

**UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO
ESCOLA DE ENGENHARIA DE SÃO CARLOS**

JOÃO CARLOS MATOS DRUCZKOSKI

**VIDA EM FADIGA TERMOMECÂNICA DE FERROS FUNDIDOS
CINZENTOS DAS CLASSES 25 E 30**

**SÃO CARLOS
2017**

JOÃO CARLOS MATOS DRUCZKOSKI

**VIDA EM FADIGA TERMOMECÂNICA DE FERROS FUNDIDOS
CINZENTOS DAS CLASSES 25 E 30**

Monografia apresentada ao Curso de Engenharia de Materiais e Manufatura, da Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo, como parte dos requisitos para obtenção do título de Engenheiro de Materiais e Manufatura.

Orientador: Prof. Dr. Waldek Wladimir Bose Filho

**SÃO CARLOS
2017**

AUTORIZO A REPRODUÇÃO TOTAL OU PARCIAL DESTE TRABALHO,
POR QUALQUER MEIO CONVENCIONAL OU ELETRÔNICO, PARA FINS
DE ESTUDO E PESQUISA, DESDE QUE CITADA A FONTE.

D794v Druczkoski, João Carlos Matos
VIDA EM FADIGA TERMOMECÂNICA DE FERROS FUNDIDOS
CINZENTOS CLASSES 25 E 30 / João Carlos Matos
Druczkoski; orientador Waldek Wladimir Bose Filho. São
Carlos, 2017.

Monografia (Graduação em Engenharia de Materiais e
Manufatura) -- Escola de Engenharia de São Carlos da
Universidade de São Paulo, 2017.

1. Ferro fundido cinzento. 2. Fadiga termomecânica.
3. Metalografia. 4. Microdureza. 5. Image J. 6. Análise
de imagens. I. Título.

FORMULÁRIO PARA RELATÓRIO DE DEFESA DE TCC

Relatório de defesa pública de Trabalho de Conclusão de Curso da Escola de Engenharia de São Carlos, da Universidade de São Paulo.

Nome: João Carlos Matos Druczkoski		Nº USP: 7591160
Orientador: Waldek Wladimir Bose Filho		Nº USP:
Título do TCC: VIDA EM FADIGA TERMOMECAÂNICA DE FERROS FUNDIDOS CINZENTOS DAS CLASSES 25 E 30		
Curso: Engenharia de Materiais e Manufatura		
Disciplina: SMM0325 - Trabalho de Conclusão		
Local da defesa:	Data de defesa: 19/06/2017	Hora da defesa: 10:00:00

Após declarada aberta a sessão, o(a) Sr(a) Presidente passou a palavra aos examinadores para as devidas arguições. Em seguida, a Comissão Julgadora proclamou o resultado:

Membros da Comissão Julgadora	Vínculo	Sigla Unidade	Nota
Waldek Wladimir Bose Filho	SMM	EESC	8,0
Marcelo Falcão de Oliveira	SMM	EESC	8,0
Márcio Henrique Ferreira	SMM	EESC	8,0

Média= (8,0) Cito		
Resultado final	<input checked="" type="checkbox"/> Aprovado	<input type="checkbox"/> Reprovado

Eu, Luiz M. G. Fabricio, lavrei o presente relatório que assino com os(as) senhores(as). São Carlos, 19/06/2017.

 Marcelo Falcão de Oliveira	 Márcio Henrique Ferreira
---	--

 Waldek Wladimir Bose Filho	
---	--

*A minha família pela compreensão,
carinho e apoio incansável.*

AGRADECIMENTOS

Primeiramente aos meus pais João Druczkoski e Marília Celeste Matos Druczkoski e a meu irmão César Matos Druczkoski por todo o apoio e esforço para a minha educação e necessidades ao longo dos anos.

Ao governo do Brasil e a Universidade de São Paulo pelo suporte e a educação gratuita e de qualidade.

Ao Professor Doutor Waldek Wladimir Bose Filho, pela orientação, ajuda e incentivo para concluir este trabalho.

Ao Mestre Márcio Henrique Ferreira, pelo respeito, partilha de conhecimentos e auxílio na elaboração deste trabalho.

Aos técnicos do Departamento de Engenharia de Materiais da Universidade de São Paulo pela assistência e suporte necessário na produção deste trabalho.

A empresa TUPY por fornecer os materiais necessários para a realização deste trabalho.

Aos professores do curso de Engenharia de Materiais e Manufatura da Universidade de São Paulo pela partilha dos seus conhecimentos ao longo de todo o curso.

Aos meus diversos amigos e colegas de curso, pelos anos de apoio e amizade.

A todos que, direta ou indiretamente, possibilitaram a elaboração deste trabalho.

“O universo deu luz a consciência, e a
consciência dá significado ao universo.”

John Archibald Wheeler

RESUMO

DRUCZKOSKI, J. C. M. **Vida em fadiga termomecânica de ferros fundidos cinzentos das classes 25 e 30.** 2017. Monografia (Trabalho de Conclusão de Curso) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2016.

Ferro fundido é um dos materiais mais utilizados nas indústrias, principalmente na indústria automobilística na fabricação de blocos e cabeçotes de motor. Estes componentes estão sujeitos a ciclos térmicos e mecânicos, tornando importante o entendimento do comportamento destes materiais nestas situações, as quais podem gerar trincas localizadas resultantes do fenômeno chamado fadiga termomecânica. Com o objetivo de criar componentes mais resistentes, de menor tamanho de parede e conseqüentemente de menor peso, as empresas fabricantes destes componentes têm buscado o desenvolvimento de ferros fundidos de resistência mecânica mais elevada. O presente trabalho tem como intuito estudar as propriedades mecânicas de duas ligas de ferro fundido cinzento, uma comumente utilizada na fabricação dos componentes, denominada de classe 25 e a outra denominada classe 30, correlacionando-as com as suas características microestruturas. Foram realizadas medições de dureza, ensaios de tração e de fadiga termomecânica, e análise microestrutural de caracterização, distribuição de tamanho, porcentagem, fator de forma da grafita presente, estas análises realizadas com o auxílio de um analisador de imagens computadorizado e pelo programa Image J. Pelos resultados obtidos pode-se concluir que apesar de ambas as ligas apresentarem morfologias de grafita extremamente similares, a liga de classe classe 30 possui uma matriz de dureza mais elevada que a de classe classe 25, o que influenciou negativamente na sua vida em fadiga termomecânica, pela redução de plasticidade da sua matriz.

Palavras-chave: Ferro fundido cinzento. Fadiga termomecânica. Metalografia. Microdureza. Image J. Análise de imagens.

ABSTRACT

DRUCZKOSKI, J. C. M. **Thermomechanical Fatigue Live In Gray Cast Iron class 25 and 30**. 2017. Monografia (Trabalho de Conclusão de Curso) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2016.

Cast iron is one of the most used materials on several of industries, it's utilization in the automotive industry as component for engine heads and blocks, components with cycles of thermic and mechanic loading giving importance to the study of it's behaviour on those applications, wich can lead to localized cracks resulting from the phenomenon called thermomechanical fatigue. Seeking to create s more resistant, same size, thin walled and consequentially lighter engine components, companies that produce this components have seeked to elaborate a gray cast iron with enhanced mechanical properties. The present paper was made with the objective of studying a relation between the mechanical properties of two gray cast iron alloys, an class 25, commonly used as the material for said components and the class 30. Tensile and thermomechanical tests were made to determine the mechanical behaviour, this tests were folowed by the microstrural analisys of the alloys, wich were the characterization, size distribution, percentage, shape fator of the present grafite and microhardness of it's pearlite matrix, said analisys were assisted using digital image analisys with the Image J software. Based on the results the author was able to conclude that despite both alloys having extremely similar graphite morphologies, the class 30 alloy has a greater matrix hardness than the class 25 alloy, wich negatively influenced it's thermomechanical fatigue life, caused by the reduction of the plasticity of the matrix.

Keywords: Gray cast iron. Thermomechanical fatigue. Metallography. Microhardness. Image J. Image analisys.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 - Produção mundial de ferros fundidos, aço e metais não ferrosos.....	4
Figura 2 - Diagrama de fases Fe-C.....	5
Figura 3 - Diagrama de Maurer.....	5
Figura 4 - Faixa aproximada da quantidade de carbono e silício nas ligas ferrosas.....	6
Figura 5 - Micrografia de um ferro fundido nodular mostrando nódulos de grafita atuando como barreiras para a propagação de trincas.....	6
Figura 6 - Micrografia de um ferro fundido cinzento mostrando trincas propagando-se na matriz através dos veios de grafita.....	8
Figura 7 - Microestruturas básicas e processamentos para obter as ligas comuns de ferro fundido.	9
Figura 8 - Efeito da nodularidade nas propriedades térmicas e mecânicas de ferros fundidos.....	10
Figura 9 - Efeito da temperatura na vida em fadiga de ferro fundido vermicular ferrítico.....	10
Figura 10 - Tensão e temperatura nos diferentes modos de FTM, em fase (a) e fora de fase (b).....	12
Figura 11 - Estruturas tridimensionais vistas no plano.....	14
Figura 12 - Fluxograma de etapas de análise de imagens.....	15
Figura 13 - Exemplo de manipulação do histograma.....	15
Figura 14 - Exemplo da técnica de limiarização.....	16
Figura 15 - Efeito do "watershed".....	17
Figura 16 - Classificação de objetos através de medições.....	17
Figura 17 - Tipos básicos de medições.....	18
Figura 18 - Bloco Y especificado pela norma, com os CPs para análise retirados de A e B.....	19
Figura 19 - Esquemática do teste FTM fora de fase.....	20
Figura 20 - Geometria dos CPs para ensio FTM.....	21
Figura 21 - Tipos de distribuição de grafita.....	22
Figura 22 - Contorno dos objetos cujos tamanhos foram medidos, CP5 aumento de 100x.....	23
Figura 23 - Opções de análise do software Image J versão 1.6.....	24
Figura 24 - Tela do microdurômetro, mostrando os valores relevantes para a análise.....	25
Figura 25 - Gráfico tensão e deformação da Liga classe 30.....	26
Figura 26 - Gráfico de tensão e deformação da Liga classe 25.....	27

Figura 27 - Gráfico de tensões por ciclo para o CP1, seta vermelha para o ciclo onde ocorre a falha do CP.....	28
Figura 28 - Gráfico de tensões por ciclo para o CP2, seta vermelha para o ciclo onde ocorre a falha do CP.....	28
Figura 29 - Gráfico de tensões por ciclo para o CP3, seta vermelha para o ciclo onde ocorre a falha do CP.....	29
Figura 30 - Gráfico de tensões por ciclo para o CP4, seta vermelha para o ciclo onde ocorre a falha do CP.....	29
Figura 31 - Classe 30 100x de aumento, sem ataque, apresentando grafita tipo VII-A 3-5-6.....	30
Figura 32 - Classe 25 100x de aumento, sem ataque, apresentando grafita tipo VII-A-C 3-4-5.....	31
Figura 33 - CP1, aumento de 1000x, ataque com nital 2%, estrutura puramente perlítica.....	31
Figura 34 - CP5, aumento de 1000x, ataque com nital 2%, estrutura puramente perlítica.....	32
Figura 35 - Distribuição de tamanhos dos Classe 30 e Classe 25.....	33
Figura 36 - Medição pelo software (esq.) 120 um e medição manual (dir.) aproximadamente 158 um.....	34
Figura 37 – Porcentagem de grafita de cada CP.....	35
Figura 38 – Fator de forma para cada CP.....	36
Figura 39 – Microdureza da matriz para cada CP.....	37

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Faixa de composição de ligas de ferro fundido conzento.....	8
Tabela 2 - Denominação dos CPs para análise metalográfica e de microdureza.....	21
Tabela 3 - Resultados do ensaio de tração para a Liga Classe 30.....	26
Tabela 4 - Resultados do ensaio de tração para a Liga Classe 25.....	27
Tabela 5 - Resultados dos ensaios de FTM.....	29
Tabela 6 - Resultados da análise de tamanho de grafita para o Classe 30.....	32
Tabela 7 - Resultados da análise de tamanho de grafita para o Classe 25.....	32
Tabela 8 - Resultados da análise de porcentagem de grafita.....	34
Tabela 9 - Resultados da análise de fator de forma da grafita.....	35
Tabela 10 - Resultados da análise de microdureza.....	36

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

A.C.	–	Antes de Cristo.
ASM	–	American Society for Metals.
ASTM	–	American Society for Testing and Materials.
CP	–	Corpo de prova.
CPs	–	Corpos de prova.
D.C.	–	Depois de Cristo.
FTM	–	Fadiga termomecânica.
HV	–	Hardness Vickers (Dureza Vickers)

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO.....	1
2 OBJETIVOS.....	2
3 REVISÃO DA LITERATURA.....	3
3.1 Contexto Histórico.....	3
3.2 Definição.....	4
3.3 Classificação.....	6
3.4 Propriedades Térmicas e Mecânicas.....	9
3.5 Introdução a Fadiga termomecânica.....	11
3.6 Análise Microestrutural.....	12
3.7 Observação da microestrutura.....	13
3.8 Elementos da microestrutura.....	13
3.9 Análise de Imagens.....	14
3.10 Programa para análise de imagens.....	17
4 PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL.....	19
4.1 Material.....	19
4.2 Corpos de prova.....	19
4.3 Ensaio de tração.....	19
4.4 Ensaio de fadiga termomecânica.....	20
4.5 Análises metalográficas.....	21
4.5.1 Classificação da grafita.....	22
4.5.2 Análise microestrutural.....	23
4.5.3 Distribuição dos tamanhos da grafita.....	23
4.5.4 Porcentagem da grafita e fator de forma.....	24
4.6 Análises de microdureza da matriz.....	24
5 RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	26
5.1 Ensaio de tração.....	26
5.2 Ensaio de FTM.....	28
5.3 Análises metalográficas.....	30
5.3.1 Classificação da grafita.....	30
5.3.2 Análise microestrutural.....	31
5.3.3 Distribuição dos tamanhos da grafita.....	31
5.3.4 Porcentagem da grafita	34

5.3.5 Fator de forma.....	35
5.4 Análises de microdureza da matriz.....	36
6 CONCLUSÃO.....	38
7 RECOMENDAÇÃO PARA TRABALHOS FUTUROS.....	39
8 BIBLIOGRAFIA.....	40

1 INTRODUÇÃO

O ferro fundido é um dos materiais mais utilizados, devido principalmente a sua ótima usinabilidade e baixo custo, a evolução dos processos de tratamento térmico melhorou ainda mais as propriedades dos ferros fundidos, possibilitando seu uso substituindo alguns componentes de aço.

Existem várias classes de ligas de ferros fundidos, dentre elas o ferro fundido cinzento é de grande importância para diversas indústrias, principalmente para a indústria automotiva, onde é amplamente utilizado para a produção de blocos e cabeçotes de motores, ambos componentes submetidos a ciclos térmicos e mecânicos, o que pode levar a formação de trincas, este fenômeno é conhecido como fadiga termomecânica. Portanto, é de grande importância determinar o comportamento dessas ligas quando submetidas a estes tipos de carregamentos.

Visando obter componentes mais resistentes, de parede mais fina e mais leves, as empresas fabricantes destes componentes tem buscado a elaboração de ferros fundidos cinzentos de classe mais elevada. O presente trabalho visa analisar os comportamentos de duas ligas, Classe 25 e Classe 30 quando submetidas a testes de tração e FTM, comparando-os com as suas respectivas microestruturas.

2 OBJETIVOS

O objetivo do presente trabalho é avaliar o desempenho em vida em fadiga termomecânica de duas ligas de ferros fundido cinzento, relacionando este comportamento com características microestruturais.

Os objetivos específicos deste trabalho são:

- Determinação da vida em fadiga termomecânica.
- Determinar as características microestruturais das ligas testadas.
- Correlacionar as propriedades mecânicas com as microestruturas relacionadas.

3 REVISÃO DA LITERATURA

3.1 Contexto Histórico

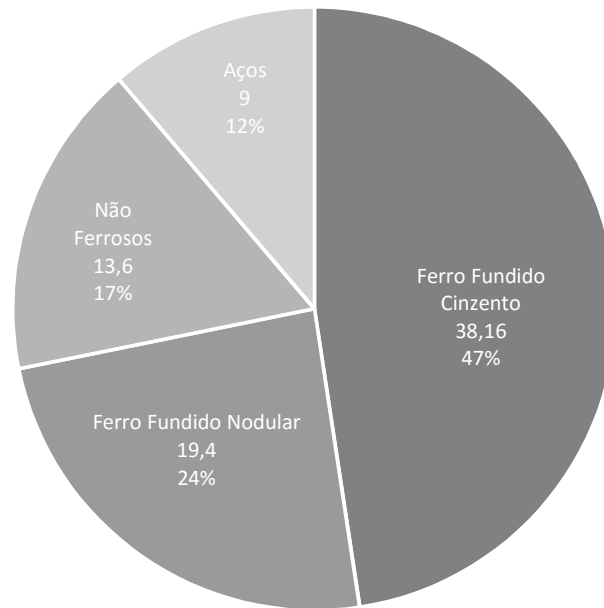
Segundo historiadores o primeiro indício de utilização do ferro fundido se dá em torno do século 5 A.C. na China, era utilizado principalmente para armas, ferramentas para agricultura e na arquitetura local [1]. Mas sua produção em massa não foi possível até o século 18 D.C., que difundiu e permitiu a utilização de ferro fundido na construção, como por exemplo da chamada “Ironbridge”, ou Ponte-de-Ferro, na Inglaterra em 1779. Foi de extrema importância para a revolução industrial e desde este período se mantém como um dos materiais de engenharia mais úteis e abrangentes no mundo, sua utilização cresceu ainda mais após a Segunda Guerra Mundial com o desenvolvimento do ferro fundido nodular, que é menos frágil que os outros tipos. Hoje em dia ferro fundido é utilizado amplamente na fabricação de tubulações, maquinários e nas indústrias automotiva, naval, ferroviária, entre outras.

Dentre as características que tornam o ferro fundido tão importante para a engenharia estão [2,3,4,5]:

- Alta fluidez
- Fácil fundição
- Baixa retração
- Ótima usinabilidade
- Excelente amortecimento (comparado ao aço)
- Alta resistência a fadiga
- Baixo custo

Na economia, ferro fundido, mais especificamente ferro fundido nodular e cinzento, representam a maior parte dos produtos fundidos mundialmente, aproximadamente 57,5 milhões de toneladas em 2010, Figura 1, de acordo com o Modern Casting Census of World Casting Production [3].

Produção Mundial em Milhões de Toneladas



Fonte: Adaptado de [6].

Figura 1 - Produção mundial de ferros fundidos, aço e metais não ferrosos.

3.2 Definição

O termo ferro fundido é empregado para definir as ligas de ferro-carbono-silício com um teor de carbono entre de 2,1% e 4% em peso e um teor de silício entre 1% e 3%, neste o carbono está presente em grande parte de forma “livre” na estrutura, pois seu teor elevado supera a sua solubilidade na austenita, formando veios, lamelas ou nódulos. Como demonstrado no diagrama de equilíbrio Ferro-Carbono, Figura 2, parte da solidificação do ferro fundido se dá no ponto eutético, podendo ser tanto hipoeutético, eutético ou hipereutético, mas no geral as composições mais utilizadas se mantêm próximas do ponto eutético, portanto tendo temperaturas de fusão próximas as deste, em torno de 1200 °C, o que contribui para as características de fundição e fluidez dos ferros fundidos.

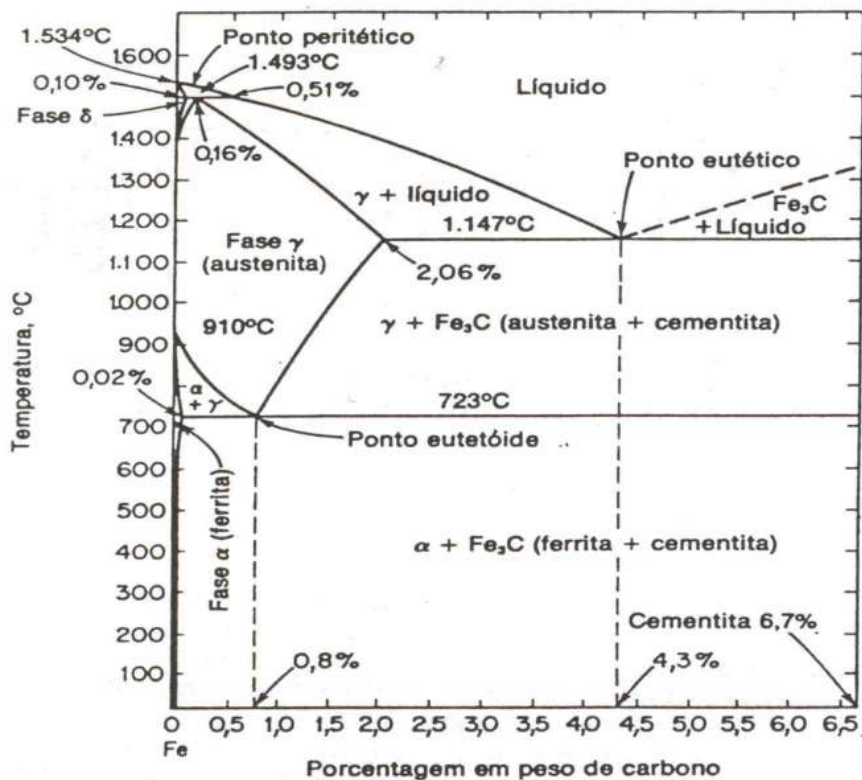


Figura 2 - Diagrama de fases Fe-C [10].

Silício é um constituinte de grande importância para os ferros fundidos, pois age desestabilizando a cementita (Fe_3C) e aumentando a da ferrita, modificando a microestrutura resultante, isto é demonstrado no diagrama de Maurer na Figura 3, que correlaciona teores de C e Si para uma taxa convencional de resfriamento e até quais teores as microestruturas são estáveis [7].

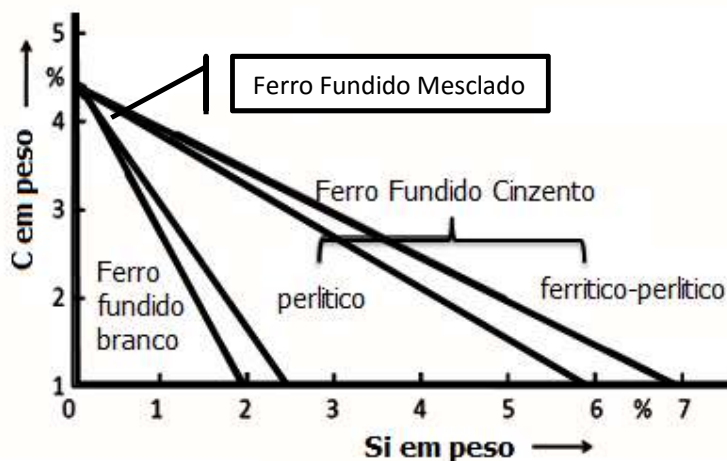


Figura 3 - Diagrama de Maurer. Adaptado de Velichko [7].

3.3 Classificação

O primeiro método, e ainda comumente utilizado, de classificação de ferros fundidos dependia do aspecto visual de sua superfície de fratura, de acordo com esta classificação rudimentar existiam dois tipos de ferros fundidos. Ferros fundidos brancos, com uma superfície branca e cristalina pois a fratura ocorre seguindo as placas de cementita (Fe_3C) presentes, e ferros fundidos cinzentos, com uma superfície cinzenta pois a fratura ocorre seguindo os planos de grafita presentes.

Atualmente podemos classificar ferros fundidos de acordo com a sua microestrutura, sendo que esta depende de diversos fatores, como: velocidade de solidificação, presença de elementos de liga, tratamento térmicos, etc. Microestrutura tal que infere diretamente nas propriedades mecânicas da liga [9]. Segue abaixo uma classificação comumente aceita, Figura 4.

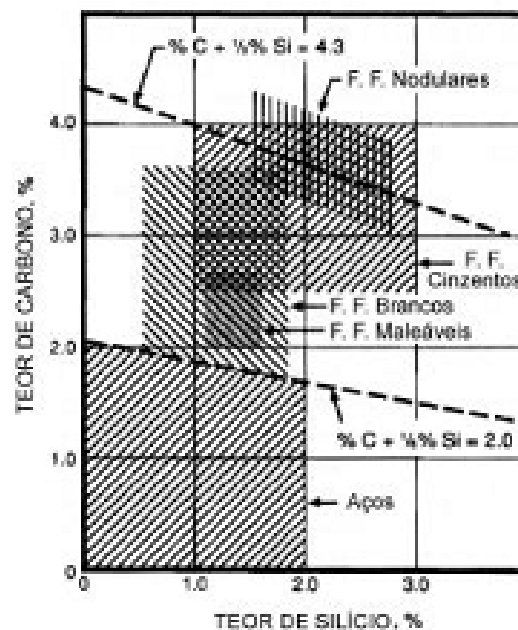


Figura 4 - Faixa aproximada da quantidade de carbono e silício nas ligas ferrosas [11].

Ferro fundido branco: fratura de coloração clara, possui grande quantidade de carbonetos na microestrutura, característica causada por uma alta velocidade de resfriamento ou induzida por elementos de liga, tornando este ferro fundido resistente a abrasão e de alta dureza, mas por consequência muito frágil.

Ferro fundido maleável: é obtido a partir do ferro fundido branco quando este é submetido a um tratamento térmico especial chamado maleabilização, transformando praticamente toda a cementita presente em grafita na forma de nódulos de formato irregular, também chamada de grafita de recozimento, em uma matriz ferrítica ou perlítica, obtendo ductilidade e resistência à tração boas.

Ferro fundido nodular: criado na primeira metade do século XX, combina as propriedades de fundibilidade do ferro fundido cinzento com propriedades mecânicas similares as do aço caracterizado pela presença de grafita na forma de nódulos, devido a utilização de Magnésio (Mg) como agente esferoidizante, conferindo uma ductilidade elevada, também chamado de ferro fundido dúctil. Uma característica importante de ressaltar é a ação dos nódulos de grafita como barreiras para a propagação de trincas no material, Figura 5 [13].

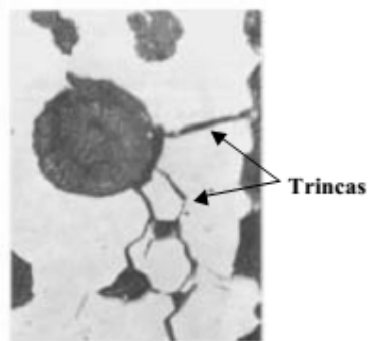


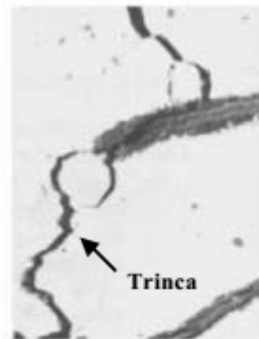
Figura 5 - Micrografia de um ferro fundido nodular mostrando nódulos de grafita atuando como barreiras para a propagação de trincas. [13].

Ferro fundido mesclado: fratura de coloração mista entre branca e cinzenta, caracterizado por ser uma mescla de proporções variadas de ferro fundido branco e cinzento, apresentando carbono tanto na forma de cementita quanto na de grafita;

Ferro fundido vermicular: possui grafitas espessas, arredondadas, interligadas e interconectadas fato que favorece a sua condutibilidade térmica, amortização de vibrações e redução do efeito de entalhe, possuindo boa plasticidade e elevada resistência mecânica.

Ferro fundido cinzento: é o material utilizado neste trabalho, juntamente com o ferro fundido branco é um dos mais antigos e comuns dos tipos de ferro, possui fratura de coloração acinzentada que se dá pela presença de veios de grafita em uma matriz ferrítica, perlítica ou uma mistura de ambas. Possui ótima fluidez e boa expansão e baixa contração durante solidificação o tornam excelente para a produção de peças de geometria complexa, sem rechupes e a baixo custo, sendo comumente utilizado em blocos de motores de combustão

interna. O fato de possuir a grafita na forma de lamelas é de extrema importância para o comportamento mecânico dessa liga, pois esta age como um intensificador de tensão causando nucleação e propagação de trincas com facilidade, demonstrado na Figura 6, mas ao mesmo tempo também melhoram as propriedades de usinabilidade, amortecimento de vibrações e auto-lubrificação do ferro fundido [13].



Fonte:

Figura 6 - Micrografia de um ferro fundido cinzento mostrando trincas propagando-se na matriz através dos veios de grafita. [13].

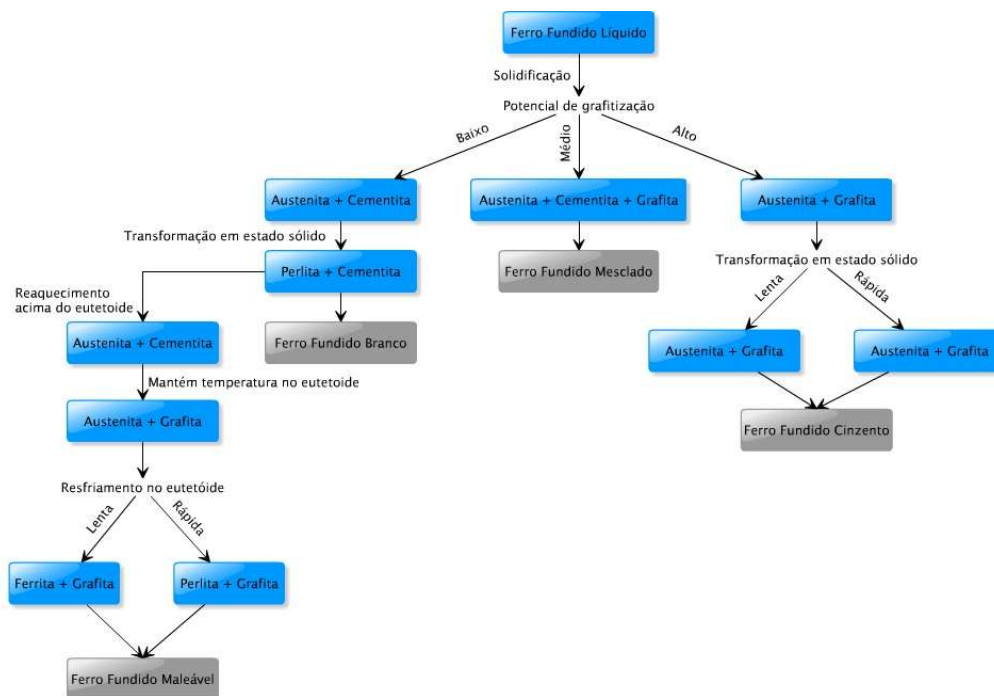
Possuem uma faixa de composição bastante ampla conforme demonstrado na Tabela abaixo [12].

Tabela 1 - Faixa de composição de ligas de ferro fundido cinzento.

Elemento	C	Si	Mn	P	S
Quantidade	2,5% a 4%	1% a 3%	0,2% a 1%	0,02% a 1%	0,02% a 0,25%

Fonte: Chiaverini, 2008.

Na Figura 7 temos um resumo dos tipos de ferro fundido discutidos acima, classificando-os em relação a potencial de formação de grafita (grafitização), tratamentos térmicos e transformações microestruturais sofridas. [2]

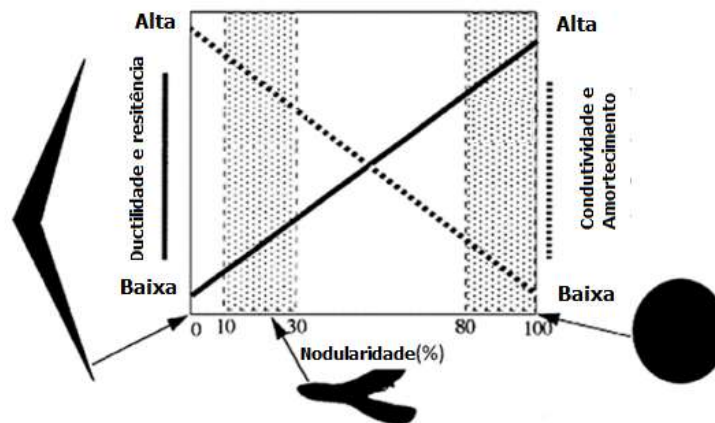


Fonte: Adaptado de Davis [2].

Figura 7 - Microestruturas básicas e processamentos para obter as ligas comuns de ferro fundido.

3.4 Propriedades Térmicas e Mecânicas

Como descrito anteriormente as propriedades de ferros fundidos são em grande parte definidas pelo tipo de grafita presente e pela matriz de ferro. Existe também uma relação inversamente proporcional entre as propriedades mecânicas e térmicas dos ferros fundidos, isto é, elevadas propriedades mecânicas são acompanhadas de baixas propriedades térmicas, e baixas propriedades mecânicas acompanhadas de altas propriedades térmicas [3] portanto é necessária uma boa análise de quais propriedades são foco quando se estiver projetando componentes de ferro fundido. A principal razão por esta troca existente entre as propriedades é pela forma e anisotropia da fase de grafita, boas propriedades mecânicas estão associadas a grafita na forma mais esferoidal, ou seja, mais nodular, e boas propriedades térmicas com uma grafita na forma de veios [3], como podemos ver na Figura 8.

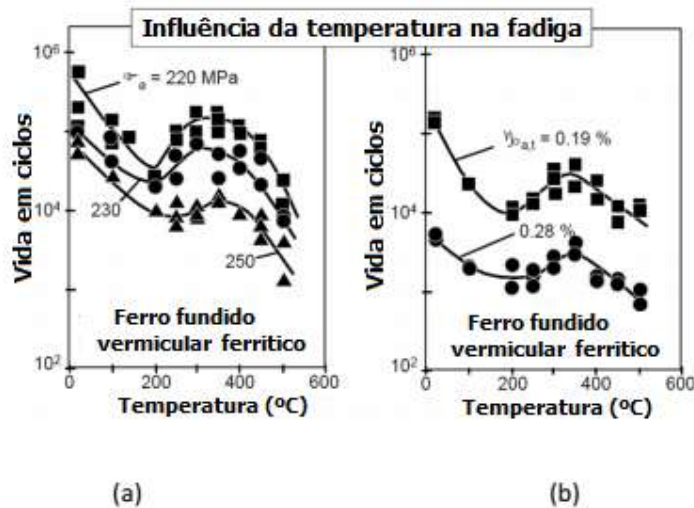


Fonte: Adaptado de Rundman [3].

Figura 8 - Efeito da nodularidade nas propriedades térmicas e mecânicas de ferros fundidos.

A temperatura também é fator importante, no geral as propriedades mecânicas e térmicas de ferros fundidos diminuem com o aumento da temperatura [14,15,16,17], o que dificulta sua utilização em altas temperaturas.

Em análises de vida em fadiga de ferros fundidos, o aumento da temperatura tem uma influência peculiar, criando, em testes com tensão, Figura 9 (a), e deformação, Figura 9 (b), constantes, primeiramente uma diminuição do número de ciclos e após este vale é observado um aumento da vida até aproximadamente 400°C seguido por outra diminuição, como provado por Löde [15], que também observou uma diminuição da vida em ciclos e o aumento tanto de tanto a tensão quanto a deformação, como demonstrado na Figura 9.



Fonte: Adaptado de Löhe [15].

Figura 9 - Efeito da temperatura na vida em fadiga de ferro fundido vermicular ferrítico.

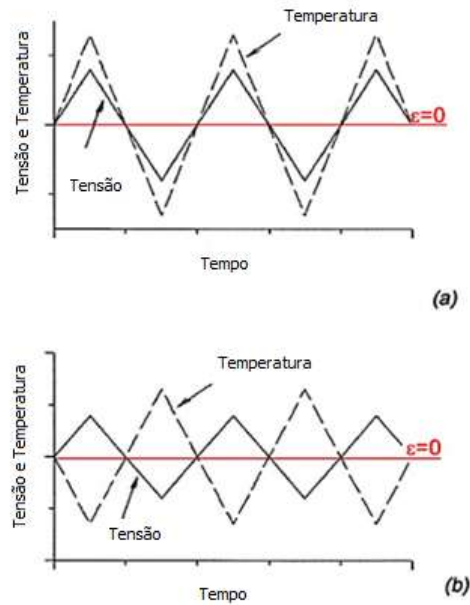
3.5 Introdução à fadiga termo mecânica

Comumente descrita como o enfraquecimento de um material quando submetido a carregamentos repetitivos, a fadiga é o principal causador de falhas em componentes mecânicos, sendo responsável por mais de 90% das falhas [18]. A fadiga é caracterizada por causar nucleação e propagação de trincas em materiais em níveis de tensões abaixo do que as tensões monotômicas até que tais trincas se tornem danosas o suficiente para causar a falha do material, sendo geralmente analisada sob controle de carga (tensão) ou deformação.

Considerando a vida para nucleação, a fadiga de alto ciclo é associada com baixos valores de tensão e número alto de ciclos até a falha (acima de 10^5 ciclos), a fadiga de baixo ciclo é caracterizada por apresentar elevadas tensões e baixo número de ciclos até a falha e a fadiga termomecânica, que é foco deste trabalho, é considerada uma classe de FBC [19], pois apresenta deformações plásticas e baixo número de ciclos até a falha, basicamente FTM é causada por tensões e deformações decorrentes de mudanças de carregamentos térmicos e mecânicos. É importante distinguir FTM de Fadiga Térmica (FT) que é caracterizada por tensões desenvolvidas sob ciclos térmicos sem solicitação externa, FTM é mais danosa quando comparada com FT pois causa um gradiente térmico no material enquanto ele expande e uma expansão próxima a concentradores de tensão (inclusões, outras fases, etc.) geralmente é restringida pelo material mais frio a seu redor, transformando carregamentos térmicos em carregamentos mecânicos o que causa maiores danos a estrutura, gerando uma redução na vida em ciclos de mais de uma ordem de magnitude quando comparada a FT. Segundo Sehitoglu [20] FTM também pode envolver outros mecanismos como fluência e oxidação, estes de diferenciam com base no histórico da deformação e temperatura.

FTM é comumente encontrada em vasos de pressão e tubulações, na indústria aeronáutica, na de geração de energia elétrica e na indústria automobilística, sendo a maioria destes componentes aços ferríticos e austeníticos, ligas de alumínio, ligas de titânio, ligas de ferro fundido, entre outras [19]. Na indústria automobilística, principalmente em motores a diesel, a maioria dos componentes, como blocos de motor e cabeçotes, são fabricados utilizando ferro fundido, pois este possibilita propriedades mecânicas e térmicas ótimas. Mas tais componentes são submetidos a elevadas temperaturas (aprox. 450°C) por longos períodos de tempo, e também por grandes quantidades de ciclos térmicos (aprox. 4000 ciclos em 5 anos). Tais ciclos térmicos causam uma deterioração nas propriedades mecânicas e térmicas do material acelerando o dano por fadiga o que, com o passar do tempo, gera falha no material. Já foi determinado por diversos pesquisadores [21,22] que, em motores à combustão, o fenômeno

da FTM é decorrente do ciclo Liga-Opera-Desliga e não dos ciclos de combustão interna motor. Cabeçotes por exemplo estão constantemente submetidos a FTM do tipo fora de fase, ou seja, uma FTM onde o material está submetido a máxima tensão e a mínima temperatura ao mesmo tempo e vice-versa [21], há também um outro tipo de FTM chamado de FTM do tipo em fase, quando os valores máximos e mínimos de tanto tensão quanto temperatura ocorrem simultaneamente, exemplificados na Figura 10.



Fonte: Adaptado de Ghodrat [6].

Figura 10 - Tensão e temperatura nos diferentes modos de FTM, em fase (a) e fora de fase (b).

3.6 Análise Miroestrutural

O ASM Handbook [23] define metalografia como o estudo da constituição e estrutura dos metais e ligas, tal análise podendo ser feita desde a observação a olho nu até aumentos de 100.000 vezes ou mais pela utilização de microscópios eletrônicos, é comumente dividida em macrografia e micrografia, dependendo da quantidade de aumento utilizada.

A macrografia é a análise de estruturas maiores que 1 mm, englobando diversas estruturas importantes para as propriedades do material, como estruturas de solidificação, porosidades de fundidos, características de soldos (profundidade de penetração, tamanho da zona de fusão e da zona termicamente afetada, imperfeições, número de passes), tamanho e distribuição de inclusões macroscópicas, características de camadas superficiais, etc.[23]

A micrografia engloba a análise de aumentos maiores, englobando estruturas da ordem de tamanho de grão, microporosidades, outras fases, inclusões, entre outras, que tem relação direta com as propriedades dos materiais [24].

Um ponto importante para a análise metalográfica é a preparação da superfície, esta precisa ser feita de maneira a produzir o contraste necessário entre os componentes a serem analisados, evitando sempre introduzir defeitos de preparação que dificultariam a análise.

3.7 Observação da microestrutura

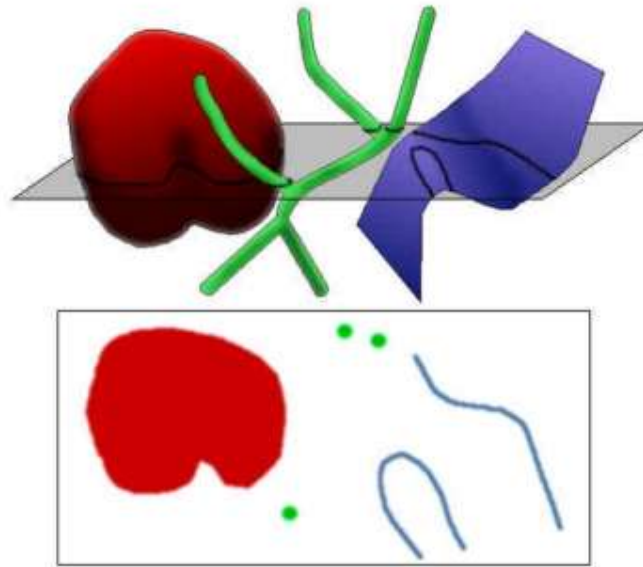
Para a análise micrográfica é necessária a utilização de um microscópio, comumente óptico de luz refletida, onde a luz incide sobre a amostra e é refletida por ela, com maior ou menor intensidade variando com o relevo superficial ou da coloração dos constituintes gerada na etapa de ataque [27]. O registro das imagens obtidas evoluiu com a tecnologia disponível, sendo inicialmente realizado com lápis e papel, seguido por fotografias em filme e mais recentemente em fotografias digitais de alta qualidade.

3.8 Elementos da microestrutura

Segundo Russ e Dehoff [28] no interior de uma liga metálica pode-se verificar a presença de diversas estruturas, estas classificadas em:

- a) Tridimensionais: possuem volume, são partículas, grãos, poros ou vazios.
- b) Bidimensionais: comumente superfícies de objetos tridimensionais e suas interfaces.
- c) Unidimensionais: retas e curvas formadas por interseções de superfícies.
- d) Adimensionais: pontos de encontro, ou estruturas cujas dimensões não podem ser determinadas com o aumento utilizado.

Na análise metalográfica, a estrutura da liga é observada no chamado plano metalográfico onde as estruturas estão reduzidas de uma dimensão, ou seja, volumes são vistos como áreas, áreas como linhas, linhas como pontos e pontos tem uma probabilidade extremamente baixa de serem interceptados pelo plano, como pode ser observado na Figura 11 [28].



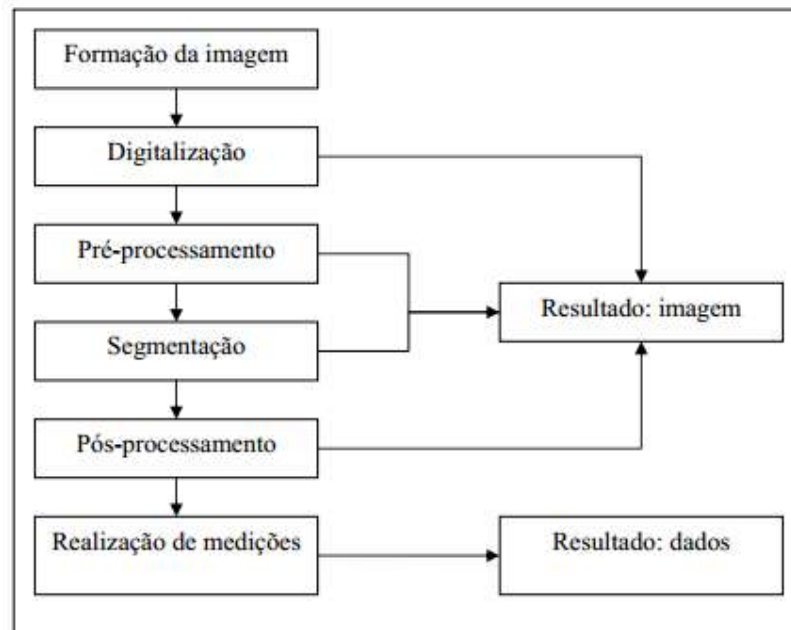
Fonte: Adaptada de Gonzales [29].

Figura 11 - Estruturas tridimensionais vistas no plano.

3.9 Análise de Imagens

A tecnologia sempre foi aliada da engenharia, facilitando atividades que necessitam de operações repetitivas e complexas, como é o caso das análises decorrentes da metalografia. A computação agiliza e em alguns casos automatiza as análises, minimizando a necessidade de intervenção do operador, melhorando a repetitividade dos resultados eliminando a percepção possivelmente viesada do operador [23].

Mas para a análise é importante que as imagens estejam no formato próprio para seu processamento, as etapas necessárias seguem conforme a Figura 12.

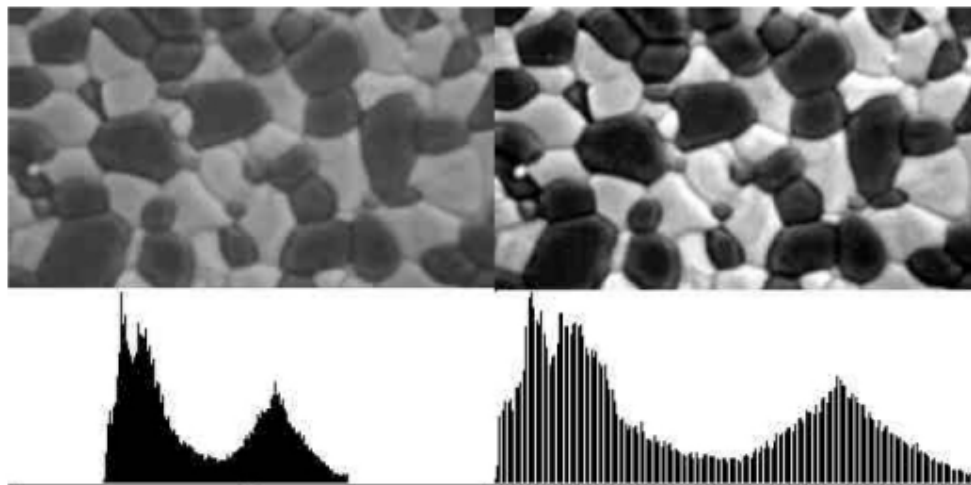


Fonte: Adaptada de ASM Handbook [23].

Figura 12 - Fluxograma de etapas de análise de imagens.

As etapas de formação e digitalização são feitas geralmente por uma câmera acoplada ao microscópio, o pré-processamento é utilizado para a correção de defeitos produzidos na produção da imagem, o que iriam dificultar as etapas subsequentes [23].

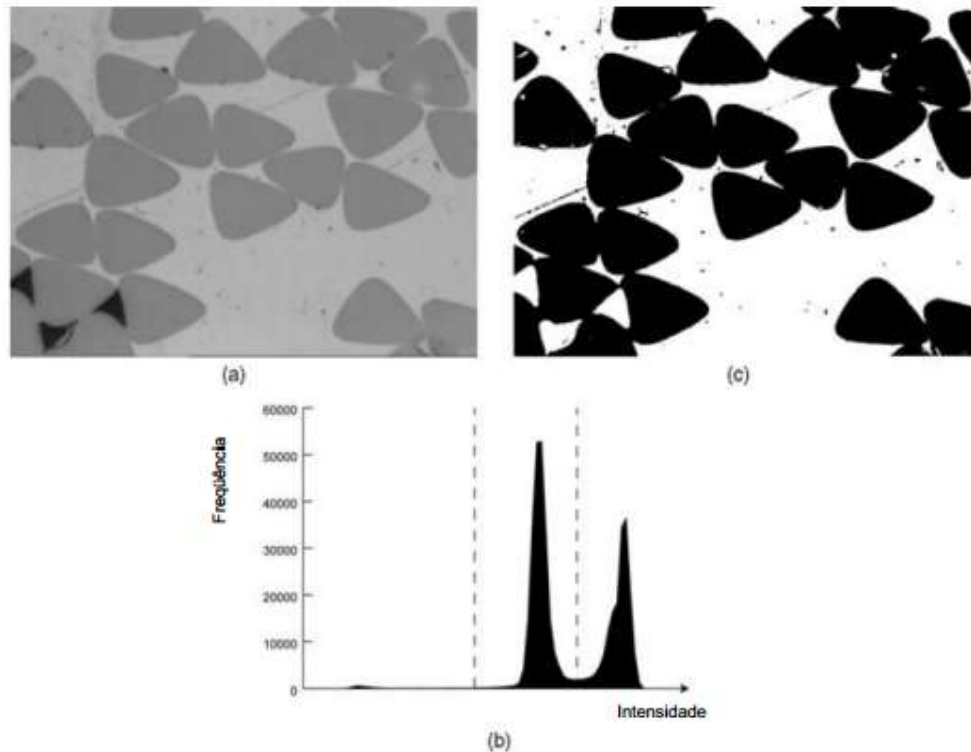
Uma das operações de pré-processamento mais comuns é a da manipulação do histograma da imagem a fim de obter um contraste melhor entre as cores, na Figura 13 temos um exemplo disso, com uma imagem de 256 tons de cinza [29].



Fonte: Extraído de [28].

Figura 13 - Exemplo de manipulação do histograma.

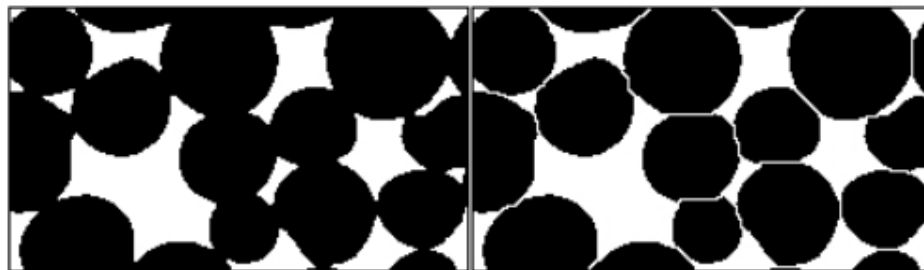
A etapa de segmentação é considerada extremamente complexa da análise de imagens e consiste na discriminação dos objetos da imagem, a técnica mais utilizada atualmente é a de thresholding, ou seja, limiarização onde é selecionado todos os pixels da imagem cuja intensidade está compreendida entre determinados valores, essa seleção pode ser realizada manualmente ou automaticamente pelo programa escolhido. Na Figura 14 temos um exemplo dessa técnica, em (a) temos a imagem original em (b) o histograma limiarizado e em (c) a imagem segmentada [29].



Fonte: Adaptada de Rasband [31].

Figura 14 - Exemplo da técnica de limiarização.

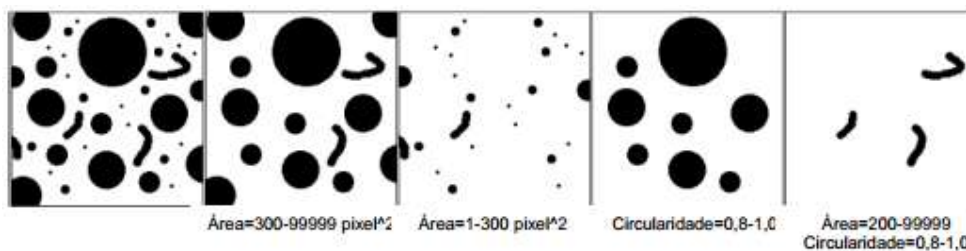
O pós-processamento é outra etapa bastante complexa, onde temos uma análise da interconectividade entre os pixels da imagem. Pode-se nesta etapa definir o contorno de objetos, Figura 15, também chamado de efeito watershed [23].



Fonte: Adaptada de Rasband [31].

Figura 15 - Efeito do "watershed".

Nesta etapa também são possíveis a medição e a classificação de objetos na imagem com base em condições determinadas pelo usuário, como exemplificado na Figura 16, onde temos a imagem original na esquerda e sua subsequente classificação por área e fator de forma, também chamado de circularidade, tal fator que varia de 0 a 1 com 1 sendo uma circunferência perfeita.



Fonte: Adaptada de Rasband [31].





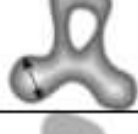



Figura 16 - Classificação de objetos através de medições.

3.10 Programa para análise de imagens

Atualmente existe uma gama diversa de programas para análise de imagens, cada um com suas diferentes funcionalidades, custo, facilidade de operação, possibilidade de implementação de rotinas para automação, suporte técnico, etc.

Todos estes fatos foram levados em conta para a escolha do programa de domínio público Image J, por sua ampla utilização na academia, sua fácil operação, fácil implementação de rotinas em linguagem Java e a possibilidade de extensão de suas funções por plug-ins e macros graváveis.

No geral estes programas contém as mesmas funcionalidades de medição básicas, demonstradas na Figura 17.

Medida	Ilustração esquemática	Propriedades
Área superficial		Contagem dos pixels contidos no objeto
Perímetro		Deve ser usado com cuidado, pois pode introduzir desvios nos resultados.
Diâmetro Feret		Usual para a caracterização de tamanho de objetos convexos alongados.
Máximo diâmetro Feret		Valor máximo do diâmetro Feret.
Espessura máxima		Maior espessura encontrada no objeto.
Centro de gravidade		Usual na análise da distribuição espacial de objetos.
Convex hull		Usual na quantificação de formas.
Mínimo retângulo circunscrito		De uso semelhante ao convex hull, pode ser usado para indicar direções preferenciais na imagem.

Fonte: Adaptado de ASM Handbook [23].

Figura 17 - Tipos básicos de medições.

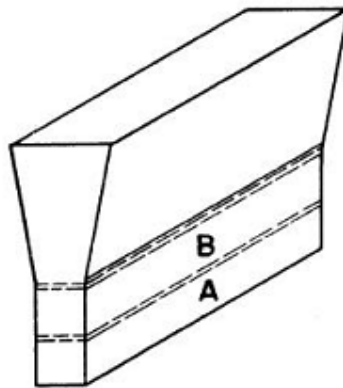
4 PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

4.1 Material

Este trabalho foi desenvolvido em dois tipos de ferros fundidos cinzentos, um de classe classe 25 e outro de classe 30, para fabricação de blocos de motor de combustão interna, sendo os resultados da liga classe 25 obtidos por Ferreira [44]. Por motivos de sigilo corporativo não foi fornecida a composição química das ligas de ferro fundido utilizadas neste trabalho.

4.2 Corpos de prova

Os CPs utilizados neste trabalho foram retirados da parte útil de blocos Y, Figura 18, conforme especificado pela norma ASTM A476/476M [32], e foram submetidos a ensaios de tração, fadiga termomecânica, ensaios metalográficos e análise de microdureza da matriz.



Fonte: ASTM A476/476M [32]

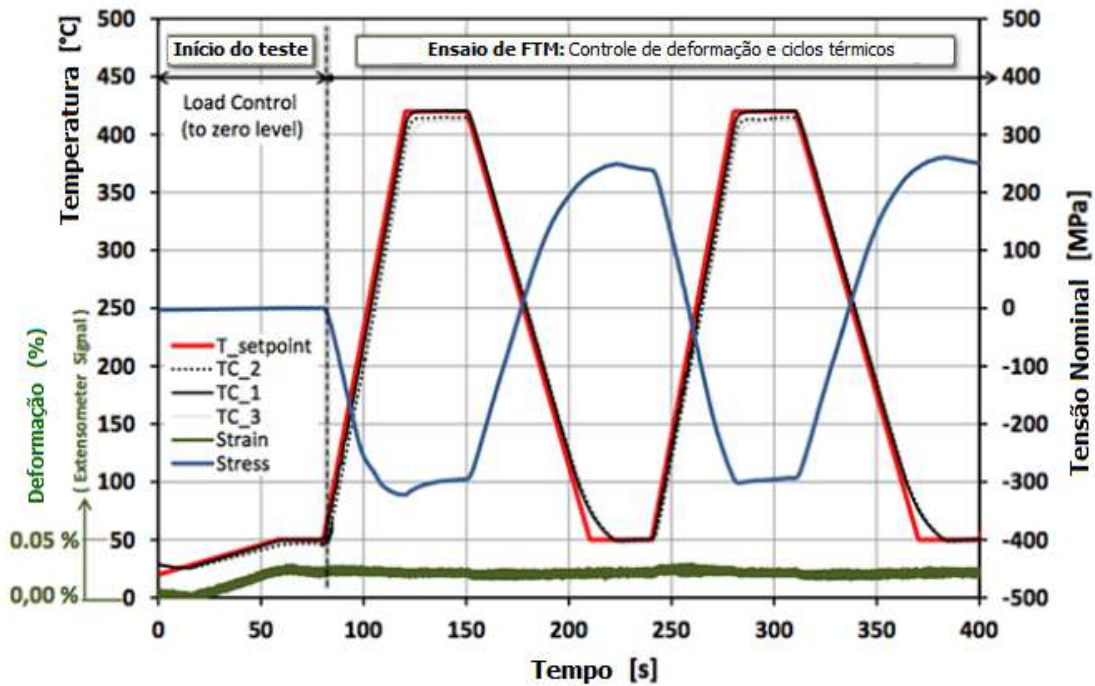
Figura 18 - Bloco Y especificado pela norma, com os CPs para análise retirados de A e B.

4.3 Ensaios de tração

Estes ensaios foram realizados com o intuito de classificar os dois ferros fundidos conforme a norma ASTM A48 [42]. Utilizando 5 CPs, com geometria especificada pela norma ASTM E8M/14 em uma máquina marca MTS modelo 810 de 250kN de capacidade máxima, a temperatura de 50°C conforme a norma ASTM E 21 [37], com taxa de deformação fixada de $1,6 \cdot 10^{-2} \text{ s}^{-1}$ e deformação medida por um extensômetro.

4.4 Ensaios de fadiga termo mecânica

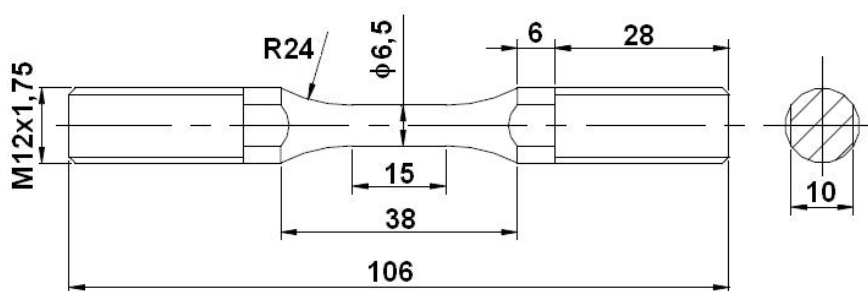
Neste trabalho foram realizados ensaios de FTM em 4 CPs, e comparados aos resultados de Ferreira [44], numa máquina MTS modelo 810 de 250 kN de capacidade máxima, com aquecimento por bobina de indução de potência de 7,5 kW e frequência de 200 kHz da marca INDUCTOHEAT com um controlador da marca EURO THERM. O resfriamento do CP é realizado por convecção forçada de ar e pôr fim a medição da temperatura foi realizada por um pirômetro ótico da marca RAYTEC. O ensaio foi realizado com controle de deformação, do tipo FTM fora de fase e com 100% de restrição. Estes ensaios foram realizados utilizando temperaturas similares as de trabalho dos componentes, ou seja, pelo aquecimento de start até a temperatura de 50°C, após atingir essa temperatura ela é mantida por 5 minutos para estabilização desta pelo CP. Após isso é iniciado devidamente o ciclo de fadiga termomecânica, com um aquecimento a taxa constante de aproximadamente 13°C/s até a temperatura de 420°C que então é mantida por 180 segundos para se obter uma temperatura constante no CP, similar a Figura 19, após este tempo desligada é forçado o resfriamento até a temperatura de 50°C novamente, simulando o ciclo Liga – Opera – Desliga típico de um motor, similar a Figura 19.



Fonte: Adaptada de Ghodrat [6].

Figura 19 - Esquemática do teste FTM fora de fase.

Os 2 CPs ensaiados de cada ferro fundido têm a geometria conforme mostrada na Figura 20 abaixo.



Fonte: Adaptado de Omar [43].

Figura 20 - Geometria dos CPs para ensio FTM.

4.5 Análises Metalográficas

Oito amostras para análises metalográficas foram retiradas de 4 CPs pós ensaio FTM, uma de cada seção rosqueada e da superfície de fratura gerada por este ensaio, denominados conforme a Tabela 2.

Tabela 2 - Denominação dos CPs para análise metalográfica e de microdureza.

CP	Classe	Seção de origem
CP1	CLASSE 30	Seção rosqueada
CP2	CLASSE 30	Seção rosqueada
CP3	CLASSE 30	Superfície de fratura
CP4	CLASSE 30	Superfície de fratura
CP5	CLASSE 25	Seção rosqueada
CP6	CLASSE 25	Seção rosqueada
CP7	CLASSE 25	Superfície de fratura
CP8	CLASSE 25	Superfície de fratura

Fonte: O Autor

As amostras foram preparadas conforme a norma ASTM E 3 [38], embutidas em baquelite, lixadas utilizando lixas de grana 100 até 1200 e então polidas em uma politriz com um tecido no qual foi depositado óxido de cromo de 5 μm , etapa esta que já poderia ser notada a forma da grafita presente nas amostras.

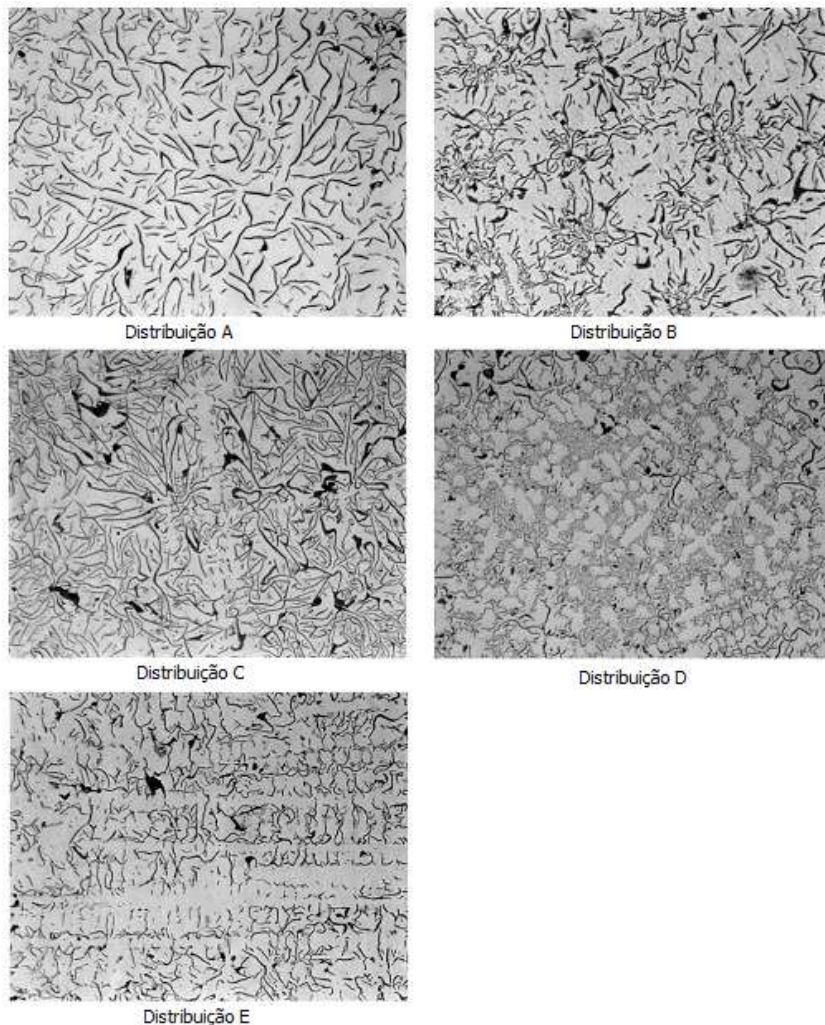
Todas as análises metalográficas e quantitativas foram realizadas por meio de fotos adquiridas por meio de um microscópio ótico da marca ZEISS modelo LAB.A1 equipado com uma câmera digital AXIO modelo ERC5s, pelo software AXIO VISION Rel. 4.8, com

aumentos de 100 até 1000 vezes, e em cada análise foram selecionados um CP de cada classe e de cada secção de origem, totalizando quatro CPs para cada análise.

A partir das fotos foram analisadas: constituintes da microestrutura, classificação da grafita, distribuição de tamanho da grafita, fração volumétrica da grafita e fator de forma da grafita. Análises estas facilitadas por meio do uso dos softwares de análise de imagens Image J versão 1.6.

4.5.1 Classificação da grafita

A classificação da grafita presente nas amostras é regida pela norma ASTM A 247 [39] e se dá de maneira puramente visual, utilizando um aumento de 100 vezes e as Tabelas de tipo, distribuição e tamanho presentes na própria norma, a Tabela de distribuição está representada na Figura 21, como exemplo.



Fonte: Adaptada da norma ASTM A 247 [39].

Figura 21 - Tipos de distribuição de grafita.

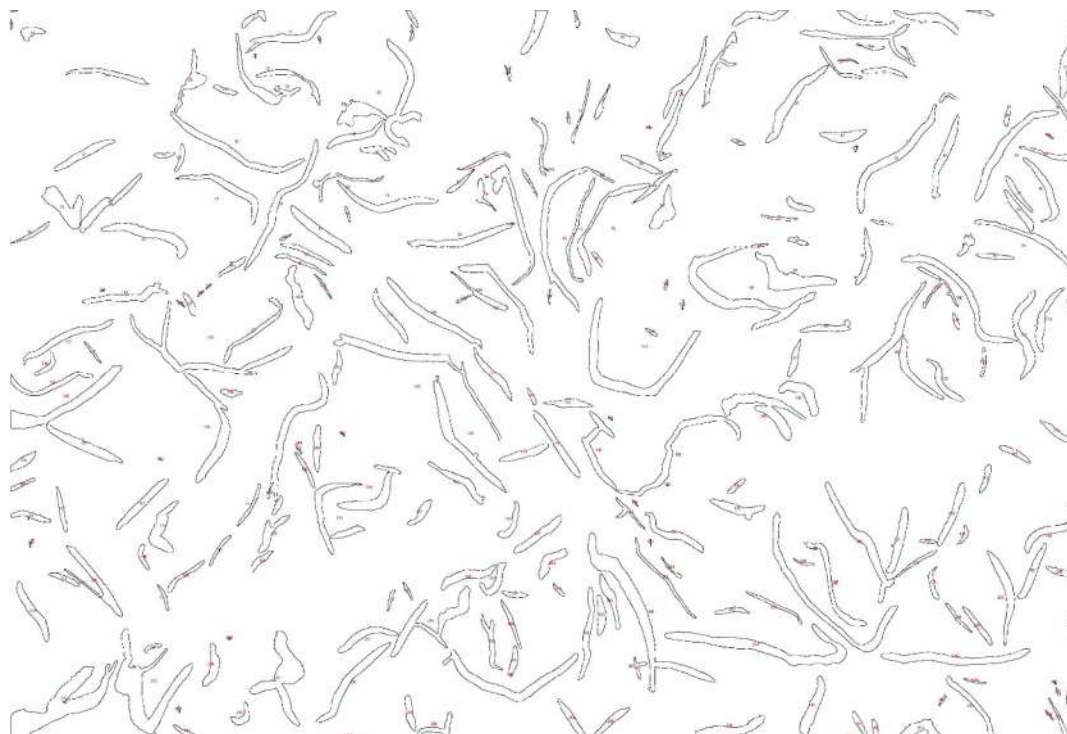
4.5.2 Análise microestrutural

Para obtenção de contraste e identificação dos componentes microestruturais dos ferros fundidos foi necessário o ataque químico destes, de acordo com a norma ASTM E 407 [40], com o reagente Nital na concentração de 2% durante 5 segundos.

4.5.3 Distribuição de tamanhos da grafita

Foi realizada utilizando o software Image J versão 1.6, os valores foram obtidos utilizando 5 imagens de cada classe de ferro fundido, sendo somente um CP escolhido em cada classe.

Para realizar a análise, primeiro é necessário abrir cada imagem no programa e a definição da escala, em seguida há a etapa de pré-processamento, onde ocorre a segmentação da imagem, Figura 22, então temos a etapa de pós-processamento com a definição de contornos e a eliminação de elementos muito pequenos e circulares, menores que $2 \mu\text{m}^2$ e com circularidade superior a 50%, assim, eliminando a maioria das inclusões e defeitos decorrentes do preparo dos CPs para a metalografia. Finalmente temos a etapa de medição, onde o software mede o tamanho máximo de cada objeto identificado, que então foram classificados de acordo com a Tabela 1 da norma ASTM A 247 [39].

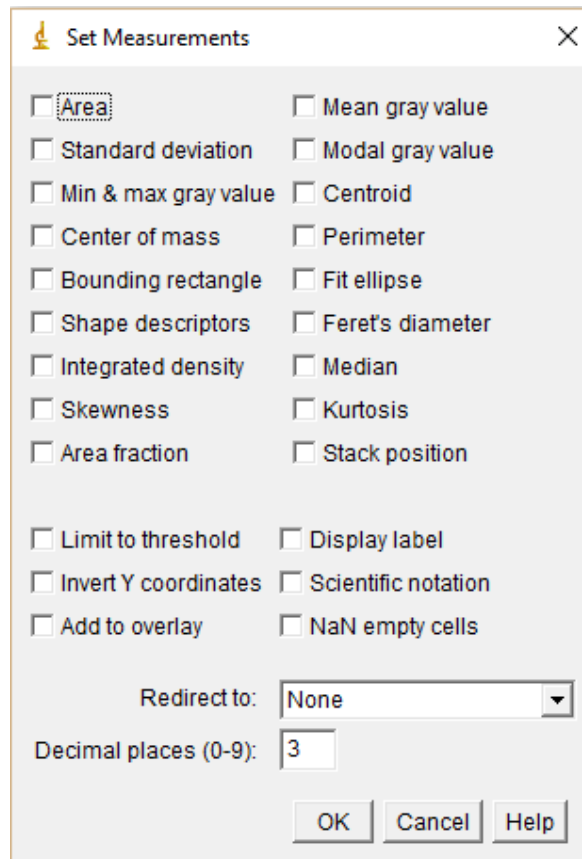


Fonte: O Autor.

Figura 22 - Contorno dos objetos cujos tamanhos foram medidos, CP5 aumento de 100x.

4.5.4 Porcentagem de grafita e fator de forma

Para esta análise o software é utilizado de maneira similar ao na análise de tamanho de grafita, mas na etapa de pós-processamento é selecionada análise de fração de área (area fraction) dos objetos ao invés do tamanho. Similarmente se selecionarmos a opção de descritores de forma (shape descriptors) o software retorna os valores de fator de forma dos objetos. A Figura 23 demonstra as diversas opções de análises possíveis no software. Em ambas as análises foram utilizados dois CPs de cada classe de ferro fundido.



Fonte: O Autor.

Figura 23 - Opções de análise do software Image J versão 1.6.

4.6 Análise de microdureza da matriz

Utilizando os mesmos CPs das análises metalográficas foram realizadas 10 medidas da microdureza do tipo Vickers da matriz presente em ambos os tipos de ferro fundido, desses valores foram excluídos os 3 menores e os 2 maiores a fim de obter um valor que representasse melhor o comportamento do material, pois pelo fato de ser um material heterogêneo pode-se obter valores bastante fora do esperado. Foi utilizado um microdurômetro com indentador do

tipo Vickers da marca LEICA modelo VMHTMOT com carga de 300gf com tempo de aplicação da força de 15 s e velocidade de aproximação de 60 $\mu\text{m/s}$, demonstrado na Figura 24, análise esta sendo regida pela norma ASTM E 384 [41].



Fonte: O Autor

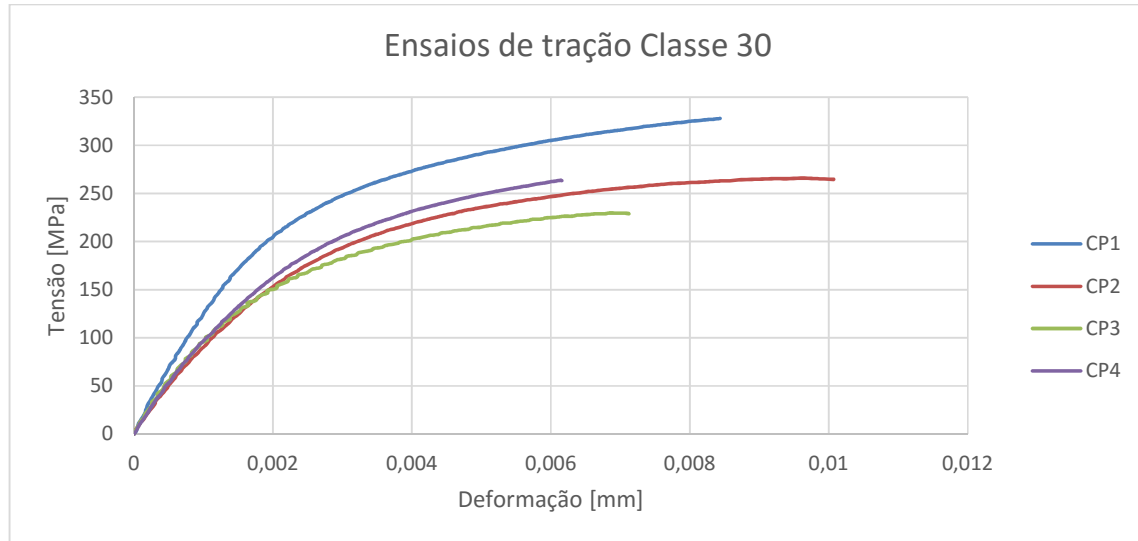
Figura 24 - Tela do microdurômetro, mostrando os valores relevantes para a análise.

5. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Todos os erros foram calculados utilizando um nível de confiança de 90% e a distribuição de Student.

5.1 Ensaio de tração

Os resultados dos ensaios realizados nos corpos de prova da liga CLASSE 30 estão apresentados na Figura 25 e na Tabela 3.



Fonte: O Autor.

Figura 25 – Gráfico tensão e deformação da Liga CLASSE 30.

Tabela 3 - Resultados do ensaio de tração para a Liga CLASSE 30.

CLASSE 30 - T 50 °C	Tensão Máxima (MPa)	Limite de Escoamento (MPa)	E (GPa)	Limite de Ruptura (MPa)	Alongamento (%)
CP - 1	328	173	139	328	0,9
CP - 2	263	135	105	263	1
CP - 3	223	127	105	223	0,7
CP - 4	265	132	119	265	0,6
Média	270	142	117	270	0,8
Desvio Padrão	43	21	16	43	0

Fonte: O Autor.

Os resultados dos ensaios realizados em 5 corpos de prova da liga CLASSE 25 por Ferreira [44] estão apresentados na Tabela 4.

Tabela 4 – Resumo dos ensaios de tração para a Liga CLASSE 25

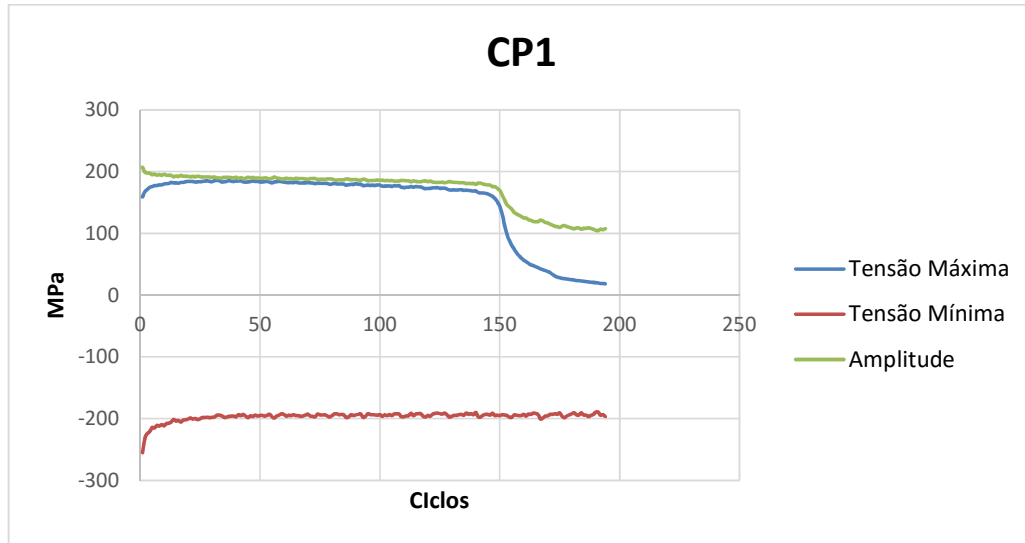
CLASSE 25 – T 50 °C	Tensão Máxima (MPa)	Limite de Escoamento (MPa)	E (GPa)	Limite de Ruptura (MPa)	Alongamento (%)
Média	258	224	117	258	1
Desvio Padrão	3	2	1	3	0

Fonte: Ferreira [44].

Os valores das propriedades de ambas as ligas estão dentro do esperado segundo a literatura [12-42], mas vale ressaltar a diferença encontrada nos valores de alongamento encontrados, fato que sugere uma menor ductilidade do CLASSE 30 em relação ao CLASSE 25.

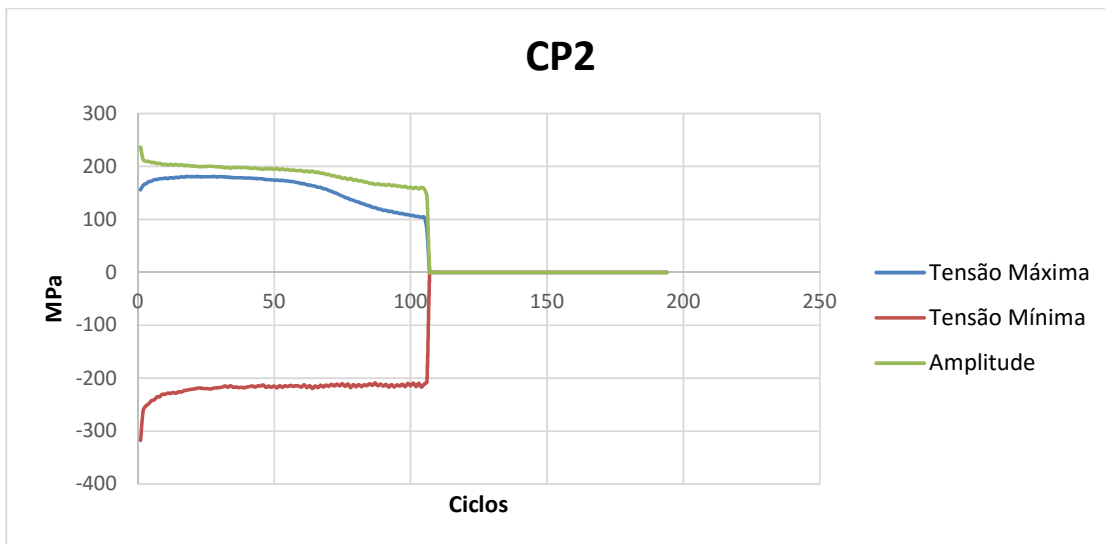
5.2 Ensaio de FTM

Os resultados estão apresentados nas Figuras 27, 28, 29 e 30, para os CPs 1, 2, 3 e 4 respectivamente, e estão resumidos na Tabela 5.



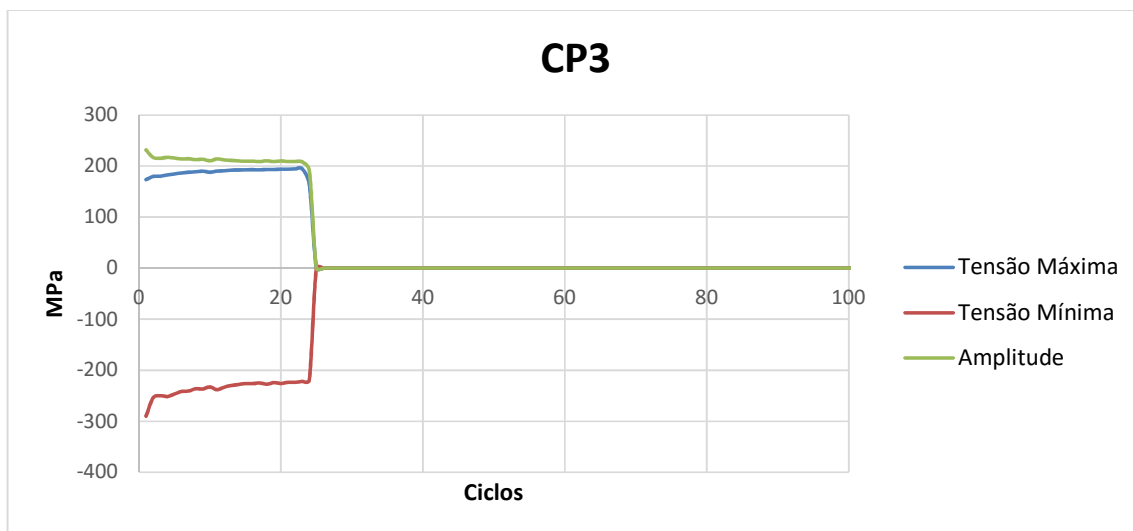
Fonte: O Autor

Figura 27 – Gráfico de tensões por ciclo para o CP1, seta vermelha para o ciclo onde ocorre a falha do CP.



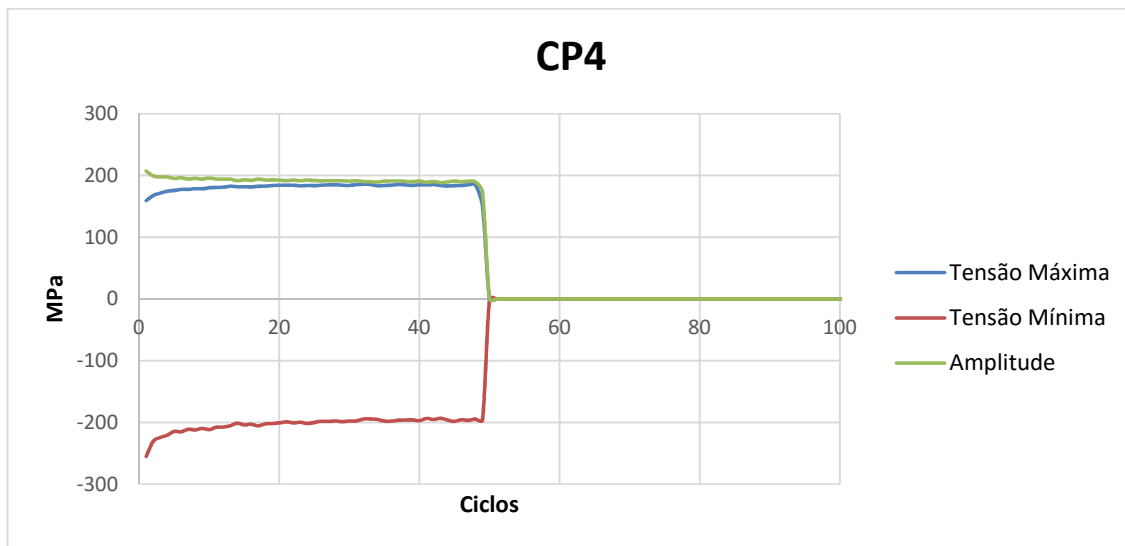
Fonte: O Autor

Figura 28 - Gráfico de tensões por ciclo para o CP2, seta vermelha para o ciclo onde ocorre a falha do CP.



Fonte: O Autor

Figura 29 - Gráfico de tensões por ciclo para o CP3, seta vermelha para o ciclo onde ocorre a falha do CP.



Fonte: O Autor

Figura 30 - Gráfico de tensões por ciclo para o CP4, seta vermelha para o ciclo onde ocorre a falha do CP.

Tabela 5 - Resultados dos ensaios de FTM.

FC	30	30	30	30
CP	1	2	3	4
Ciclos	140	60	25	48

Fonte: O Autor

Podemos observar que os valores obtidos geraram uma média de 69 ciclos, mas com um desvio padrão elevado de aproximadamente 50, portanto não é possível, estatisticamente prever um comportamento padrão para a liga de classe 30.

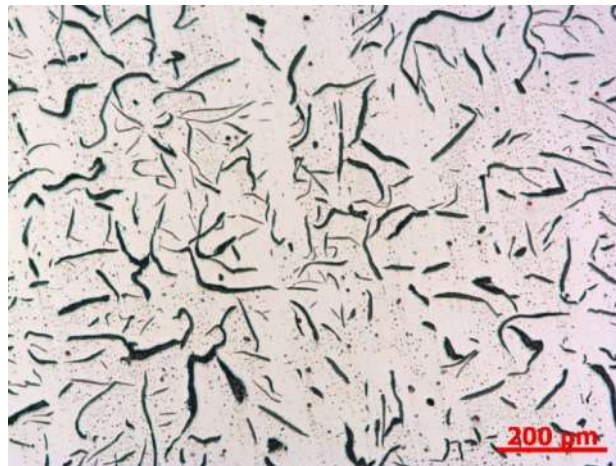
Também podemos observar a vida inferior do CLASSE 30 em relação ao CLASSE 25, que resistiu a uma média de 128 ciclos, de acordo com Ferreira [44], o que é condizente com o seu menor alongamento obtido no ensaio de tração. A razão por trás desta diferença será analisada mais profundamente no decorrer deste trabalho.

5.3 Análises metalográficas

5.3.1 Classificação da grafita

Conforme se pode ver nas Figuras 31 e 32, a grafita no CLASSE 30 sendo classificada como do tipo VII por se apresentar em veios, de distribuição aleatória tipo A, de tamanho predominantemente 3 seguido de 5 e 6. As grafitas do CLASSE 25 também estão na forma de veios, tipo VII, mas com distribuição misturada, predominantemente A, mas com algumas do tipo C e de tamanhos predominantemente 3 seguido de 4 e 5.

Como pode-se ver as grafitas de ambos os ferros fundidos apresentam características similares, mas com a do CLASSE 30 se apresentando levemente menos alongada e mais larga que a presente no CLASSE 25. O que, de acordo com Collini et al [8], justifica a maior resistência a tração apresentada pelo CLASSE 30.



Fonte: O Autor.

Figura 31 – No.300A 100x de aumento, sem ataque, apresentando grafita tipo VII-A 3-5-6.



Fonte: O Autor

Figura 32 – Classe 25 100x de aumento, sem ataque, apresentando grafita tipo VII-A-C 3-4-5.

5.3.2 Análise microestrutural

Feito o ataque nas amostras foram retiradas outras imagens, com o aumento de 1000 vezes, a fim de determinar os constituintes microestruturais da matriz, Figuras 33 e 34.



Fonte: O Autor

Figura 33 - CP1, aumento de 1000x, ataque com nital 2%, estrutura perlítica com veios de grafita.



Fonte: O Autor

Figura 34 - CP5, aumento de 1000x, ataque com nital 2%, estrutura perlítica com veios de grafita.

Como pode-se notar a matriz de ambos é puramente perlítica, composta de ferrita de cor branca cementita em azul escuro [8].

5.3.3 Distribuição do tamanho da grafita

A distribuição de tamanho da grafita foi realizada e todos os CPs e seus resultados estão apresentados nas Tabelas 6 e 7.

Tabela 6 - Resultados da análise de tamanho de grafita para o CLASSE 30.

Classe 30								
Tamanho	8	7	6	5	4	3	2	1
CP 1	47	94	92	35	6	2	0	0
CP 2	30	67	66	45	6	2	0	0
CP 3	38	82	84	46	6	2	0	0
CP 4	45	92	80	40	6	2	0	0
Média	40	84	81	42	6	2	0	0
Desvio Padrão	7	11	9	4	0	0	0	0
Erro	4	6	6	3	0	0	0	0

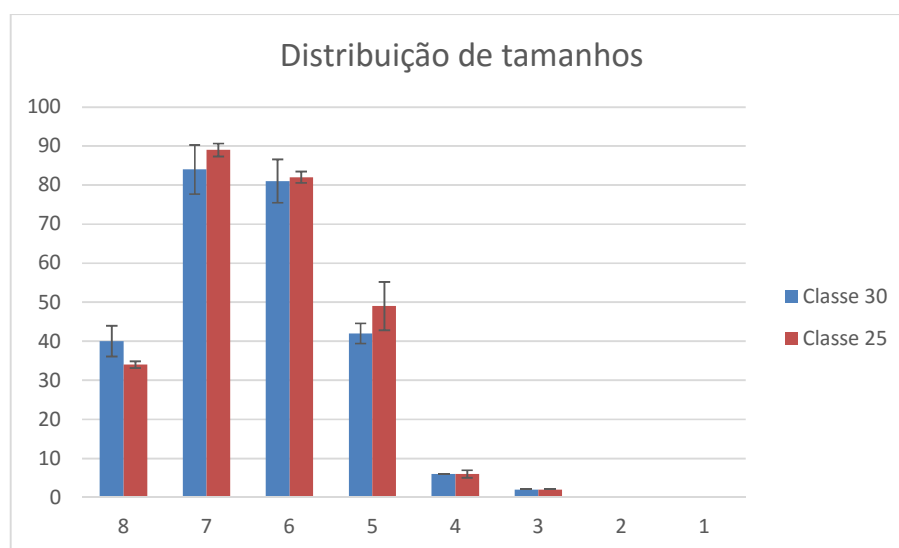
Fonte: O Autor

Tabela 7 - Resultados da análise de tamanho de grafita para o CLASSE 25

Classe 25								
Tamanho	8	7	6	5	4	3	2	1
CP 5	34	91	82	58	7	2	0	0
CP 6	36	90	78	39	7	2	0	0
CP 7	32	90	85	61	3	2	0	0
CP 8	33	84	82	38	5	2	0	0
Média	34	89	82	49	6	2	0	0
Desvio Padrã	1	3	2	11	2	0	0	0
Erro	1	2	1	6	1	0	0	0

Fonte: O Autor

E suas médias plotadas na Figura 35 abaixo.



Fonte: O Autor

Figura 35 - Distribuição de tamanhos dos CLASSE 30 e CLASSE 25.

Como pode-se notar ambos os ferros fundidos aparentemente possuem distribuições de tamanho de grafita muito similares, o que é contrário ao observado na classificação anterior. Isto pode ser explicado, pois, o software identifica tamanho como o tamanho máximo do diâmetro do feret do objeto na imagem, isto é, não mede o tamanho verdadeiro de objetos curvos, somente de retos e, portanto, como os veios de grafita apresentados por ambos os ferros fundidos têm características curvas, o software não consegue ter uma medição verdadeira do

tamanho da partícula. Fato que pode ser comprovado quando comparamos a medição do software com uma medição manual, Figura 36.



Fonte: O Autor

Figura 36 - Medição pelo software (esq.) 120 μm e medição manual (dir.) aproximadamente 158 μm .

Mas apesar desses fatores, novamente vemos a similaridade entre ambas as ligas.

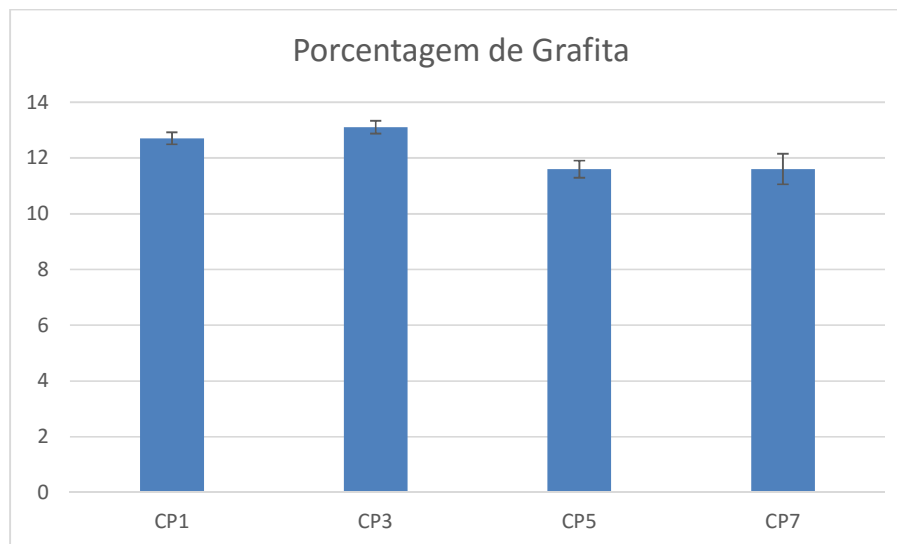
5.3.4 Porcentagem de grafita

Os resultados da análise de fração de grafita presente, retirados de um CP de cada origem, que pode ser aproximada por sua fração de área média, estão apresentados na Tabela 8 e na Figura 37.

Tabela 8 - Resultados da análise de porcentagem de grafita.

Classe		30	30	25	25
Observação	CP1	CP3	CP5	CP7	
1		12,9	12,7	11,5	11,3
2		13,3	13,6	12,2	12,9
3		13	12,5	10,5	12,2
4		12,1	13	12,3	11,9
5		12,3	13,7	11,4	9,5
Média		12,7	13,1	11,6	11,6
Desvio Padrão		0,5	0,5	0,7	1,3
Erro		0,2	0,2	0,3	0,5

Fonte: O Autor.



Fonte: O Autor

Figura 37 – Porcentagem de grafita de cada CP.

Como se pode notar o valor médio para o CLASSE 30 é superior ao do CLASSE 25, a literatura que sugere uma relação inversamente proporcional entre a fração de grafita, o módulo elástico e o alongamento [33, 34, 35, 36]. Tal discrepância pode ser justificada pela característica estatística da análise metalográfica, onde nem sempre se consegue um plano metalográfico significativo o suficiente para representar o material como um todo.

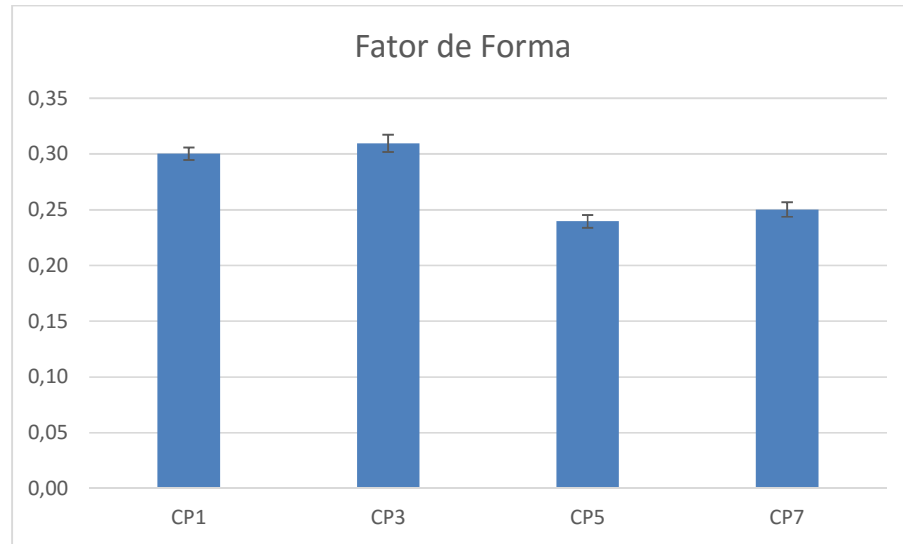
5.3.5 Fator de forma

Foi analisado também o fator de forma médio dos veios de grafita, os resultados encontram-se na Tabela 9.

Tabela 9 - Resultados da análise de fator de forma da grafita.

Classe	Fator de Forma			
	30	30	25	25
Observação	CP1	CP3	CP5	CP7
1	0,30	0,31	0,24	0,25
2	0,28	0,28	0,26	0,27
3	0,32	0,33	0,23	0,23
4	0,29	0,30	0,24	0,26
5	0,31	0,33	0,23	0,25
Média	0,30	0,31	0,24	0,25
Desvio Padrão	0,01	0,02	0,01	0,02
Erro	0,01	0,01	0,01	0,01

Fonte: O Autor



Fonte: O Autor

Figura 38 – Fator de forma para cada CP.

O fator de forma médio das grafitas no CLASSE 30 se apresentou maior do que o encontrado nas grafitas do CLASSE 25, fato que está de acordo com a classificação anterior e justificando, de acordo com a literatura [13] a sua maior resistência mecânica. Pois uma grafita com fator de forma maior age como um concentrador de tensão pior que uma grafita com um fator de forma menor [8].

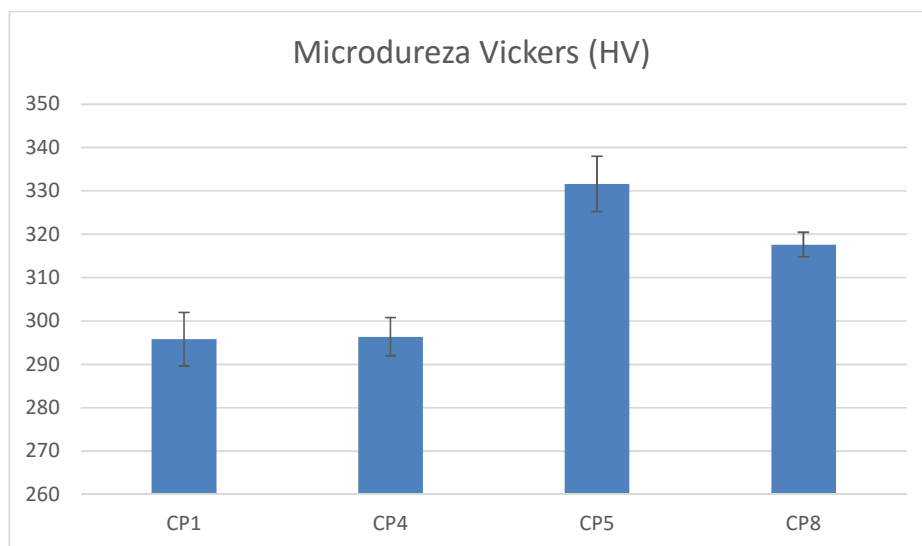
5.4 Análise de microdureza da matriz

Os resultados obtidos na análise de microdureza da matriz estão apresentados na Tabela 10 e na Figura 38.

Tabela 10 - Resultados da análise de microdureza.

Microdureza Vickers (HV)					
Classe	30		25		25
Observação	CP1	CP4	CP5	CP8	
1	272	282	314	325	
2	292	293	326	311	
3	304	296	330	312	
4	305	301	333	316	
5	306	310	355	324	
Média	295,8	296,4	331,6	317,6	
Desvio Padrão	14,5	10,3	14,9	6,6	
Erro	6,2	4,4	6,4	2,8	

Fonte: O Autor



Fonte: O Autor

Figura 38 – Fator de forma para cada CP.

Como se pode notar os valores tanto unitários quanto médios da dureza Vickers da matriz do CLASSE 30 são superiores ao do CLASSE 25, demonstrando, portanto, uma maior dureza da matriz perlítica o que explica seu comportamento na análise de FTM, pois, em uma

matriz mais dura e frágil, trincas geradas pelo ensaio seriam mais danosas que as em um material com uma matriz mais dúctil [12].

6 CONCLUSÃO

Ambas as ligas obtiveram valores de tensão máxima em tração dentro do esperado para suas classes, com o CLASSE 30 obtendo um alongamento máximo menor que o observado no CLASSE 25.

As morfologias das grafitas presentes em ambas as ligas são extremamente similares, com a da liga CLASSE 30 se apresentando levemente menos alongada e mais larga.

A análise microestrutural revelou que ambas as ligas possuem uma estrutura predominantemente perlítica com veios de grafita.

A distribuição de tamanhos de grafita, apesar resultar valores menores que os encontrados visualmente, demonstrou a similaridade entre as grafitas das ligas.

A porcentagem de grafita em ambos apresentou valores muito próximos, com o do CLASSE 30 levemente superior.

O fator de forma da grafita se apresentou maior para o CLASSE 30 do que para o CLASSE 25.

Pela análise de microdureza temos que o CLASSE 30 obteve valores mais elevados que os do CLASSE 25, isto é, possui uma matriz mais dura e frágil.

Em suma, podemos concluir que a liga de classe CLASSE 30 não é recomendada para a utilização em blocos e cabeçotes de motor, pois, apesar de apresentar morfologias de grafita levemente melhores que as encontradas na liga de classe CLASSE 25, também apresenta uma maior dureza da matriz perlítica o que gera uma maior fragilidade quando submetida a fadiga termomecânica.

7 RECOMENDAÇÃO PARA TRABALHOS FUTUROS

- Realizar uma análise química a fim de determinar a composição e o valor do carbono equivalente de cada liga.
- Utilização de um maior número de corpos de prova para as análises, obtendo dados com maior acurácia estatística.
- Utilização de método manual ou um software mais robusto para a determinação das características relevantes da grafita, principalmente seu tamanho.
- Realizar uma análise metalográfica mais robusta, a fim de encontrar outras microestruturas importantes em ferros fundidos como células eutéticas, eutéticos de fósforo e de manganês.
- Verificar o tamanho e espaçamento das lamelas da perlita presente nas estruturas, para obter uma melhor relação entre microestrutura e propriedades.

8 REFERÊNCIAS

- [1] WAGNER, Donald B. (1993). **Iron and Steel in Ancient China**. BRILL. pp. 335–340
- [2] DAVIS J.R. (Ed.) **ASM Specialty Handbook: Cast Irons**, ASM International, United States of America, Materials Park, OH 44073-0002, 1996; 3-6, 16-20.
- [3] RUNDMAN K.B. **Cast Irons, Encyclopedia of Materials, Science and Technology**, 2003; 1003-1010.
- [4] 44TH CENSUS OF WORLD CASTING PRODUCTION, **A MODERN CASTING Staff Report**, December 2010.
- [5] CALLISTER W. D. **Materials Science and Engineering, An Introduction**, John Wiley & Sons, Inc., 7th edition
- [6] GHODRAT, Sepideh. **Thermo-Mechanical Fatigue of Compacted Graphite Iron in Diesel Engine Components**. Ph. D. Thesis, Department of Materials Science and Engineering of TUDelft, 2013.
- [7] VELICHKO A. **Quantitative 3D Characterization of Graphite Morphologies in Cast Iron using FIB Microstructure Tomography**. PhD thesis, University of Saarlandes, 2008.
- [8] COLLINI, L, NICOLETTO, G., KONECNA, R. **Microstructure and mechanical properties of pearlitic gray cast iron**. Materials Science and Engineering A · August 2008.
- [9] QIT-Fer et Titane Inc. **Ductile Iron Data for Engineers**. Montreal, 1990.
- [10] CHIAVERINI, Vicente. **Acos e ferros fundidos: características gerais, tratamentos termicos, principais tipos**. 7ª ed. ABM: São Paulo, 2008. p. 22.
- [11] CHIAVERINI, Vicente. **Acos e ferros fundidos: características gerais, tratamentos termicos, principais tipos**. 7ª ed. ABM: São Paulo, 2008. p. 499.
- [12] CHIAVERINI, Vicente. **Acos e ferros fundidos: características gerais, tratamentos termicos, principais tipos**. 7ª ed. ABM: São Paulo, 2008. p. 516.
- [13] QIT-Fer et Titane Inc. **A Design Engineer's Digest of Ductile Iron**. Montreal, 1990.
- [14] SHAO S., DAWSON S., LAMPIC M. **The Mechanical and Physical Properties of Compacted Graphite Iron**, Mat.-wiss. u. Werkstofftech, 29, 1998; 397-411.

- [15] LÖHE D. **Properties of vermicular cast iron at mechanical and thermal-mechanical loading**, Institut für Werkstoffkunde I, Universität Karlsruhe (TH), MACHINING WORKSHOP 2005 for Powertrain Materials, Darmstadt, November 24-25, 2005.
- [16] ZIEGLER K.R., WALLACE J.F. **The Effect of Matrix Structure and Alloying on the Properties of Compacted Graphite Iron**, Transactions of the American Foundrymen's Society, 92, 1984; 735-748.
- [17] CHAO C. G., LUI T. S., HON M. H. **A study of tensile properties of ferritic compacted graphite cast irons at intermediate temperatures**, Journal of Materials Science 24, 1989; 2610-2614
- [18] DIETER, G. **Mechanical metallurgy**, Book published by McGraw-Hill Co, 1988.)
- [19] REMY L. **Fatigue and thermomechanical fatigue at high temperature**, Encyclopedia of Materials: Science and Technology, 2001; 2866-2877.
- [20] SEHITOGLU, H. **Thermal and thermomechanical fatigue of structural alloys**. In: ASM HANDBOOK – Fatigue and Fracture. Ohio, V.9, 1996
- [21] TRAMPERT S, GOCMEZ T, PISCHINGER S. **Thermomechanical fatigue life prediction of cylinder heads in combustion engines**, J. Eng. Gas Turbines Power, 2008; 130: 012806-1 (10 pages).
- [22] RIEDLER M., LEITNER H., PRILLHOFER B., WINTER G., EICHLSEDER W. **Lifetime simulation of thermomechanically loaded components**, Meccanica 42, 2007; 47-59.
- [23] ASM INTERNATIONAL. **ASM Handbook: metallography and microstructures**. Materials Park: ASM International, 2004. V.9. 2733p.
- [24] BHADESHIA, H.K.D.H.; HONEYCOMBE, R.W.K **Steels: microstructure and properties**. 3ed. Oxford: Elsevier, 2006. p. 27-30
- [25] COLPAERT, H. **Metalografia dos produtos siderúrgicos comuns**. 3 ed. São Paulo: Edgard Blücher, Editora da Universidade de São Paulo, 1974. 412p.
- [26] COUTINHO, T. **Metalografia de não-ferrosos: análise e prática**. São Paulo: Edgard Blücher, 1980. p. 1-23
- [27] HIGGINS, R A. **Engineering Metallurgy: applied physical metallurgy**. 6th ed. London: Arnold, 1993 v.1. cap. 10.

- [28] RUSS, J. C.; DEHOFF, R. T. **Practical Stereology**. 2ed. Boca Raton: CRC Press, 1999. 307p.
- [29] GONZALES, R. C.; WOODS R. E. **Processamento de imagens digitais**. São Paulo: Edgard Blücher, 2000. 509p.
- [30] CLARKE, A. R.; EBERHARDT, C.N. **Microscopy techniques for Materials Science**. Cambridge: Woodhead, 2002. 459 p.
- [31] RASBAND, W.S. **Image J**, Bethesda, USA: U.S. National Institute of Health 1997-2009.
- [32] AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS – **ASTM A476/476M-00. Standard Specification for Ductile Iron Castings for Paper Mill Dryer Rolls**. West Conshohocken, ASTM, 2001.
- [33] DAVIS, J.R., **ASM Specialty Handbook**, ASM International, 1996.
- [34] MILLS, K., et al., **Metals Handbook**, vol. 9, ASM, 1985.
- [35] HAENNY, L. **Zambelli, G. Eng. Fract. Mech.** 18 (2) (1983) 377–387.
- [36] NOGUCHI, T. SHIMIZU, K. **Int. J. Cast Met. Res.** 6 (3) (1993) 146–152.
- [37] AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS – **ASTM E 21. Standard Test Methods for Elevated Temperature Tension Tests of Metallic Materials**. West Conshohocken, ASTM, 2009.
- [38] AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS – **ASTM E 3. Standard Guide for Preparation of Metallographic Specimens**. West Conshohocken, ASTM, 2011.
- [39] AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS – **ASTM A 247. Standard Test Method for Evaluating the Microstructure of Graphite in Iron Castings**. West Conshohocken, ASTM, 2016.
- [40] AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS – **ASTM E 407. Standard Practice for Microetching Metals and Alloys**. West Conshohocken, ASTM, 2015.
- [41] AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS – **ASTM E 384. Standard Test Method for Microindentation Hardness of Materials**. West Conshohocken, ASTM, 2016.
- [42] AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS – **ASTM A48/A48M. Standard Specification for Gray Iron Castings**. West Conshohocken, ASTM, 2016.

[43] MALUF, Omar et al. **Development of materials for automotive disc brakes**. *Minerva*, v. 4, n. 2, p. 149-158, 2004.

[44] FERREIRA, Márcio H. **Análise de vida em fadiga termomecânica de ferros fundidos cinzento e vermicular**. São Paulo, 2017.