$

e

$$A = \left[\frac{0,5062 - 0,8776 \left(\frac{w}{t}\right) + 0,3504 \left(\frac{w}{t}\right)^2 - 0,0078 \left(\frac{w}{t}\right)^3}{12,03 \left(\frac{w}{t}\right) + 9,892 \left(\frac{w}{t}\right)^2} \right] \quad (7)$$

Independente da metodologia e na condição do material isotrópico, o coeficiente de Poisson se relaciona com E e G por:

$$\nu = \left(\frac{E}{2G} \right) - 1 \quad (8)$$

Quando os módulos de elasticidade e de cisalhamento são determinados pelos métodos descritos anteriormente, ou seja, frequência de ressonância flexional e torcional respectivamente, o coeficiente de Poisson pode ser determinado pela Equação 8. De posse do valor teórico do coeficiente de Poisson (valor da literatura), o módulo de cisalhamento pode ser obtido indiretamente a partir do resultado experimental do módulo de elasticidade, admitindo-se isotropia.

3. MATERIAIS E MÉTODOS

Nesta seção será descrita a metodologia empregada no estudo experimental realizado para avaliação do efeito da morfologia da grafita e da matriz metálica nas propriedades elásticas dos ferros fundidos nodular e cinzento. Também será apresentado o desenvolvimento de uma ferramenta, baseada na propagação de erros, que permite uma avaliação da incerteza no modelo matemático do ensaio de frequência de ressonância a partir das equações matemáticas segundo a Norma ASTM E1876 (2002).

A primeira etapa do trabalho consiste em verificar a influência da morfologia da grafita sobre as propriedades físicas, a segunda caracteriza as condições microestruturais no estado bruto e no estado recozido e correlaciona a influência da variação da matriz sobre as propriedades físicas, e, por fim, o desenvolvimento de modelos matemáticos para a determinação da incerteza de propriedades elásticas no ensaio de frequência de ressonância.

3.1 PROCESSO DE PRODUÇÃO DO MATERIAL

Para extração das amostras de ferro fundido nodular e cinzento foram utilizadas barras produzidas pelo processo de fundição contínua, conforme Figura 10.

Figura 10 - Barra retangular produzida pelo processo de fundição contínua.



Fonte: Autor (2016).

O processo de fundição contínua consiste no vazamento do metal líquido em um forno alimentador, onde é montada uma coquilha de grafite refrigerada à água, que confere a forma e a dimensão desejada do perfil requerido. No momento em que o metal líquido entra em contato com a coquilha, inicia-se a formação de uma casca sólida. Quando essa casca alcança uma determinada resistência mecânica, o perfil é tracionado, mesmo com o núcleo da barra ainda em estado líquido. Na medida em que a barra percorre o comprimento da máquina, ocorre o processo de solidificação por completo.

Para a extração das amostras de ferro fundido nodular, foram produzidas barras da classe ASTM A536 classe 65-45-12, fundidas na dimensão quadrada de 470 mm. Trata-se de uma liga ferrítica-perlítica dessulfurada, oriunda de forno cubilô. Após processo de dessulfuração, o metal foi transferido para o forno de indução com capacidade de 8 toneladas para ajuste de composição e temperatura. O tratamento de nodularização foi realizado em panela do tipo tundish cover (panela de tratamento com formato cilíndrico

que possui um compartimento de posicionamento da liga de magnésio), com capacidade de 1000 kg, por meio de adição de 1,4% (em peso) de liga nodularizante (Fe-Si-Mg). Após o processo de nodularização, o metal foi inoculado durante a transferência para o forno alimentador, com adição de 0,8% (em peso) de Fe-Si-Ca granulado.

Para a obtenção das amostras de ferro fundido cinzento foram utilizadas barras da classe ASTM A48 classe 25, fundidas na dimensão retangular de 355,6 x 558,8 mm. Trata-se de liga base perlítica oriunda de forno cubilô. Após processo de fusão da carga metálica, o metal foi transferido para o forno de indução com capacidade de 8 toneladas para ajuste de composição e temperatura. Após as correções químicas, o metal líquido foi transferido através de uma panela com capacidade de 1000 kg para o forno alimentador. O metal foi inoculado durante a transferência para o forno alimentador, com adição de 1,0% (em peso) de Fe-Si-Ca granulado.

3.2 ANÁLISE QUÍMICA

A coleta de amostra do metal líquido foi realizada dentro do forno alimentador, adicionando uma pequena quantidade de metal líquido em uma concha de ferro fundido revestida de material refratário composto por zirconita (ligante utilizado: sílica coloidal, 30%). O material coletado nesta concha foi vazado em um molde metálico para obtenção das amostras para análise química. A análise química das amostras foi realizada por espectrometria de emissão óptica (equipamento ARL modelo 3460) da Tupy S.A.

3.3 OBTENÇÃO DAS AMOSTRAS

Para o ensaio de frequência de ressonância dos fundidos, foram utilizados corpos de prova de ferro nodular e cinzento, fornecidos pela Tupy S.A. A geometria utilizada para os corpos de prova foi retangular, de acordo com as recomendações da norma ASTM E1876. Foram extraídos 11 corpos de prova para cada tipo de material a partir de cinco barras produzidas por fundição

contínua, de cada material. Após a extração das amostras a partir das barras fundidas, as mesmas foram usinadas em uma fresadora com pastilhas de carbetto, utilizando baixa rotação e com fluido de arrefecimento, objetivando evitar possíveis modificações microestruturais. A Tabela 3 mostra a descrição das amostras.

Tabela 3 - Lista das amostras do estado bruto de fusão obtidas na parte experimental deste estudo.

Corrida	Material	Amostra Ressonância	Amostra Metalografia
1	Ferro Fundido Nodular	N1	
		N2	
		N3	MN1
		N4	MN2
		N5	MN3
		N6	MN4
		N7	MN5
		N8	MN6
		N9	MN7
		N10	MN8
		N11	
2	Ferro Fundido Cinzento	C1	
		C2	
		C3	MC1
		C4	MC2
		C5	MC3
		C6	MC4
		C7	MC5
		C8	MC6
		C9	MC7
		C10	MC8
		C11	

Fonte: Autor (2017).

As amostras metalográficas foram extraídas juntamente com os corpos de prova de excitação por impulso e analisou-se a seção transversal desses cortes. Foram analisadas 8 amostras de cada material. As regiões analisadas dos corpos de prova

compreenderam posições a meio raio da superfície e no núcleo.

3.4 TRATAMENTO TÉRMICO DE RECOZIMENTO

Com o objetivo de analisar a influência da microestrutura dos ferros fundidos nodular e cinzento sobre as propriedades físicas (densidade e propriedades elásticas), realizou-se um tratamento térmico visando à obtenção de uma microestrutura predominantemente ferrítica para ambos os materiais.

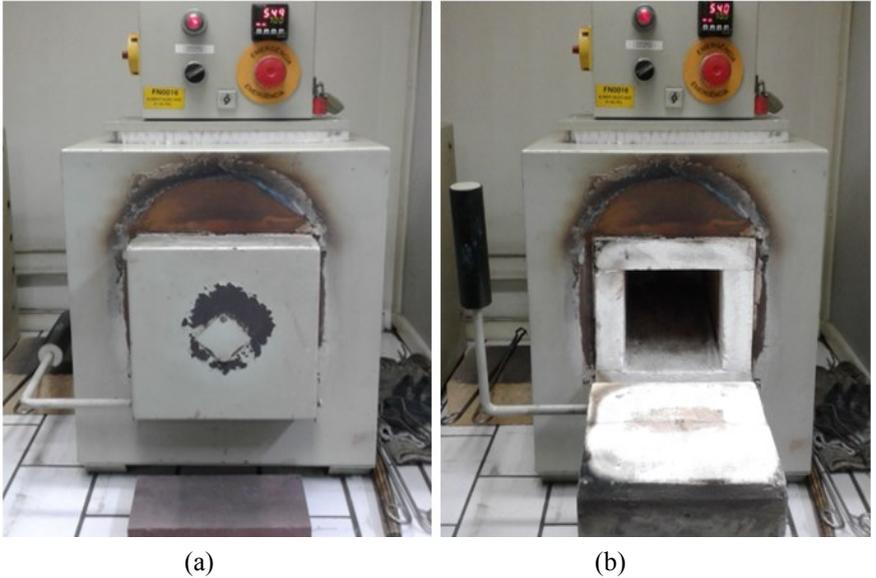
O tipo de tratamento térmico aplicado na transformação da matriz metálica foi o recozimento de ferritização subcrítico. Este tipo de tratamento visa obter uma matriz essencialmente ferrítica, quando isto não foi possível realizar na amostra bruta de fundição.

No recozimento subcrítico decompõe-se a cementita da perlita, obtendo-se ferrita e grafita, conforme Equação 1

Este ciclo térmico subcrítico é selecionado quando existe uma baixa quantidade de perlita a decompor, sendo usuais temperaturas de 700 a 780°C. O tempo de recozimento é estabelecido em função da composição química e da espessura da peça. O recozimento subcrítico pode ainda ser empregado para apenas esferoidizar a perlita, aumentando-se assim a ductilidade sem redução drástica da resistência mecânica (GUESSER, 2009).

No presente trabalho foi realizado o recozimento subcrítico em forno tipo Mufla, conforme Figura 11. As amostras utilizadas foram às mesmas amostras analisadas no estado bruto de fundição, após ensaios de frequência de ressonância e caracterização microestrutural.

Figura 11 - Forno tipo Mufla utilizado no tratamento térmico das amostras: (a) forno fechado durante aquecimento (b) forno aberto aguardando o carregamento das amostras.



Fonte: Autor (2017).

O tratamento térmico foi realizado a uma temperatura de 750°C por 7 horas para as amostras de ferro nodular, e a 750°C por 192 horas para as amostras de ferro cinzento, seguido de resfriamento lento ao ar, de modo a evitar a formação de perlita durante o resfriamento. O tempo total de tratamento térmico para o ferro fundido nodular foi determinado através de ciclos padronizados internamente na Tupy S.A. Para o ferro fundido cinzento, foram realizados diversos testes preliminares para determinar o tempo final, e dessa forma estabelecer um ciclo de tratamento térmico. As justificativas serão apresentadas na seção 4.2.2.

3.5 CARACTERIZAÇÃO MICROESTRUTURAL

A avaliação metalográfica foi realizada utilizando um microscópio ótico Nikon. Os corpos de prova foram seccionados na região de núcleo e a meio raio da superfície da barra. Os procedimentos para preparação das amostras seguem a Norma ABNT NBR13284 (1995). A avaliação metalográfica foi realizada de duas maneiras, a saber:

1. Avaliação da forma, degenerações e imperfeições da grafita e o nível de rechupes. Para o ferro fundido cinzento, analisou-se o tipo e área da grafita (%), além disso, para o ferro fundido nodular, avaliaram-se o grau de nodularização e o número de partículas de grafitas por unidade de área (pelo software Image-Pro Plus).
2. Avaliação microscópica da quantidade de ferrita e perlita das amostras através do ataque químico com nital 3%. Realizou-se a contagem de células eutéticas para o ferro fundido cinzento através do ataque químico com *Stead*.

Destaca-se que todo o processo de caracterização metalográfica realizou-se segundo a Norma alemã VDG P441 (1962), equivalente à Norma ISO 945-1 (2008).

Na análise de microscopia eletrônica de varredura (MEV) utilizou-se o microscópio Tescan modelo 51 ADD0007. Objetivou-se quantificar o refino da microestrutura e aspectos mais precisos da morfologia da grafita e matriz metálica. As amostras utilizadas para esta avaliação foram às mesmas da caracterização metalográfica por microscopia óptica. Para isso, foram feitas 5 fotos de regiões diferentes de cada amostra.

A identificação das fases cristalinas foi determinada por difração de raios x com ângulo rasante, utilizando um difratômetro Shimadzu modelo XRD-700, possibilitando a identificação das fases cristalinas presentes e os respectivos planos cristalográficos. Foi analisada uma amostra de cada tipo de ferro fundido e a identificação dos planos foi obtida através do banco de dados do próprio equipamento.

3.6 PARÂMETROS GEOMÉTRICOS E DENSIDADE

De modo a empregar a técnica de excitação por impulso, as amostras foram caracterizadas fisicamente através da determinação das dimensões, da massa e da densidade dos corpos de prova.

Para a determinação dos parâmetros geométricos, ou seja, do comprimento (L), largura (w) e espessura (t) foi utilizado um paquímetro digital da marca Mitutoyo com capacidade de medição de 400 mm e resolução de 0,02 mm. Para determinação da massa foi utilizada uma balança de precisão. A densidade foi calculada de posse dos valores médios dos parâmetros geométricos e da massa, utilizando a Equação 9.

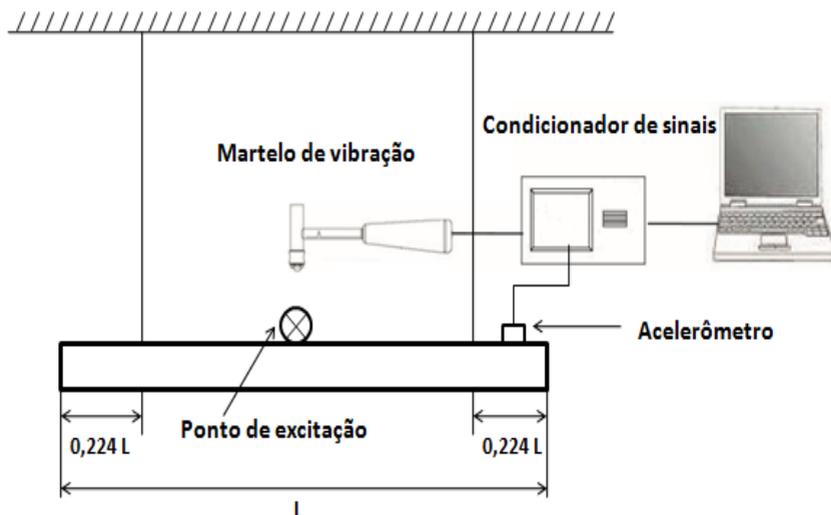
$$\rho = \frac{m}{V} = \frac{m}{L w t} \quad (9)$$

3.7 CARACTERIZAÇÃO MECÂNICA

O ensaio de frequência de ressonância foi realizado pelo método de excitação por impulso.

O aparato experimental utilizado para o ensaio é composto por três componentes: o suporte para as amostras, os componentes eletrônicos para captação da resposta acústica e o programa para análise de dados, ilustrados na Figura 12 (NUAWI et al, 2013).

Figura 12 - Componentes do aparato utilizado no sistema de medição para determinação da frequência de ressonância.



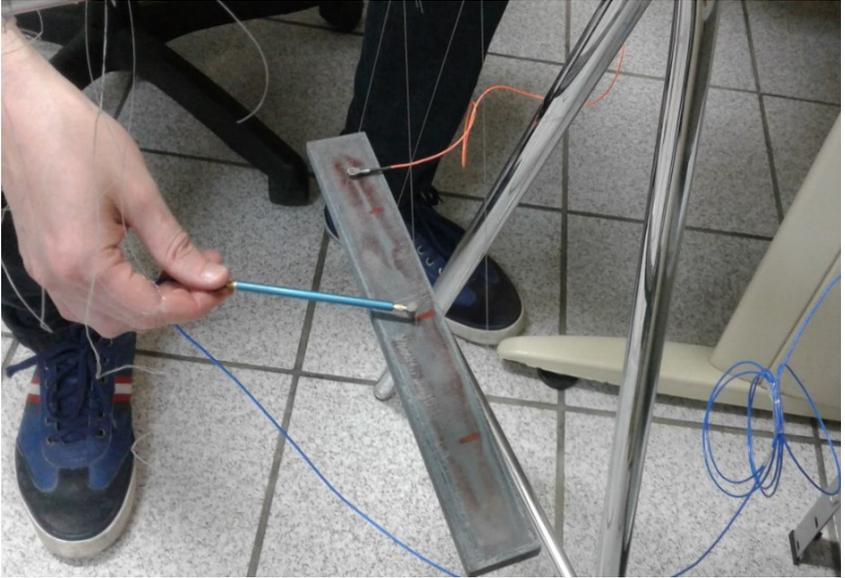
Fonte: Adaptado de NUAWI et al. (2013).

O suporte foi ajustado para aplicar as corretas condições de contorno necessárias para permitir que o corpo de prova vibre livremente, de acordo com o primeiro modo de vibração. O programa indica a posição para apoio dos corpos de prova, a uma distância de $0,224 L$, de acordo com a norma ASTM E1876 (2002). O ponto para a realização do impacto é dependente do tipo de vibração que deseja alcançar, como observado na Figura 11, no centro-do-corpo de prova, determinando dessa maneira a frequência flexional.

Sendo assim, no presente estudo utilizou-se somente a frequência de flexão para determinação do módulo de elasticidade. Somente a frequência de flexão foi empregada porque as condições de livre apoio não foram completamente satisfeitas, de modo que a frequênciatorcional era inferior e muito próxima ao segundo modo de vibração do corpo de prova.

A Figura 13 ilustra o ensaio de excitação por impulso no presente trabalho.

Figura 13 - Ilustração do ensaio de excitação por impulso evidenciando o posicionamento do acelerômetro, local da excitação e o posicionamento dos apoios no corpo de prova.



Fonte: Autor (2017).

As dimensões, massas e as frequências fundamentais flexionais ressonantes foram utilizadas para o cálculo do módulo de elasticidade dinâmico para as amostras de ferro fundido nodular e cinzento no estado bruto e tratado termicamente. Deste modo, como já mencionado, os corpos de prova foram devidamente apoiados e realizou-se o ensaio, com uma medição para cada amostra. Com base na Norma ASTM E1876 (2002), obteve-se o valor para o módulo de elasticidade.

O ensaio de frequência de ressonância foi repetido para as mesmas amostras após tratamento térmico de recozimento. Em função dos resultados obtidos, foi possível estudar a influência da morfologia e da matriz nas propriedades elásticas dos ferros fundidos nodular e cinzento, propondo uma análise baseada na caracterização dos materiais e de fatores que possam ter influenciado nas propriedades elásticas.

3.8 DESENVOLVIMENTO DE MODELO MATEMÁTICO PELA PROPAGAÇÃO DE ERROS

No presente estudo, a expressão do módulo de elasticidade foi obtida através da norma ASTM E 1876, com o objetivo de determinar o módulo de elasticidade dinâmico aplicando o ensaio de excitação por impulso.

Na metodologia convencional, basicamente os conceitos de estatística descritiva foram explorados (cálculos de média e desvio padrão), a partir da base de dados gerada pela técnica de excitação por impulso, entretanto não se tem o acesso a todas as variáveis que podem ser controladas (matematicamente) e aquelas que não podem ser controladas (com pequena variação residual).

Este fato pode ser minimizado através da construção de modelos matemáticos que relacionam as variáveis envolvidas no fenômeno (variáveis independentes da Equação 2), ou seja, estabelecendo uma relação funcional entre essas variáveis, através de uma função, de forma que se tenha uma aproximação razoável entre os valores observados e aqueles calculados pelo emprego da função (GUERRA; DONAIRE, 1991).

O cálculo do parâmetro variância é determinado a partir do desenvolvimento de todas as derivadas de primeira ordem. Dessa forma, a propagação de erros (ou incerteza) de uma função qualquer $f = f(x, y, z, \dots)$, para variáveis independentes, pode ser determinada por (VUOLO, 1996):

$$\delta f^2 = \left(\frac{\partial f}{\partial x}\right)^2 \delta x^2 + \left(\frac{\partial f}{\partial y}\right)^2 \delta y^2 + \left(\frac{\partial f}{\partial z}\right)^2 \delta z^2 + \dots \quad (10)$$

Em que δ é a incerteza, δf é a incerteza propagada da função e δx , δy e δz são os erros adotados para as variáveis x , y e z , respectivamente. A propagação de erros (Equação 10), será aplicada para o módulo de elasticidade dinâmico (Equação 2), para obter o modelo matemático que determina a incerteza desta propriedade. A principal vantagem é poder incluir os erros de todas as variáveis da Equação 2, assumindo distribuição gaussiana. A propagação de erros também será empregada na Equação 8, para obter o modelo matemático para incerteza do módulo de

cisalhamento.

4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Neste capítulo serão apresentados os resultados da caracterização química e física dos ferros fundidos nodular e cinzento, bem como a caracterização mecânica e o desenvolvimento do modelo matemático de propagação de erros a partir da técnica de excitação por impulso.

4.1 CARACTERIZAÇÃO QUÍMICA E FÍSICA

A seguir serão apresentados os resultados da avaliação química e a identificação dos planos cristalográficos dos materiais, bem como as dimensões das amostras e suas densidades.

4.1.1 Análise Química

A Tabela 4 apresenta os resultados da análise química via espectroscopia de emissão óptica, do lote de metal líquido (corrida) do ferro fundido nodular e cinzento. A carga metálica do ferro fundido nodular foi realizada com 35% de ferro gusa. Já a carga do ferro fundido cinzento consistiu de 40% de retorno de ferro fundido e 60% de sucata de aço.

Tabela 4 - Composição química dos ferros fundidos nodular (FFN) e cinzento (FFC), percentual em peso das amostras de ferro líquido do vazamento.

Elemento	Percentual em peso (%)	
	FFN	FFC
C	3,45	3,25
Si	2,84	2,66
Mn	0,18	0,27
S	0,007	0,077
P	0,041	0,052
Mg	0,044	0,002
Cu	0,03	0,408
Cr	0,05	0,104
Sb	0,001	0,057
Fe	93,36	93,12

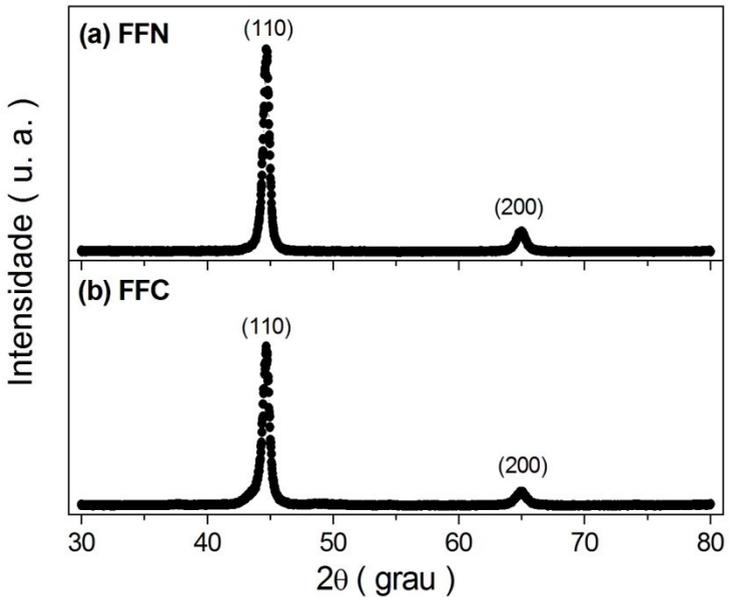
Fonte: Autor (2017).

Os resultados de composição química da Tabela 4 estão de acordo com as composições químicas praticadas para obtenção destas classes de materiais, conforme observado por diversos autores (ELLIOT, 1998; GOODRICH, 2003; GUESSER, 2009)

4.1.2 Difração de Raios X

A difração de raios X (DRX) foi realizada numa faixa angular de 30 a 80° mostrando somente os picos significativos em relação à escala do gráfico. A identificação das fases foi feita pelo banco de dados do equipamento. A Figura 14 mostra o resultado do DRX para a amostra bruta de fundição do ferro fundido nodular (FFN) e cinzento (FFC).

Figura 14 - DRX da amostra bruta de fusão com as fases identificadas pelo banco de dados do equipamento (a) Ferro fundido nodular (FFN) e (b) Ferro fundido cinzento (FFC).



Fonte: Autor (2017).

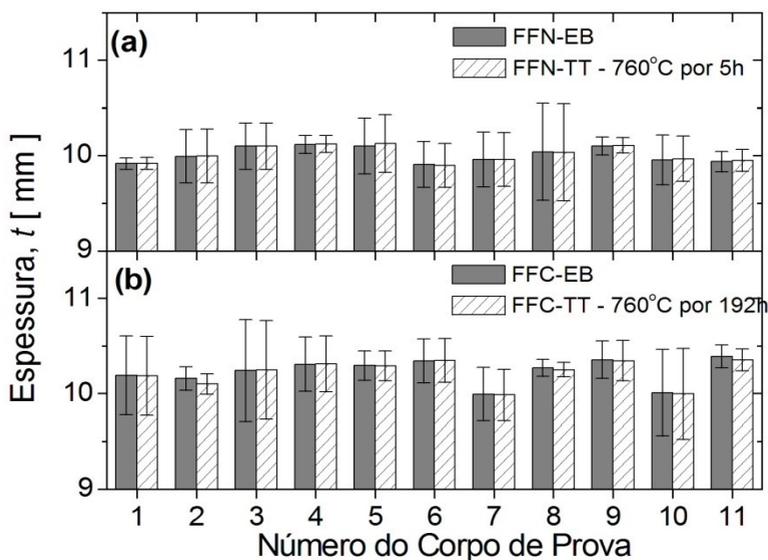
O ensaio de difração de raios X realizado nos corpos de prova do ferro fundido nodular e cinzento constatou-se como esperado, a identificação dos planos cristalográficos, utilizando a base de dados do equipamento (segundas fichas do JCPDS, *Joint Comittee for Powder Diffraction Standart*) apresentando reflexões cristalográficas conforme esperado para este material, de aproximadamente, 45° (110) e 65° (200) graus. A estrutura cristalina de ambos materiais é cúbica de corpo centrado (RODRIGUES, 2016).

4.1.3 Parâmetros geométricos e densidade

Com o objetivo de determinar a densidade (ρ) das ligas de

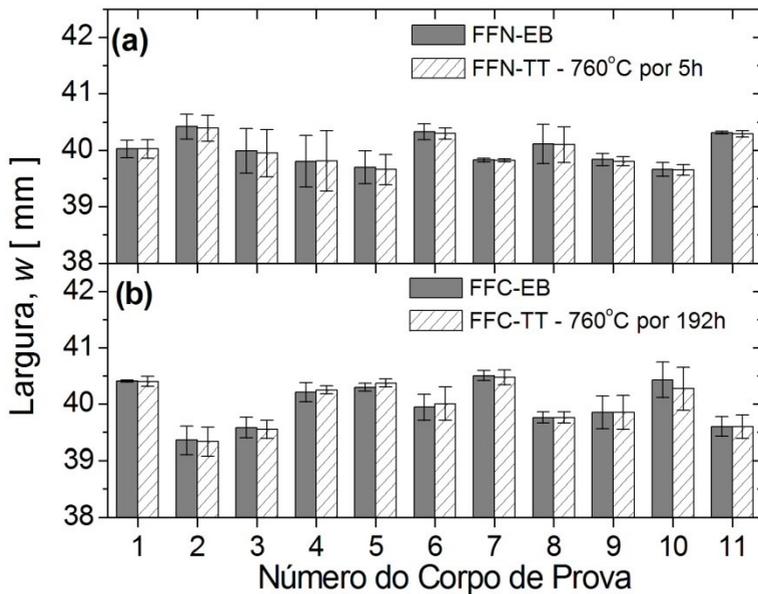
ferro fundido no estado bruto (EB) e tratado termicamente (TT) e os parâmetros geométricos para atendimento a Norma ASTM E 1876, foram realizadas medições nos corpos de prova utilizando um paquímetro digital, cujos valores obtidos são apresentados nas Figuras 15, 16 e 17. Os parâmetros geométricos t e w foram obtidos através da média de três medições e o comprimento (L) através da média de duas medições. Cada medição foi realizada em pontos padronizados dos corpos de prova, para verificar a uniformidade das amostras.

Figura 15 - Resultados das medições da espessura (t) dos corpos de prova no estado bruto (EB) e tratado termicamente (TT). a) Ferro fundido nodular (FFN) e b) Ferro fundido cinzento (FFC).



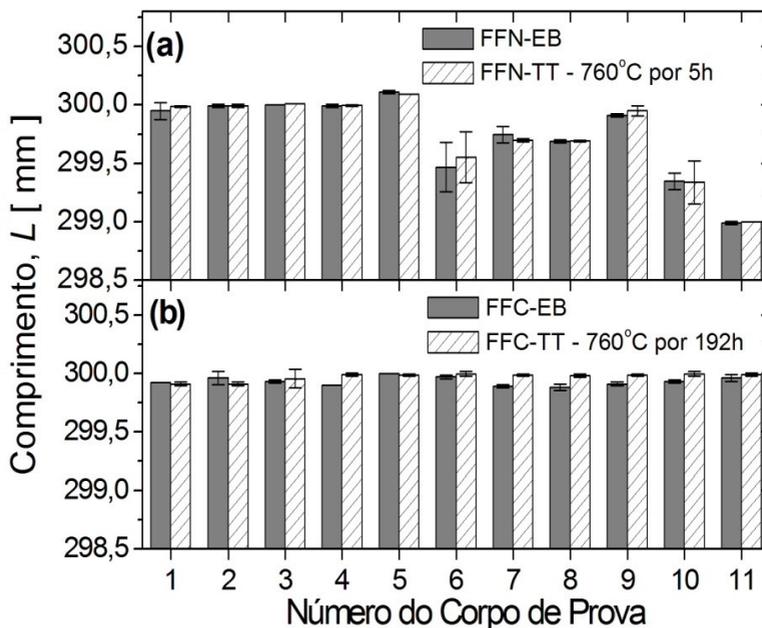
Fonte: Autor (2017).

Figura 16 - Resultados das medições da largura (w) dos corpos de prova no estado bruto (EB) e tratado termicamente (TT). a) Ferro fundido nodular (FFN) e b) Ferro fundido cinzento (FFC).



Fonte: Autor (2017).

Figura 17 - Resultados das medições do comprimento (L) dos corpos de prova no estado bruto (EB) e tratado termicamente (TT). a) Ferro fundido nodular (FFN), e b) Ferro fundido cinzento (FFC).



Fonte: Autor (2017).

A Tabela 5 apresenta as médias e os desvios padrões dos parâmetros geométricos dos corpos de prova para cada condição.

Tabela 5 - Resultados das dimensões médias dos corpos de prova (t , w e L), e os respectivos desvios padrões.

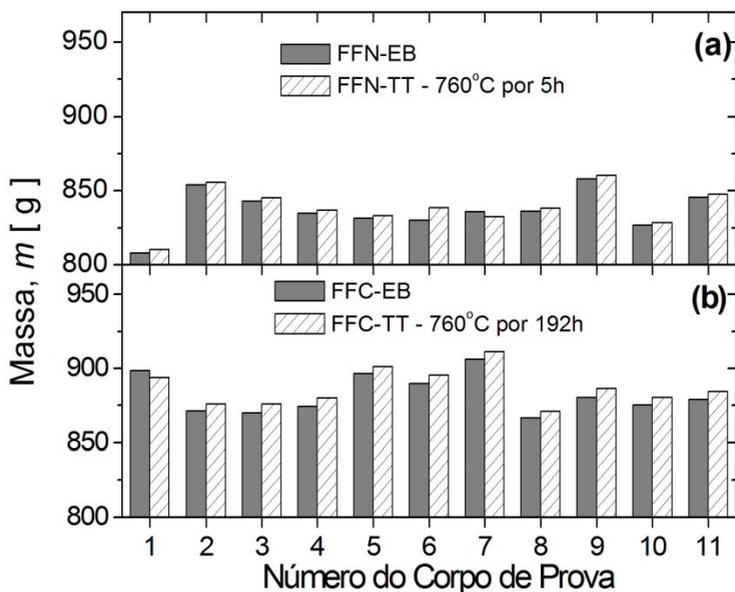
Material	t (mm)	w (mm)	L (mm)
FFN-EB	$10,01 \pm 0,08$	$40,00 \pm 0,26$	$299,76 \pm 0,34$
FFN-TT	$10,02 \pm 0,08$	$39,98 \pm 0,26$	$299,76 \pm 0,34$
FFC-EB	$10,23 \pm 0,13$	$39,99 \pm 0,40$	$299,93 \pm 0,04$
FFC-TT	$10,22 \pm 0,14$	$39,99 \pm 0,39$	$299,97 \pm 0,03$

Fonte: Autor (2017).

Avaliando os dados das Figuras 15, 16 e 17 e a Tabela 5, certifica-se que existem pequenas diferenças de dimensões (t, w, L) entre os onze espécimes para cada uma das quatro condições.. Estas diferenças são oriundas dos processos de usinagem e acabamento, porém as dimensões de todas as amostras atendem os requisitos de ensaio recomendados na Norma ASTM E 1876, conforme apresentado na seção 2.6.5. É importante salientar também, que não houve variação significativa das dimensões entre o estado bruto (EB) e tratado térmicamente (TT), concluindo que o processo de tratamento térmico não interferiu em variações dimensionais das amostras, como por exemplo, distorções e empenamento.

A massa (m) dos corpos de prova foram medidas em uma balança de precisão. Os resultados são apresentados na Figura 18.

Figura 18 - Resultado da medição da massa (m) dos corpos de prova nos estados brutos (EB) e tratado termicamente (TT). a) Ferro fundido nodular (FFN), e b) Ferro fundido cinzento (FFC).

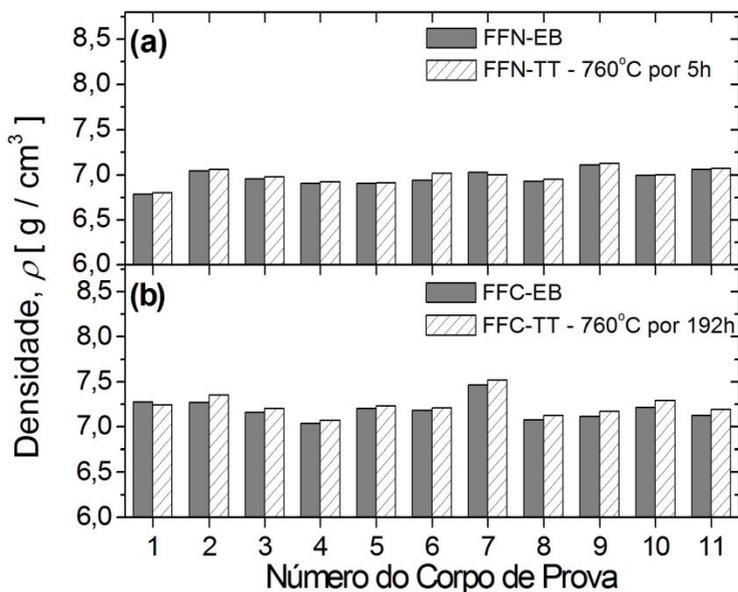


Fonte: Autor (2017).

As diferenças de massa entre os onze corpos de prova são provenientes das diferenças de dimensões, conforme abordado anteriormente. Não houve variação significativa da massa entre o estado bruto de fusão (EB) e tratado termicamente (TT), comprovando mais uma vez que não houve variações dimensionais significativas após tratamento térmico, evidenciando dessa forma, que a perda de massa ocasionada pela descarbonetação da superfície durante tratamento térmico foi desprezível.

Com os resultados das dimensões geométricas e da massa das amostras, foi possível calcular a densidade do ferro fundido nodular (FFN) e cinzento (FFC) nos estados bruto de fusão (EB) e tratado termicamente (TT), aplicando a Equação 9. Os resultados de densidade para cada corpo de prova são mostrados na Figura 19.

Figura 19 - Resultados do cálculo da densidade (ρ) dos corpos de prova no estado bruto (EB) e tratado termicamente (TT). a) Ferro fundido nodular (FFN) e b) Ferro fundido cinzento (FFC).



Fonte: Autor (2017).

Os resultados da densidade (ρ) apresentadas na Figura 19 estão coerentes com os valores da literatura. De acordo com a Norma ISO 185 (2005) a faixa de densidade típica para os ferros fundidos cinzentos é de 7,1 até 7,3 g/cm³. Já a Norma ISO 1083 (2004) aponta para o ferro fundido nodular uma faixa de 7,1 até 7,2 g/cm³. A Tabela 6 apresenta os resultados médios de densidade e da massa para ambos os materiais nos estados bruto de fusão (EB) e tratado termicamente (TT) e os respectivos desvios padrões.

Tabela 6 - Resultados da densidade média das amostras de ferro fundido nodular (FFN) e cinzento (FFC) nos estados bruto de fusão (EB) e tratado termicamente (TT).

Material	<i>m</i> (g)	ρ (g/cm³)
FFN-EB	836,88 ± 13,67	6,97 ± 0,09
FFN-TT	838,93 ± 13,67	6,99 ± 0,10
FFC-EB	882,77 ± 13,18	7,19 ± 0,12
FFC-TT	887,11 ± 12,29	7,24 ± 0,12

Fonte: Autor (2017).

A mudança da matriz metálica após tratamento térmico para ambos os materiais não alterou significativamente a densidade.

Para os materiais do presente estudo, a densidade média para o ferro fundido nodular no estado bruto e tratado foi de 6,97 e 6,99 g/cm³, respectivamente. Não houve variação significativa da densidade entre os estados, uma vez que houve pequeno aumento na área da grafita entre os estados e também pelo fato do estado bruto apresentar-se essencialmente predominantemente ferrítico, conforme avaliação metalográfica.

Na literatura encontra-se valores de até 6,9 g/cm³ citados para ferros fundidos nodulares ferríticos (HACHENBERG, 1988). A densidade de um ferro fundido depende da quantidade relativa de microconstituintes presentes. A grafita apresenta densidade de 2,25 g/cm³, enquanto os microconstituintes da matriz apresentam densidade entre 7,3 a 7,9 g/cm³. Desta forma, quanto maior a quantidade de grafita, menor será a densidade do ferro fundido (GUESSER, 2009).

Um dos problemas na determinação da densidade é a

presença de microporosidades na amostra. Deste modo, resultados de densidades obtidas em peças fundidas normalmente são menores que os valores reais do material, e este fato pode ser utilizado para a determinação do volume de microporosidades numa peça fundida (PALMER, 1987).

4.2 CARACTERIZAÇÃO MICROESTRUTURAL

Nesta seção será apresentada a caracterização microestrutural dos materiais do presente estudo, utilizando as técnicas de microscopia óptica e eletrônica.

4.2.1 Ferro Fundido Nodular

A Tabela 7 mostra os detalhes da caracterização metalográfica segundo a Norma VDG P441 para as amostras do estado bruto de fundição e recozidas, evidenciando a média das regiões transversais dos corpos de prova.

Tabela 7 - Análise metalográfica para as amostras de ferro fundido nodular.

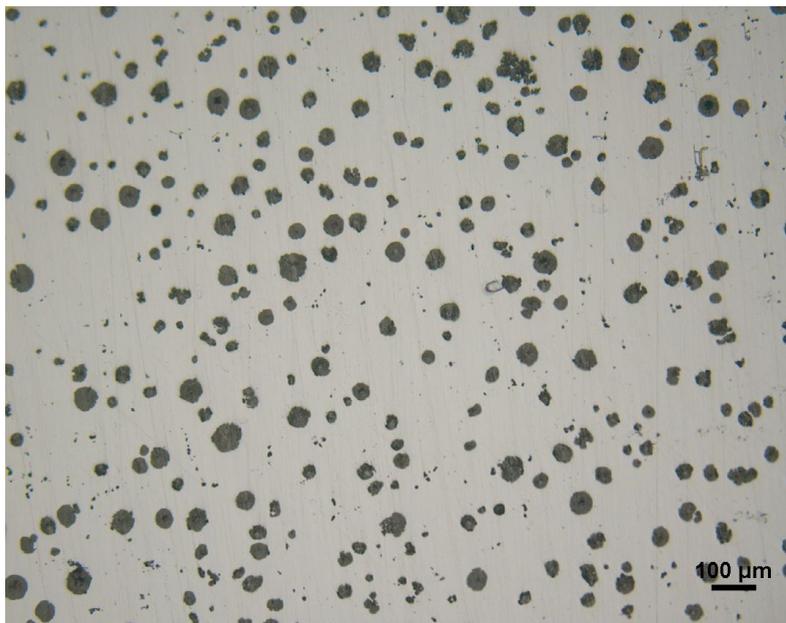
Amostra	Estado Bruto	Tratado
Forma	VI	VI
Perlita (%)	15	1
Tamanho	(6)-(8)	(6)-(8)
Nodularização (%)	90	90
Nódulos/mm ²	132	132
Área da Grafita (%)	9	10
Nível de Rechupe	N1	N1

Fonte: Autor (2017).

Ambos os estados das amostras apresentam a mesma forma de grafita (forma VI – nodular) com nodularização de 90%, com incidência de alguns nódulos imperfeitos e inclusões intercelulares, distribuídos homoganeamente pela matriz. A Figura 20 evidencia a condição da morfologia da grafita das amostras do ferro fundido

nodular no estado bruto (EB) de fundição e recozidas, ou seja, após tratamento térmico. A partir da análise metalográfica, nota-se que não existem diferenças em relação ao tamanho, grau de nodularização e fração volumétrica da grafita em ambos os estados, uma vez que as amostras são as mesmas e sabendo que a cinética de formação e crescimento das grafitas ocorre no estado líquido (GUESSER, 2009). Também não se observou aumento significativo da área da grafita causada pela difusão do carbono da matriz para os nódulos durante o tratamento térmico. Além disso, as amostras também possuem o mesmo nível de porosidade de contração (rechupe), com defeitos de tamanho máximo de 1 mm (N1).

Figura 20 - Morfologia da grafita de ferro fundido nodular (FFN), sem ataque. Ampliação: 100X.

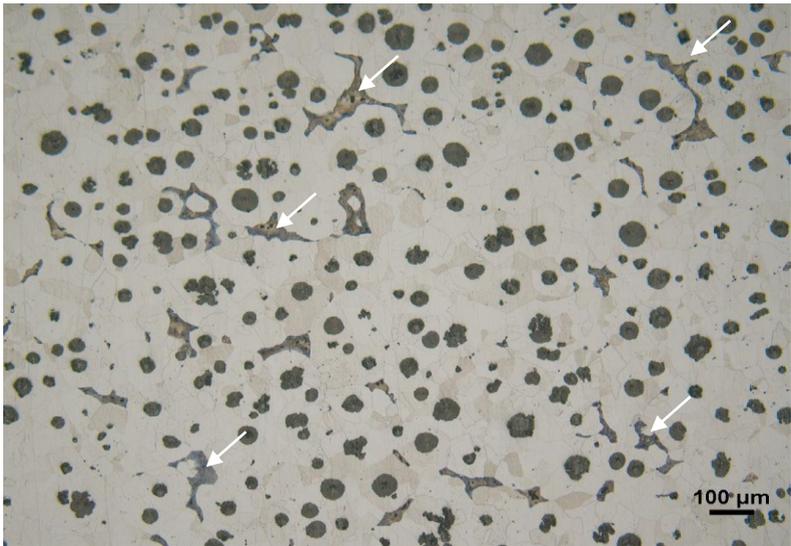


Fonte: Autor (2017).

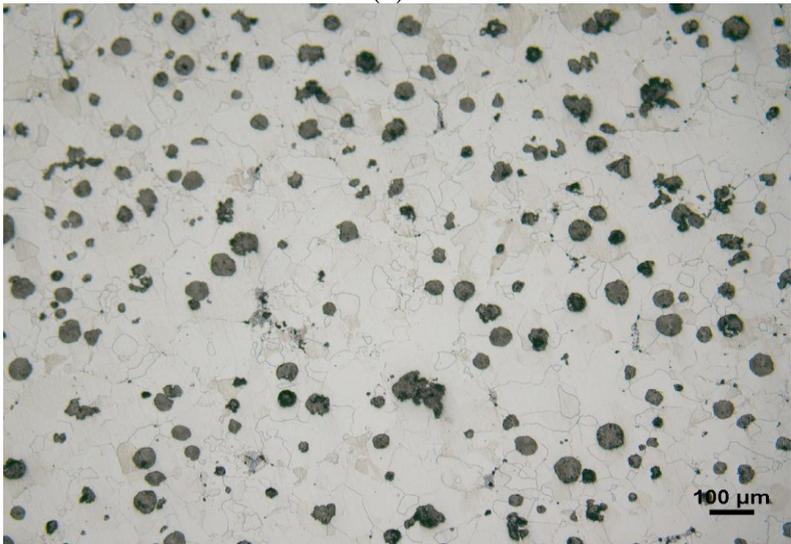
As amostras do estado bruto de fusão (EB) apresentaram matriz ferrítica-perlítica, com incidência de aproximadamente 85%

de ferrita, enquanto nas amostras tratadas termicamente a fração volumétrica da ferrita foi de 99%. A Figura 21 mostra a diferença da matriz entre os estados das amostras. Nota-se que a amostra bruta de fundição apresenta maior quantidade de perlita (regiões escuras), enquanto a amostra recozida apresenta pequena quantidade de perlita (menos de 1%). As setas brancas (na Figura 21-a) mostram as regiões com incidência de perlita. Na Figura 21-b) não observa-se as regiões indicadas com seta branca da Figura 21-a), que corresponde as regiões perlíticas da amostra.

Figura 21 - Estrutura da matriz das amostras de ferro fundido nodular (FFN), com ataque. Ampliação: 100X. (a) Bruto de fundição (EB) e (b) Tratado termicamente (TT).



(a)

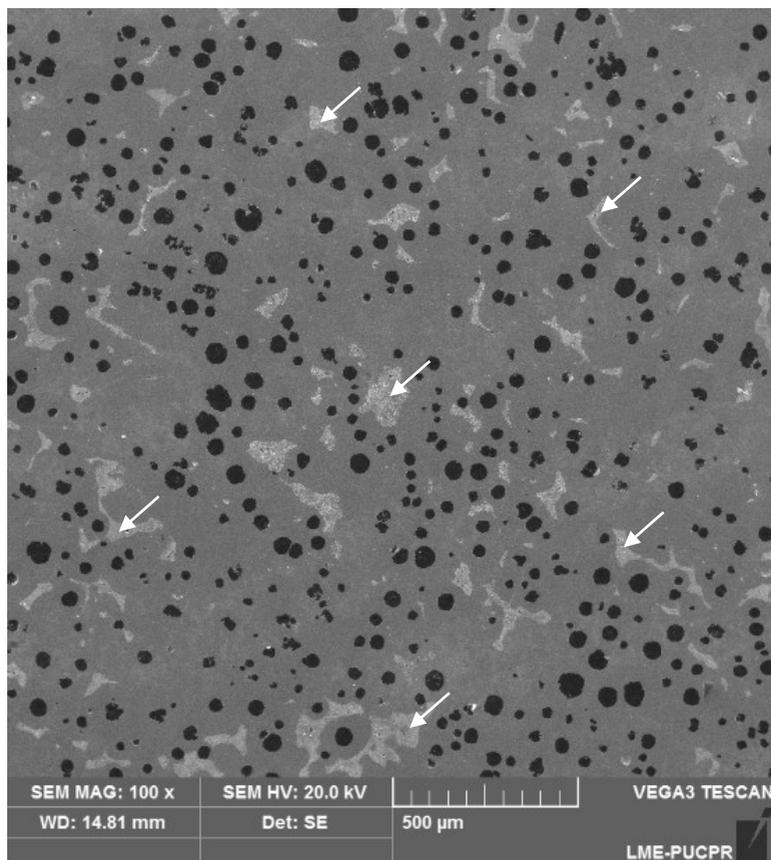


(b)

Fonte: Autor (2017).

A Figura 22 obtida por MEV evidencia melhor as regiões com formação de perlita na amostra no estado bruto de fusão. Esta região perlítica na análise via MEV apresenta-se com cor branca e dispersa aleatoriamente na imagem.

Figura 22 - MEV da estrutura da matriz das amostras de ferro fundido nodular (FFN) no estágio bruto de fusão (EB).



Fonte: Autor (2017).

4.2.2 Ferro Fundido Cinzento

Os detalhes da caracterização metalográfica para as amostras do ferro fundido cinzento encontram-se na Tabela 8, segundo a norma VDG P441 para as amostras do estado bruto de fundição e recozidas. Os resultados são referentes às médias das regiões transversais dos corpos de prova.

Tabela 8 - Análise metalográfica das amostras de ferro fundido cinzento (FFC).

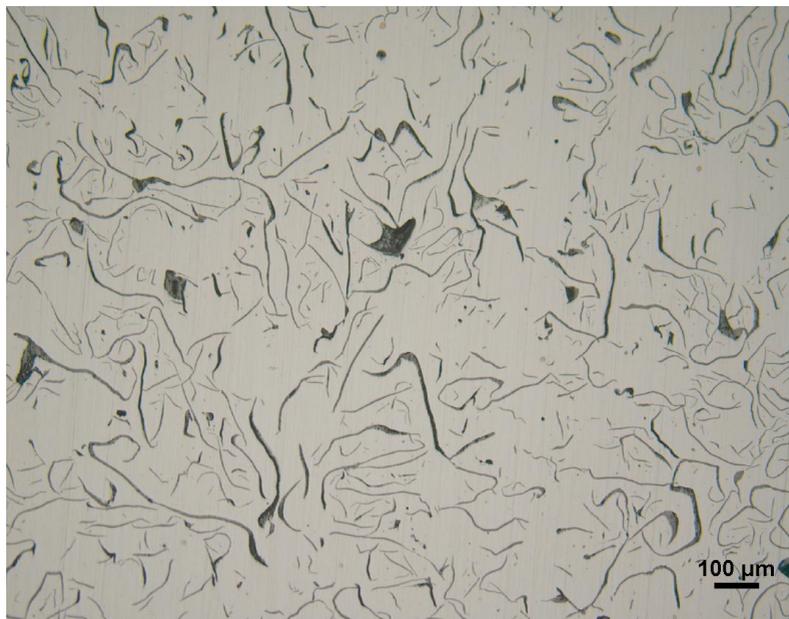
Amostra	Estado Bruto	Tratado
Forma	I	I
Tipo	A-C	A-C
Perlita (%)	100	100
Área de Grafita (%)	9	11
Tamanho	(4)-(8)	(4)-(8)
Nº de Partículas de Grafita/mm ²	268	268
Nº de Células Eutéticas	200	200
Nível de Rechupe	N1	N1

Fonte: Autor (2017).

A metalografia qualitativa apresentou grafita lamelar do tipo A com orientação aleatória e uniformemente distribuída na estrutura, com algumas áreas de grafita tipo C, típica de composições hipereutéticas, podendo apresentar-se como placas grosseiras, ou ainda na forma de estrela. Como esperado, não se observa diferenças na forma, tipo, tamanho, número de partículas e número de células eutéticas da grafita em ambos os estados, uma vez que as amostras são as mesmas e devido ao fato da cinética de formação e crescimento das grafitas ocorrerem durante a solidificação. Avaliando a área da grafita, houve aumento de aproximadamente 2% nas amostras recozidas, devido à difusão do carbono da cementita (Fe_3C) da perlita para as lamelas das grafitas, devido à exposição do material a alta temperatura por longo período de tempo. As amostras apresentam o mesmo nível de porosidade de

contração (rechupe), com defeitos de tamanho máximo menor de 1 mm (N1) dispersas e avaliadas ao microscópio óptico. A estrutura lamelar do ferro fundido cinzento (FFC) do presente estudo é mostrada na Figura 23.

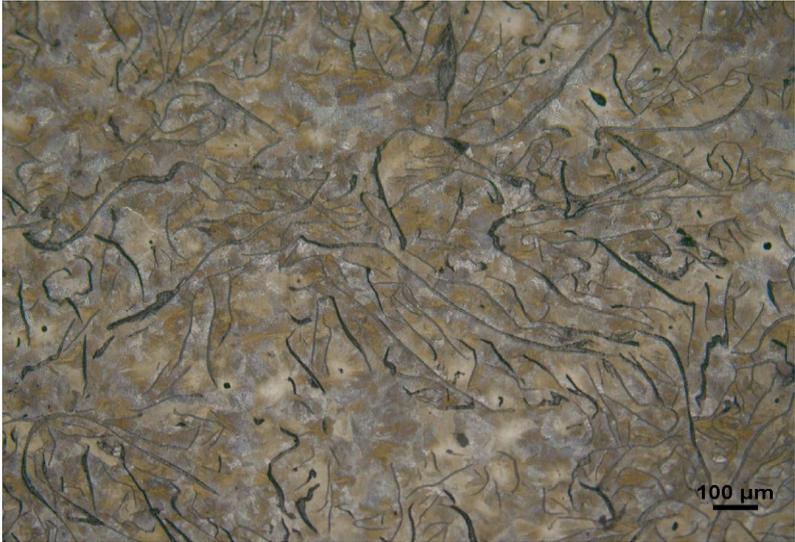
Figura 23 - Micrografia do ferro fundido cinzento (FFC) com grafita lamelar do Tipo A e C, sem ataque. Ampliação: 100X.



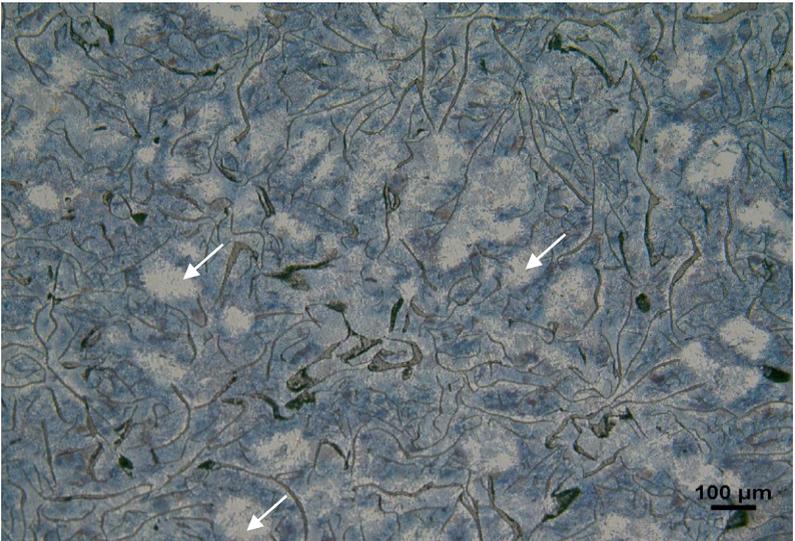
Fonte: Autor (2016).

As amostras do estado bruto de fusão (EB) apresentaram matriz 100% perlítica, conforme mostrado na Figura 24 (a). Já nas amostras recozidas, a matriz é essencialmente formada de perlita coalescida pelo tratamento térmico (TT), onde se observa regiões com ferrita livre (carbonetos da perlita quase que totalmente dissolvidos) e perlita com maior e menor grau de coalescimento (decomposição parcial dos carbonetos da perlita), como mostrado na Figura 24 (b).

Figura 24 - Estrutura da matriz das amostras de ferro fundido cinzento (FFC), com ataque. Ampliação: 100X. (a) Bruto de fundição (EB) e (b) tratado termicamente (TT).



(a)



(b)

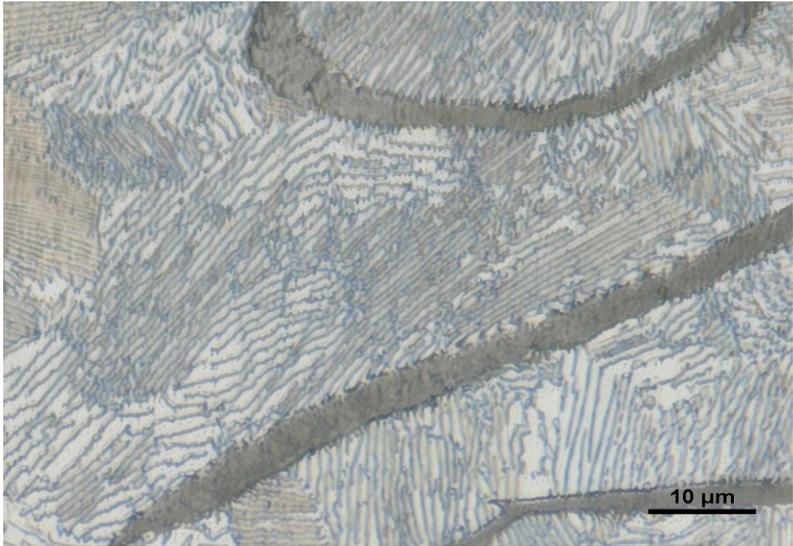
Fonte: Autor (2017).

A Figura 25 mostra as diferenças mais significativas entre as amostras brutas de fundição e recozidas. Na amostra bruta de fundição observa-se que a perlita está refinada, ou seja, à distância interlamelar entre os carbonetos é pequena. Avaliando a microestrutura da amostra recozida, observa-se regiões com ferrita livre (brancas), e a formação de perlita esferoidizada ou coalescida (carbonetos em formato esférico ou em forma de ripas espaçadas).

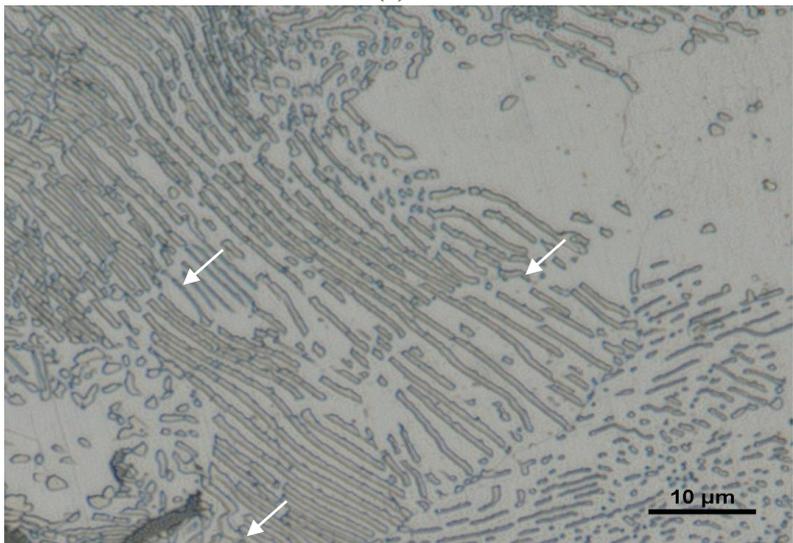
O tempo de recozimento foi elevado, cerca de 192 horas devido a dificuldade de formação da matriz ferrítica ou a esferoidização total da perlita. Mesmo com um tempo de tratamento térmico prolongado, não houve esferoidização total da perlita, apenas regiões ou ilhas de perlita esferoidizada. Esta dificuldade está relacionada com a estabilidade da perlita devido ao material estar ligado com antimônio.

Os ferros fundidos cinzento ligados ao antimônio têm maior estabilidade da perlita quando expostos a alta temperatura, de modo que suportam temperatura e tempos maiores de recozimento, não ocorrendo uma degradação rápida da matriz. O antimônio por ser altamente solúvel na austenita e por formar solução sólida substitucional na austenita promove o efeito de barreira durante a difusão do carbono na solidificação. Este efeito de barreira impossibilita a difusão do carbono da austenita durante a reação eutetóide, formando a perlita. Este efeito de barreira também age em temperaturas de tratamento térmico na zona subcrítica, inibindo ou reduzindo a difusão do carbono da perlita para as lamelas de grafita.

Figura 25 - Estrutura da matriz das amostras de ferro fundido cinzento (FFC), com ataque. Ampliação: 1000X. (a) Bruto de fundição (EB) e (b) Tratado termicamente (TT).



(a)

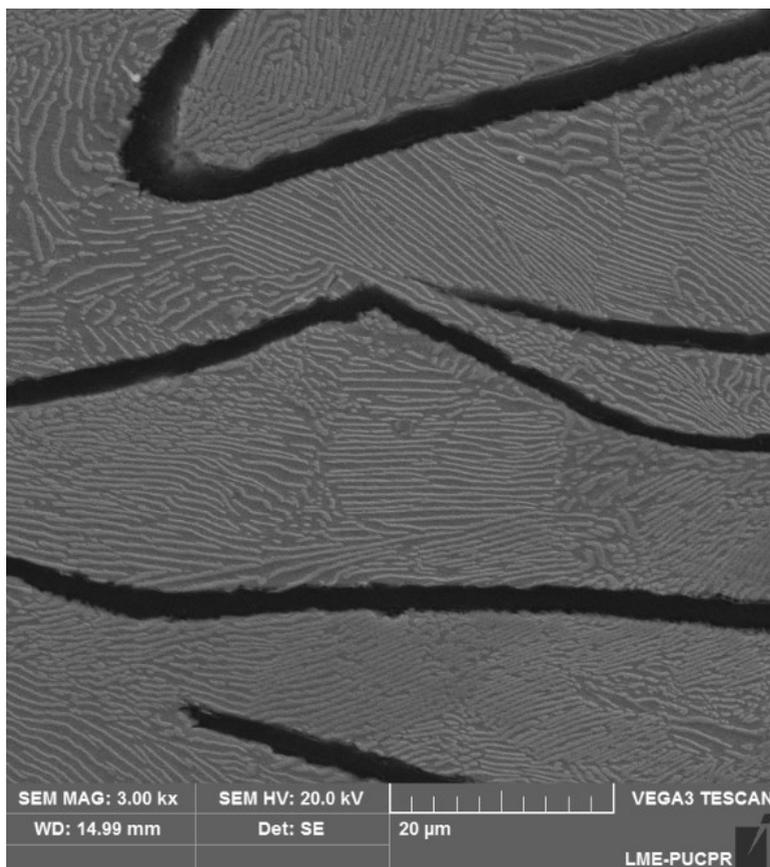


(b)

Fonte: Autor (2017).

A Figura 26 obtida via MEV mostra a estrutura da matriz e da morfologia da grafita para o ferro fundido cinzento no estado bruto. Avaliando a matriz, observa-se que a mesma apresenta-se 100% perlítica. A perlita é composta por cementita (Fe_3C) que apresentam-se na forma de ripas espaçadas (regiões brancas) e ferrita, que aparece ao fundo na cor cinza. A grafita apresenta-se na cor preta e na forma de veios.

Figura 26 - MEV da estrutura da matriz das amostras de ferro fundido cinzento (FFC) no estado bruto de fusão (EB).



Fonte: Autor (2017).

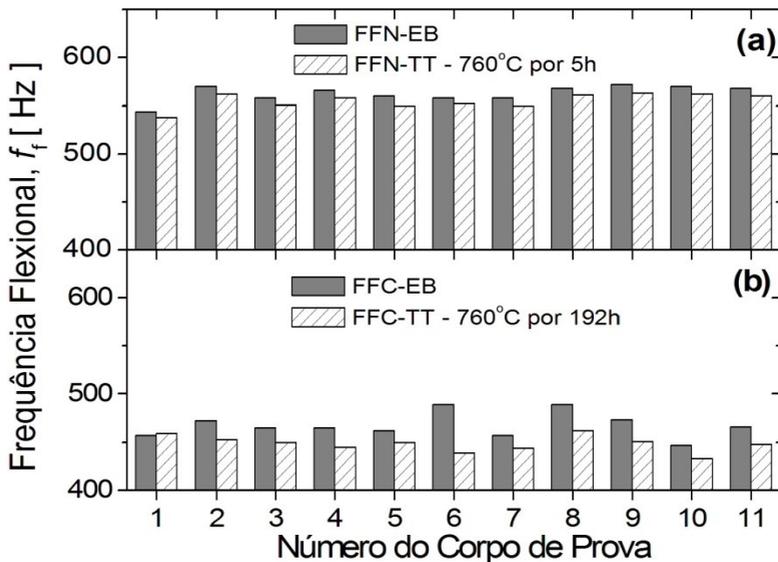
4.3 CARACTERIZAÇÃO MECÂNICA

Neste capítulo serão apresentados os resultados das propriedades elásticas, ou seja, do módulo de elasticidade e de cisalhamento determinados a partir da frequência de ressonância flexural através da técnica de excitação por impulso.

4.3.1 Frequência de Ressonância Flexional

Na Figura 27 são apresentados os valores da frequência de ressonância obtidas no ensaio de excitação por impulso para as onze barras de cada material (FFN e FFC) nos estados bruto de fusão (EB) e tratado termicamente (TT).

Figura 27 - Frequência flexional (f_f) para as amostras no estado bruto de fusão (EB) e tratado termicamente (TT). a) Ferro fundido nodular (FFN), e b) Ferro fundido cinzento (FFC).

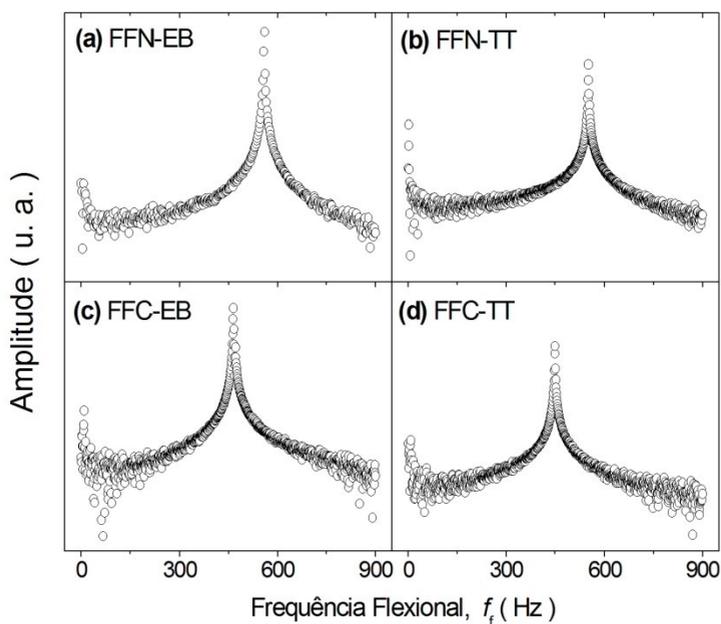


Fonte: Autor (2017).

Observa-se que a distribuição dos valores de frequência de ressonância flexional para o ferro fundido nodular (FFN) é superior ao ferro fundido cinzento (FFC), na condição do estado bruto (EB) de fundição. E ainda, após tratamento térmico (TT), observa-se que com o recozimento dos ferros fundidos nodular (FFN) e cinzento (FFC), as distribuições dos valores de frequência de ressonância decrescem.

A frequência flexional foi determinada no intervalo (0 a 900 Hz), compreendendo a máxima amplitude para cada amostra, conforme Figura 28.

Figura 28 - Amplitude característica de cada material obtida no ensaio de excitação por impulso na frequência de 0 a 900 Hz.



Fonte: Autor (2017).

A Tabela 9 mostra os valores médios da frequência

flexional obtido através do ensaio de excitação por impulso para os estados bruto de fusão (EB) e tratado termicamente (TT) para ambos os ferros fundidos.

Tabela 9 - Frequência flexional obtida no ensaio de excitação por impulso.

Material	$f_f(\text{Hz})$
FFN-EB	$562,91 \pm 8,26$
FFN-TT	$555,18 \pm 7,72$
FFC-EB	$467,45 \pm 12,89$
FFC-TT	$448,55 \pm 8,29$

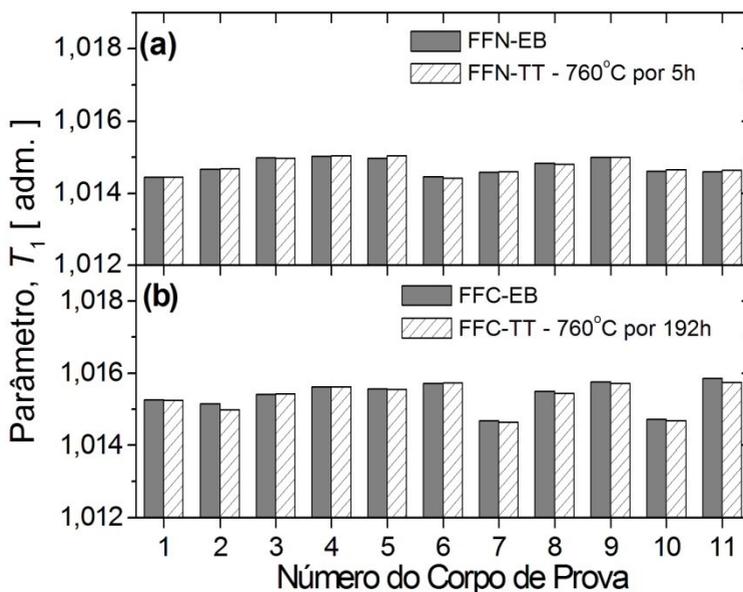
Fonte: Autor (2017).

Observa-se que a frequência média no estado tratado termicamente foi menor quando comparado ao estado bruto de fusão para ambos os ferros fundidos. Embora dentro do erro obtido, representado pelo desvio padrão, o ensaio de ressonância mostra-se sensível não somente a variação da morfologia da grafita, mas também sobre a variação da matriz metálica, mesmo que mínima.

4.3.2 Propriedades Elásticas

A avaliação do módulo de elasticidade pelo ensaio não destrutivo de excitação por impulso foi determinado algebricamente com a Equação 2. Para aplicação da referida equação, inicialmente determinou-se o parâmetro geométrico T_l através da Equação 4. Os resultados estatísticos de T_l são apresentados na Figura 29.

Figura 29 - Parâmetro geométrico T_1 calculado através da Equação 4.



Fonte: Autor (2017).

Avaliando a Figura 29, observa-se uma pequena variação entre as amostras em cada condição, uma vez que a variação da espessura (t) e largura (L) de cada amostra e em cada estado foi pequena. A Tabela 10 apresenta as médias de T_1 para o ferro fundido nodular (FFN) e cinzento (FFC) nos estados bruto de fusão (EB) e tratado termicamente (TT).

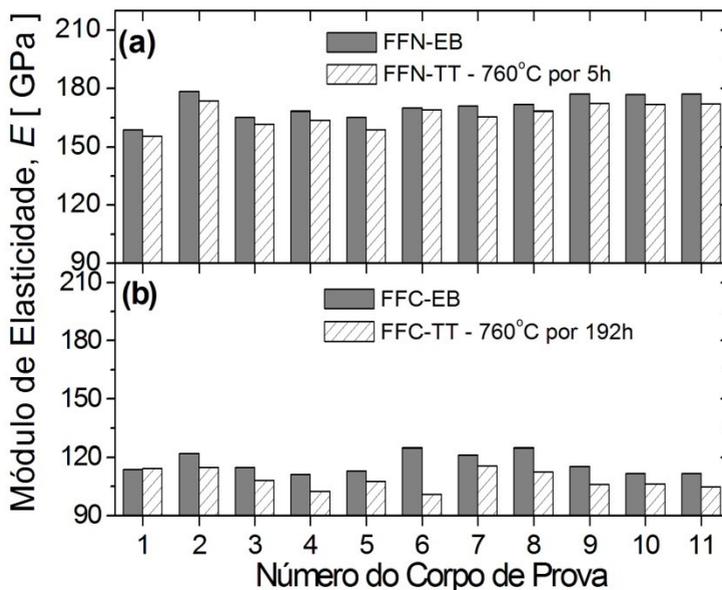
Tabela 10 - Parâmetro geométrico adimensional T_1 .

Material	T_1 (adimensional)
FFN-EB	$1,02 \pm 2,25 \times 10^{-4}$
FFN-TT	$1,02 \pm 2,33 \times 10^{-4}$
FFC-EB	$1,01 \pm 3,97 \times 10^{-4}$
FFC-TT	$1,01 \pm 4,07 \times 10^{-4}$

Fonte: Autor (2017).

Os valores de t , w , L , m , f_f e T_1 de cada corpo de prova, foram substituídos na Equação 2, para determinação do módulo de elasticidade para cada corpo de prova. A Figura 30 apresenta os resultados do módulo de elasticidade obtidos para cada amostra.

Figura 30 - Módulo de elasticidade para cada amostra obtido pelo método de Excitação por Impulso.



Fonte: Autor (2017).

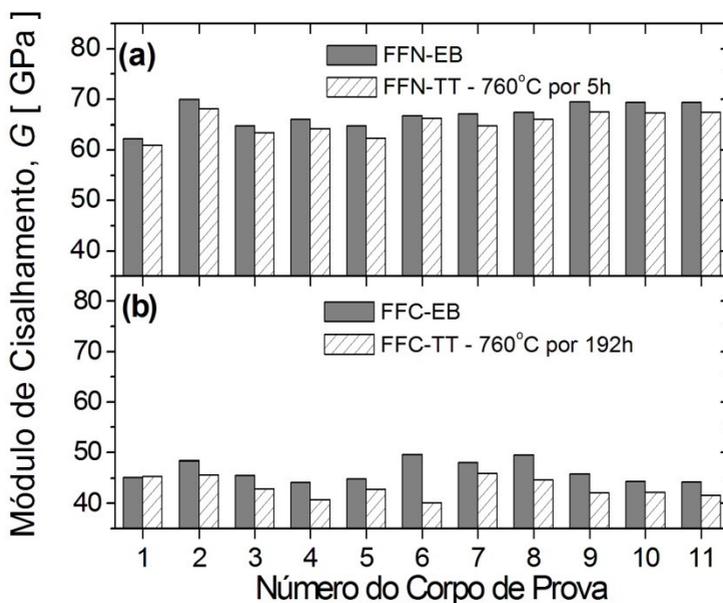
O módulo de cisalhamento (G) relaciona-se com o módulo de elasticidade (E) segundo a Equação 8, deste modo, isolando G , têm-se:

$$G = \left(\frac{E}{2\nu + 2} \right) \quad (11)$$

Desta forma, foi possível calcular o valor do módulo de cisalhamento para cada amostra aplicando a Equação 9, com os valores do coeficiente de Poisson obtidos da literatura, sendo 0,275

e 0,260 para o ferro fundido nodular e cinzento, respectivamente (ISO 1083, 2004; ISO 185, 2005). A Figura 31 apresenta os valores do módulo de cisalhamento para cada amostra.

Figura 31 - Módulo de cisalhamento calculado para cada amostra.



Fonte: Autor (2017).

A Tabela 11 destaca os valores médios do módulo de elasticidade e do módulo de cisalhamento calculados a partir das onze amostras de cada condição.

Tabela 11 - Resultados dos módulos de elasticidade e cisalhamento médios obtidos através do Ensaio de Frequência de Ressonância pelo método de Excitação por Impulso.

Material	<i>E</i> (GPa)	<i>G</i> (GPa)
FFN-EB	170,93 ± 6,21	67,03 ± 2,44
FFN-TT	166,57 ± 5,96	65,32 ± 2,34
FFC-EB	116,84 ± 5,37	46,37 ± 2,13
FFC-TT	108,60 ± 5,08	43,09 ± 2,02

Fonte: Autor (2017).

Os valores do módulo de elasticidade para o ferro fundido nodular no estado bruto estão de acordo com o especificado pela Norma ISO 1083 (2004). Para o estado tratado termicamente, o valor médio apresentou-se próximo ao descrito na Norma ISO 1083 (2004). Ambos os estados apresentaram-se próximos ao descrito em outras literaturas (FULLER, EMERSON E SERGEANT, 1980); (KOVACTS E COLE, 1975), para amostras perlíticas e ferríticas.

Em trabalho recente, MARTINS (2015), utilizando a mesmo ensaio de frequência de ressonância, determinando o módulo de elasticidade para um ferro fundido nodular bruto com 5% de perlita, alcançou valores de aproximadamente 173 GPa. Em relação ao estado tratado, é usualmente alcançado valores de 160 a 170 GPa para classes ferríticas, conforme observado por BCIRA (1974).

Para o ferro fundido cinzento em ambos os estados, também estão de acordo com o especificado pela Norma ISO 185 (2005), onde cita a faixa usal de 78 a 143 GPa. Utilizando a técnica de excitação por impulso, MARTINS (2015), determinou o módulo de elasticidade de 122 a 137 GPa para um ferro fundido cinzento com 100% de perlita.

A diminuição do módulo de elasticidade com o tratamento térmico de recozimento é devido à precipitação de carbono sobre a grafita causando uma região de mistura de ferrita e grafita. Dessa forma, tratamentos térmicos normalmente afetam a interação da grafita com a matriz, tendendo a reduzir o módulo de elasticidade.

O módulo de cisalhamento para ambos os materiais está de acordo com o especificado pelas respectivas literaturas citadas, uma vez que o módulo de cisalhamento se relaciona diretamente

proporcional ao módulo de elasticidade (Equação 9).

4.4 MODELO MATEMÁTICO DE PROPAGAÇÃO DE ERROS

Nesta seção serão abordados os desenvolvimentos dos modelos de propagação de erros para o módulo de elasticidade (E), do parâmetro geométrico T_l e do módulo de cisalhamento (G), conforme a Norma ASTM E 1876, além da aplicação do modelo desenvolvido para os ferros fundidos nodular e cinzento.

4.4.1 Desenvolvimento dos Modelos de Propagação de Erros

Aplicando o método de propagação de erros (Equação 10) na expressão do módulo de elasticidade pela técnica de excitação por impulso (Equação 2), em que o módulo de elasticidade é definido como uma função $E = E(m, w, t, L, f_f, T_1)$, têm-se:

$$\begin{aligned}
 (\sigma_E)^2 = & \left(\frac{\partial E}{\partial m} \sigma_m \right)^2 + \left(\frac{\partial E}{\partial f_f} \sigma_{f_f} \right)^2 + \left(\frac{\partial E}{\partial w} \sigma_w \right)^2 \\
 & + \left(\frac{\partial E}{\partial L} \sigma_L \right)^2 + \left(\frac{\partial E}{\partial t} \sigma_t \right)^2 + \left(\frac{\partial E}{\partial T_1} \sigma_{T_1} \right)^2
 \end{aligned} \tag{12}$$

As derivadas parciais de E em relação a cada variável independente em função de E , são:

$$\frac{\partial E}{\partial m} = \frac{0,9465 f_f^2 L^3 T_1}{w t^3} = \frac{E}{m} \tag{13}$$

$$\frac{\partial E}{\partial f_f} = \frac{2(0,9465 m f_f L^3 T_1)}{w t^3} = \frac{2E}{f_f} \tag{14}$$

$$\frac{\partial E}{\partial w} = - \left(\frac{0,9465 m f_f^2 L^3 T_1}{w^2 t^3} \right) = - \left(\frac{E}{w} \right) \tag{15}$$

$$\frac{\partial E}{\partial L} = \frac{3 (0,9465 m f_f^2 L^2 T_1)}{w t^3} = \frac{3 E}{L} \quad (16)$$

$$\frac{\partial E}{\partial t} = -3 \left(\frac{0,9465 m f_f^2 L^3 T_1}{w t^4} \right) = - \left(\frac{3E}{t} \right) \quad (17)$$

E

$$\frac{\partial E}{\partial T_1} = \frac{0,9465 m f_f^2 L^3}{w t^3} = \frac{E}{T_1} \quad (18)$$

Substituindo as derivadas parciais (Equações 13 a 18) na Equação 12 e aplicando simplificações matemáticas, têm-se:

$$\sigma_E = E \left[\left(\frac{\sigma_m}{m} \right)^2 + 4 \left(\frac{\sigma_{f_f}}{f_f} \right)^2 + \left(\frac{\sigma_w}{w} \right)^2 + 9 \left(\frac{\sigma_L}{L} \right)^2 + 9 \left(\frac{\sigma_t}{t} \right)^2 + \left(\frac{\sigma_{T_1}}{T_1} \right)^2 \right]^{\frac{1}{2}} \quad (19)$$

BULLOUGH (2000) fez um modelo matemático similar, mas, no entanto, negligenciou o parâmetro geométrico T_1 , dessa forma, o autor não desenvolveu a propagação de erros para o parâmetro geométrico T_1 .

A Equação 19 representa a expressão da propagação do erro do módulo de elasticidade determinado a partir da técnica de excitação por impulso, destacando:

σ_m : é o erro padrão da massa, $[\sigma_m] = \mathbf{m}$;

σ_{f_f} : é o erro padrão da frequência flexional, $[\sigma_{f_f}] = \mathbf{Hz}$;

σ_w : é o erro padrão da largura, $[\sigma_w] = \mathbf{cm}$;

σ_L : é o erro padrão do comprimento, $[\sigma_L] = \mathbf{cm}$;

σ_t : é o erro padrão da espessura, $[\sigma_t] = \mathbf{cm}$;

σ_{T_1} : é o erro propagado do parâmetro geométrico, $[\sigma_{T_1}] = \mathbf{adimensional}$;

O erro padrão na estatística gaussiana é o desvio padrão.

Os demais valores de entrada são as médias aritméticas das variáveis independentes (m, f_f, w, L, t e T_1).

O valor médio do módulo de elasticidade (E) pode ser calculado por duas maneiras, conforme Equações 20 e 21.

$$E = E_{DG} = \sum_{i=1}^{N=11} \frac{E_i}{n} \quad (20)$$

$$E = \bar{E}_{PE} = 0,9465 \left(\frac{\bar{m} \bar{f}_f^2}{\bar{w}} \right) \left(\frac{\bar{L}^3}{\bar{t}^3} \right) \bar{T}_1 \quad (21)$$

Destacando:

E_{DG} : é o módulo de elasticidade médio obtido a partir da distribuição gaussiana (DG), ou seja, a partir da média aritmética dos 11 corpos de prova (Figura 30), $[E_{DG}] = \mathbf{Pa}$;

\bar{E}_{PE} : é o módulo de elasticidade médio proposto (PE) a partir da média de cada variável independente (Tabela 11), $[\bar{E}_{PE}] = \mathbf{Pa}$;

\bar{m} : é a média da massa dos corpos de prova (Tabela 6), $[\bar{m}] = \mathbf{g}$;

\bar{f}_f : é a média da frequência dos corpos de prova (Tabela 9), $[\bar{f}_f] = \mathbf{Hz}$;

\bar{L} : é a média do comprimento dos corpos de prova (Tabela 5), $[\bar{L}] = \mathbf{cm}$;

\bar{w} : é a média da largura dos corpos de prova (Tabela 5), $[\bar{w}] = \mathbf{cm}$;

\bar{t} : é a média da espessura dos corpos de prova (Tabela 5), $[\bar{t}] = \mathbf{cm}$;

\bar{T}_1 : é a média do fator de correção dos corpos de prova (Tabela 10), $[\bar{T}_1] = \mathbf{adimensional}$;

Na seção 4.2.2 será possível avaliar a diferença de resultados do módulo de elasticidade determinados a partir das

Equações 20 e 21.

Aplicando o método de propagação de erros para o parâmetro geométrico do modo fundamental flexional (Equação 4) com a Equação 10, onde o parâmetro de correção adimensional é definido como uma função $T_1 = T_1(t, L)$, têm-se:

$$(\sigma_{T_1})^2 = \left(\frac{\partial T_1}{\partial t} \sigma_t \right)^2 + \left(\frac{\partial T_1}{\partial L} \sigma_L \right)^2 \quad (22)$$

As derivadas parciais de T_1 em relação a cada variável independente em função de T_1 são:

$$\frac{\partial T_1}{\partial t} = \frac{2}{t} (T_1 - 1) \quad (23)$$

E

$$\frac{\partial T_1}{\partial L} = -\frac{2}{L} (T_1 - 1) \quad (24)$$

Substituindo as Equações 23 e 24 na Equação 22, têm-se:

$$\sigma_{T_1} = T_1 \left[K_1 \left\{ \left(\frac{\sigma_t}{t} \right)^2 + \left(\frac{\sigma_L}{L} \right)^2 \right\} \right]^{\frac{1}{2}} \quad (25)$$

Sendo $K_1 = K_1(T_1)$ e representado pela Equação 24:

$$K_1 = 4 - \frac{8}{T_1} + \frac{4}{T_1^2} \quad (26)$$

Dessa forma, a Equação 25 descreve a expressão de propagação do erro do fator de correção do modo fundamental flexional.

Para o módulo de cisalhamento, a expressão de propagação de erros foi determinada aplicando a Equação 10 na Equação 11. O módulo de cisalhamento é definido como uma função $G = G(E, \nu)$, e a propagação de erros fica:

$$(\sigma_G)^2 = \left(\frac{\partial G}{\partial E} \sigma_E \right)^2 + \left(\frac{\partial G}{\partial \nu} \sigma_\nu \right)^2 \quad (27)$$

As derivadas parciais de G em relação a cada variável independente em função de G são:

$$\frac{\partial G}{\partial E} = \frac{1}{2(\nu + 1)} = \frac{G}{E} \quad (28)$$

E

$$\frac{\partial G}{\partial \nu} = -\frac{E}{2(\nu + 1)^2} = -\frac{G}{(\nu + 1)} \quad (29)$$

Substituindo as derivadas parciais, Equações 28 e 29, na Equação 27, têm-se:

$$\sigma_G = G \left[\left(\frac{\sigma_E}{E} \right)^2 + \left(\frac{\sigma_\nu}{\nu} \right)^2 \left(\frac{\nu}{\nu + 1} \right)^2 \right]^{\frac{1}{2}} \quad (30)$$

A Equação 30 representa a expressão da propagação do erro do módulo de cisalhamento determinado a partir da técnica de excitação por impulso, destacando:

G : é o módulo de cisalhamento médio, $[G] = \text{Pa}$;

σ_E : é o erro padrão do módulo de elasticidade, $[\sigma_E] = \text{Pa}$;

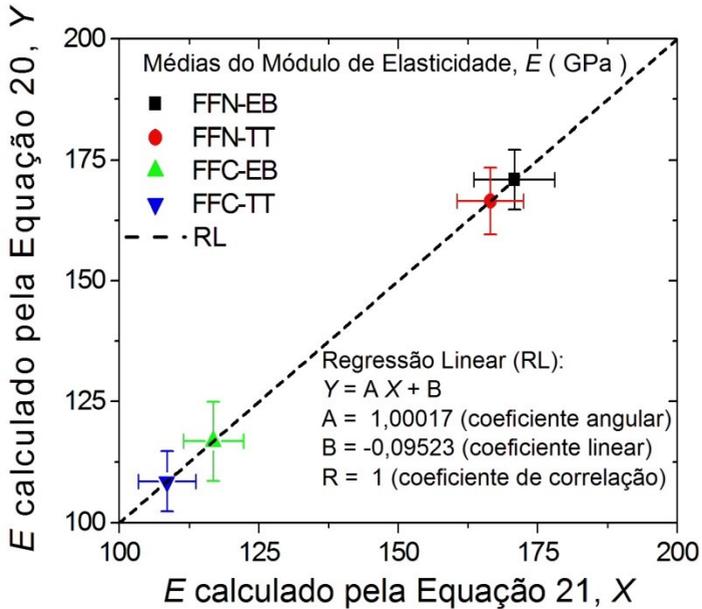
σ_ν : é o erro padrão do coeficiente de Poisson, $[\sigma_\nu] =$
adimensional;

Os demais valores de entrada são as médias aritméticas das variáveis independentes (ν e E).

4.4.2 Aplicações dos Modelos de Propagação de Erros

Inicialmente serão apresentados os resultados dos módulos de elasticidade médios, a partir das Equações 20 e 21, conforme mostra a Figura 32.

Figura 32 - Módulo de elasticidade determinado com as Equações 20 e 21.

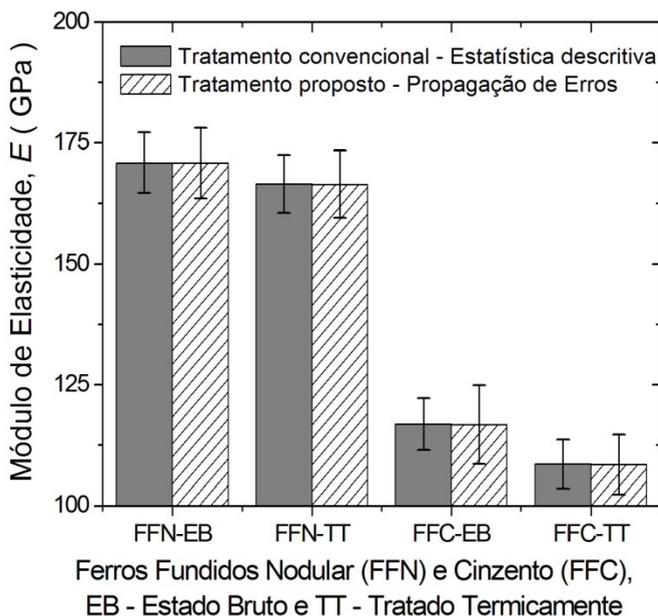


Fonte: Autor (2018).

A Figura 32 apresenta o gráfico com os resultados médios do módulo de elasticidade para o ferro fundido nodular (FFN) e cinzento (FFC) no estado bruto (EB) e tratado termicamente (TT). Observa-se que ambas as equações obtiveram resultados bastante próximos e dessa forma, as duas formas de cálculo podem ser utilizadas para determinação de E , e conseqüentemente, na obtenção do erro propagado. O resultado é justificado pelo coeficiente de correlação igual a 1 da regressão linear.

Sendo assim, o erro propagado ao módulo de elasticidade foi determinado para os ferros fundidos (FFN e FFC) em ambos os estados (EB e TT) a partir da Equação 17. A Figura 33 apresenta os resultados das médias e dos erros associados ao módulo de elasticidade para a metodologia proposta em comparação com a estatística descritiva.

Figura 33 - Módulo de elasticidade médio com o respectivo erro padrão determinados pela metodologia de propagação de erros proposta e pela estatística descritiva.



Fonte: Autor (2018).

Os valores médios dos módulos de elasticidade para o tratamento convencional (estatística descritiva) foram calculados pela Equação 20, e o erro associado, neste caso é o desvio padrão.

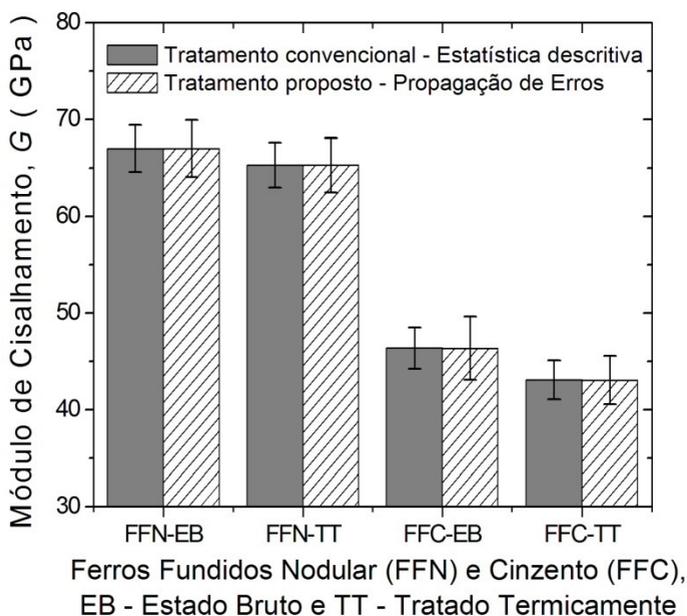
Para o tratamento proposto (propagação de erros), os valores médios dos módulos de elasticidade foram calculados pela Equação 21, e o erro associado é a propagação de erros dado pela Equação 19.

Verifica-se que a forma do tratamento estatístico empregado, seja convencional ou proposta, não altera o valor médio do módulo de elasticidade dos ferros fundidos nodular e cinzento, considerando um sigma da distribuição normal. Entretanto, o erro associado ao valor médio do módulo de elasticidade é levemente superior para o tratamento proposto em comparação com o tratamento convencional. Neste caso, verifica-se que a estatística

descritiva subestima o erro, e ainda cabe ressaltar que apenas o erro padrão foi utilizado para as variáveis independentes.

O erro propagado ao módulo de cisalhamento também foi determinado para os ferros fundidos (FFN e FFC) em ambos os estados (EB e TT), a partir da Equação 30. A Figura 34 apresenta os resultados das médias e dos erros associados ao módulo de cisalhamento para a metodologia proposta em comparação com a estatística descritiva.

Figura 34 - Módulo de cisalhamento médio com o respectivo erro padrão determinados pela metodologia de propagação de erros proposta e pela estatística descritiva.



Fonte: Autor (2018).

Os valores dos módulos de cisalhamento médios para o tratamento convencional e proposto apresentaram um comportamento análogo, conforme observado para o módulo de elasticidade, uma vez que o módulo de cisalhamento se relaciona

diretamente proporcional ao módulo de elasticidade.

Como já observado para o módulo de elasticidade, o erro associado ao valor médio do módulo de cisalhamento é levemente superior para o tratamento proposto em comparação com o tratamento convencional.

Uma importante contribuição do presente estudo para o ensaio de frequência de ressonância, utilizando a técnica de excitação por impulso, que vem sendo utilizado crescentemente na indústria de fundição, para o controle de qualidade de seus produtos fundidos, é a equação do módulo de elasticidade (Equação 2) com o respectivo erro propagado através da teoria de propagação de erros (Equação 19). Com base no contexto acima, pode-se definir o resultado do módulo de elasticidade de uma distribuição, conforme Equação 31.

$$E = 0,9465 \left(\frac{\bar{m} \bar{f}_f^2}{\bar{w}} \right) \left(\frac{\bar{L}^3}{\bar{t}^3} \right) \bar{T}_1 \pm K_\alpha \sigma_E \quad (31)$$

σ_E é o erro propagado (Equação 19), e K_α o intervalo estatístico de abrangência, compreendendo o intervalo sobre o qual se pode dizer que contém, com um dado nível de confiança, pelos menos uma proporção especificada da população.

Para finalizar, ressalta-se que com esta metodologia, os erros das variáveis m , f_f , L , w , t e T_1 podem ser tratados por distribuições estatísticas que melhor representam os dados experimentais.

5. CONCLUSÃO

O objetivo geral do presente estudo foi o de avaliar o método de ensaio não destrutivo de excitação por impulso, através da caracterização e correlação das propriedades elásticas dos ferros fundidos com variação da morfologia da grafita e da matriz metálica.

A frequência de ressonância utilizando a técnica de excitação por impulso se mostrou uma importante técnica para determinação de propriedades elásticas dos ferros fundidos, principalmente quando ocorre variação da morfologia da grafita e sensível a variação da matriz nos níveis estudados, apresentando resultados equivalentes aos encontrados na literatura. Constituiu-se dessa forma, um método de ensaio que apresenta uma boa correlação com a morfologia da grafita e matriz metálica.

A morfologia da grafita é o fator determinante para diferenças no módulo de elasticidade para os ferros fundidos nodulares e cinzentos. Dessa forma, as propriedades elásticas dos ferros fundidos são fortemente dependentes do volume, tamanho e forma da grafita.

O tratamento térmico utilizado no presente trabalho, onde se reduziu a quantidade de perlita de 15 para 1% no ferro fundido nodular e a formação de perlita esferoidizada no ferro fundido cinzento, não afetou significativamente o comportamento elástico, reduzindo sensivelmente o módulo de elasticidade no estado tratado termicamente para ambos os materiais.

Um dos objetivos específicos, além de analisar a influência da morfologia da grafita e da matriz sobre as propriedades elásticas, foi de desenvolver modelos matemáticos baseados na teoria de propagação de erros a partir das expressões para determinação das propriedades elásticas pela técnica de excitação por impulso segundo a norma ASTM E 1876.

O modelo matemático proposto contribui ao preencher uma lacuna nos estudos que é a interferência aos resultados do módulo de elasticidade determinado a partir da técnica de excitação por impulso com a estimativa do erro para as medidas determinadas. As variáveis de entrada são estabelecidas com a determinação dos parâmetros geométricos e da massa das amostras dos corpos de prova ou produto fundido analisado.

O modelo matemático de propagação de erros foi desenvolvido e empregado de forma satisfatória em comparação

com a estatística descritiva, para estimar o erro do módulo de elasticidade e de cisalhamento.

O trabalho contribui ao preencher uma lacuna no levantamento dos erros experimentais para a técnica de excitação por impulso, contribuindo dessa forma, na aplicação do modelo matemático de propagação de erros e da presente técnica na avaliação metalúrgica (morfologia de grafita e defeitos físicos) e das propriedades mecânicas (módulos de elasticidade e cisalhamento) dos ferros fundidos.

6. SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

A partir do estudo desenvolvido foi possível destacar algumas questões para trabalhos futuros, que se encontram listadas a seguir:

- Estudar a influência da variação extrema da matriz metálica (100% ferrítica, 100% perlítica e 100% martensítica) nas propriedades elásticas dos ferros fundidos utilizando a técnica de excitação por impulso.
- Avaliar a correlação da resistência mecânica (limite de resistência e de escoamento) e o módulo de elasticidade utilizando a técnica de excitação por impulso.
- Estudar e comparar o erro padrão entre o modelo proposto e a estatística descritiva aumentando o número de amostras analisadas.
- Estudar o efeito do antimônio na estabilidade da perlita para os ferros fundidos cinzentos.

REFERÊNCIAS

- ABNT NBR 13284. Preparação de corpo de prova para análise metalográfica – Procedimento. (1995)
- ASTM A247-10. Standard Test Method for Evaluating the Microstructure of Graphite in Iron Casting, 2006.
- ASTM E1876. Standard test method for dynamic Young's modulus, shear modulus, and Poisson's ratio by impulse excitation of vibration, 2002.
- BCIRA. Engineering data on nodular cast irons. Birmingham, 1974.
- BENZ, M.G.; ELLIOT, J.F. The austenite solidus and revised Iron-Carbon diagram. Transactions of the Metallurgical Society of AIME, v.221, p.323-330, 1961.
- CABEZAS, C.; FUOCO, R.; GOLDENSTEIN, H. *Influência da interface grafita-austenita na formação da ferrita ou perlita nos ferros fundidos*. In *CONAF 2001 – Congresso de Fundição*. 2001. São Paulo, SP.
- CALLISTER JR, W. D. Materials science and engineering: an introduction. 7a.ed. New York: John Wiley & Sons, 2007.
- COSSOLINO, L. C.; PEREIRA, A. H. A. Módulos elásticos: visão geral e métodos de caracterização. Informativo Técnico Científico – ITC-ME/ATCP. São Paulo, 2010.
- COOPER, C. A.; ELLIOTT, R.; YOUNG, R. J. Investigation of elastic property relationships for flake and spheroidal cast irons using Raman spectroscopy. *Acta Materialia*, 2004.
- CZIKEL, J.; HUMMER, R. Qualitäts diagram für Gusseisen mit Lamellen graphit. In: Röhrig, K. & Brunhuber, E. Taschenbuch der Giesserei-Praxis. Schiele & Schön GmbH, 1992.
- ELLIOTT, R. Cast iron technology. Londres: Butterworth & Co, 1998.

FULLER, A. G.; EMERSON, P. J.; SERGEANT, G. F. A report on the effect upon mechanical properties of variation in graphite form in irons having varying amounts of ferrite and perlite in the matrix structure and the use of non destructive tests in assessments of mechanical properties of such irons. AFS Transactions, v.88, p. 21-50, 1980.

GOODRICH, G. M. Iron Castings Engineering Handbook. DesPlaineis: AFS, 2003.

GUESSER, W. L. Propriedades Mecânicas dos Ferros Fundidos. 1a.ed. São Paulo: Blucher, 2009.

GUERRA, M. J.; DONAIRE, D. Estatística indutiva: teoria e aplicações. 5. ed. São Paulo: LTCE, 1991

GUTHRIE, R. I. L.; JONAS, J. J. Microstructures, processing and properties of steel. In: ZWILSKY, K. M.; LANGER, E. L. Properties and Selection: Irons, Steels, and High Performance Alloys - ASM Metals Handbook. [S.l.]: ASM International, v. 1, p. 300, 1990.

GUZIK, E. Structure and mechanical properties as well as application of high quality vermicular cast iron. Archives of foundry engineering, p.95-100, 2010.

HACHENBERG, K.; KOWALKE, H.; MOTZ, J. M.; ROHRING, K.; SIEFER, W.; STAUDINGER, P.; TOLKE, P.; WERNING, H.; WOLTERS, D. B. Gusseisen mit Kugelgraphit. Konstruieren + Giessen, v.13.n.1, 1988.

HOLMGREN, D. Review of the thermal conductivity of cast iron, International Journal of Cast Metals Research (2005). Vol.23 (18), pp. 331-345

ISO 185. Grey cast irons - classifications, 15 ago. 2005.

ISO 945-1. Microstructure of cast iron. Part 1: Graphite classification by visual analysis, 2008.

ISO 1083. Spheroidal graphite cast iron - classification, 15 jul.

2004.

KOVACTS, B. V.; COLE, G.S. On the interaction of acoustic waves with SG iron castings. *AFS Transactions*, v. 83, p. 497-502, 1975.

LIKHITE, A.; PESHWE, D. R.; PATHAK, S. U. Effect of Graphitemorfology on modulus of elasticity of low carbon equivalent ductile iron. *Trans. Indian. Inst. Met.*, p. 491-501, 2008.

LORD, J. D.; MORRELL, R. Measurement Good Practice Guide No. 98 - Elastic Modulus Measurement. Teddington: National Physical Laboratory, 2006.

LOPER, J.C.R., R.W.HEINE; M.F CHAUDARI. *Thermal analysis for structure control. In the Metallurgy of Cast Iron*. 1974. Geneve, Switzerland.

MAYNARD, J. Resonant ultrasound spectroscopy. American Institute of Physics, n. AIP Publishing, p. 26-31, Janeiro 1996.

MARTINS, R, P, L. Avaliação das propriedades físicas dos ferros fundidos pelos métodos de ensaios não destrutivos: ultrassom e frequência de ressonância. Dissertação de Mestrado. Universidade Estadual de Santa Catarina. Joinville, 2015.

METALS HANDBOOK. Metallography, Structures and Phase Diagrams. Metals Park, Ohio: American Society for Metals, 8^a ed., vol8, Chap. Metalography technique for cast irons.p. 86-93, 1973.

NUAWI; BAHARI; ABDULLAH, S. Time Domain Analysis Method of the Impulse Vibro-Acoustic Signal for Fatigue Strength Characterisation of Metallic Material. 5th Fatigue Design Conference, Fatigue Design. 2013.

PALMER, K.B. The mechanical and physical properties of engineering grades of cast iron up to 500°C. *BCIRA Journal*, p. 417-425, BCIRA Report 1717, Nov. 1987.

RODRIGUESM J.A. Difração e Espectroscopia. Séries

apontamentos. Universidade Federal de São Carlos, 2016.

RIO TINTO IRON & TITANIUM, INC. Ductile iron data for engineers. Quebec, 1980.

STEFANESCU, D. M. Solidification of eutectic alloys: cast iron. In: STEFANESCU, D. M. ASM Metals Handbook - Properties and Selection: Irons, Steels, and High- Performance Alloys. [S.l.]: ASM International, v. 1,1998.

VDG P441 Merkblatt, Düsseldorf, August 1962.

VUOLO, J. H. Fundamentos da teoria de erros. 2. ed. São Paulo: Edgard Blücher, 1996.

WALTON, CF & OPAR, TJ.Iron Castings Handbook.Iron Casting Society, Inc. 1981.

WESSÉN, M.; SVENSSON, I. L. Cast iron design: processes, alloys and properties. In: TOTTEN, G. E.; XIE, L.; FUNATANI, K. Handbook of mechanical alloy design. Nova York: Marcel Dekker Inc., 2004.

WILLIAMS, J.A; MORRIS, J.H; BALL, A. The effect of transfer layers on the surface contact and wear of carbon-graphite materials, Tribology International, p. 663-677, 1997.

