

**FUNDAÇÃO OSWALDO ARANHA
CENTRO UNIVERSITÁRIO DE VOLTA REDONDA
CURSO DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA
TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO**

FABRICIO BARRETO GALLI GONÇALVES

HENRICCO CRAI DE SOUZA SILVA

PAULO VICTOR TRINDADE

ESTUDO COMPARATIVO DE FADIGA EM FERRO FUNDIDO

**VOLTA REDONDA
2017**

**FUNDAÇÃO OSWALDO ARANHA
CENTRO UNIVERSITÁRIO DE VOLTA REDONDA
CURSO DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA
TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO**

ESTUDO COMPARATIVO DE FADIGA EM FERRO FUNDIDO

Monografia apresentada ao Curso de Engenharia Mecânica do UniFOA como requisito à obtenção do título de bacharel em Engenharia Mecânica.

Alunos:

Fabricio Barreto Galli Gonçalves

Henricco Crai de Souza Silva

Paulo Victor Trindade

Orientador:

Prof.: Dr. Alexandre Alvarenga
Palmeira

**VOLTA REDONDA
2017**

FOLHA DE APROVAÇÃO

Alunos:

Fabricio Barreto Galli Gonçalves

Henricco Crai de Souza Silva

Paulo Victor Trindade

ESTUDO COMPARATIVO DE FADIGA EM FERRO FUNDIDO

Orientador:

Prof. Dr. Alexandre Alvarenga Palmeira

Banca Examinadora:

Prof. Dr. Alexandre Alvarenga Palmeira

Prof. Dr. Alexandre Fernandes Habibe

Prof^a. Dr^a. Monique Osório Talarico da Conceição

AGRADECIMENTOS

Ao Prof. Dr. Eng. Alexandre Alvarenga Palmeira, pela brilhante orientação, atenção, apoio e esclarecimentos de dúvidas concedidos a nós durante a realização deste trabalho.

Ao Prof. Eng. Antônio de Pádua Sobreira Leal, por ser incansável nas ajudas com materiais didáticos e orientação quanto ao andamento do trabalho.

A todos os colegas da Engenharia Mecânica do Centro Universitário de Volta Redonda que nos apoiaram e incentivaram para realização deste trabalho.

Aos nossos pais, pela paciência e incentivo incondicional durante toda nossa vida.

Ao UniFOA pela incrível estrutura aos alunos e disponibilidades de livros em sua biblioteca presencial e virtual.

Enfim, agradecemos a todos os amigos e colegas que contribuíram de alguma forma com experiência profissional e conhecimento passados durante o desenvolvimento do trabalho.

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	1
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	3
2.1 Ferros fundidos.....	3
2.1.1 Definição de ferros fundidos	3
2.1.2 Composição química da liga.....	4
2.1.3 Velocidade de resfriamento	5
2.1.4 Componentes estruturais dos Ferros Fundidos	6
2.1.5 Classificação dos ferros fundidos	8
2.2 Ferro fundido Cinzento	9
2.2.1 Definição.....	9
2.2.2 Classificação.....	10
2.2.3 Propriedades.....	11
2.2.4 Aplicação	12
2.3 Ferro fundido branco	12
2.3.1 Definição.....	12
2.3.2 Propriedades.....	13
2.3.3 Classificação.....	14
2.3.4 Aplicação	14
2.4 Ferro fundido Nodular ou Dúctil.....	15
2.4.1 Definição.....	15
2.4.2 Propriedades.....	15
2.4.3 Classificação.....	16
2.4.4 Aplicação	17
2.5 Ferro fundido maleável.....	18
2.5.1 Definição.....	18
2.5.2 Propriedades.....	18
2.5.3 Aplicação	22
2.5.4 Classificação.....	22
2.6 Ferro Fundido Vermicular	23
2.6.1 Definição.....	23
2.6.2 Propriedades.....	24

2.6.3	Aplicação	24
2.6.4	Classificação.....	25
2.7	Fadiga	27
2.7.1	Aspectos gerais da fadiga.....	27
2.7.2	Regimes de fadiga	33
2.7.3	Modelos de falhas por fadiga	34
2.7.4	Fadiga em ferros fundidos	39
3	METODOLOGIA.....	56
3.1	Desenvolvimento	56
4	RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	58
4.1	Dureza.....	58
4.1.1	Dureza – Ferro Fundido Nodular	58
4.1.2	Dureza – Ferro Fundido Cinzento.....	59
4.1.3	Dureza – Ferro Fundido Vermicular.....	59
4.1.4	Dureza – Ferro Fundido Maleável.....	60
4.1.5	Dureza – Ferro Fundido Branco.....	61
4.1.6	Dureza – Comparativo Ferro Fundido.....	61
4.2	Resistência à tração	63
4.2.1	Resistência à tração – Ferro Fundido Nodular.....	63
4.2.2	Resistência à tração – Ferro Fundido Cinzento	64
4.2.3	Resistência à tração – Ferro Fundido Vermicular	65
4.2.4	Resistência à tração – Ferro Fundido Maleável.....	65
4.2.5	Resistência à tração – Comparativo Ferro Fundido.....	65
4.3	Sensibilidade ao entalhe	67
4.4	Tamanho da peça.....	67
4.5	Superfície	68
4.5.1	Superfície – Ferro Fundido Nodular	68
4.5.2	Superfície – Ferro Fundido Cinzento	68
4.5.3	Superfície – Ferro Fundido Vermicular	69
4.5.4	Superfície – Comparativo Ferro Fundido	70
4.6	Meio ambiente e corrosão	71
4.6.1	Meio ambiente e corrosão – Ferro Fundido Nodular.....	71
4.6.2	Meio ambiente e corrosão – Ferro Fundido Cinzento	73

4.6.3	Meio ambiente e corrosão – Ferro Fundido Maleável.....	73
4.6.4	Meio ambiente e corrosão – Ferro Fundido Branco.....	74
4.6.5	Meio ambiente e corrosão – Comparativo Ferro Fundido.....	74
4.7	Temperatura.....	75
4.7.1	Temperatura – Ferro Fundido Nodular.....	76
4.7.2	Temperatura – Ferro Fundido Cinzento.....	76
4.7.3	Temperatura – Ferro Fundido Vermicular.....	76
4.7.4	Temperatura – Ferro Fundido Maleável.....	77
4.7.5	Temperatura – Comparativo Ferro Fundido.....	77
5	CONCLUSÃO.....	78
5.1	Sugestão para trabalhos futuros.....	81
6	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	82

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1 - Diagrama de equilíbrio de fases ferro-carbono (CALLISTER, 2016). .	4
Figura 2.2 - Formas típicas da grafita (ISO 945:2008).	7
Figura 2.3 - Forma e distribuição dos veios de grafita (ASTM A247:2006).	8
Figura 2.4 - Ferro fundido vermicular. (A) Grafita Forma III segundo ISO 945, 2008. (B) Micrografia óptica do ferro fundido vermicular atacada com nital. (Fonte: ASM). (C) Microscopia Eletrônica de Varredura do ferro fundido vermicular após ataque profundo (GUESSER, 2002).	25
Figura 2.5 - Padrões de amplitude de tensão-tempo de carregamentos variáveis (adaptado a ASM METALS HANDBOOK, 1990).	27
Figura 2.6 - Formação de trincas por fadiga provocadas por micro deformações. (a) Deformação estática; (b) deformação por fadiga originando um entalhe superficial (intrusão); (c) deformação por fadiga originando extrusão (DIETER, 1976).	29
Figura 2.7 - Ilustração das características da trinca durante o estágio de propagação da trinca por fadiga (DIETER 1976).	31
Figura 2.8 - Estágio de propagação de trinca de fadiga (Adaptado a FERREIRA, 2008).	32
Figura 2.9 - Diagrama esquemático do ensaio de flexão rotativa (a) e de um corpo de provas (b) (CALLISTER, 2016).	35
Figura 2.10 - Amplitude do fator de concentração de tensões (ΔK) em função do tempo (NEWMAN, 2000).	38
Figura 2.11 - Representação esquemática em escala logarítmica da relação entre a taxa de propagação de trinca de fadiga (da/dN) e amplitude do fator de intensidade de tensão (ΔK) (BRANCO, 1986).	39
Figura 2.12 - Comparação de curvas S-N (a) e ϵ -N (b) típicas para ferros fundidos nodular (dúctil), cinzento e de grafita compacta (adaptado a ASM METALS HANDBOOK, 1996).	40
Figura 2.13 - Propriedades de fadiga de dois ferros maleável ferrítico. Flexão rotativa (ASM METALS HANDBOOK, 1990).	45

Figura 2.14 - Propriedades de fadiga de três ferros fundidos maleáveis martensítico a partir de ensaio de flexão rotativa em amostras sem entalhes de 25 mm (1 in) (ASM METALS HANDBOOK, 1990).	46
Figura 2.15 - (a) Decréscimo do limite de fadiga e do limite de resistência com o aumento da espessura da peça de ferro nodular e (b) efeito da espessura sobre o limite de fadiga de ferro fundido cinzento classe FC250 (GUESSER, 2009).	47
Figura 2.16 - Variáveis que influenciam a resistência à fadiga (GUESSER, 2009).	48
Figura 2.17 - Influência de defeitos superficiais sobre o limite de fadiga de ferro fundido nodular perlítico. Flexão rotativa (GUESSER, 2009).	49
Figura 2.18 - Relação entre limite de escoamento e limite de fadiga para diferentes superfícies (GUESSER, 2009).	49
Figura 2.19 - Efeito da temperatura sobre a resistência à fadiga de ferro fundido vermicular (GUESSER, 2009).	55
Figura 2.20 - Variação da resistência à tração de ferro fundido maleável ferrítico sobre o efeito de diferentes temperaturas (METALS VOL.1, 1990).	55
Figura 4.1 - Gráfico comparativo de resistência à tração e limite de fadiga em relação à dureza.	63
Figura 4.2- Gráfico comparativo do limite de fadiga em relação ao limite de resistência.	67
Figura 4.3 - Gráfico comparativo do limite de fadiga em relação à superfície.	71

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1 - Composição química de ferros fundidos típicos comuns (CHIAVERINI, 2007).	5
Tabela 2.2 - Classificação de ferro fundido por designação comercial, microestrutura e fratura (ASM METALS HANDBOOK, 1990).	9
Tabela 2.3 - Classificação do ferro fundido cinzento de acordo com suas propriedades mecânicas (CHIAVERINI, 2007).....	10
Tabela 2.4 - Classificação de acordo com a composição química, segundo ASTM, do ferro fundido cinzento (CHIAVERINI, 2007).	11
Tabela 2.5 - Propriedade mecânicas dos ferros cinzentos, de acordo com a EB-126 da ABNT (CHIAVERINI, 2007).	11
Tabela 2.6 - Melhor usabilidade dos ferros cinzentos (CHIAVERINI, 2007).	12
Tabela 2.7 - Classes de ferro fundido branco de acordo com sua composição química (CHIAVERINI, 2007).	14
Tabela 2.8 - Propriedade de um ferro nodular tratado termicamente para ensaio Charpy de resistência ao choque (CHIAVERINI, 2007).	15
Tabela 2.9 – Classificação, segundo a ABNT, do ferro fundido nodular (CHIAVERINI, 2007).	16
Tabela 2.10 - Classificação do ferro fundido nodular, de acordo com a norma ABNT (CHIAVERINI, 2007).	16
Tabela 2.11 – Empregos típicos e aplicações gerais de ferro nodular (CHIAVERINI, 2007).	17
Tabela 2.12 - Propriedades do ferro fundido maleável (COLPAERT, 2008).	20
Tabela 2.13 - Propriedades dos ferros fundidos maleáveis de núcleo branco, segundo as normas ABNT (adaptada a COLPAERT, 2008).	21
Tabela 2.14 - Propriedades dos ferros fundidos maleáveis de núcleo branco, segundo as normas ABNT (adaptada a COLPAERT, 2008).	21
Tabela 2.15 - Faixa de composição típica de ferro fundido maleável branco (COLPAERT, 2008).	22
Tabela 2.16 - Propriedades para o Ferro fundido vermicular ASTM A842 (CASTING SOURCE DIRECTORY, 2006).	24

Tabela 2.17 - Classes ferro vermicular segundo a norma VDG W50: 2002 (Adaptado de GUESSER, 2009).	26
Tabela 2.18 - Tabela demonstrativa de valores de dureza e limite de fadiga para diversos ferros fundidos a partir de ensaio de flexão rotativa (adaptada a ASM METALS HANDBOOK, 1996).	41
Tabela 2.19 - Valores demonstrativos do aumento do limite de fadiga com o acréscimo da resistência à tração para uma amostra de 10.6 mm de diâmetro e entalhe com raio de 0.25 mm e profundidade de 3.6 mm (ASM METALS HANDBOOK, 1996).....	43
Tabela 2.20 - Valores demonstrativos do acréscimo do limite de resistência à fadiga com o acréscimo da resistência à tração (ASM METALS HANDBOOK, 1996).	44
Tabela 2.21 - Propriedades mecânicas de ferros fundidos vermiculares com nodularidade de 10 a 30% (adaptado a GUESSER, 2009).....	44
Tabela 2.22 - Limite de fadiga (MPa) de ferros fundidos perlíticos com diferentes acabamentos superficiais (GUESSER, 2009).	50
Tabela 2.23 - Resultados de ensaios de fadiga em superfícies com grafita lamelar (GUESSER, 2009).	51
Tabela 2.24 – Resistência à fadiga de ferros fundidos ao ar, em água, em salmoura, e sob inibidores alcalinos. Flexão rotativa (GUESSER, 2009).	51
Tabela 2.25 - Efeitos de camada de tinta contendo zinco e alumínio sobre a resistência à fadiga sob corrosão de ferros nodulares perlíticos (GUESSER, 2009).	52
Tabela 2.26 - Resistência à fadiga de ferros fundidos a altas temperaturas. Flexão rotativa (GUESSER, 2009).....	54
Tabela 4.1 - Comparação de limite de fadiga e resistência à tração de amostras de ferros fundidos sem entalhe para valores próximos de dureza.	62
Tabela 4.2 - Relação do limite de resistência com o limite de fadiga para diferentes ferros fundidos.	66
Tabela 4.3 - Limite de fadiga para diferentes superfícies.	71
Tabela 4.4 – Comportamento do limite de fadiga (seta) para diferentes situações e ferros fundidos.....	75

Tabela 5.1 - Tabela comparativa do grau de usabilidade dos ferros fundidos de acordo com o comportamento do limite de fadiga para os parametros de comparação, bem como suas melhores aplicações..... 80

LISTA DE ABREVIATURAS E SÍMBOLOS

Abreviações

<i>C.E</i>	Carbono Equivalência	
<i>FoFo</i>	Ferros Fundidos	
<i>Fe₃C</i>	Cementita	
<i>Fe₃P</i>	Fosfeto	
<i>CCC</i>	Estrutura cúbica de corpo centrado	
<i>FC</i>	Ferro Fundido Cinzento	
<i>HB</i>	Dureza Brinell	[Kgf/mm ²]
<i>R</i>	Razão ou Relação das tensões	

Letras Gregas

σ_r	Faixa de tensão	[N/mm ²]
σ_a	Tensão de amplitude	[N/mm ²]
σ_m	Tensão média	[N/mm ²]
$\sigma_{m\acute{a}x}$	Tensão máxima	[N/mm ²]
$\sigma_{m\acute{i}n}$	Tensão mínima	[N/mm ²]
ϵ	Deformação	

Siglas

<i>ASTM</i>	American Society for Testing and Materials
<i>ISO</i>	International Organization for Standardization
<i>JIS</i>	Japanese Industrial Standards
<i>SAE</i>	Society of Automotive Engineers

RESUMO

Devido a demanda por novos mercados e a busca por materiais alternativos capazes de desempenhar as mesmas funções que os metais convencionais e ainda assim, manterem a mesma eficiência ou até melhores, estudos sobre fadiga foram se aperfeiçoando. Em conjunto, deu-se incentivo a estudos e pesquisas sobre a descobertas e aperfeiçoamentos de novos materiais, novos processos e redução de custo. O ferro tem se mostrado muito importante ao longo da história pois através dele tem ocorrido grandes mudanças na sociedade. Principalmente no período pós idade do ferro. Ligas ferrosas, onde o ferro é o principal constituinte, são produzidas em larga escala, sendo assim o material com maior produção dentre todos os metais. Os ferros fundidos apresentam diversas vantagens conhecidas de fabricação e engenharia sobre o aço fundido, incluindo 30 a 40% dos custos de fabricação mais baixos em relação ao aço fundido e características de desempenho mais desejáveis, como melhor resistência ao desgaste e amortecimento de vibrações. O objetivo deste presente trabalho é fazer um estudo comparativo da fadiga em ferros fundidos abordando diferentes parâmetros importantes para determinação do mesmo. Dentre tais parâmetros podemos englobar propriedades fundamentais do material para caracterização de fadiga, como por exemplo a dureza e a resistência a tração, assim como outros fatores externos; efeitos da superfície, meio ambiente e corrosão, e temperatura.

Palavras-chave: Ferros Fundidos. Fadiga. Comparativo.

ABSTRACT

Due to the demand for new markets and the search for alternative materials capable of performing the same functions as conventional metals, and still, maintaining the same efficiency or even better, fatigue studies have improved. In addition began studies and research to find improvements in materials, processes and cost reduction. Iron has been very important throughout history because through it there have been great changes in society. Especially in the post-iron period. Ferrous alloys, where iron is the main constituent, are produce on a large scale, thus being the material with the highest production among all metals. Cast iron have several well-known manufacturing and engineering advantages over cast steel, including 30 to 40% lower manufacturing costs relative to cast steel and more desirable performance characteristics, such as better wear resistance and vibration damping. The purpose of this present work is to make a comparative study of fatigue in cast irons addressing different important parameters to determination of this study. Among these parameters can include fundamental properties of the material for the characterization of fatigue, such as hardness and tensile strength, as well as other external factors; surface effects, environment and corrosion, and temperature.

Key words: Cast Iron. Fatigue. Comparative.

1 INTRODUÇÃO

O descobrimento da fadiga ocorreu no século XIX, quando vários pesquisadores da Europa observaram que os componentes da ponte e da ferrovia estavam quebrando quando submetidos a carregamentos repetidos (ASM METALS HANDBOOK, 1990). À medida que os anos se passavam e o uso de metais se expandiram com o crescente uso em máquinas, foram registradas mais e mais falhas de componentes submetidos a cargas repetidas. Devido a isso, não só os estudos sobre fadiga foram se aperfeiçoando, mas também foram crescendo os incentivos a estudos sobre a descobertas e aperfeiçoamentos de novos materiais, pesquisas sobre novos mercados e redução de custo.

Os ferros fundidos apresentam diversas vantagens conhecidas de fabricação e engenharia sobre o aço fundido. Por causa de uma maior concentração de carbono livre e maior silício, os ferros fundidos cinzento e nodular possuem maior fluidez e menor encolhimento do que qualquer metal ferroso. Além disso, os ferro fundidos são mais fáceis de usinagem se comparados ao aços fundidos, e são relativamente mais resistentes ao desgaste porque a grafita atua como um sistema auto lubrificante. A grafita também atenua a vibração sonora e mecânica, o que torna o ferro fundido ideal para muitas aplicações mecânicas, como freios. No entanto, a maior concentração de carbono responsável por várias propriedades físicas desejáveis e facilidade de fabricação do ferro fundido é, infelizmente, também responsável pela degradação da ductilidade e fratura por elevada dureza. O carbono, geralmente presente principalmente como grafita, atua para nuclear processos de fadiga e fraturas em níveis de deformação relativamente baixos, prejudicando significativamente a fadiga e a resistência à fratura do ferro fundido em comparação com o aço moldado ou forjado (ASM METALS HANDBOOK, 1996).

Existem vários tipos de ferro fundido, cada um apresentando características bem distintas. Para determinar a aplicação, as propriedades mecânicas desejadas são fundamentais para a escolha correta do tipo de ferro fundido a ser empregado. Os cinco tipos comerciais de ferro fundido considerados neste trabalho são: Ferro Fundido Nodular ou Dúctil; Ferro Fundido Cinzento; Ferro Fundido Vermicular; Ferro Fundido Maleável; Ferro Fundido Branco.

Ao analisar a maioria dos componentes mecânicos, independentemente do tipo de material, podemos concluir que estão submetidos à carregamentos cíclicos, o que significa dizer que existe uma variação de carga durante o tempo, e essa variação de carga resulta em falhas por fadiga. Fadiga é o termo empregado, justamente porque esse tipo de falha ocorre após ser sujeito à carregamentos cíclicos por um longo período de tempo. A importância da fadiga resume-se no fato de ser a maior causa individual de falhas nos equipamentos; pesquisas mostram que entre 50 a 90% de todas as falhas mecânicas são por conta de fadiga. As falhas por fadiga são determinadas por três estágios: início da trinca, propagação da trinca e ruptura repentina devido ao crescimento instável da trinca. Existem três modelos de falha por fadiga em uso, atualmente, e cada um possui uma área de aplicação e um propósito. As abordagens são: o modelo tensão-número de ciclos (S-N), o modelo deformação-número de ciclos (ϵ -N) e o modelo da mecânica da fratura (NORTON, 2013).

Ao determinar a fadiga, não só carregamentos cíclicos são levados em consideração. Diferentes parâmetros são considerados importantes na influência sobre a fadiga dos materiais. Dentre tais parâmetros podemos englobar propriedades fundamentais do material para caracterização de fadiga, como por exemplo a dureza e a resistência a tração, assim como outros fatores externos; efeitos da superfície, meio ambiente e corrosão, e temperatura (ASM METALS HANDBOOK, 1996).

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 Ferros fundidos

O ferro tem se mostrado ao longo da história bem importante, pois através dele têm ocorrido grandes mudanças na sociedade. Principalmente no período pós idade do ferro.

Ligas ferrosas são produzidas em larga escala, sendo assim o material com maior produção dentre todos os metais. Existem três fatores que podem explicar sua aplicação (CALLISTER, 2007):

- Ferro é abundante da crosta terrestre
- Baixo custo no processo de produção da liga
- São muito versáteis podendo assim ser adaptados para uma variedade de propriedades mecânicas.

2.1.1 Definição de ferros fundidos

Ferro Fundido é uma classe de liga ferro possuindo teores de carbono acima de 2,14%, porém, a maioria desses contêm entre 3,0 e 4,5 %p C, dentre outros elementos de liga, sendo um deles o Silício que tem um papel altamente importante no produto final, pois eleva a resistência da ferrita contida no ferro fundido (CALLISTER, 2016).

Em ferros fundidos considerados como ligas ternárias, aplica-se o conceito de Carbono Equivalente, mostrado pela equação química a seguir. Essa definição possibilita levar em conta o impacto do Silício nas transformações estruturais e, portanto, nas propriedades dos Ferros fundidos onde o silício encontra-se em teores elevados (CHIAVERINI, 2005).

$$C.E = \% C + \frac{1}{3} (\%Si + \%P)$$

Como mostra o diagrama de ferro carbono na Figura 2.1, as ligas nessas faixas de composição tornam-se totalmente líquidas em uma faixa de temperaturas entre 1150°C e 1300°C, apresentando valores menores do que para

os aços. Sendo assim, essas ligas podem ser fundidas com facilidade, tonando assim ótimas para fundição (CALLISTER, 2016).

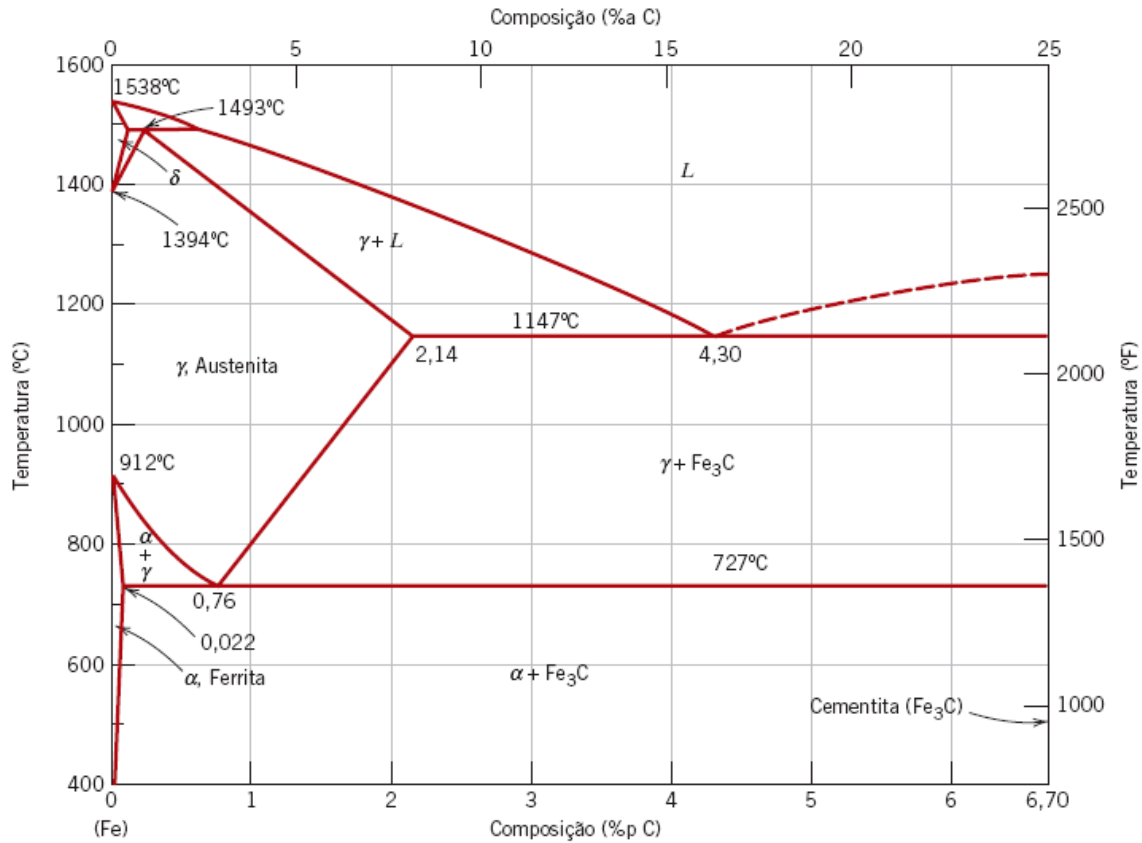


Figura 2.1 - Diagrama de equilíbrio de fases ferro-carbono (CALLISTER, 2016).

2.1.2 Composição química da liga

Os ferros fundidos tem em geral pelo menos a adição de mais um elemento de liga, sendo o Si o mais comum. Os mais encontrados são C, S, P, Si e Mn. Estes elementos alteram a composição do eutético e o modo de solidificação dessas ligas. A Tabela 2.1 mostra os elementos químicos constituintes dos cinco tipos de ferros fundidos abordados neste trabalho. De acordo com Chiaverini (CHIAVERINI, 2005), as influencias dos elementos de liga são:

- **Carbono (C):** é responsável por determinar a parcela de grafita que poderá ser formada, ou em teores mais baixos à tendência é formar cementita.
- **Silício (Si):** depois do C o silício pode ser considerado o elemento de maior importância nos ferros fundidos. O Si reduz a estabilidade da

cementita, assim, favorece também, a decomposição da cementita em grafita e perlita. Sua adição é importante quando deseja-se obter um fofo com grafita, quando em baixos teores há formação de ferro branco (sem grafita). Portanto, é uma substância grafitizante.

- **Manganês (Mn):** este complica a decomposição da cementita, em teores elevados pode até eliminar o efeito do Si. Seu principal papel nos FoFo é neutralizar a ação do S (fragilizante) formando MnS.
- **Enxofre (S):** Este elemento não tem significado com relação a tendência grafitizante.
- **Fósforo (P):** Quando em teores normais ou baixos é grafitizante porem em altos teores contribui para a fragilidade e age como estabilizador da cementita. Combinado com o ferro, o fosforo forma um fosfeto (Fe_3P) e pode formar eutéticos binários.

Tabela 2.1 - Composição química de ferros fundidos típicos comuns (CHIAVERINI, 2007).

Tipo	Composição química %				
	C	Si	Mn	S	P
Branco	1,8-3,6	0,5-1,9	0,25-0,80	0,06-0,20	0,06-0,20
Maleável	2,2-2,9	0,9-1,9	0,15-1,20	0,02-0,20	0,02-0,20
Cinzento	2,5-4,0	1,0-3,0	0,20-1,00	0,02-0,25	0,02-1,00
Nodular	3,0-4,0	1,8-2,8	0,10-1,00	0,01-0,03	0,01-0,10
Vermicular	2,5-4,0	1,0-3,0	0,20-1,00	0,01-0,03	0,01-0,10

2.1.3 Velocidade de resfriamento

Fator relacionado com a espessura de peças moldadas. Seções espessas significam um resfriamento significativamente mais lento, e seções finas velocidades mais rápidas.

Em velocidades elevadas, não ocorre o tempo necessário para a decomposição da cementita, uma vez que quando dependem dos teores de C e Si, há pouca ou nenhuma grafitização, originado assim FoFo branco.

Velocidades de resfriamento mais lentas favorecem a formação de grafita, sendo assim a estrutura será constituída basicamente de grafita e perlita.

O teor de silício será ainda mais elevado para resfriamentos mais lentos, com isso a cementita da perlita pode também dividir-se parcialmente, dando origem a uma estrutura constituída de veios de ferrita e grafita. Estrutura essa de excelente usinabilidade, baixa dureza e razoável resistência mecânica.

Este fator não influi somente na formação de grafita, mas também, está relacionada ao tamanho do veio de grafita formado na estrutura do fofó (CHIAVERINI, 2007).

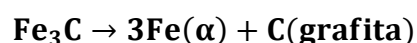
- Alta → veios finos e indesejáveis
- Média → veios normais
- Baixa → veios Grosseiros

2.1.4 Componentes estruturais dos Ferros Fundidos

Visto que a composição química e a velocidade de resfriamento determinarão a distribuição, tamanho, quantidade e forma de Ferrita, Grafita, Perlita, Cementita, Steadita e Ledeburita contidas no ferro fundido, é de extrema importância conhecer os elementos estruturais que irão se formar, a fim de antever as propriedades mecânicas da liga.

Grafita: sua formação é influenciada especialmente pelo Carbono e Silício. Por determinar as principais características mecânicas dos ferros fundidos, a grafita é considerada o componente estrutural mais importante do ferro fundido.

O Carbono estipula a quantidade de grafita que poderá se formar na estrutura e o Silício é essencial, pois proporciona a decomposição da cementita e, sob certas circunstâncias, pode se decompor para formar grafita e ferrita, de acordo com a reação (CALLISTER, 2016):



Essa grande tendência em formar grafita, pode ser regulada através da taxa de resfriamento da composição. A formação da grafita acontece devido presença de silício em concentrações superiores a 1 %p. Além do mais, a formação da grafita é facilitada por taxas de resfriamento mais longas no decorrer da solidificação (CHIAVERINI, 2005).

Devido a essa capacidade de regular a formação da grafita com utilização da taxa de resfriamento, pode-se obter seis formas para a grafita existente no interior da microestrutura do material, sendo elas apresentadas na

Figura 2.2 (COLPAERT, 2008):

- I. Lamelar
- II. Rosetas
- III. Vermicular
- IV. Semi-compactas
- V. Compactas
- VI. Esferoidal

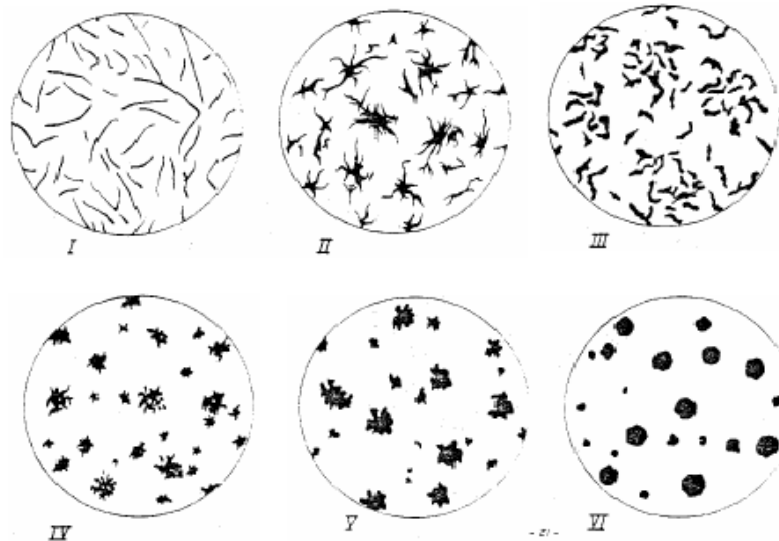


Figura 2.2 - Formas típicas da grafita (ISO 945:2008).

De acordo com a Japanese Industrial Standards (JIS G5502: 2001), American Society for Testing and Materials (ASTM A 247: 2006) e a International Organization for Standardization (ISO 945: 2008), que classificam a morfologia da microestrutura da grafita. As grafitas lamelares ainda pode se mostrar de cinco maneiras, conforme a Figura 2.3.

- A. Irregular desorientada;
- B. Em roseta;
- C. Desigual irregular;
- D. Interdendrítica desorientada;
- E. Interdendrítica orientada.

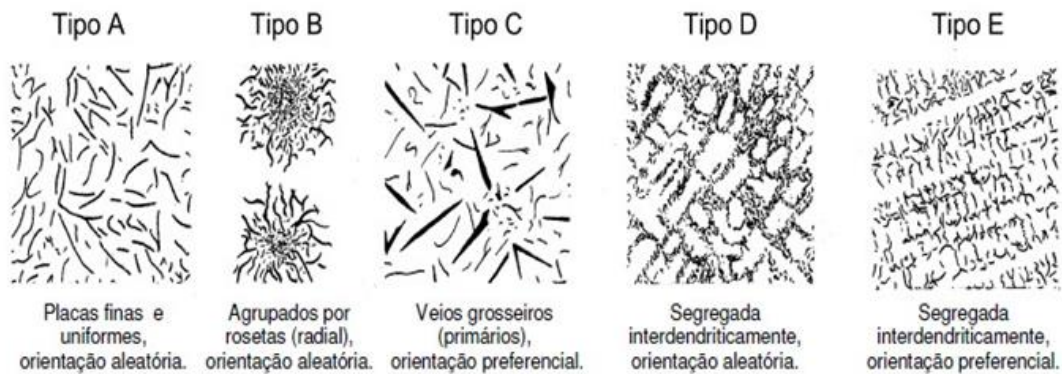


Figura 2.3 - Forma e distribuição dos veios de grafita (ASTM A247:2006).

Ferrita: é a solução sólida de estrutura CCC em ferro alfa, onde a solubilidade do carbono é baixa.

Cementita: é o carboneto de ferro (Fe_3C), que possui elevada dureza e de estrutura ortorrômbica.

Perlita: este processo acontece quando a um resfriamento rápido dificultando o processo de separação da austenita, que deveria se transformar totalmente em ferrita mais cementita, porém devido a essa rapidez o processo de separação ocorre em forma de lamelas de perfis relativamente finos, sendo essa chamada de perlita.

Ledeburita: sua elevada dureza é justificada por ser um constituinte onde, sobre um fundo de cementita, é formado pequenos glóbulos de perlita.

Steadita: de natureza eutética, é constituído por partículas de cementita (Fe_3C) e fosfeto de ferro (Fe_3P), com ponto de fusão baixo (inferior a $980^\circ C$) (CHIAVERINI, 2005).

2.1.5 Classificação dos ferros fundidos

Historicamente, a primeira classificação de ferro fundido baseou-se na sua fratura. Sendo assim dois tipos de ferro foram inicialmente reconhecidos (ASM METALS HANDBOOK, 1990):

- Ferro branco: exibe uma superfície de fratura branca, cristalina, porque a fratura ocorre junto as placas de carboneto de ferro; é o resultado da solidificação metaestável (eutético Fe_3C).

- Ferro cinzento: pela fratura ocorrer ao longo das placas de grafita (flocos), exibe uma superfície de fratura cinza; é o resultado da solidificação estável (eutético Gr).

Com o advento da metalografia e de conhecimentos pertinentes ao aumento de ferro fundido, outras classificações, mostradas na Tabela 2.2, com base em características micro estruturais tornaram-se possível, através da matriz e da forma do grafite, dando assim origem aos cinco tipos mais utilizados atualmente de ferros fundidos, sendo eles (ASM METALS HANDBOOK, 1990):

- Ferro Cinzento;
- Ferro Nodular ou Dúctil;
- Ferro Branco;
- Ferro Maleável;
- Ferro Vermicular

Tabela 2.2 - Classificação de ferro fundido por designação comercial, microestrutura e fratura (ASM METALS HANDBOOK, 1990).

Designação comercial	Fase rica em carbono	Matriz	Fratura
Ferro Cinzento	Grafita lamelar	P	Cinza
Ferro Nodular	Grafita esferoidal	F, P, A	Cinza-prateada
Ferro Vermicular	Grafita compacta	F, P	Cinza
Ferro Branco	Cementita	P, M	Branca
Ferro Maleável	Grafita temperada	F, P	Cinza-prateada

P – Perlita, F – Ferrita, A – Austenita, M – Martensita

2.2 Ferro fundido Cinzento

2.2.1 Definição

Esse ferro fundido possui ductilidade praticamente desprezível correspondente a presença de grafita em forma de lamelas. Porém tem uma ótima capacidade de absorver energia em forma de vibração, ou seja, possui alta

capacidade de amortecimento, o que lhe permite aplicações variadas (VAN VLACK, 1984).

Dentre todos as ligas fundidas, o cinzento é o mais utilizado devido as suas características (CHIAVERINI, 2005):

- Fácil fusão e moldagem;
- Boa resistência mecânica;
- Excelente usinabilidade;
- Boa resistência ao desgaste;
- Boa capacidade de amortecimento.

A composição química dos ferros cinzentos situa-se dentro de uma faixa bem ampla (CHIAVERINI, 2005):

- 2,00 a 4,00 %C;
- 1,00 a 3,00 %Si;
- 0,3 a 1,00 %Mn;
- 0,10 a 1,00 %S;
- 0,05 a 0,25 %P.

2.2.2 Classificação

As classificações do ferro cinzento quanto as suas propriedades mecânicas e composição química são mostradas na Tabela 2.3 e Tabela 2.4, respectivamente.

Tabela 2.3 - Classificação do ferro fundido cinzento de acordo com suas propriedades mecânicas (CHIAVERINI, 2007).

Classe	Descrição
FC-10 e FC-15	Ferro fundido comum, com melhor usinabilidade e excelente fundibilidade
FC-20 e FC-25	Boa fundibilidade e usinabilidade. Possui melhor resistência mecânica
FC-30 e FC-35	Maior dureza e resistência mecânica
FC-40	É o que possui maior resistência mecânica

Tabela 2.4 - Classificação de acordo com a composição química, segundo ASTM, do ferro fundido cinzento (CHIAVERINI, 2007).

Classe ASTM	Composição química (%)				
	C	Si	Mn	P	S
20	3,10-3,80	2,20-2,60	0,50-0,80	0,20-0,80	0,08-0,13
25	3,00-3,50	1,90-2,40	0,50-0,80	0,15-0,50	0,08-0,13
30	2,90-3,40	1,70-2,30	0,45-0,80	0,15-0,30	0,08-0,12
35	2,80-3,30	1,60-2,20	0,45-0,70	0,10-0,30	0,06-0,12
40	2,75-3,20	1,50-2,20	0,45-0,70	0,07-0,25	0,05-0,12
50	2,55-3,10	1,40-2,10	0,50-0,80	0,07-0,20	0,06-0,12
60	2,50-3,00	1,20-2,20	0,50-1,00	0,05-0,20	0,05-0,12

2.2.3 Propriedades

As propriedades mecânicas segundo a EB-126 da ABNT do ferro fundido cinzento são mostradas na Tabela 2.5.

Tabela 2.5 - Propriedade mecânicas dos ferros cinzentos, de acordo com a EB-126 da ABNT (CHIAVERINI, 2007).

Classe	Diâmetro da barra de ensaio		Limite de resistência à tração (min.)		Dureza Brinell (máx.)
	Diâmetro –estado bruto de fundição (mm)	Diâmetro – usinada (mm)	Kgf/mm ²	MPa	
FC15	13	8	23	230	241
	20	12,5	18	180	223
	30	20	15	150	212
	45	32	11	110	201
FC20	13	8	28	270	255
	20	12,5	23	230	235
	30	20	20	200	223
	45	32	16	160	217
FC25	13	8	33	320	269
	20	12,5	28	270	248
	30	20	25	250	241
	45	32	21	210	229

FC30	20	12,5	33	320	269
	30	20	30	290	262
	45	32	26	260	248
FC35	20	12,5	38	370	–
	30	20	35	340	227
	45	32	31	300	269
FC40	30	20	40	390	–
	45	32	36	350	–

2.2.4 Aplicação

Ferro fundido cinzento é usado para muitos tipos diferentes de peças em uma grande variedade de máquinas e estruturas. Para cada aplicação destina-se uma classe diferente, como mostra a Tabela 2.6.

Tabela 2.6 - Melhor usabilidade dos ferros cinzentos (CHIAVERINI, 2007).

Classe	Aplicação
FC-10 e FC-15	Base de máquinas, carcaças metálicas e aplicações semelhantes.
FC-20 e FC-25	Elementos estruturais tais como cabeçotes, barramentos e mesas de máquinas operatrizes.
FC-30 e FC-35	Pequenos virabrequins, engrenagens, base pesada de máquinas, buchas, colunas de máquinas e grandes blocos de motor.
FC-40	Utilização limitada a peças de espessuras médias e grossas

2.3 Ferro fundido branco

2.3.1 Definição

De acordo com Chiaverini (CHIAVERINI, 2007), os ferros brancos não apresentam grafitas em sua microestrutura. Basicamente todo o carbono se mostra como carboneto de ferro Fe_3C , devido a isso esse tipo de material apresenta uma superfície de fratura clara.

Os principais fatores para a obtenção da composição química desejada são:

- Teores de carbono e silício
- Velocidade de resfriamento

Esses fatores são de extrema importância para a produção do ferro branco, pois para tal objetivo é necessário a combinação dos mesmos. Para isso, utiliza-se o “coquilhamento” ou o sistema de “coquilha”, que se trata de derramar metal líquido em moldes de material metálico, onde o ferro líquido resfria com velocidades de resfriamento e tais condições que quase toda a grafitação é extinta.

Embora o silício seja um fator predominante no coquilhamento, outros fatores também influem, sendo eles:

- Temperatura de vazamento
- Temperatura de “coquilha”
- Espessura da peça na secção coquilhada
- Espessura da coquilha
- Tempo durante o qual o metal fica em contato com a coquilha

2.3.2 Propriedades

De acordo com Chiaverini (CHIAVERINI, 2007), as propriedades indispensáveis deste material, são relacionadas a alta quantidade de cementita em sua micro estrutura, sendo assim esse tipo de ferro fundido apresenta características como:

- Excelente resistência ao desgaste;
- Baixas tenacidade e ductilidade;
- Grafita em flocos;
- Frágil sob tensão trativa;
- Resistência sob compressão;
- Excelente absorção de vibrações.

2.3.3 Classificação

Tabela 2.7 - Classes de ferro fundido branco de acordo com sua composição química (CHIAVERINI, 2007).

Classe	Dureza Brinell	Tipo de moldagem ou tratamento térmico	Composição química (%)								
				Ci	Si	Mn	Ni	Cr	Mo	S	Outros
I Tipo A	500 600	Areia Coquilha	min. max.	3,0 3,6	0,8	1,3	3,3 5,0	1,4 4,0	1,0	0,15	0,30 P
I Tipo B	550 600	Areia Coquilha	min. max.	2,5 3,0	0,8	1,3	3,3 5,0	1,4 4,0	1,0	0,15	0,30 P
I Tipo C	550 600	Areia Coquilha	min. max.	2,9 3,7	0,8	1,3	2,7 4,0	1,1 1,5	1,0	0,15	0,30 P
I Tipo D	550 600	Areia Coquilha	min. max.	2,5 3,6	1,0 2,2	1,3	5,0 7,0	7,0 11,0	1,0	0,15	0,10 P
II Tipo A	550 600	Areia Temperada	min. max.	2,4 2,8	1,0	0,5 1,5	0,5	11,0 14,0	0,5 1,0	0,06	0,10 P; 1,2 Cu
II Tipo B	450 600	Areia Temperada	min. max.	2,4 2,8	1,0	0,5 1,5	0,5	14,0 18,0	1,0 3,0	0,06	0,10 P; 1,2 Cu
II Tipo C	550	Areia Temperada	min. max.	2,8 3,6	1,0	0,5 1,5	0,5	14,0 18,0	2,3 3,5	0,06	0,10 P; 1,2 Cu
II Tipo D	450 600	Areia Temperada	min. max.	2,0 2,6	1,0	0,5 1,5	1,5	18,0 23,0	1,5	0,06	0,10 P; 1,2 Cu
II Tipo E	450 600	Areia Temperada	min. max.	2,6 3,2	1,0	0,5 1,5	1,5	18,0 23,0	1,0 2,0	0,06	0,10 P; 1,2 Cu
III Tipo A	450 600	Areia Temperada	min. max.	2,3 3,0	1,0	0,5 1,5	1,5	23,0 28,0	1,5	0,06	0,10 P; 1,2 Cu

2.3.4 Aplicação

Por possuir uma alta resistência a abrasão é muito utilizado na produção de peças que seja necessário ter esse tipo de características, sendo assim aplica-se em equipamentos para a moagem de minérios, pás de escavadeiras, rodas de trem e outros componentes similares (CHIAVERINI, 2007).

2.4 Ferro fundido Nodular ou Dúctil

2.4.1 Definição

Esse tipo de ferro fundido se caracteriza pela tenacidade, ductilidade e resistência mecânica, entretanto a característica mais importante, é o seu limite de escoamento que é mais elevado no ferro fundido nodular do que no cinzento.

A grafita desse tipo de ferro fundido encontra-se na forma esferoidal, essa não interrompe a continuidade da matriz, resultando assim em uma maior ductilidade e tenacidade (CHIAVERINI, 2007).

2.4.2 Propriedades

Tabela 2.8 - Propriedade de um ferro nodular tratado termicamente para ensaio Charpy de resistência ao choque (CHIAVERINI, 2007).

Amostra	Tratamento Térmico	Resistência à tração		Limite de escoamento		Alongamento em 50 mm (%)	Dureza R.C
		kgf/mm ²	MPa	kgf/mm ²	MPa		
A	Estado fundido	54,4	536	34,0	336	13,0	7
B	Recozido subcrítico a 700° C	43,7	431	32,1	315	23,6	1
C	Temperado a 900°C e revenido a 680°C	64,5	635	53,5	527	8,8	19
E	Normalizado a 900°C e revenido a 635°C	79,1	779	47,7	470	8,2	21
J	Temperado a 860°C e revenido a 650°C	75,9	748	58,9	581	9,4	18
G	Temperado a 860°C e revenido a 480°C	106,7	1051	80,4	792	4,1	29

2.4.3 Classificação

Tabela 2.9 – Classificação, segundo a ABNT, do ferro fundido nodular (CHIAVERINI, 2007).

Classe	Limite de resistência à tração, min. Kgf/mm ² (Mpa)	Limite de escoamento (0,2%) min. Kgf/mm ² (Mpa)	Alongamento (5d), min. (%)	A título informativo	
				Faixa de dureza aproximada Brinell	Estruturas predominantes
FE 3817	38,0 (370)	24,0 (240)	17	140 - 180	ferrítica
FE 4212	42,0 (410)	28,0 (270)	12	150 - 200	ferrítica - perlítica
FE 5007	50,0 (490)	35,0 (340)	7	170 - 240	perlítica - ferrítica
FE 6002	60,0 (590)	40,0 (390)	2	210 - 280	perlítica
FE 7002	70,0 (690)	45,0 (440)	2	230 - 300	perlítica
FE 3817	38,0 (370)	24,0 (240)	17	140 - 180	ferrítica

Tabela 2.10 - Classificação do ferro fundido nodular, de acordo com a norma ABNT (CHIAVERINI, 2007).

Classe	Limite de resistência à tração Kgf/mm ² (MPa)	Limite de escoamento Kgf/mm ² (MPa)	Alongamento (%)	Dureza Brinell	Módulo de elasticidade de Kgf/mm ²	Resistência ao choque kgf/mm ²	Resistência à flexão kgf/mm ² (MPa)
GGG - 45	45,0 (440)	35,0 (340)	5	160/240	17.000	2	80/95 (780/930)
GGG - 38	38,0 (370)	25,0 (250)	17	140/180	↑	10	70/90 (740/880)
GGG - 42	42,0 (410)	28,0 (270)	12	150/200	16.500	8	80/90 (780/880)
GGG - 50	50,0 (490)	35,0 (340)	7	170/240	-	6	85/100 (830/980)
GGG - 60	60,0 (590)	42,0 (410)	2	210/300	18.500	4	90/110 (880/1080)
GGG - 70	70,0 (690)	50,0 (490)	2	230/320	-	2	100/120 (1080/1180)

2.4.4 Aplicação

Tabela 2.11 – Empregos típicos e aplicações gerais de ferro nodular (CHIAVERINI, 2007).

Especificação Nº	Classe	Usos gerais	Aplicações típicas
ASTM A 395 ASME AS 395	60-40-18	Componentes para pressão para utilização em altas temperaturas.	Válvulas e equipamentos de vapor.
ASTM A 476 SAE MAS 5316	80-60-03	Equipamento de fábricas de papel, até temperaturas de 230°C.	Cilindros de secagem para fábricas de papel.
ASTM A 536	60-40-18	Partes para resistência ao choque; serviços de baixas temperaturas.	Válvulas e corpos de bombas de pressão
	65-45-12	Serviços gerais.	Elementos de máquinas submetidos a cargas de choque e fadiga.
	80-55-06	Serviços gerais.	Virabrequins, engrenagens e rolamentos.
	100-90-02	Melhor combinação de resistência ao desgaste, mecânica à têmpera superficial.	Engrenagens e elementos de máquinas para suportar elevados esforços.
	120-90-02	Mais elevadas resistência mecânica e ao desgaste.	Pinhões, engrenagens, rolamentos etc.
SAE J 434	D 4018	Componentes mecânicos sob cargas moderadas, exigindo boas	Articulações de direção.
	D 4512	Ductilidade e usinabilidade	Calibres de freios a disco.
	D 5506	Componentes sujeitos a tensões elevadas, exigindo boa tenacidade	Virabrequins
	D 7003	Componentes sujeitos a tensões elevadas; ótima resistência ao desgaste e a reação ao endurecimento parcial.	Engrenagens
	DQ & T	Componentes sujeitos a elevadas tensões, exigindo controle rigoroso de propriedades e uniformidade de microestrutura.	Braços de balancim.

2.5 Ferro fundido maleável

De acordo com a coleção de Joseph Davis, ASM Metals Handbook, desenvolveu com sucesso na década de 1720, a primeira tentativa para produzir ferro fundido maleável de núcleo branco, na qual era caracterizado por ser mais tenaz. Anos depois, foi a vez de Seth Boyden desenvolver e patentear a sua criação, o ferro fundido maleável preto, ou de núcleo preto.

2.5.1 Definição

Consiste em um tipo de ferro fundido no qual possui a maior parte do seu carbono em forma de nódulos de grafita de forma irregular, em vez de flocos, como em ferro cinzento ou como em ferro dúctil. O ferro maleável é feito primeiramente lançando o ferro como um ferro branco e, em seguida, a conversão do carboneto de ferro nos nódulos, através de um tratamento térmico no ferro fundido branco. Esta forma de grafite em ferro maleável é chamada de carbono temperado porque é formada no estado sólido durante o tratamento térmico (DAVIS, J., 2001).

2.5.2 Propriedades

O ferro maleável, como o ferro dúctil, possui ductilidade e tenacidade consideráveis devido à sua combinação de grafite nodular e uma matriz metálica com baixo teor de carbono. Consequentemente, o ferro maleável e o ferro dúctil são adequados para algumas das mesmas aplicações que exigem boa ductilidade e resistência, com a escolha entre ferro maleável e dúctil com base na economia e disponibilidade em vez de propriedades.

No entanto, uma vez que a solidificação do ferro branco em uma seção é essencial na produção de ferro maleável, o ferro dúctil possui uma clara vantagem quando a seção é muito grossa para permitir a solidificação como ferro branco. As peças fundidas de ferro maleáveis são produzidas em espessuras de seção variando de cerca de 1,5 a 100 mm (1/16 a 4 pol.) E em pesos de menos de 0,03 a 180 kg (1/16 a 400 lb) ou mais. O ferro dúctil também possui claras

vantagens sobre o ferro maleável quando é necessário um encolhimento de baixa solidificação.

O ferro maleável também possui alta resistência à corrosão, excelente usinabilidade, boa permeabilidade magnética e baixa retenção magnética para garras magnéticas e freios. A boa resistência à fadiga e a capacidade de amortecimento do ferro maleável também são úteis para um serviço longo em peças altamente estressadas (DAVIS, J., 2001).

Tabela 2.12 - Propriedades do ferro fundido maleável (COLPAERT, 2008).

Propriedades do Ferro Fundido Maleável								
Especificações	Classe	Limite de resistência à tração		Limite de escoamento		Dureza Brinell	Alongamento (%)	Microestrutura
		Kgf/mm ²	Mpa	Kgf/mm ²	Mpa			
FERRÍTICO ASTM A 147 e A338 ASTM A 197	32510	35,0	340	22,4	224	156 max	10	Ferrita e carbono em nódulos. Ferrita e carbono em nódulos. Sem grafita primária.
	35018	37,1	361	24,5	245	156 max	18	
	-	28,0	270	21,0	210	156 max	5	
PERLÍTICO E MARTENSÍTICO ASTM A 220	40010	42,0	410	28,0	270	149/197	10	Carbono em nódulos na matriz, sem cementita primária ou grafita
	45008	45,5	445	31,5	305	156/197	8	
	45006	45,5	445	31,5	305	156/207	6	
	50005	49,0	480	35,0	340	179/229	5	
	60004	56,0	550	42,0	410	197/241	4	
	70003	59,5	585	49,0	480	217/269	3	
	80002	66,5	655	56,0	550	241/285	2	
	90001	73,5	725	63,0	620	269/321	1	

Tabela 2.13 - Propriedades dos ferros fundidos maleáveis de núcleo branco, segundo as normas ABNT (adaptada a COLPAERT, 2008).

Tipo ABNT	D – corpo de prova (mm)	Limite de resistência à tração mínima	Limite de escoamento (0,2) min.	Alongamento em 3d mín. (%)	Dureza Brinell
		Kgf/mm ² (MPa)	Kgf/mm ² (MPa)		
FBMF-3204	15	35(340)	-	3	220
FBMF-3504	15	36(350)	-	3	220
FBMF-4006	15	42(410)	23(230)	4	220
FBMF-4507	15	48(470)	28(270)	5	200
FBMP-5505	15	57(560)	37(360)	4	240
FBMP-6503	15	67(560)	44(430)	2	270
FBMS-3812	15	40(390)	21(210)	8	200

Tabela 2.14 - Propriedades dos ferros fundidos maleáveis de núcleo branco, segundo as normas ABNT (adaptada a COLPAERT, 2008).

Tipo ABNT	D – corpo de prova (mm)	Limite de resistência à tração mínima	Limite de escoamento (0,2) min.	Alongamento em 3d mín. (%)	Dureza Brinell
		Kgf/mm ² (Mpa)	Kgf/mm ² (Mpa)		
FMPF-3006	15	30(290)	-	6	-
FMPF-3512	15	35(340)	19(190)	12	Até 150
FMPF-4507	15	45(440)	26(260)	7	150/200
FMPF-5005	15	50(490)	30(290)	5	170/230
FMPF-5504	15	55(540)	33(320)	4	190/240
FMPF-6503	15	60(640)	49(380)	3	210/250

2.5.3 Aplicação

O ferro maleável, segundo Colpaert (COLPAERT, 2008), é preferido nas seguintes aplicações:

- Peças de seção fina;
- Peças que devem ser perfuradas, cunhadas ou formadas a frio;
- Peças que requerem máxima usinabilidade;
- Peças que devem reter boa resistência ao impacto em temperaturas baixas;
- Peças que requerem resistência ao desgaste (apenas ferro maleável martensítico).

2.5.4 Classificação

2.5.4.1 Ferro Fundido Maleável de Núcleo Branco

De acordo com o livro Metalografia dos produtos siderúrgicos comuns, de Hubertus Colpaert (COLPAERT, 2008), o ferro é fundido contendo cementita eutética e perlita, ou seja, como um ferro fundido branco. O ferro é descarbonetado através de um tratamento térmico. Peças com maiores de espessura apresentam apenas na periferia da peça uma camada descarbonetada, enquanto peças com menores espessuras podem descarbonetar em toda a sua estrutura. São conhecidos de esta forma devido apresentar uma fratura de aspecto branco em seu centro. A Tabela 2.15 mostra sua composição típica.

Tabela 2.15 - Faixa de composição típica de ferro fundido maleável branco (COLPAERT, 2008).

Elemento	Antes do recozimento	Após recozimento
Carbono	3,0-3,7%	0,5-2,0%
Silício	0,4-0,8%	0,4-0,7%
Manganês	0,1-0,4%	0,1-0,4%
Enxofre	0,3% Max.	0,3% Max.
Fósforo	0,1% Max.	0,1% Max.

2.5.4.2 Ferro Fundido Maleável de Núcleo Preto

Ainda segundo definições do livro Metalografia dos produtos siderúrgicos comuns, de Hubertus Colpaert (COLPAERT, 2008), a seção da peça é solidificada e recebe um tratamento térmico para a decomposição da cementita precipitando a grafita. A grafita obtida é morfologicamente compacta, porém menos regular que os nódulos obtidos no ferro fundido nodular.

Necessita-se de um tratamento térmico após sua fundição, representando um custo adicional para a sua produção. Sua aplicação é desejável quando a contração de solidificação é importante e para peças com maiores dimensões.

2.6 Ferro Fundido Vermicular

É conhecido também como ferro fundido de grafita compactada (CGI – “Compacted Graphite Iron”) foi produzido na década de 1940 como resultado de insuficientes níveis de cério e magnésio para produzir de ferro fundido nodular. (ASM METALS HANDBOOK, 1988).

2.6.1 Definição

É caracterizado por sua grafita se apresentarem em “escamas”, ou seja, em forma de estrias ou plaquetas. Da mesma forma como o ferro nodular, o ferro fundido vermicular necessita de adição de elementos especiais, como o titânio, a fim da redução da formação de grafita esferoidal. (GUESSER, 2002)

O ferro fundido vermicular contém entre 2,0 – 2,4% de silício, onde a adição de perlita por estabilizadores é notada para conseguir-se o nível desejável.

Se o teor de silício for elevado para 3,0% ou mais que isso e os estabilizadores de perlita reduzirem-se ao teor residual, terão uma matriz ferrítica predominante e o carbono irá se deslocar da matriz para as grafitas (DAWSON, 2001).

No ferro fundido vermicular, a adição de elementos anti-nodularizantes determina taxa de resfriamento do fundido, a formação de grafita e tamanho da

seção. Estes fatores interagem entre si e afetam o resultado da estrutura da matriz (SHY, 1999).

2.6.2 Propriedades

É definida segundo George M. Goodrich e Joseph S. Santner, que o ferro de grafita compactada possui propriedades intermediárias se comparado ao fundido cinzento e o nodular; possui a fundibilidade acrescido de uma melhor resistência mecânica e ductilidade do ferro fundido cinzento. Abaixo a Tabela 2.16 apresenta as devidas propriedades do ferro fundido vermicular.

Tabela 2.16 - Propriedades para o Ferro fundido vermicular ASTM A842 (CASTING SOURCE DIRECTORY, 2006).

Propriedades para o Ferro Fundido Vermicular ASTM A842				
Classe	Resistência à tração	Resistência ao escoamento	Alongamento (%) em 50mm	Dureza Brinell
250	250 Mpa	175 Mpa	3,0	179 máx
300	300 Mpa	210 Mpa	1,5	143-207
350	350 Mpa	245 Mpa	1,0	163-229
400	400 Mpa	280 Mpa	1,0	197-255
450	450 Mpa	315 Mpa	1,0	207-269

2.6.3 Aplicação

Segundo apostilas e normas da companhia Indústria de Fundição Tupy, pode-se afirmar que a sua comercialização é considerada recente. A aplicação dos ferros fundidos vermiculares é de acordo com suas propriedades específicas. Quando comparado com outros fundidos comerciais, apresentam vantagens econômicas e tecnológicas. Por exemplo, fazendo uma comparação com os ferros fundidos comerciais mais comuns, como o cinzento e o nodular, o vermicular apresenta vantagens sobre ambos. Do ponto de vista econômico, uma

fundição austríaca, onde se produzia 32 diferentes tipos de peças em vermicular para caminhões e tratores, seu custo era 20% menor que o maleável preto e 25% menor que o nodular ferrítico. Exemplo de peças produzidas em série atualmente:

- Lingoteiras (com vida até 70% maior que o cinzento);
- Blocos de motores;
- Cabeçotes de motores;
- Coletores de escape;
- Tubos;
- Carcaça de bombas;
- Discos de freio;
- Anéis de pistão;
- Pistões;
- Engrenagens;
- Carcaça de diferencial.

2.6.4 Classificação

As normas JIS G5502: 2001, ASTM A247: 2006 e ISO 945: 2008, classificam a liga pela forma da grafita e pelo tipo.

O ferro vermicular pode ser classificado como Tipo III de acordo com a norma ISO 945: 2008.

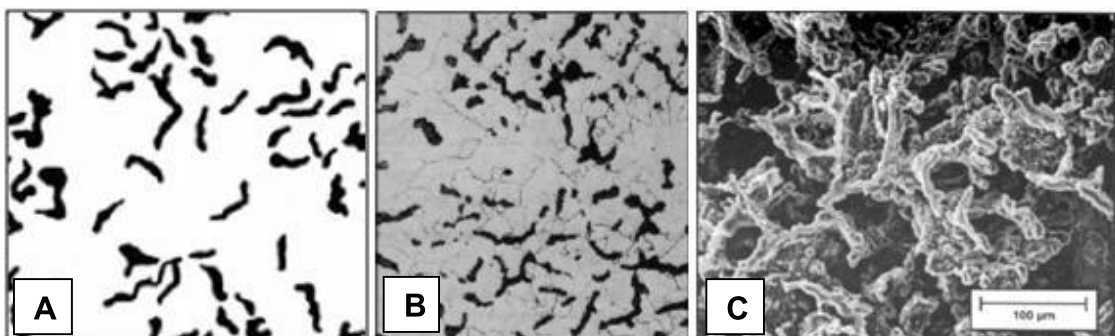


Figura 2.4 - Ferro fundido vermicular. (A) Grafita Forma III segundo ISO 945, 2008. (B) Micrografia óptica do ferro fundido vermicular atacada com nital. (Fonte: ASM). (C) Microscopia Eletrônica de Varredura do ferro fundido vermicular após ataque profundo (GUESSER, 2002).

Instituições nacionais e internacionais como SAE, ASTM, ISO, VDG, são as responsáveis pela classificação dos ferros fundidos vermiculares. Elas desenvolveram e publicaram normas na qual temos o limite de resistência a tração e microestrutura expressa em termos de nodularidade.

A ISO determinou, no ano de 2006, para o ferro vermicular a abreviação “GJV” e cinco classes de acordo com o limite mínimo de resistência a tração (DAWSON, 2007):

- GJV 300 (ferrítico);
- GJV 350;
- GJV 400;
- GJV 450 (perlítico);
- GJV 500 (ligado).

Tabela 2.17 - Classes ferro vermicular segundo a norma VDG W50: 2002 (Adaptado de GUESSER, 2009).

Classe	Resistência a Tração (MPa)	Resistência ao Escoamento (MPa)	Alongamento (%)	Dureza Brinell (resultados típicos)
EN-GJV-300	300-375	220-295	1,5	140-210
EN-GJV-350	350-425	260-335	1,5	160-220
EN-GJV-400	400-475	300-375	1,0	180-240
EN-GJV-450	450-525	340-415	1,0	200-250
EN-GJV-500	500-575	380-455	0,5	220-260

2.7 Fadiga

2.7.1 Aspectos gerais da fadiga

Ao analisar a maioria dos componentes mecânicos podemos concluir que estão submetidos à carregamentos cíclicos, o que significa dizer que existe uma variação de carga durante o tempo, e essa variação de carga provoca falhas por fadiga. Usualmente estas falhas acontecem em níveis de tensão consideravelmente abaixo dos valores da resistência ao escoamento dos materiais. Fadiga é o termo empregado, justamente porque esse tipo de falha acontece após ser sujeito à tensões repetitivas ou ciclos de deformação por um longo período de tempo. A importância da fadiga resume-se no fato de ser a maior causa individual de falhas nos equipamentos; pesquisas mostram que a maioria das falhas mecânicas ocorridas são devido a fadiga, com valores entre 50 a 90%.

Os carregamentos variáveis com o tempo podem ser classificados segundo sua amplitude em função do tempo ou número de ciclos: alternados, pulsantes, flutuantes e variado. Estes padrões de amplitude de tensão-tempo são mostrados na Figura 2.5.

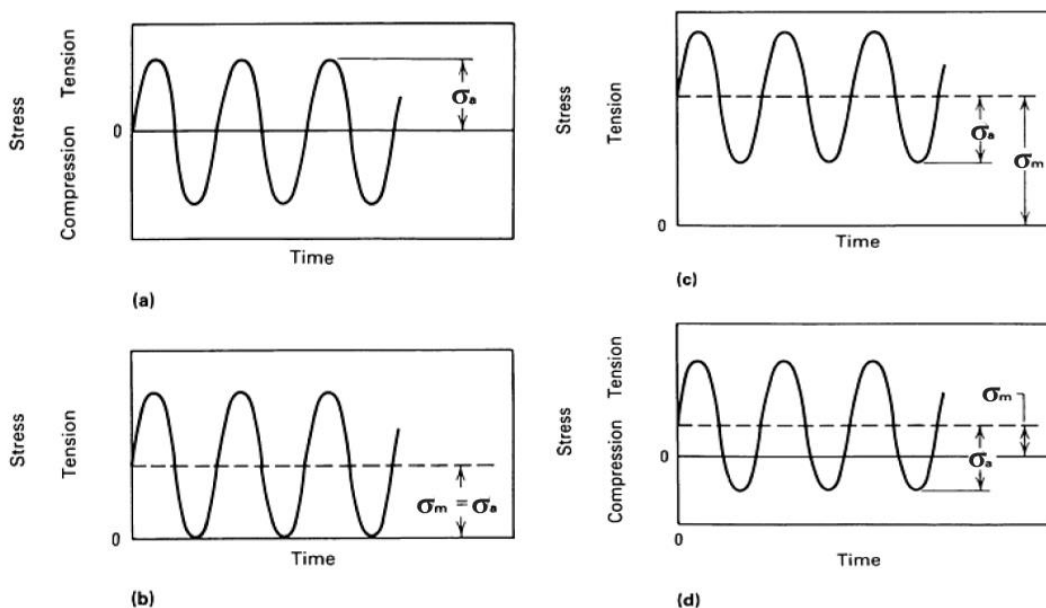


Figura 2.5 - Padrões de amplitude de tensão-tempo de carregamentos variáveis (adaptado a ASM METALS HANDBOOK, 1990).

O padrão ciclo de tensões alternadas (a), é caracterizado por tensões máxima e mínima de igual magnitude. No padrão ciclo de tensões pulsantes (b), cujo valor oscila periodicamente, entre um zero e máximo. Já o padrão ciclo de tensões flutuantes (c) ocorre quando as tensões mínimas e máximas são trativas e o padrão variado (d) todas as situações em que não se enquadre nas duas anteriores (ASM METALS HANDBOOK, 1990).

Dentre os parâmetros utilizados para caracterizar os ciclos de tensões em um ponto material do objeto, podemos relacionar as seguintes equações:

Faixa de tensão,

$$\sigma_r = \sigma_{m\acute{a}x} - \sigma_{m\acute{i}n} \quad \text{Equação 2.1}$$

Tensão de amplitude,

$$\sigma_a = \frac{\sigma_{m\acute{a}x} - \sigma_{m\acute{i}n}}{2} \quad \text{Equação 2.2}$$

Tensão média,

$$\sigma_m = \frac{\sigma_{m\acute{a}x} + \sigma_{m\acute{i}n}}{2} \quad \text{Equação 2.3}$$

Razão ou Relação das tensões,

$$R = \frac{\sigma_{m\acute{i}n}}{\sigma_{m\acute{a}x}} \quad \text{Equação 2.4}$$

Na maioria das vezes, as falhas por fadiga têm seu início na superfície de um equipamento com micro deformação plástica em um local de concentração de tensão no qual vai ocasionar a deterioração do material desenvolvendo a propagação de trincas e chegando a uma ruptura final. Portanto, a falha por fadiga é composto por três estágios: dano inicial de fadiga que leva a nucleação da trinca, propagação da trinca para um tamanho crítico e fratura repentina provocado pelo crescimento instável da trinca. A duração do primeiro estágio pode ser curta; já o estágio dois envolve maior tempo da vida da peça; e o terceiro e último estágio é instantâneo (NORTON, 2013).

- **Estágio 1: Nucleação/início da trinca**

Nas interseções das estruturas cristalinas estão presentes átomos e há regiões onde nas fronteiras estão faltando átomos que dariam continuidades a estrutura cristalina. Sendo essas regiões de alta energia, o deslizamento das discordâncias nos planos de escorregamento provocado por tensões cíclicas causa distorções, criando bandas de deslizamento (regiões de grande deformação devido a movimentos cisalhantes) no decorrer dos contornos dos cristais do material. À medida que os ciclos de tensão se sucedem, bandas de deslizamento adicionais aparecem e agrupadas, formam extrusões e intrusões, tornando-se locais onde surgem as trincas microscópicas. A aparência geral das bandas de deslizamento de fadiga depende principalmente das características de deslizamento do material e da amplitude de deformação ou de tensão. Portanto, nucleação é o ponto onde estava presente uma descontinuidade no material a princípio de pequeno tamanho, variando de 2 a 5 grãos em torno da origem (DIETER, 1976).

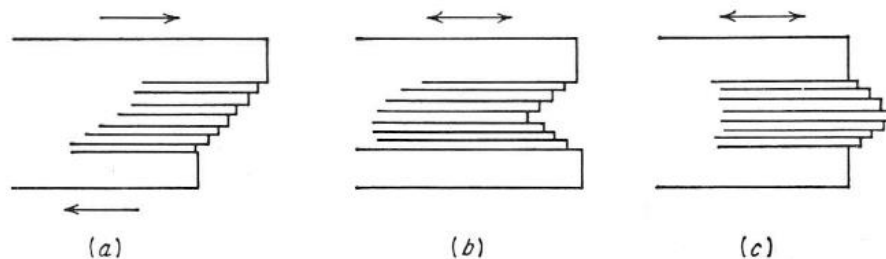


Figura 2.6 - Formação de trincas por fadiga provocadas por micro deformações. (a) Deformação estática; (b) deformação por fadiga originando um entalhe superficial (intrusão); (c) deformação por fadiga originando extrusão (DIETER, 1976).

Um número considerável de microfissuras normalmente se formam durante os primeiros 20 a 40% da vida de fadiga. Com o carregamento cíclico contínuo, algumas das microfissuras iniciadas crescem, e praticamente nenhuma nova é formada. A nucleação de trincas, bem como todas as etapas de fadiga, é controlada pela deformação plástica cíclica. Portanto, pode-se esperar que as trincas se iniciem em posições onde a deformação plástica cíclica é maior do que a média, ou seja, na superfície. Em tensões de baixas magnitudes, o estágio de

nucleação pode ocupar a maior parte da vida útil. Já em altas magnitudes, a nucleação geralmente é realizada dentro de uma pequena parte da vida por fadiga.

Os materiais mais frágeis não apresentam a mesma capacidade de escoar e tendem a desenvolver trincas mais facilmente, ou seja, eles são mais sensíveis a entalhes. Materiais frágeis, como no caso de ferros fundidos, que não possuem capacidade de escoamento podem não passar pelo estágio de nucleação e proceder diretamente para o estágio dois em locais de existência de inclusões ou vazios, se comportam como trincas microscópicas (NORTON, 2013).

- **Estágio 2: Propagação da trinca**

Os mecanismos de deformação entram em funcionamento ao se estabelecer a trinca microscópica. O crescimento da trinca é relativamente pequeno, porém após a sujeição à tensões cíclicas que variam de valores acima da tensão de escoamento para outros abaixo da tensão de escoamento, este crescimento torna-se significativo. Por esta razão que a propagação de trinca se deve a tensão de tração ainda que o processo se inicia a partir de tensões de cisalhamento, como no caso de materiais dúcteis.

Durante o estágio de desenvolvimento de uma trinca de fadiga, forma-se uma região de superfície de fratura onde pode ser observado dois tipos de marcas, chamadas de estrias e marcas de praia. Essas duas marcas apontam a posição do extremo da trinca em um determinado instante e surgem como nervuras concêntricas que se disseminam para longe dos locais de iniciação da trinca, repetidas vezes em um formato semicircular ou circular. As marcas de praia possuem dimensões macroscópicas e são visíveis a olho nu (CALLISTER, 2016). Essas marcas surgem devido aos ciclos de início e parada do crescimento da trinca e circundam a origem da trinca, geralmente em um entalhe ou em um outro intensificador de tensão interna (NORTON, 2013).

De acordo com Dieter (DIETER, 1976), o estágio de propagação de trinca acontece por consecutivos processos de embotamento plástico que transforma a ponta da trinca rombuda, como pode ser visto na Figura 2.7. Ao se iniciar o carregamento cíclico, a extremidade da trinca possui a forma de pequeno entalhe

duplo (a). À medida que se aplica tensão de tração, este pequeno entalhe duplo na extremidade da trinca acumula o deslizamento ao longo dos planos que fazem 45° com a região superficial da trinca (b). Conforme a trinca se torna mais larga para sua máxima extensão, ou seja, máxima tensão trativa (c), ela se desenvolve por cisalhamento plástico no mesmo instante em que sua ponta torna-se rombuda. No momento em que a carga passa para compressão, os sentidos de deslizamento na extremidade se invertem (d), até a construção da nova região superficial de trinca afilada com entalhe duplo (e). A partir daí a ponta segue para um novo ciclo de tensões por intermédio da aplicação de uma tração pequena (f).

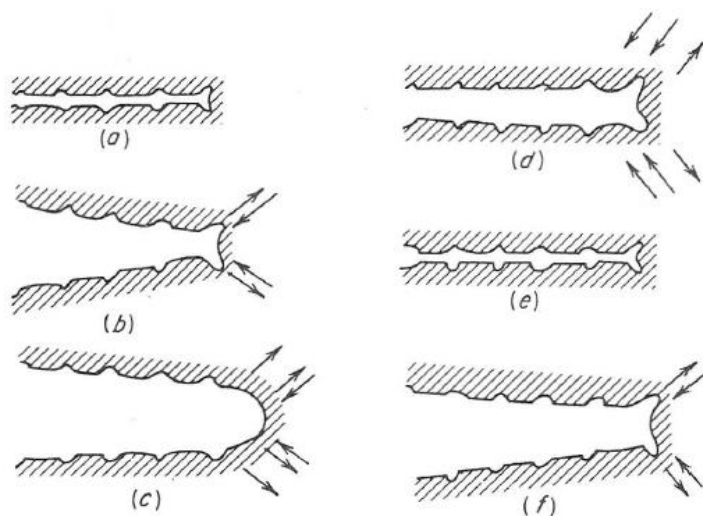


Figura 2.7 - Ilustração das características da trinca durante o estágio de propagação da trinca por fadiga (DIETER 1976).

É válido enfatizar que, segundo estudos realizados e como mostra a literatura de Callister (CALLISTER, 2016), apesar de tanto as marcas de praia quanto as estrias possuírem características semelhantes, seja pela aparência ou por serem localizadas na superfície da fratura, elas são, no entanto, diferentes tanto no tamanho quanto na origem. Em uma única marca de praia, podem existir infinidades de estrias.

Ainda sobre a literatura de Callister (CALLISTER, 2016), estudos mostram que o motivo de uma falha pode ser entendido, com frequência, depois de um exame das superfícies falhadas. A confirmação de que a falha foi causada por fadiga pode ser determinada pela superfície fraturada estar acompanhada de marcas de praia e/ou de estrias. Porém, a ausência de ambas ou de qualquer

uma não elimina a fadiga como a causa da falha. As estrias não são observadas em todos os metais que experimentam fadiga. Além disso, a probabilidade de aparecimento de estrias pode depender do estado de tensões. A detectabilidade das estrias diminui com a passagem do tempo, devido a formação de produtos de corrosão de superfície e/ou de películas de óxidos. Ainda, no decorrer do ciclo de aplicação de tensões, as estrias podem ser destruídas por ação abrasiva, na medida em que as superfícies de trincas opostas se esfregam umas contra as outras. As estrias e as marcas de praia não estarão presentes naquela região na qual a falha for repentina. Ao contrário, a falha repentina pode ser frágil ou dúctil; a comprovação de deformação plástica estará ausente nas frágeis e presente nas falhas dúcteis.

- **Estágio 3: fratura**

A falha ligada a fadiga ocorre no instante em que a trinca alcança um tamanho crítico no ciclo de tensão de tração final, ocasionando, desta forma, a falha por colapso plástico. A fratura pode ser dúctil, onde uma deformação progressiva da estrutura está presente ou frágil, provocada por propagação rápida de trincas acompanhada de pouca ou nenhuma deformação (NORTON, 2013).

A região da superfície fraturada por fadiga é identificada por três regiões diferentes, fáceis de identificar, podendo ser associadas ao processo de fadiga. Na Figura abaixo está representado o esquema de superfície do material fraturado submetido a fadiga (FERREIRA, 2008).

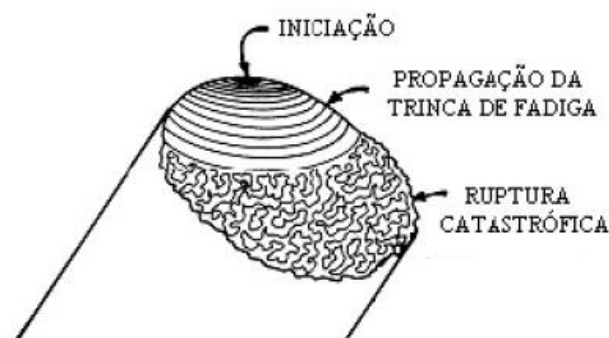


Figura 2.8 - Estágio de propagação de trinca de fadiga (Adaptado a FERREIRA, 2008).

Em ferro fundido cinzento com grafitas em formas de flocos, geralmente não é possível determinar, a partir da aparência da fratura, se a falha foi causada por fadiga ou a uma única sobrecarga de tensão, pois não se observa uma fratura de fadiga distinta. Isto ocorre particularmente com ferro fundido relativamente frágil. No entanto, em ferros fundidos nodulares, as falhas de fadiga frequentemente têm uma aparência distinta daquela associada à falha por outros meios (ASM METALS HANDBOOK, 1996).

2.7.2 Regimes de fadiga

Norton diz que (NORTON, 2013), baseando-se na deformação ou no número de ciclos de tensão, ao qual se espera que a peça seja submetida durante a sua vida em operação, pode-se estabelecer um regime de fadiga de baixo-ciclo (FBC) ou um regime de fadiga de alto-ciclo (FAC).

- **Fadiga de baixo ciclo (FBC)** – as principais características de componentes dentro deste regime é determinada por tensões nominais com valores acima do limite de escoamento do material acompanhada de baixos números de ciclos até a fratura. As curvas ϵ -N (deformação-número de ciclos) são características fundamentais deste regime.

$$\begin{aligned}\sigma_N &> \sigma_e \\ N_f &< 10^3 \text{ ciclos}\end{aligned}$$

- **Fadiga de alto ciclo (FAC)** – neste regime, os níveis de tensões nominais são inferiores ao limite de escoamento do material acompanhada de elevados números de ciclos até a fratura. As curvas S-N (tensão-número de ciclos) são características deste regime.

$$\begin{aligned}\sigma_N &< \sigma_e \\ N_f &> 10^3 \text{ ciclos}\end{aligned}$$

2.7.3 Modelos de falhas por fadiga

Segundo Norton (NORTON, 2013), existem três abordagens de falha por fadiga utilizados atualmente, sendo que cada um possui uma área de aplicação e um enfoque principal. São eles: modelo tensão-número de ciclos (S-N), modelo deformação-número de ciclos e mecânica da fratura linear elástica (MFLE).

2.7.3.1 Tensão-número de ciclos – Curva S-N

O modelo tensão-número de ciclos é baseado no critério da vida infinita e reflete a abordagem clássica da fadiga. Inicialmente foi desenvolvido ao longo dos anos 1800 e início dos anos 1900, porque as máquinas cada vez mais complexas da revolução industrial produziram cargas dinâmicas que criaram um número crescente de falhas. A filosofia deste modelo foi a primeira a abordar essa necessidade (ASM METALS HANDBOOK, 1996).

Este modelo é mais frequentemente utilizado nas aplicações que envolvem fadiga de alto-ciclo (FAC), nas quais espera-se que o conjunto mecânico opere por mais de 10^3 ciclos de tensão aproximadamente. Trata-se de um modelo fundamentado na tensão, que visa definir o limite de fadiga do material, de maneira que as tensões cíclicas sejam capazes de ser mantidas abaixo deste nível e, com isso, evita-se a falha para o número de ciclos requerido (NORTON, 2013).

O tipo mais comum de ensaio conduzido em um ambiente de laboratório emprega um eixo com rotação e flexão: tensões alternadas de tração e de compressão com igual magnitude são colocadas sobre o corpo de provas na medida em que ele é simultaneamente flexionado e rotacionado (ensaios giratórios com dobramento). Nesse caso, o ciclo de tensões é alternado, isto é, $R = -1$. Durante a rotação, a superfície inferior do corpo de provas está sujeita a uma tensão de tração (isto é, positiva), enquanto a superfície superior está submetida a uma tensão de compressão (isto é, negativa).

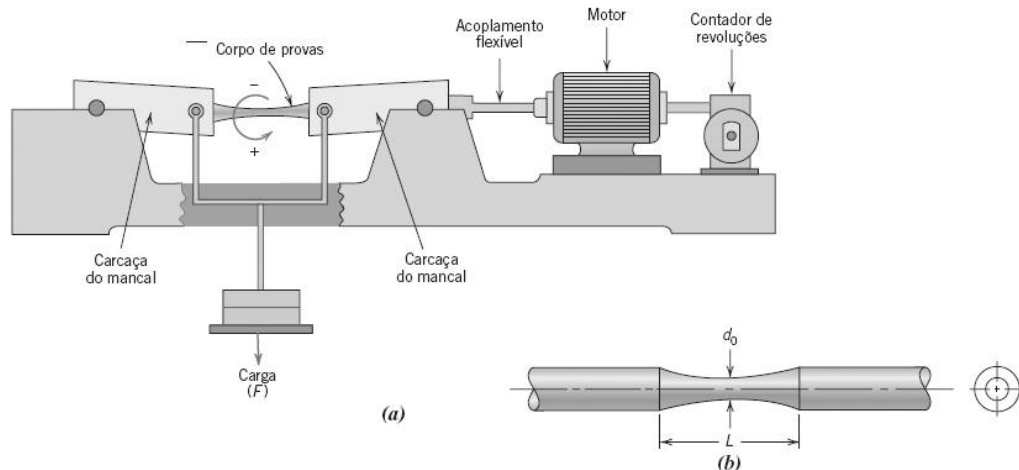


Figura 2.9 - Diagrama esquemático do ensaio de flexão rotativa (a) e de um corpo de provas (b) (CALLISTER, 2016).

Além disso, as condições de serviço esperadas podem ser tais que recomendem a condução de ensaios de fadiga simulados em laboratório que utilizem ciclos de tensões de compressão e tração, ou ciclos de tensões de torção, em lugar de testes giratórios com dobramento.

Diferentes ensaios são realizados sujeitando um corpo de provas a um ciclo de tensões sob uma tensão máxima significativamente grande ($\sigma_{m\acute{a}x}$), geralmente na faixa de dois terços do limite estático de resistência à tração; é registrado e contado o número de ciclos até a fratura. Este mesmo procedimento é realizado novamente com outros corpos de prova sob valores máximos de tensão progressivamente menores. Os dados são traçados em um gráfico da tensão S em função do logaritmo do número de ciclos N que causa falha, para cada um dos corpos de provas. O parâmetro S é tomado normalmente ou como a tensão máxima ($\sigma_{m\acute{a}x}$), ou como a amplitude da tensão (σ_a).

A vida infinita começa com, mais ou menos, 10^6 ciclos. Já a vida finita é considerada para um carregamento inferior à 10^7 ciclos para materiais ferrosos (BOANIATTI, 2003).

De acordo com De Marco Filho (DE MARCO FILHO, 2002), a curva S-N indica limitações no comportamento dos dados, já que não fica nítido as etapas de iniciação e propagação das trincas, ocasionando dificuldades na observação do comportamento de estruturas que possuem trincas ou entalhes agudos. Machado (MACHADO, 2002) indica que as curvas S-N não são adequadas para

retratar o estado físico da estrutura para um certo tempo (t). O autor aponta, ainda, que há a necessidade de uma abordagem capaz de permitir a avaliação do progresso de uma trinca no decorrer do tempo, mais preciso, a abordagem da Mecânica da Fratura.

2.7.3.2 Deformação-número de ciclos – Curva ϵ -N

O escoamento é envolvido por uma iniciação de trinca, com isso uma aproximação de acordo com a tensão não é capaz de modelar de forma correta esse estágio da fadiga. Um modelo fundamentado na deformação provê uma visão levemente precisa do estágio de nucleação da trinca. Essa abordagem também pode esclarecer os danos cumulativos devido às variações na carga cíclica ao longo da vida da peça, como sobrecargas, que podem introduzir tensões residuais favoráveis ou desfavoráveis na região de falha. Combinações de cargas de fadiga e temperatura elevada são modeladas com maior segurança nesse caso, porque os efeitos de fluência podem ser incluídos na formulação matemática. Este método é empregado com maior repetição em problemas de vida finita e em regimes de fadiga de baixo-ciclo, nos quais as tensões cíclicas são aumentadas o suficiente para ocasionarem escoamento local. É a aproximação mais complicada dos três modelos para ser utilizada e requer uma solução com o auxílio de computadores (NORTON, 2013).

A abordagem da tensão em geral é empregada para uma resposta contínua no regime de vida segura e de vida finita. Isto é, principalmente quando é destinado a abordar a área de fadiga de baixo ciclo (por exemplo, de aproximadamente 10^2 a 10^6 ciclos). Então o método também pode ser usado para caracterizar o comportamento de "fadiga" de longa duração de materiais que não mostram limite de fadiga.

Do ponto de vista das propriedades, as representações dos dados da vida útil da tensão são semelhantes às dos dados sobre a fadiga. No entanto, uma vez que a tensão plasmática é uma condição essencial para a fadiga, o teste controlado por deformação oferece vantagens em relação a caracterização da iniciação da fissura de fadiga (antes do crescimento subsequente da fissura e falha final). O método S-N é baseado em apenas um critério de falha: a separação

total da análise de teste. Em contrapartida, qualquer um dos seguimentos podem ser utilizados como critério de falha no teste de fadiga controlada por deformação (conforme ASTM E 606): separação, razão de módulo, microcraqueamento (iniciação) ou porcentagem de queda de carga máxima. Essa flexibilidade pode fornecer melhor caracterização do comportamento de fadiga. O teste para dados da vida útil da tensão não é tão direto como o teste S-N simples controlado por carga (controlado por pressão). O monitoramento e controle usando tensão requer capacidade de extensômetro contínuo. Além disso, a evolução da técnica pode tornar necessário determinar outras características associadas ao comportamento monotônico ou cíclico (ASM METALS HANDBOOK, 1997).

2.7.3.3 Mecânica da Fratura Linear Elástica (MFLE)

O segundo estágio encontrado da fadiga, denominado propagação da trinca, tem sido motivo de muitos estudos, sendo assim equacionado por leis prescritas neste modelo.

Na Mecânica da Fratura Linear Elástica, a inserção da determinação do fator de concentração de tensões (K) é de grande relevância, pois retrata o campo de tensões nas imediações da trinca. É descrito pela fórmula (DIETER, 1976):

$$K = Y\sigma\sqrt{\pi a} \quad \text{Equação 2.5}$$

- K = fator de concentração de tensões ($\text{MPa}\sqrt{\text{m}}$);
- $Y = f(a/W)$ é o fator geométrico da trinca;
- σ = tensão uniaxial atuante perpendicular ao plano da trinca (MPa); comprimento da trinca;
- W = largura do corpo de prova.

No decorrer dos ciclos de fadiga, tendo em conta carregamentos de amplitude constante, a inconstância do carregamento aplicado é encarregado da variação da tensão entre um valor máximo e mínimo, ou seja, submetendo a estrutura a uma oscilação de tensão constante $\Delta\sigma$, que aplicado a um corpo de

prova trincado, corresponde à variação entre $K_{\text{máx}}$ e um K_{min} . O diferencial entre K_{min} e $K_{\text{máx}}$ é chamado amplitude do fator de concentração de tensões ΔK .

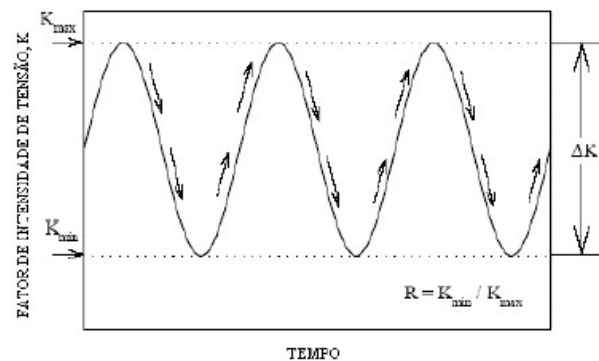


Figura 2.10 - Amplitude do fator de concentração de tensões (ΔK) em função do tempo (NEWMAN, 2000).

Estudando a desenvolvimento das trincas de fadiga, pode-se notar que o crescimento desta era em função do ΔK que se portava na ponta da trinca. Assim relacionam a crescimento da trinca por fadiga com a amplitude do fator de intensidade de tensões.

Sendo assim a mecânica da fratura correlaciona a amplitude do fator de concentração de tensões K com a taxa de propagação de trinca (da/dn). Essa taxa pode ser calculada através da derivada de cada ponto da curva, ou seja, seu valor aumenta juntamente com o desenvolvimento da trinca, devido ao fator de intensidade de tensões (K) aumentar o valor de (a).

$$\frac{da}{dN} = C(\Delta K)^n \quad \text{Equação 2.6}$$

- $\frac{da}{dN}$ é a taxa de desenvolvimento da trinca de fadiga;
- C e n são constantes que resulta da condições ambientais e tensão média. São matematicamente os coeficientes linear e angular da reta.

Então, conclui-se que há uma relação entre a taxa de propagação da trinca e ΔK . Essa relação entre eles é ilustrada pela curva $da/dN \times \Delta K$ em escala logarítmica, conforme a Figura abaixo:

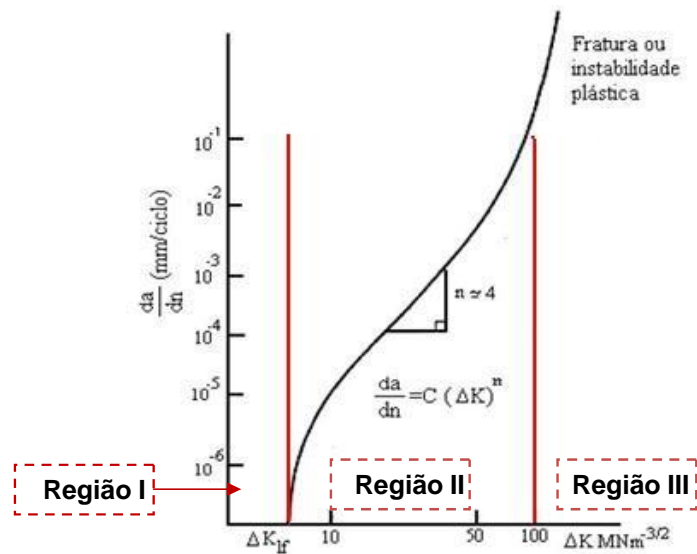


Figura 2.11 - Representação esquemática em escala logarítmica da relação entre a taxa de propagação de trinca de fadiga (da/dN) e amplitude do fator de intensidade de tensão (ΔK) (BRANCO, 1986).

De acordo com Braz (BRAZ, 1999), o gráfico que reproduz a relação entre a curva $da/dN \times \Delta K$ divide-se em três regiões:

Região I: Possui velocidades muito baixas de propagação da trinca, onde pode-se definir um valor de ΔK_{th} (threshold), inferior ao qual não há desenvolvimento da trinca de fadiga. Essa região é fortemente motivada pela microestrutura do material, meio ambiente e a tensão média.

Região II: É a de maior interesse nos estudos relacionados a fadiga, pois essa região é menos sensível à microestrutura, ao meio ambiente e a tensão média. É nessa etapa que se pode observar as estrias de fadiga e as marcas de praia.

Região III: Essa possui vida em propagação pequena e uma elevada taxa de crescimento de trinca. É uma região de sobreposição de fratura monotônica e mecanismos de estrias. A proximidade da propagação instável da trinca ocorre quando o valor de $K_{máx}$ atinge a tenacidade à fratura.

2.7.4 Fadiga em ferros fundidos

O desempenho de fadiga dos ferros fundidos, em geral, é influenciado pela morfologia (forma, tamanho e distribuição) da grafita, microestrutura da matriz,

força de tração, número de ciclos, o tamanho da amostra, a condição da superfície, a degradação da superfície, como a corrosão, e o tipo de carregamento submetido.

A maioria dos dados disponíveis sobre a fadiga de ferro fundido são baseados em testes de flexão rotativa onde o diâmetro da amostra é geralmente inferior a 13 mm (0,5 pol.). Os resultados são frequentemente relatados em termos de limites de resistência à fadiga, embora os testes em intervalos de vida finita (abaixo de 10^6) também estarem sendo mais enfatizados (Figura 2.12). O limite de fadiga geralmente ocorre entre 10^6 e 10^7 ciclos. Para muitos ensaios, se uma amostra dura 10^7 ciclos sob a ação de um determinado valor de tensão, então é frequentemente assumido que o material suportaria tal tensão indefinidamente. Contudo, em ensaios de flexão rotativa, as falhas por fadiga ocorrem acima de 10^7 ciclos. Portanto, alguns limites de fadiga são baseados em 2×10^7 ciclos (ASM METALS HANDBOOK, 1996).

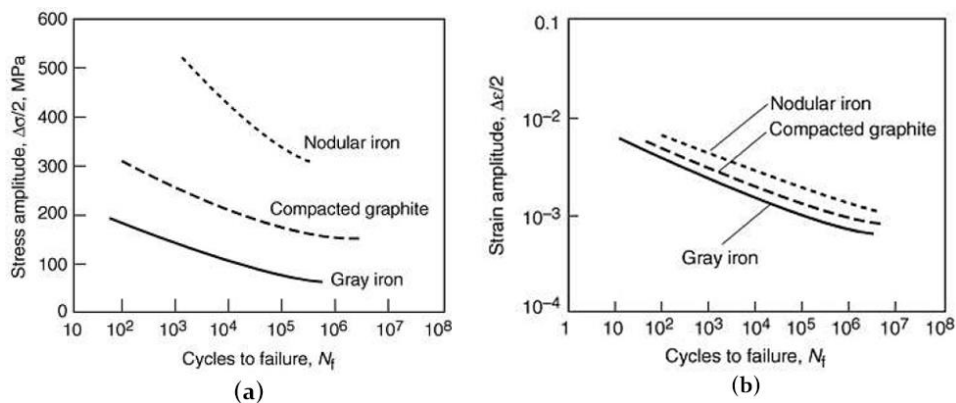


Figura 2.12 - Comparação de curvas S-N (a) e ϵ -N (b) típicas para ferros fundidos nodular (dúctil), cinzento e de grafita compacta (adaptado a ASM METALS HANDBOOK, 1996).

2.7.4.1 Efeitos de dureza

Pela dureza e o limite de resistência à tração serem indicadores de resistência dos ferros fundidos, em gerais, e tais propriedades também estarem relacionadas ao limite de fadiga, podemos dizer que as mesmas são aproximadamente proporcionais (CALLISTER, 2016). Tal relação é comprovada a

partir da Tabela 2.18 com resultado de ensaio de flexão rotativa para valores de ciclos entre 10^6 e 10^7 (ASM METALS HANDBOOK, 1996).

Tabela 2.18 - Tabela demonstrativa de valores de dureza e limite de fadiga para diversos ferros fundidos a partir de ensaio de flexão rotativa (adaptada a ASM METALS HANDBOOK, 1996).

Classe ou Tipo	Limite de resistência à tração (MPa)	Dureza Brinell (HB)	Limite de fadiga	
			Sem entalhe (MPa)	Com entalhe (MPa)
Ferro Fundido Cinzento				
FC-20	138-172	140-187	65.5-69	65.5
FC-25	172-207	170-229	83-103	-
FC-30	207-241	170-241	94-107	93
FC-35	241-276	187-269	110-121	-
FC-40	276-331	207-269	121-134	121
FC-45	310-358	217-269	148-176	-
FC-50	345-393	215-260	169-190	148
FC-60	414-455	230-290	169-203	-
Ferro Fundido Maleável				
Maleável ferrítico (32510)	345-400	110-156	193	-
Maleável ferrítico (35018)	365-414	110-156	214	-
Maleável perlítico (45007)	448	163-217	-	-
Maleável perlítico (48004)	483	163-228	-	-
Maleável martensítico (80002)	689	241-269	276	-
Ferro Fundido Branco				
Ferro puro	138-345	300-575	-	-
Alto Si	90-124	480-520	-	-
Alto Cr (Resistente à corrosão)	207-620	290-400	-	-
Ferro Fundido Nodular				
60-40-18	414-552	149-187	210	124-159
80-55-06	552-689	179-248	269-276	145-165
100-70-03	689-827	217-269	-	-
120-90-02	827-1206	240-300	338	207

2.7.4.2 Resistência à tração

As tabelas e figuras abordadas neste item claramente demonstram que o aumento do limite de resistência à tração influencia diretamente no aumento do limite de fadiga. O limite de fadiga é o valor da tensão ao qual o material pode presumivelmente suportar um número infinito de ciclos sem que ocorra sua fratura, ou seja, a tensão na qual o diagrama S-N se torna e parece permanecer horizontal (ASM METALS HANDBOOK, 1996).

2.7.4.2.1 Ferro fundido nodular

Os valores mínimos de resistência a tração e limite de fadiga para ferros nodulares, segundo a Norma ISO 1083 estão resumidos na Tabela 2.19. Em aplicações de fadiga, ferros nodulares são geralmente usados em condições perlíticas (brutos de fundição ou normalizado) (ASM METALS HANDBOOK, 1996).

Tabela 2.19 - Valores demonstrativos do aumento do limite de fadiga com o acréscimo da resistência à tração para uma amostra de 10.6 mm de diâmetro e entalhe com raio de 0.25 mm e profundidade de 3.6 mm (ASM METALS HANDBOOK, 1996).

Propriedades		Ferro perlítico		Classe intermediária			Ferros perlíticos brutos de fundição normalizados		
		Classe 350-22 350-22L	Classe 400-18 400-18L	Classe 450-10	Classe 500-7	Classe 600-3	Classe 700-2	Classe 800-2	Classe 900-2
Resistência à tração (MPa)		350	400	450	500	600	700	800	900
Limite de fadiga (S-N)	Sem entalhe (MPa)	180	195	210	224	248	280	304	317
	Entalhe V-45° (MPa)	114	122	128	134	149	168	182	190

2.7.4.2.2 Ferro fundido cinzento

Os entalhes e as imperfeições superficiais têm pouco efeito sobre a resistência à fadiga de ferro fundido cinzento, o que é um dos motivos para a sua utilização em virabrequins de automóvel e aplicações similares. As propriedades mínimas de fadiga e tração de ferro cinzento de acordo com ISO 185 estão resumidas na Tabela 2.20 (ASM METALS HANDBOOK, 1996).

Tabela 2.20 - Valores demonstrativos do acréscimo do limite de resistência à fadiga com o acréscimo da resistência à tração (ASM METALS HANDBOOK, 1996).

Propriedades		Propriedades mínimas					
		Classe 150	Classe 200	Classe 250	Classe 300	Classe 350	Classe 400
Resistência à tração (MPa)		150	200	260	300	350	400
Limite de fadiga (S-N)	Sem entalhe (MPa)	68	90	117	135	149	152
	Com entalhe V-45° (MPa)	68	87	108	122	127	129

2.7.4.2.3 Ferro fundido vermicular

Os valores de limite de fadiga e resistência à tração para ferros fundidos vermiculares, de acordo com a literatura de Guessser (GUESSER, 2009) estão resumidos na Tabela 2.21.

Tabela 2.21 - Propriedades mecânicas de ferros fundidos vermiculares com nodularidade de 10 a 30% (adaptado a GUESSER, 2009).

Propriedades	Classe FV-300	Classe FV-400	Classe FV-500
Limite de resistência à tração (MPa)	300	400	500
Limite de fadiga. Flexão rotativa (MPa)	160	200	250
Limite de fadiga. Tração-compressão (MPa)	100	135	175

2.7.4.2.4 Ferro fundido maleável

O ferro maleável ferrítico sem entalhe possui um limite de fadiga de cerca de 50 a 60% do valor da resistência à tração. A Figura 2.13 mostra os resultados das propriedades de fadiga de dois ferros maleável ferrítico (25 mm, ou 1 polegada) a partir dos testes de fadiga por flexão rotativa em amostras entalhadas e não entalhadas. O limite de fadiga não entalhado é cerca de 200 MPa para o ferro com uma resistência à tração de 342 MPa e cerca de 185 MPa para o ferro com uma resistência à tração de 293 MPa. O raio da entalhe geralmente tem pouco efeito sobre a resistência à fadiga, mas a mesma diminui conforme a profundidade do entalhe se intensifica.

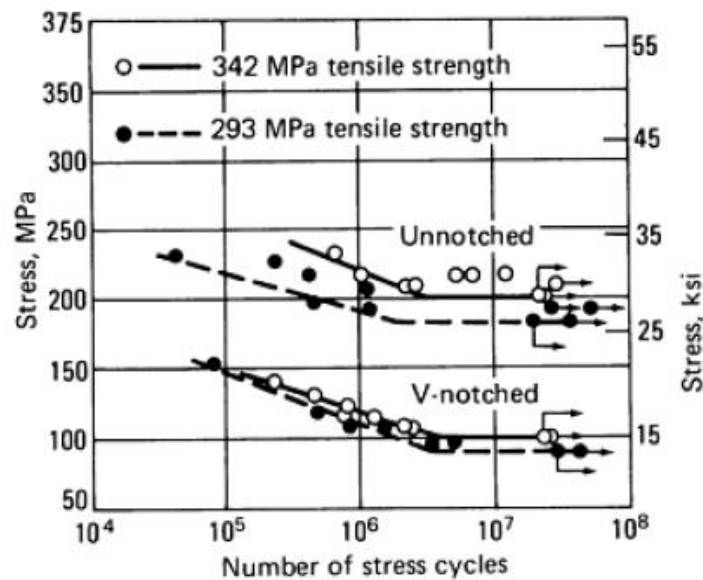


Figura 2.13 - Propriedades de fadiga de dois ferros maleável ferrítico. Flexão rotativa (ASM METALS HANDBOOK, 1990).

Os limites de fadiga de ferros maleáveis perlíticos temperados e não entalhados (resfriados por ar ou óleo) são cerca de 40 a 50% da resistência à tração. Os ferros maleáveis martensíticos temperados (resfriado em óleo) possuem um limite de fadiga sem entalhe de cerca de 35 a 40% da resistência à tração. Os limites de fadiga dos três ferros com entalhe em V na Figura 2.14 variaram de 110 a 125 MPa (ASM METALS HANDBOOK, 1990).

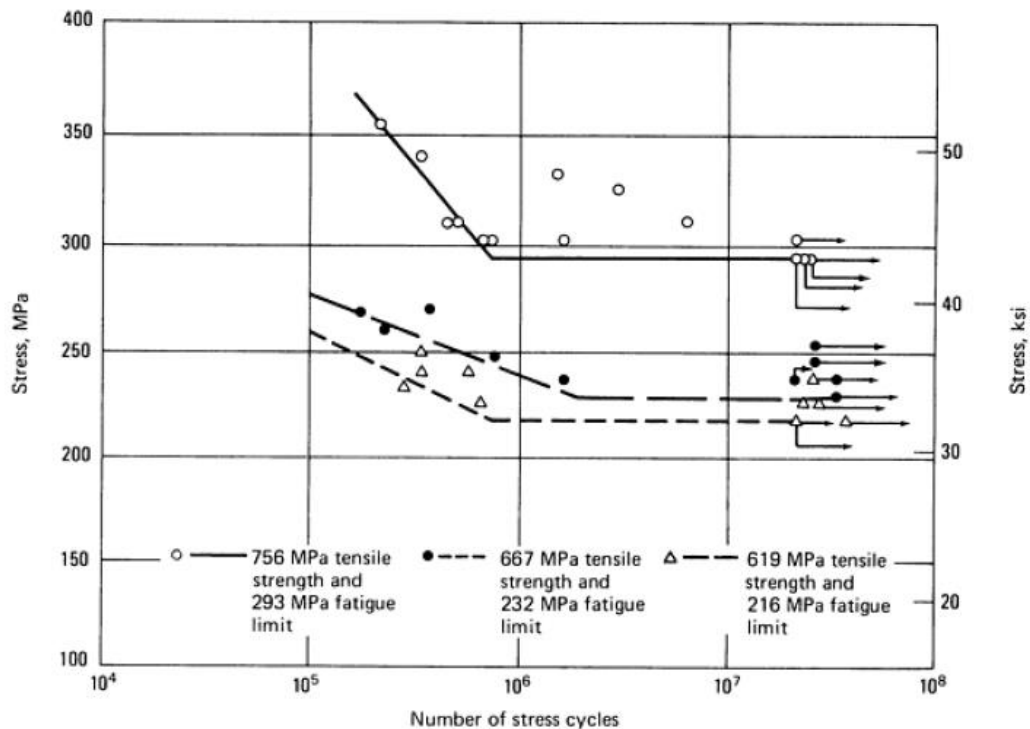


Figura 2.14 - Propriedades de fadiga de três ferros fundidos maleáveis martensítico a partir de ensaio de flexão rotativa em amostras sem entalhes de 25 mm (1 in) (ASM METALS HANDBOOK, 1990).

2.7.4.3 Efeitos de concentração de tensão e sensibilidade ao entalhe

A resistência à fadiga é significativamente reduzida pela introdução de um concentrador de tensão, como um entalhe, furo ou poço de corrosão. Pelos elementos de máquina invariavelmente conterem tais concentradores de tensão como filetes, trancas de chave, roscas de parafusos, ajustes de pressão e furos, as trincas de fadiga nos componentes geralmente iniciam em tais irregularidades geométricas (ASM METALS HANDBOOK, 2003). O fator de concentração de tensão teórico, K_t , é a relação entre a tensão máxima localizada no entalhe e a tensão nominal, representando assim a intensidade do efeito do entalhe. O valor de K_t depende basicamente da geometria do entalhe bem como o tipo de esforço, e a medida que o valor de K_t aumenta reduz-se a tensão alternante que o material suporta (GUESSER, 2009).

Sensibilidade ao entalhe é caracterizada como as diferentes sensibilidades a concentrações de tensões presentes nos materiais (NORTON, 2013). Os ferros fundidos cinzentos são menos sensíveis ao entalhe do que os ferros fundidos

nodulares. Como as grafitas em forma de flocos do ferro cinzento podem ser interpretadas como entalhes internos, os ferro fundidos cinzentos têm pouca ou nenhuma sensibilidade à presença de entalhes adicionais resultantes de características de projeto (ASM METALS HANDBOOK, 1996).

2.7.4.4 Efeitos relacionados ao tamanho da peça

É difícil prever o desempenho de fadiga de componentes grandes diretamente dos resultados de testes de laboratório em pequenas amostras. Na maioria das vezes, existe um efeito de tamanho, ou seja, o limite de fadiga dos componentes grandes é menor que o dos componentes pequenos. Mesmo que a microestrutura seja a mesma, simplesmente aumentando o tamanho da amostra aumenta a área superficial e, portanto, a probabilidade de conter falhas de fabricação, que representam potencial de fadiga ou locais de iniciação de fadiga por corrosão são maiores (ASM METALS HANDBOOK, 2003). Para mostrar melhor este efeito, a Figura 2.15 mostra resultados de ensaios de flexão rotativa em ferro fundido nodular e cinzento, onde o decréscimo do limite de resistência à fadiga varia de acordo que a espessura da amostra é aumentada. Na Figura 2.15 (a), mostra ainda a relação do limite de resistência com o limite de fadiga, onde este decréscimo é de mesma intensidade, o que sugere que este aumento da espessura, pelo fato de alterar a microestrutura (formação de inclusões, segregações e diminuição do número de nódulos), influencia diretamente nas duas propriedades (GUESSER, 2009).

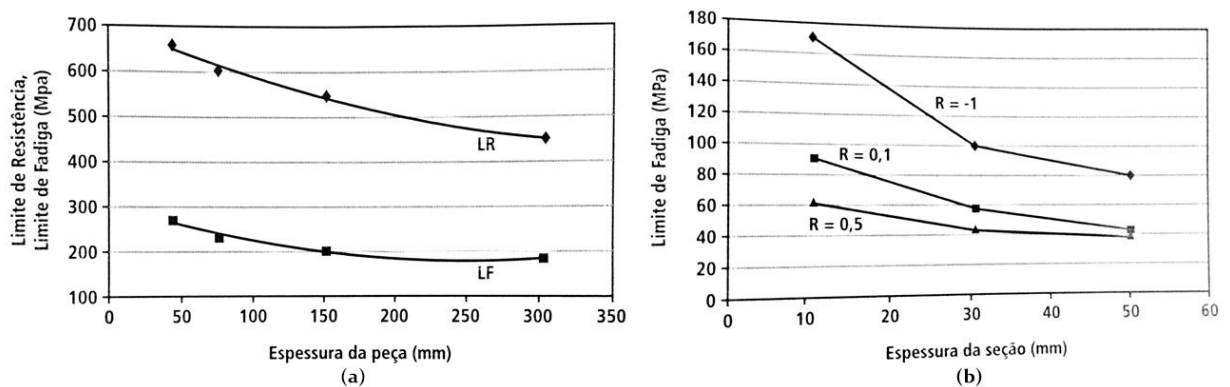


Figura 2.15 - (a) Decréscimo do limite de fadiga e do limite de resistência com o aumento da espessura da peça de ferro nodular e (b) efeito da espessura sobre o limite de fadiga de ferro fundido cinzento classe FC250 (GUESSER, 2009).

2.7.4.5 Efeitos relacionados à superfície

As propriedades da fadiga geralmente são muito sensíveis às condições da superfície. Exceto em casos especiais envolvendo defeitos internos, todas as trincas de fadiga iniciam na superfície (ASM METALS HANDBOOK, 2003). Um estudo feito por Bauer (2004), pode ser ilustrado na Figura 2.16, mostrando os fatores principais que afetam a resistência a fadiga dos ferros fundidos, envolvendo características da microestrutura do material, qualidade da superfície e da introdução de tensões residuais compressivas na superfície (GUESSER, 2009).

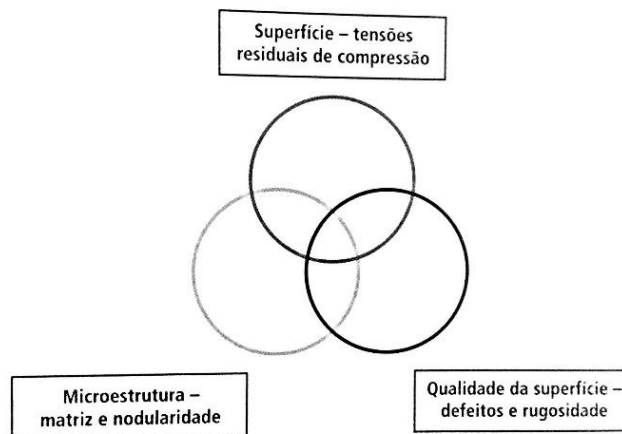


Figura 2.16 - Variáveis que influenciam a resistência à fadiga (GUESSER, 2009).

2.7.4.5.1 Ferro fundido nodular

De um modo geral, os defeitos superficiais são mais importantes que os defeitos internos, mesmo para solicitações do tipo tração-compressão. A Figura abaixo, obtida através de um estudo presente na literatura de Guessser (GUESSER, 2009), mostra a influência de diferentes irregularidades superficiais sobre o limite de fadiga do ferro fundido nodular perlítico.

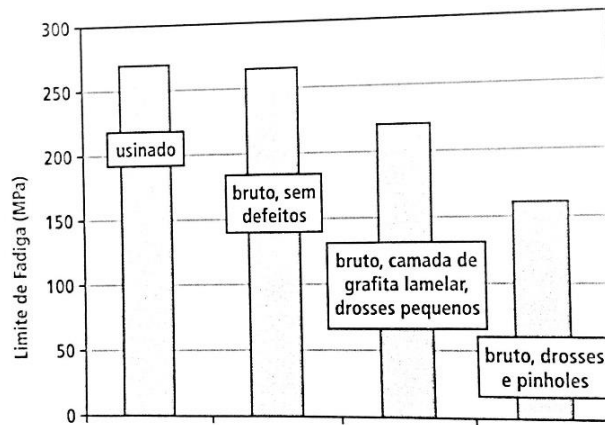


Figura 2.17 - Influência de defeitos superficiais sobre o limite de fadiga de ferro fundido nodular perlítico. Flexão rotativa (GUESSER, 2009).

Ainda sobre a influência de defeitos superficiais, um extenso trabalho desenvolvido por Bauer (2004) pode ser resumido na Figura 2.18, onde é conciliado defeitos com tratamentos superficiais.

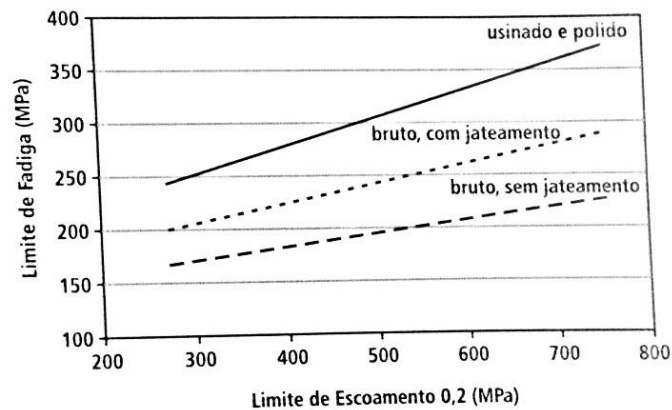


Figura 2.18 - Relação entre limite de escoamento e limite de fadiga para diferentes superfícies (GUESSER, 2009).

2.7.4.5.2 Ferro fundido cinzento

Segundo a literatura de Guesser (GUESSER, 2009), é sabido que nos ferros fundidos cinzentos, devido à ausência de magnésio, a tendência à formação de defeitos superficiais é muito menor do que em ferros fundidos nodulares. Bauer (2004) demonstra isso em seu estudo, resumido na Tabela 2.22,

onde o ferro fundido classe FC 250 não apresentou diferenças no limite de fadiga com superfícies brutas de fundição e usinadas.

Tabela 2.22 - Limite de fadiga (MPa) de ferros fundidos perlíticos com diferentes acabamentos superficiais (GUESSER, 2009).

Tipo de ferro fundido	Quantidade de fraturas sem defeitos (%)	Estado da superfície		
		Usinada	Bruta, sem jateamento	Bruta, com jateamento
FE 70002	86	300		
	20-29	300	205	230-250
	2,5		170	
FV 500	96	245		
	70			255
	57		205	
FC 250	88-100	130	130	130

Os estudos realizados por Sakwa & Bachmacz (1971), através de ensaios com amostras sem limpeza da superfície bruta de fundição, foi verificado uma queda de 15 a 40% do limite de fadiga comparados à amostras usinadas. Após um processo qualquer de limpeza da superfície, obteve-se um aumento do limite de fadiga, mas resultados significativos só foram alcançados com jateamento com granalha de aço, isso por causa do efeito de encruamento e introdução de tensões residuais de compressão na superfície (GUESSER, 2009).

2.7.4.5.3 Ferro fundido vermicular

A Tabela abaixo, obtida a partir do trabalho de Langmayer et al (2001), confirma a influência do jateamento sobre a superfície da peça, onde a resistência à fadiga do material é restaurada para valores próximos aos obtidos com superfície usinada. Tais resultados foram coletados de ensaios de fadiga em superfície com grafita lamelar (GUESSER, 2009).

Tabela 2.23 - Resultados de ensaios de fadiga em superfícies com grafita lamelar (GUESSER, 2009).

Superfície	Limite de Fadiga (Mpa)	Tensão residual (Mpa)
Usinada	155	-60
Bruta, perlítica	100	0
Bruta, ferrítica	115	-330
Bruta, perlítica, jateada	170	0
Bruta, ferrítica, jateada	150	-320

2.7.4.6 Efeito do meio ambiente e corrosão

A falha que ocorre pela ação simultânea de um ataque químico e de uma tensão cíclica é denominada fadiga associada à corrosão (CALLISTER, 2016). Ao colocar uma peça de ferro fundido em um meio corrosivo, a mesma irá sofrer corrosão generalizada, mas sob esforços de fadiga, geralmente se desenvolve um considerável número de trincas devido as cavidades formadas nas áreas mais solicitadas. Pela corrosão ser progressiva, a resistência à fadiga reduz com o aumento do tempo de exposição ao ambiente corrosivo (GUESSER, 2009).

Tabela 2.24 – Resistência à fadiga de ferros fundidos ao ar, em água, em salmoura, e sob inibidores alcalinos. Flexão rotativa (GUESSER, 2009).

Ambiente	Limite de Fadiga (Mpa)		
	Cinzento	Nodular perlítico	Nodular ferrítico
Ar	124	270	209
Água	100	224	178
3% cloreto de sódio	39	46	46
1% bórax	108	193	155
3% carbonato de sódio	124	247	193
3% óleo solúvel	124	209	185
0,25% cromato de potássio	124	263	216

2.7.4.6.1 Ferro fundido nodular

Em estudos realizados por Fischer et al (1987), em ambiente com solução de água e 3% de cloreto de sódio, os ferros fundidos nodulares ferríticos tem sua resistência à fadiga significativamente reduzida.

Para complementar, a literatura de Palmer (1970) demonstra a Tabela 2.24 referente a resistência de fadiga dos ferros fundidos expostos em diferentes meios. De maneira geral, para ferro fundido nodular, o limite de fadiga foi reduzindo em conjunto com ambientes mais corrosivos e na presença de inibidores alcalinos de corrosão, o decréscimo do limite de fadiga não foi prevenido, mesmo que a corrosão tenha diminuído de intensidade. O óleo solúvel também não se mostrou eficiente na prevenção da diminuição do limite de fadiga (GUESSER, 2009).

Como mostra a Tabela 2.25, o uso de camadas de tintas de materiais anódicos com relação ao ferro, como o zinco e alumínio é uma alternativa para prevenir a corrosão de ferros fundidos nodulares perlíticos submetidos a fadiga. Alumínio e zinco podem ser aplicados como tintas ou então pode ser efetuado depósito de zinco através de galvanização, a fogo ou eletrolítica (GUESSER, 2009).

Tabela 2.25 - Efeitos de camada de tinta contendo zinco e alumínio sobre a resistência à fadiga sob corrosão de ferros nodulares perlíticos (GUESSER, 2009).

Ambiente	Limite de Fadiga (MPa)		
	Sem proteção	Camada com zinco	Camada com alumínio
Ar	270	-	-
Água	224	270	278
3% cloreto de sódio	46	270	270

2.7.4.6.2 Ferro fundido cinzento

Ainda sobre a literatura de Palmer (1970), a Tabela 2.24 mostra efeitos positivos do uso de inibidores alcalinos de corrosão, ou ainda óleo solúvel em ferro fundido cinzento para prevenir a redução do limite de fadiga quando expostos a ambientes corrosivos (GUESSER, 2009).

2.7.4.6.3 Ferro fundido maleável

A resistência à corrosão e conseqüentemente a resistência à fadiga corrosiva do ferro maleável ferrítico é aumentada pela adição de cobre, geralmente cerca de 1%, para certas aplicações, por exemplo, fundição de pontes, acessórios de tubulação, suportes para comutadores ferroviários e ferragens de carga. O ferro ferrítico maleável pode ser galvanizado para proporcionar proteção adicional (ASM METALS HANDBOOK, 1990).

2.7.4.6.4 Ferro fundido branco

Os ferros fundidos brancos resistentes à corrosão possuem sua resistência ao ataque químico principalmente por seu alto teor em liga. Dependendo de qual dos três elementos de liga (silício, cromo ou níquel) domina a composição, um ferro resistente à corrosão pode ser ferrítico, perlítico, martensítico ou austenítico em sua microestrutura. O cromo, além de ser um elemento estabilizador de austenita, altera a forma dos carbonetos, tornando o material resistente ao impacto e melhora a resistência a corrosão. Outros elementos de liga são adicionados ao ferro fundido branco para introduzir ou melhorar propriedades específicas para cada situação. Recomenda-se a adição de 2% de Mo para melhorar a resistência aos ambientes contendo cloretos. Para esta aplicação, as estruturas de matriz completamente austeníticas proporcionam a melhor resistência à corrosão, mas é de esperar uma redução da resistência à abrasão (ASM METALS HANDBOOK, 2003).

2.7.4.7 Efeito da temperatura

A fadiga térmica é induzida geralmente em temperaturas elevadas, por causa de tensões térmicas variáveis. Não precisam estar presentes tensões mecânicas derivadas de uma fonte externa. O início dessas tensões térmicas está na contração dimensional e/ou restrição à expansão que normalmente deveria ocorrer em um membro estrutural sujeito a variações de temperatura (CALLISTER, 2016). Já a fadiga termomecânica é a combinação de ciclagem

térmica e mecânica podendo apresentar ciclos em fase, caracterizado pela coincidência de picos de deformação por tração e térmico, e ciclos fora de fase, caracterizado pela coincidência de picos de deformação por compressão e térmica (GUESSER, 2009).

2.7.4.7.1 Ferro fundido nodular

De acordo com a Tabela 2.26, o ferro fundido nodular começa a ter quedas significativas da resistência à fadiga em temperaturas acima de 250°C. Segundo Nechtelberger (1980), tal comportamento tem dependência dos elementos de liga empregados, uma vez que nesta situação a resistência à fadiga está relacionada à resistência a quente e a fluência (GUESSER, 2009).

Tabela 2.26 - Resistência à fadiga de ferros fundidos a altas temperaturas. Flexão rotativa (GUESSER, 2009).

Propriedades	Temperatura (°C)	Bruto de fundição	Recozido
Limite de Resistência (Mpa)	20	585	508
Limite de Fadiga (Mpa)	20	227	187
	250	207	187
	400	179	134
	550	173	134

2.7.4.7.2 Ferro fundido cinzento

Diferentemente dos ferros fundidos nodulares, os ferros fundidos cinzentos apresentam resistência à fadiga quase constante no intervalo de temperatura de -40 a +400°C (GUESSER, 2009).

2.7.4.7.3 Ferro fundido vermicular

A Figura 2.19 mostra a influência da temperatura sobre a resistência à fadiga do ferro fundido vermicular. Pode-se observar que quando a temperatura é aumentada até 400°C, o limite de fadiga reduz de 185 para 155 Mpa, e esta redução é ainda mais acentuada em temperaturas superiores (GUESSER, 2009).

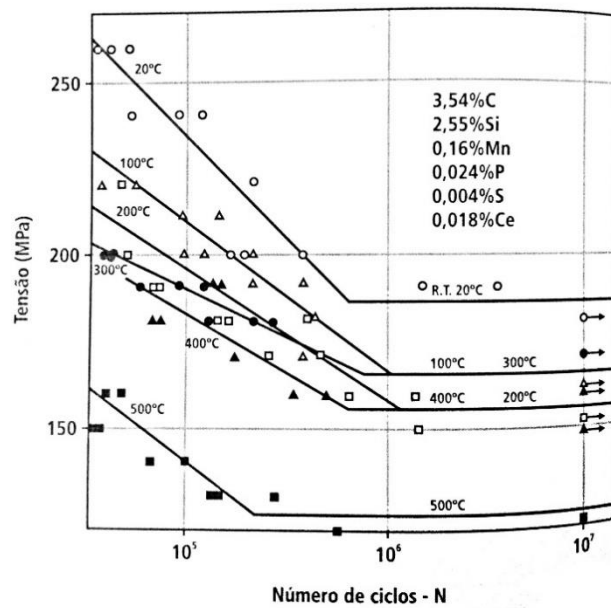


Figura 2.19 - Efeito da temperatura sobre a resistência à fadiga de ferro fundido vermicular (GUESSER, 2009).

2.7.4.7.4 Ferro fundido maleável

A Figura 2.20 mostra o efeito da temperatura sobre a propriedade de resistência à tração do ferro fundido maleável ferrítico. Sendo a resistência a tração diretamente proporcional ao limite de fadiga, é válido afirmar que ambos não sofrem mudança significativa até temperaturas de aproximadamente 370 °C (ASM METALS HANDBOOK, 1990).

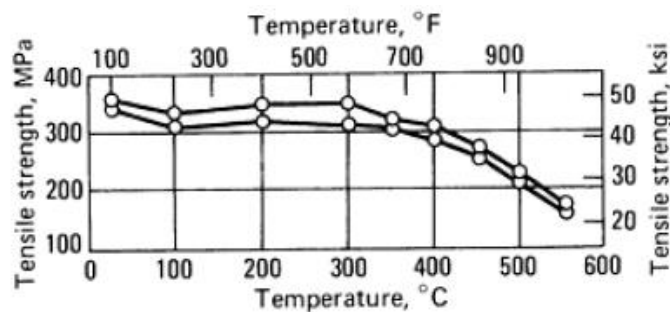


Figura 2.20 - Variação da resistência à tração de ferro fundido maleável ferrítico sobre o efeito de diferentes temperaturas (METALS VOL.1, 1990).

3 METODOLOGIA

Existem dois critérios relevantes quanto à conceituação da pesquisa, onde coloca que a pesquisa se divide quanto a seus fins e quanto aos meios. Para tanto, este trabalho é descritivo quanto a seus fins e bibliográfico quanto aos seus meios, uma vez que se utilizou de livros, monografias, artigos, sites eletrônicos, periódicos, revistas, buscando dados referentes às propriedades mecânicas e fadiga em ferros fundidos. (VERGARA, 2009).

Pesquisas bibliográficas segundo o mesmo autor, explica alguma problemática partindo-se de referências teóricas e pesquisa descritiva é aquela que se utiliza de parte de uma população para explicação de algum fenômeno.

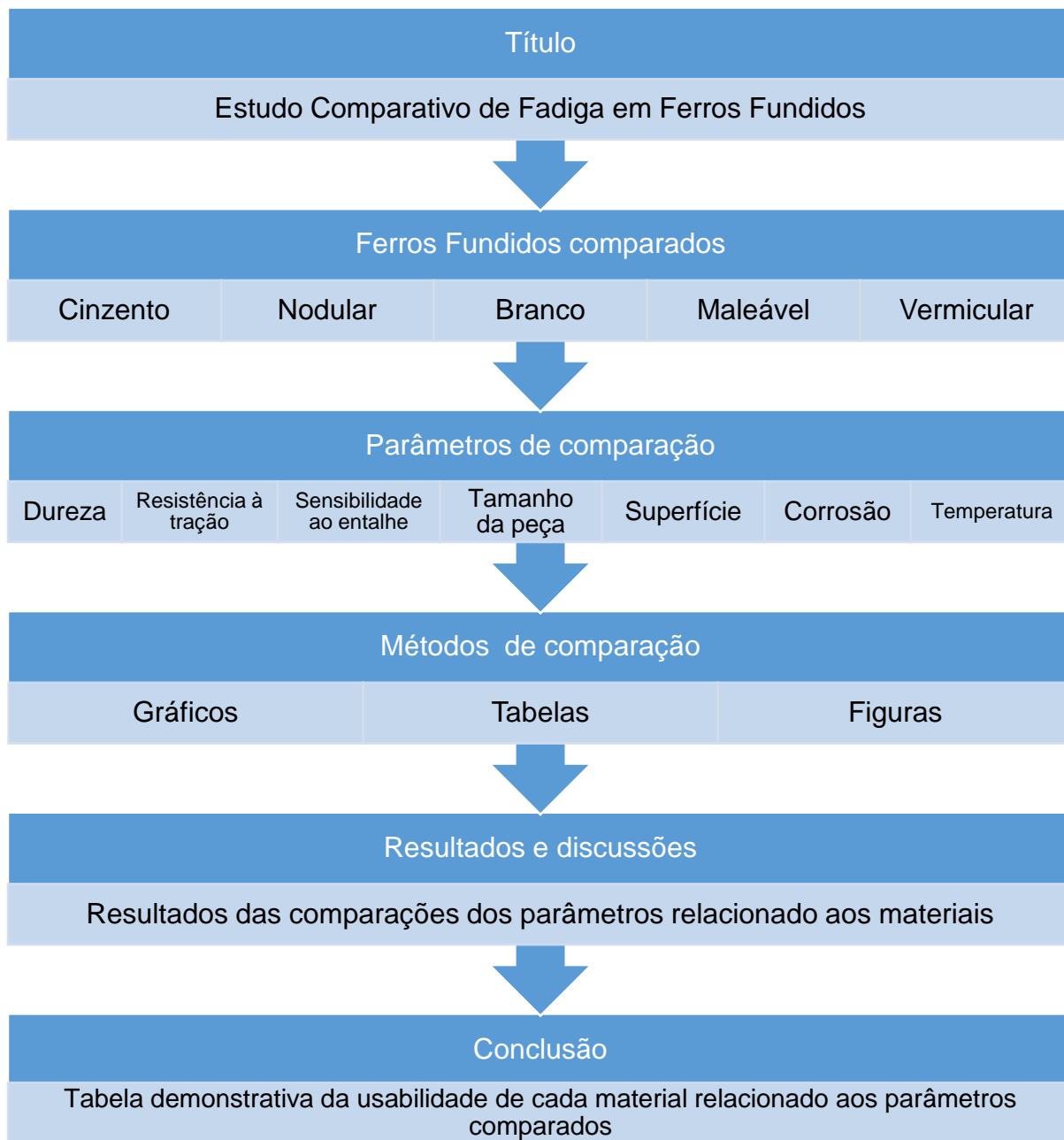
3.1 Desenvolvimento

Este trabalho visa a elaboração de um estudo comparativo de fadiga nos cinco tipos de ferros fundidos mais utilizados, sendo: Ferro fundido cinzento, nodular, branco, maleável e vermicular. O presente estudo tem como ponto de partida a exposição das propriedades mecânicas relacionada aos ferros fundidos devidamente citados bem como suas estruturas metalográficas.

Para realizar este estudo, foram abordados diferentes parâmetros de comparação que influenciam diretamente na resistência à fadiga dos ferros fundidos, sendo eles: Dureza, resistência à tração, sensibilidade ao entalhe, tamanho da peça, condição da superfície, efeitos da corrosão e temperatura.

Para demonstrar este estudo comparativo, foram retirados gráficos, tabelas e figuras da literatura com valores obtidos a partir de amostras de ferro fundido utilizadas em ensaios de laboratórios, sendo a maioria de flexão-rotativa. Após levantamento dos dados, será feita uma comparação de todos os parâmetros citados.

Além disso, como resultado final do estudo, será mostrada uma tabela demonstrativa da usabilidade de cada tipo de ferro fundido.



4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Neste capítulo, são apresentados os resultados dos parâmetros relacionado aos ferros fundidos, assim como a comparação dos mesmos, sendo eles:

- Dureza
- Resistência à tração
- Sensibilidade ao entalhe
- Tamanho da peça
- Superfície
- Meio ambiente e corrosão
- Temperatura

4.1 Dureza

Resultados de dureza Brinell estão apresentados por partes retiradas da Tabela 2.17 e Tabela 2.18 e através do gráfico comparativo, onde será mostrado a influência que a dureza pode ter sobre a fadiga, em cada tipo de ferro fundido apresentado.

4.1.1 Dureza – Ferro Fundido Nodular

Através da parte destacada da Tabela 2.18 adaptada, é possível observar os valores de durezas e de limite de resistência à fadiga presente nas literaturas, referente às amostras de ferro fundido nodular.

Classe ou Tipo	Limite de resistência à tração (MPa)	Dureza Brinell (HB)	Limite de fadiga	
			Sem entalhe (MPa)	Com entalhe (MPa)
Ferro Fundido Nodular				
80-55-06	552-689	179-248	269-276	145-165
100-70-03	689-827	217-269	-	-
120-90-02	827-1206	240-300	338	207

Tomando como referência a classe 120-90-02, pode-se notar que para o valor de dureza de 300 HB, o mesmo é dotado de um limite de resistência entre de 1206 MPa e limite de fadiga no valor de 338 MPa para amostras sem entalhe.

4.1.2 Dureza – Ferro Fundido Cinzento

Através da parte destacada da adaptação feita da Tabela 2.18, é possível observar os valores de durezas e de limite de resistência à fadiga presente nas literaturas, referente às amostras de ferro fundido cinzento com os limites indicados na norma ISO 185:2005.

Classe ou Tipo	Limite de resistência à tração (MPa)	Dureza Brinell (HB)	Limite de fadiga	
			Sem entalhe (MPa)	Com entalhe (MPa)
Ferro Fundido Cinzento				
FC-20	138-172	140-187	65.5-69	65.5
FC-25	172-207	170-229	83-103	-
FC-30	207-241	170-241	94-107	93
FC-35	241-276	187-269	110-121	-
FC-40	276-331	207-269	121-134	121
FC-45	310-358	217-269	148-176	-
FC-50	345-393	215-260	169-190	148
FC-60	414-455	230-290	169-203	-

Tomando como referência a classe FC60, pode-se observar que os resultados apresentados indicam que para dureza de 290 HB o limite de resistência vale 455 MPa e o limite de fadiga do material possui o valor de 203 MPa quando não há entalhe.

4.1.3 Dureza – Ferro Fundido Vermicular

Na parte destacada da adaptação da Tabela 2.17 é possível observar os valores de durezas presente nas literaturas, referente às amostras de ferro fundido vermicular, com os limites indicados na norma VDG W50: 2002.

Classe	Resistência a Tração (MPa)	Resistência ao Escoamento (MPa)	Alongamento (%)	Dureza Brinell (resultados típicos)
EN-GJV-400	400-475	300-375	1,0	180-240
EN-GJV-450	450-525	340-415	1,0	200-250
EN-GJV-500	500-575	380-455	0,5	220-260

Tomando como referência a classe EN-GJV-500, pode-se notar que esse material possui um limite de resistência de 575 MPa para valores de dureza da ordem de 260 HB.

4.1.4 Dureza – Ferro Fundido Maleável

Através do destaque retirado da Tabela 2.18 adaptada, é possível observar os valores de durezas e de limite de resistência à fadiga presente nas literaturas, referente às amostras de ferro fundido maleável martensítico.

Classe ou Tipo	Limite de resistência à tração (MPa)	Dureza Brinell (HB)	Limite de fadiga	
			Sem entalhe (MPa)	Com entalhe (MPa)
Ferro Fundido Maleável				
Maleável ferrítico (32510)	345-400	110-156	193	-
Maleável ferrítico (35018)	365-414	110-156	214	-
Maleável perlítico (45007)	448	163-217	-	-
Maleável perlítico (48004)	483	163-228	-	-
Maleável martensítico (80002)	689	241-269	276	-

Tomando como referência o ferro maleável martensítico (80002), pode-se notar que esse material possui um limite de resistência de 689 MPa e limite de

fadiga no valor de 276 MPa para amostras sem entalhes com valores de dureza na faixa de 269 HB.

4.1.5 Dureza – Ferro Fundido Branco

Através da Tabela 2.18 adaptada, como mostra a parte destacada, é possível observar os valores de durezas e de limite de resistência à fadiga presente nas literaturas, referente às amostras de ferro fundido branco.

Classe ou Tipo	Limite de resistência à tração (MPa)	Dureza Brinell (HB)	Limite de fadiga	
			Sem entalhe (MPa)	Com entalhe (MPa)
Ferro Fundido Branco				
Ferro puro	138-345	300-575	-	-
Alto Si	90-124	480-520	-	-
Alto Cr (Resistente à corrosão)	207-620	290-400	-	-

Tomando como referência o ferro branco sem liga, ou seja, puro, pode-se observar que este material apresenta um limite de resistência de 138 MPa para um valor de dureza de 300 HB.

4.1.6 Dureza – Comparativo Ferro Fundido

A dureza de um material é um parâmetro muito importante em relação à fadiga que irá ocorrer ao longo de um período de trabalho, sendo assim será mostrada uma comparação para valores próximos ou iguais de dureza dos ferros fundidos de modo a analisar o comportamento tanto da resistência à tração quanto do limite de fadiga.

De acordo com a literatura presente, verifica-se uma tendência sempre crescente do limite de fadiga com o aumento da resistência à tração e da dureza, o que é favorável quando se trata de fadiga. Porém, vale ressaltar que este aumento proporcional do limite de fadiga com a dureza é limitado, uma vez que em níveis muito elevados de dureza o material fica mais suscetível à trincas,

tornando assim um material não muito indicado para trabalhos de carregamentos cíclicos, pois resiste a um número relativamente baixo de ciclos de trabalho.

Devido a sua elevada dureza e resistência à tração relativamente baixa, se comparados aos demais ferros fundidos, pode-se dizer que para fadiga o ferro fundido branco torna-se inviável, pois resiste a um número baixo de ciclos de trabalho, sendo então desconsiderado da comparação com os demais, quando se trata de carregamentos cíclicos de trabalho.

Levando em consideração somente o parâmetro de dureza, nota-se que os ferros fundidos nodular e maleável se destacam dos demais, pois para valores próximos de dureza, os mesmos apresentaram valores superiores de resistência à tração e limite de fadiga, o que torna esses materiais bons para aplicações em trabalhos de natureza cíclicas.

O ferro cinzento, quando comparado aos demais, mostrou ter valores de resistência à tração e limite de fadiga em nível intermediário, assim como o ferro nodular para valor de resistência à tração, porém devido ao baixo custo o mais utilizado para carregamentos cíclicos é o ferro cinzento. Essa diferença de dureza relacionada a limite de fadiga e resistência à tração dos ferros fundidos está demonstrada na Tabela 4.1 e na Figura 4.1.

Tabela 4.1 - Comparação de limite de fadiga e resistência à tração de amostras de ferros fundidos sem entalhe para valores próximos de dureza.

Ferro Fundido	Resistência à tração (MPa)	Limite de fadiga (MPa)	Dureza (HB)
Nodular	1206	338	300
Cinzento	455	203	290
Vermicular	575	-	260
Maleável	689	276	269
Branco	138	-	300

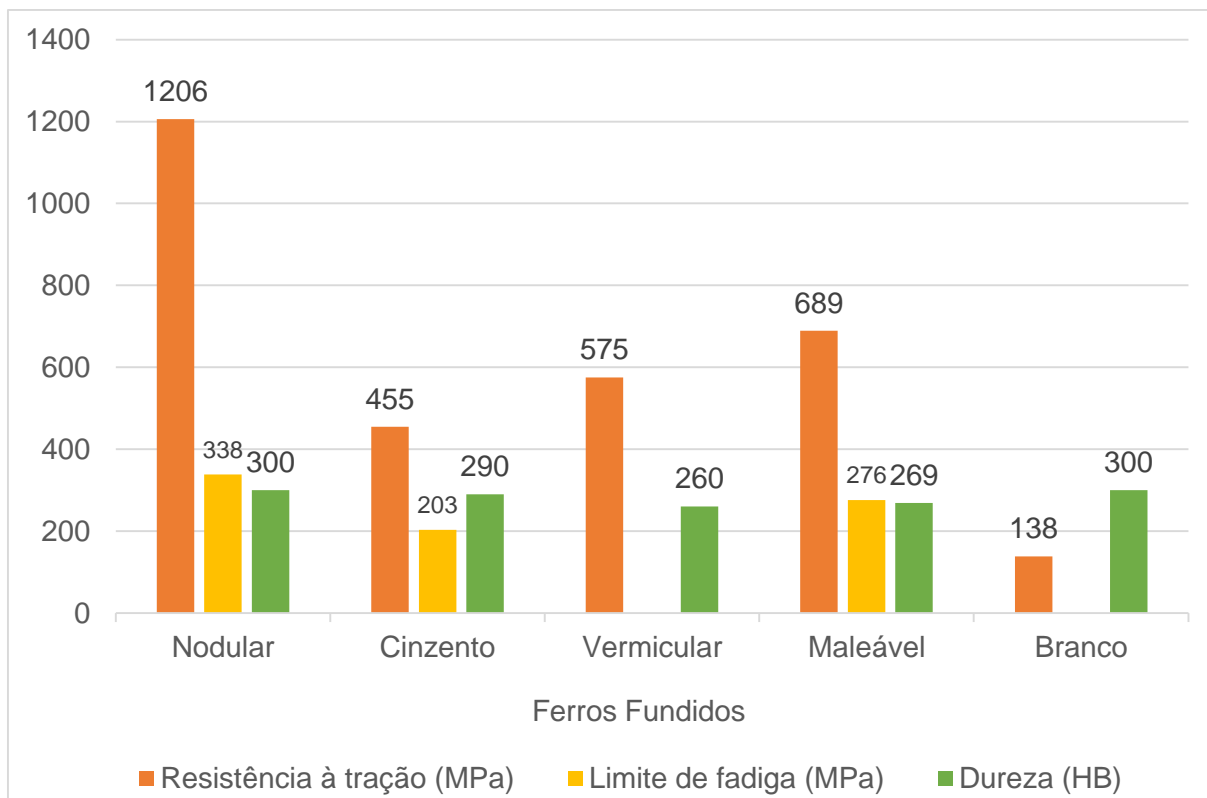


Figura 4.1 - Gráfico comparativo de resistência à tração e limite de fadiga em relação à dureza.

4.2 Resistência à tração

Para apresentação dos resultados do limite de resistência à tração e limite de fadiga, estão apresentados por meio de partes retiradas de tabelas do capítulo 2 e figuras, que representam o comportamento dos ferros fundidos analisados.

4.2.1 Resistência à tração – Ferro Fundido Nodular

Através da parte destacada da Tabela 2.19 adaptada, como mostrada a seguir, é possível observar os valores de resistência à tração e limite de fadiga presente nas literaturas, referente às amostras de ferro fundido nodular.

Propriedades		Ferro perlítico	
		Classe 350-22 350-22L	Classe 400-18 400-18L
Resistência à tração (MPa)		350	400
Limite de fadiga (S-N)	Sem entalhe (MPa)	180	195
	Entalhe V-45° (MPa)	114	122

Tomando como referência a classe intermediária 400-18 e 400-18L, pode-se notar que este material apresenta resistência à tração com valor de 400 MPa e limite de fadiga sem entalhe de 195 MPa.

4.2.2 Resistência à tração – Ferro Fundido Cinzento

Através do destaque retirado da Tabela 2.20 adaptada, como mostrada a seguir, é possível observar os valores de resistência a tração e limite de fadiga, referente às amostras de ferro fundido cinzento com os limites indicados na norma ISO185: 2005.

Propriedades		Propriedades mínimas	
		Classe 350	Classe 400
Resistência à tração (MPa)		350	400
Limite de fadiga (S-N)	Sem entalhe (MPa)	149	152
	Com entalhe V-45° (MPa)	127	129

Tomando como referência a classe 400, pode-se observar que os resultados apresentados indicam que o limite de resistência à tração é de 400 MPa e o limite de fadiga sem entalhe 152 MPa.

4.2.3 Resistência à tração – Ferro Fundido Vermicular

Na parte destacada da Tabela 2.21, como mostrada a seguir, é possível observar os valores de resistência à tração e limite de fadiga presente nas literaturas, referente às amostras de ferro fundido vermicular.

Propriedades	Classe FV-300	Classe FV-400	Classe FV-500
Limite de resistência à tração (MPa)	300	400	500
Limite de fadiga. Flexão rotativa (MPa)	160	200	250
Limite de fadiga. Tração-compressão (MPa)	100	135	175

Tomando como referência a classe FV-400, pode-se notar que este material apresenta resistência à tração com valor de 400 MPa e limite de fadiga de flexão rotativa de 200 MPa.

4.2.4 Resistência à tração – Ferro Fundido Maleável

Através da Figura 2.13 é possível observar os valores de resistência à tração e limite de fadiga presente nas literaturas a partir de testes por flexão rotativa, referente às amostras de dois ferros fundidos maleáveis ferríticos.

Tomando como referência as propriedades de fadiga de um dos ferros maleável ferrítico, o limite de fadiga não entalhado é cerca de 200 MPa para o ferro com uma resistência à tração de 342 MPa.

4.2.5 Resistência à tração – Comparativo Ferro Fundido

A resistência à tração e o limite de fadiga de um material são parâmetros muito importante em relação à fadiga que irá ocorrer ao longo dos ciclos de vida de um determinado componente, sendo assim, será apresentado uma comparação da atuação da fadiga em todos os ferros fundidos estudados até o presente momento.

De acordo com a literatura presente, estudos de tabelas e figuras, pode-se observar claramente que o limite de resistência à fadiga aumenta com o aumento do limite de resistência à tração.

Levando em consideração as classes dos ferros fundidos contendo o valor de resistência à tração de aproximadamente 400 MPa, nota-se que o limite de fadiga dos ferros fundidos maleável e vermicular estão em um nível superior aos demais, sendo que o maleável foi comparado com um valor de resistência a tração um pouco inferior aos demais (342 MPa). O fato de a mesma ser elevada torna ambos os ferros bons para aplicações em trabalhos envolvendo carregamentos de natureza cíclica.

Porém não muito atrás se encontra o ferro nodular, que por possuir suas características semelhantes ao ferro maleável, esse também possui um limite de fadiga relativamente bom, tornando-o melhor que o ferro cinzento, pois esse se encontra em níveis intermediários.

Pode-se dizer que a resistência à tração está diretamente ligada à dureza e a fragilidade de um material, com isso o ferro branco, por possuir elevada dureza e resistência à tração baixa, não é um bom material para ser exposto a esforços de tração e natureza cíclica.

A diferença de resistência à tração e limite de fadiga dos ferros fundidos está demonstrada na Tabela 4.2 e na Figura 4.2.

Tabela 4.2 - Relação do limite de resistência com o limite de fadiga para diferentes ferros fundidos.

Tipos de ferros fundidos	Resistência à tração (MPa)	Limite de fadiga (MPa)
		Sem entalhe
Nodular	400	195
Cinzento	400	152
Vermicular	400	200
Maleável	342	200
Branco	-	-

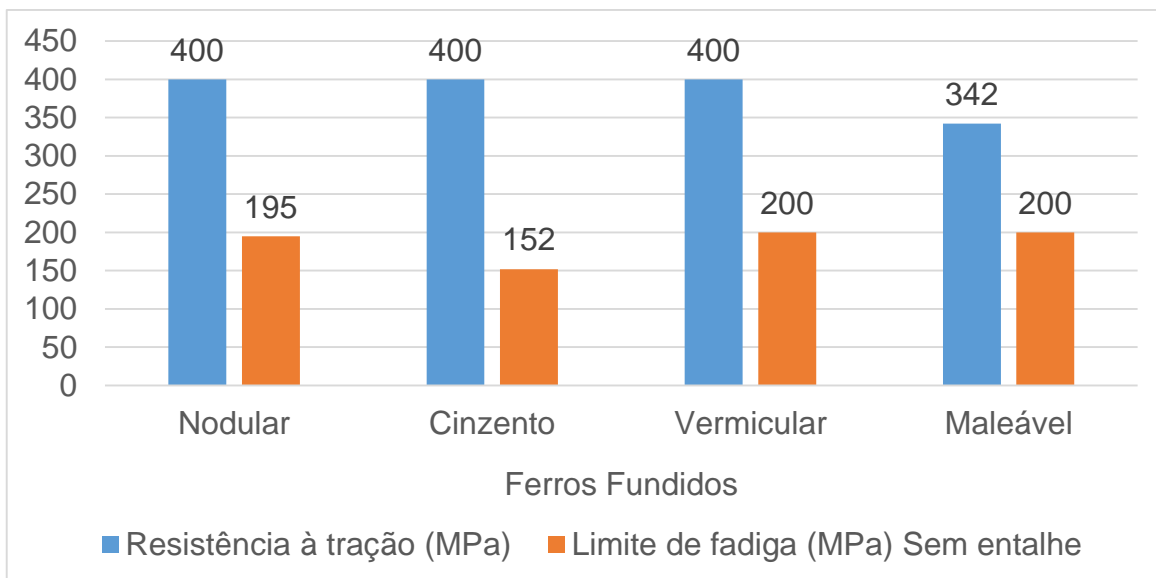


Figura 4.2- Gráfico comparativo do limite de fadiga em relação ao limite de resistência.

4.3 Sensibilidade ao entalhe

Quando se trata de ferros fundidos, no geral, é comum dizer que os mesmos sofrem redução da resistência à fadiga, na presença de entalhes, principalmente para as classes de maior resistência. A Tabela 2.19 e Tabela 2.20 e a Figura 2.13 mostram isso claramente para os ferros nodular, cinzento e maleável, respectivamente. Portanto, como os ferros apresentam comportamentos semelhantes na presença de entalhes, tal parâmetro será desconsiderado da comparação individual.

4.4 Tamanho da peça

Uma vez que as falhas por fadiga geralmente se iniciam na superfície da peça, ao aumentar o diâmetro da mesma, o volume da área superficial também é aumentado. Portanto, a resistência à fadiga de componentes grande é menor que de componentes pequenos, pois a probabilidade de conter falhas de fabricação, que representam potencial de fadiga ou locais de iniciação de fadiga por corrosão são maiores. Isto ocorre para todos os tipos de ferros fundidos, porém a Figura 2.15 mostra claramente a redução do limite de fadiga de acordo que aumenta a espessura da peça para ferros nodular e cinzento. Na Figura 2.15 (a), mostra

ainda o decréscimo do limite de fadiga e do limite de resistência é de mesma intensidade, o que sugere que este aumento da espessura, pelo fato de alterar a microestrutura (formação de inclusões, segregações e diminuição do número de nódulos), influencia diretamente nas duas propriedades. Portanto, como os ferros apresentam comportamentos semelhantes ao aumentar o diâmetro da peça, tal parâmetro será desconsiderado da comparação individual.

4.5 Superfície

Os resultados dos efeitos relacionados à superfície estão apresentados através partes retiradas de tabelas e através de figuras, onde será mostrado a influência que a condição superficial pode ter sobre a fadiga, em cada tipo de ferro fundido apresentado.

4.5.1 Superfície – Ferro Fundido Nodular

Por meio do gráfico exposto na Figura 2.17, é possível observar os valores de limite de fadiga do ferro fundido nodular, referente aos tipos de acabamento superficial.

Devido aos valores mostrados, pode-se notar que quanto maior o grau de acabamento superficial de uma peça de ferro nodular, maior será seu limite de fadiga, sendo assim toma-se como referência a superfície usinada, pois é a que possui maior grau de acabamento, e possuindo um limite de fadiga acima de 250 MPa. Os piores danos são provocados por “drosses” e “pinholes”, mas também a presença de grafita lamelar na superfície provocou a redução do limite de fadiga.

4.5.2 Superfície – Ferro Fundido Cinzento

Abaixo está representado parte retirada da adaptação feita da Tabela 2.22, onde está demonstrado valores de limite de fadiga, para as amostras de ferro fundido cinzento com variados tipos de acabamentos superficiais.

Tipo de ferro fundido	Quantidade de fraturas sem defeitos (%)	Estado da superfície		
		Usinada	Bruta, sem jateamento	Bruta, com jateamento
FC 250	88-100	130	130	130

Tomando como referência a classe FC250, pode-se observar que este material não apresentou variação no limite de fadiga para os processos de jateamento e de usinagem, se comparado com superfície bruta de fundição, sendo assim os resultados apresentados indicam valores de 130 MPa para as determinadas superfícies. Pode-se observar também que não foi verificado defeitos superficiais iniciando algum processo de fadiga, isto porque a tendência à formação de micro porosidades em ferros cinzentos é bem pequena. Entretanto, podem ocorrer variações na superfície de peça para peça, podendo então ocorrer decréscimo do limite de fadiga dependendo da superfície obtida.

4.5.3 Superfície – Ferro Fundido Vermicular

Utilizando o destaque retirado da Tabela 2.23 adaptada, é possível observar os valores de limite de fadiga, referente às amostras de ferro fundido vermicular com diversos tipos de acabamentos superficiais.

Superfície	Limite de Fadiga (MPa)	Tensão residual (MPa)
Usinada	155	-60
Bruta, perlítica	100	0

É sabido que quanto maior o grau de acabamento superficial de uma peça, maior será seu limite de fadiga, com isso foi tomado como referência a superfície com maior grau de acabamento, sendo esse o usinado com um limite de fadiga de 155 MPa. A partir da Tabela 2.23, pode-se verificar que tratamentos de jateamento em superfícies brutas de fundição, tanto para matriz perlítica ou ferrítica, restauram a resistência à fadiga do material para valores similares aos obtidos com superfície usinada.

4.5.4 Superfície – Comparativo Ferro Fundido

Os efeitos relacionados à superfície de um material é um dos parâmetros mais importantes em relação à fadiga, com isso será realizado um estudo comparativo da influência desse parâmetro nos ferros fundidos apresentados acima.

Geralmente as propriedades relacionadas à fadiga são muito sensíveis às condições superficiais de um determinado material, pois todas as trincas por fadiga se iniciam na superfície da peça, exceto em casos raros que ocorre defeitos internos.

A fim de se efetuar uma boa comparação foi tomada como base a superfície usinada de cada ferro apresentado, podendo assim observar as diferenças entre cada material quando submetidos a um acabamento superficial.

Utilizando a classe FC250 do ferro cinzento, pode-se observar que mesmo passando por um acabamento superficial, onde a peça foi totalmente usinada e polida, seu limite de fadiga permaneceu o mesmo, mostrando que para essa classe os defeitos superficiais são mínimos quando em estado bruto.

Porém, diferentemente do ferro cinzento que não houve variação, o ferro vermicular ocorre uma variação considerável no aumento do limite de fadiga, quando sua superfície sai do estado bruto e passa por um processo de usinagem, tornando-a quase sem defeitos.

Já o ferro nodular, de acordo com a Figura 2.17, onde mostra que esse material pode conter alguns defeitos superficiais que podem diminuir consideravelmente o seu limite de fadiga, e tornando-o mais suscetível a trincas por fadiga, fazendo com que seja necessário que esse material passe por um processo de usinagem, a fim de aumentar sua resistência à fadiga. Entretanto mesmo em estado bruto com defeito, o ferro nodular tem maior limite de fadiga que os outros já apresentados, fazendo com que se torne o melhor ferro para aplicação em casos de carregamento de natureza cíclica. A seguir, a Tabela 4.3 e a Figura 4.3 mostram o comparativo para superfície.

Tabela 4.3 - Limite de fadiga para diferentes superfícies.

Tipo	Limite de fadiga (MPa)	
	Superfície Bruta	Superfície Usinada
Nodular	160	270
Cinzento	130	130
Vermicular	100	155

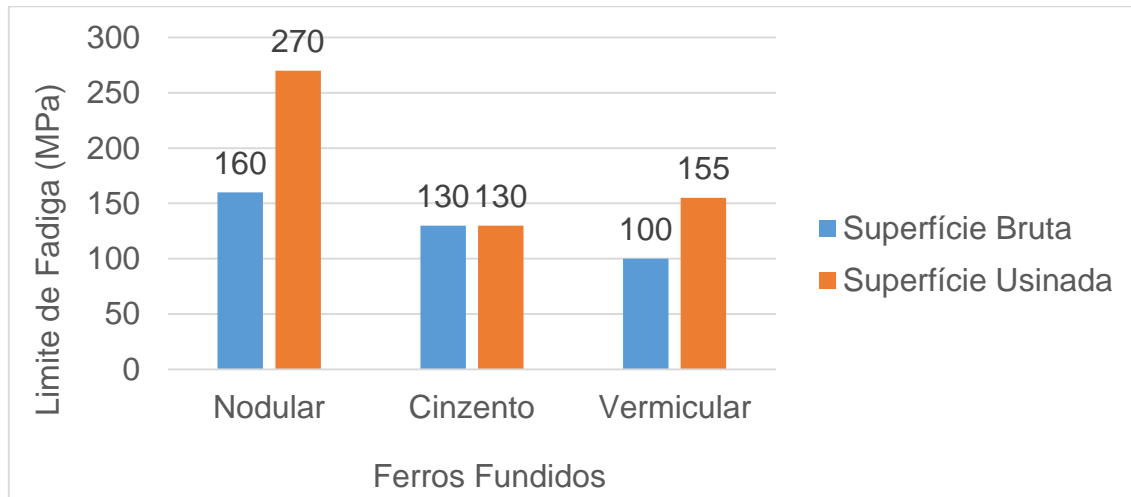


Figura 4.3 - Gráfico comparativo do limite de fadiga em relação à superfície.

4.6 Meio ambiente e corrosão

Resultados do efeito da corrosão sobre a resistência à fadiga dos ferros fundidos estão apresentados na descritiva pela Tabela 2.24, mostrada a seguir, que representa a resistência à fadiga de ferros fundidos ao ar, em água, em salmoura e sob inibidores alcalinos, bem como óleo solúvel, todos submetidos a ensaios de flexão rotativa. Também serão obtidos resultados a partir de textos descritivos abordadas no capítulo dois.

4.6.1 Meio ambiente e corrosão – Ferro Fundido Nodular

A Tabela 2.24 apresenta os valores do limite de fadiga de ferro fundido nodular perlítico e ferrítico expostos a diferentes ambientes sujeitos a corrosão.

No destaque feito da adaptação da Tabela 2.24 fica nítido a redução da resistência à fadiga de ferros nodulares perlíticos e ferríticos em ambiente com solução de água e 3% de cloreto de sódio.

Ambiente	Limite de Fadiga (Mpa)	
	Nodular perlítico	Nodular ferrítico
Ar	270	209
Água	224	178
3% cloreto de sódio	46	46

De maneira geral, a partir da parte destacada da Tabela 2.24 adaptada, pode-se observar que para ferro fundido nodular, o limite de fadiga foi reduzindo em conjunto com ambientes mais corrosivos e na presença de inibidores alcalinos de corrosão, o decréscimo do limite de fadiga não foi prevenido, mesmo que a corrosão tenha diminuído de intensidade. O óleo solúvel também não se mostrou eficiente na prevenção da diminuição do limite de fadiga. O único inibidor de corrosão satisfatório a prevenir a queda do limite de fadiga devido à exposição a ambiente aquoso foi o cromato de potássio.

Ambiente	Limite de Fadiga (Mpa)	
	Nodular perlítico	Nodular ferrítico
Ar	270	209
Água	224	178
3% cloreto de sódio	46	46
1% bórax	193	155
3% carbonato de sódio	247	193
3% óleo solúvel	209	185
0,25% cromato de potássio	263	216

Na Tabela 2.25 pode-se observar que os limites de fadiga de amostras revestidas com alumínio e com zinco quando submetidas a ambientes com água ou com cloretos são similares ao limite de fadiga obtido ao ar, mostrando ser uma alternativa para prevenir a corrosão.

Ambiente	Limite de Fadiga (MPa)		
	Sem proteção	Camada com zinco	Camada com alumínio
Ar	270	-	-
Água	224	270	278
3% cloreto de sódio	46	270	270

4.6.2 Meio ambiente e corrosão – Ferro Fundido Cinzento

A Tabela 2.24 apresenta os valores do limite de fadiga de ferro fundido cinzento exposto a diferentes ambientes sujeitos a corrosão.

Na Tabela 2.24 adaptada fica nítido a redução da resistência à fadiga de ferros cinzentos em ambiente com solução de água e 3% de cloreto de sódio.

Ambiente	Limite de Fadiga (MPa)
	Cinzento
Ar	124
Água	100
3% cloreto de sódio	39

De maneira geral, a partir da adaptação feita da Tabela 2.24, pode-se observar que para ferro fundido cinzento o decréscimo da resistência a fadiga em ambientes corrosivos pode ser prevenido pelo uso de inibidores alcalinos, ou ainda óleo solúvel.

Ambiente	Limite de Fadiga (Mpa)
	Cinzento
Ar	124
Água	100
3% cloreto de sódio	39
1% bórax	108
3% carbonato de sódio	124
3% óleo solúvel	124
0,25% cromato de potássio	124

4.6.3 Meio ambiente e corrosão – Ferro Fundido Maleável

Como pode ser observado no Título 2.7.4.6.3 do capítulo dois, a resistência a corrosão do ferro fundido maleável ferrítico pode ser aumentada pela adição de cobre, geralmente 1%, e podendo, também, ser galvanizados para obter uma

proteção adicional contra a corrosão. Conseqüentemente, tais proteções aumentam a resistência a fadiga do ferro maleável devido a redução das cavidades formadas nas áreas mais solicitadas a esforços cíclicos.

4.6.4 Meio ambiente e corrosão – Ferro Fundido Branco

Como pode ser observado no Título 2.7.4.6.4 do capítulo dois, a resistência a corrosão do ferro fundido branco pode ser aumentada pela adição de cromo. O cromo, além de ser um elemento estabilizador de austenita, altera a forma dos carbonetos, deixando-os mais interligados e desta forma melhora a resistência a corrosão. A adição de 2% de Mo proporciona uma melhor resistência aos ambientes contendo cloretos.

4.6.5 Meio ambiente e corrosão – Comparativo Ferro Fundido

Tendo em vista a importância do ambiente de trabalho a qual os componentes são expostos quando se trata de fadiga, a seguir será feita uma comparação da variação do limite de fadiga dos ferros fundidos quando submetidos a condições normais de ar, ambientes com soluções aquosas com cloreto de sódio e ambientes contendo inibidores alcalinos, bem como a adição de elementos de ligas para proteção à corrosão. Porém, como enfoque principal desta comparação, será adotado duas condições usuais de trabalho, ar e solução aquosa contendo cloreto de sódio.

Ao comparar todos os resultados da influência do meio ambiente e corrosão sobre a resistência à fadiga de ferros fundidos, podemos observar resultados similares de ferro cinzento e nodular perlítico e ferrítico para ambientes com água e com soluções aquosas contendo 3% de cloreto de sódio, tendo ambos suas resistências a fadiga reduzida. Porém, para ambientes contendo inibidores alcalinos ou óleo solúvel, os ferros nodulares não mostraram ser eficientes para prevenção da diminuição da resistência à fadiga de ferros nodulares perlíticos e ferríticos, diferentemente de ferros cinzentos.

Quanto a utilização de outros elementos de liga para melhorar a prevenção da corrosão em ambientes contendo cloretos de sódio, o ferro nodular mostrou

ser eficiente com camadas de proteção contendo alumínio ou zinco. Já para o ferro maleável ferrítico, a adição de cobre melhora a proteção contra a corrosão, enquanto que para o ferro branco, o cromo e o molibdênio fazem essa função.

Tabela 4.4 – Comportamento do limite de fadiga (seta) para diferentes situações e ferros fundidos.

Situações	Ferros Fundidos					
	Nodular		Cinzento	Maleável ferrítico	Branco	Vermicular
	Perlítico	Ferrítico				
Água	↓	↓	↓	-	-	-
3% cloreto de sódio	↓	↓	↓	-	-	-
Inibidores alcalinos ou óleo solúvel	↓	↓	→	-	-	-
Camadas de proteção de alumínio ou zinco	↑	↑	-	-	-	-
Adição de cobre	-	-	-	↑	-	-
Adição de cromo ou molibdênio	-	-	-	-	↑	-

Conceito: (↑) – Aumenta; (↓) – Reduz; (→) – Sem alteração.

4.7 Temperatura

Resultados de temperatura estão apresentados na forma de tabelas e figuras presentes na literatura estudada, onde será mostrado que a fadiga térmica é induzida geralmente em temperaturas elevadas, por causa de tensões térmicas variáveis.

4.7.1 Temperatura – Ferro Fundido Nodular

Tomando como referência a Tabela 2.26, onde mostra o resultado da resistência à fadiga de ferros fundidos nodulares para temperaturas até 550 °C. De acordo com a tabela, pode-se observar que, diferentemente de ferros cinzentos, o ferro fundido nodular apresenta quedas significativas da resistência à fadiga em temperaturas acima de 250 °C, tanto para superfícies brutas de fundição como para ferro nodular recozido.

Propriedades	Temperatura (°C)	Bruto de fundição	Recozido
Limite de Resistência (MPa)	20	585	508
Limite de Fadiga (MPa)	20	227	187
	250	207	187
	400	179	134
	550	173	134

4.7.2 Temperatura – Ferro Fundido Cinzento

De acordo com o item 2.7.4.7.2 apresentado no capítulo dois, os ferros fundidos cinzentos apresentam resistência à fadiga quase constante no intervalo de temperatura de -40 a +400 °C.

4.7.3 Temperatura – Ferro Fundido Vermicular

Na Figura 2.19, é mostrado o efeito da temperatura sobre a resistência à fadiga do ferro fundido vermicular. Pode-se observar que quando a temperatura é aumentada até 400 °C, o limite de fadiga reduz de 185 para 155 Mpa, e esta redução é ainda mais acentuada em temperaturas superiores.

4.7.4 Temperatura – Ferro Fundido Maleável

A partir da Figura 2.20, pode-se observar que a resistência à tração (e, portanto, o limite de fadiga) do ferro fundido maleável ferrítico não apresenta mudanças significativas até a temperatura de aproximadamente 370 °C.

4.7.5 Temperatura – Comparativo Ferro Fundido

Tendo em vista a importância da temperatura de trabalho a qual os componentes são submetidos quando se trata de fadiga, a seguir será feita uma comparação do comportamento do limite de fadiga quanto a variação de temperatura.

De acordo com os resultados apresentados, pôde-se observar que o ferro fundido nodular começa a ter quedas significativas do limite de fadiga, a partir de temperaturas acima de 250 °C. Diferentemente, os ferros fundidos cinzentos apresentam resistência à fadiga quase constante no intervalo de temperatura de -40 a +400 °C. Quanto ao ferro fundido vermicular, observa-se mudanças nos efeitos da temperatura sobre a resistência à fadiga quando a temperatura é aumentada. Por exemplo, quando sua temperatura é elevada até 400 °C, o limite de fadiga reduz de 185 para 155 MPa, e esta redução é ainda mais acentuada em temperaturas superiores. Já para o ferro maleável ferrítico, pôde-se observar que a resistência à tração e, portanto, o limite de fadiga, não apresentam mudanças significativas até temperaturas de aproximadamente 370 °C.

5 CONCLUSÃO

Neste presente estudo, foi determinado e comparado cada ferro fundido com relação à sua resistência à fadiga. Para isto realizou-se uma análise detalhada dos cinco tipos de ferros fundidos mais utilizados, usando como parâmetro de comparação os seguintes itens: dureza, limite de resistência a tração, tipos de superfície, meio ambiente e corrosão, e temperatura.

Analisando os resultados obtidos conclui-se que:

- Pelos ferros fundidos apresentarem comportamentos semelhantes ao se tratar dos parâmetros de sensibilidade ao entalhe e tamanho da peça, os mesmos foram retirados da comparação individual e portanto, resultado final.
- Para níveis iguais ou próximos de dureza, conclui-se que o ferro fundido maleável e nodular apresentam resultados satisfatórios para valores de resistência à tração e limite de fadiga. Porém o ferro fundido branco possui resistência à tração indesejável para carregamentos de natureza cíclica. Já para os ferros cinzento e vermicular, foram constatados valores intermediários de resistência à tração e/ou limite de fadiga.
- Para valores iguais ou próximos de resistência à tração, pode-se concluir que o limite de fadiga de ferro fundido vermicular e maleável apresenta superioridade quando comparado aos demais ferros fundidos. Conclui-se também que o limite de fadiga do ferro nodular possui valores aproximados ao que se considera como muito bom, diferentemente do ferro fundido cinzento.
- Mesmo após usinagem para acabamento superficial, o limite de fadiga do ferro fundido cinzento permaneceu o mesmo. Quando analisado a superfície do ferro vermicular e nodular, constatou-se considerável variação no limite de fadiga após usinagem de sua superfície bruta.
- Ao analisar a influência da corrosão no limite de fadiga dos ferros fundidos e tomando como referência a variação desse limite, pode-se concluir que os ferros cinzento e nodular tiveram quedas significativas quando expostos a ambientes com solução aquosa contendo cloreto. Porém, na presença de camadas de proteção de zinco ou alumínio, o ferro nodular não apresentou

decréscimo do limite de fadiga para esse ambiente. Já o ferro maleável e branco mostraram ser eficientes contra corrosão, devido a adição de cobre e cromo ou molibdênio, respectivamente.

- Para os resultados de temperatura, conclui-se que os ferros cinzento e maleável não apresentam mudanças significativas na resistência à fadiga quando submetidos a variações de temperaturas de aproximadamente 20 a 400 °C. De antemão, os ferros nodular e vermicular tiveram seus limites de fadiga reduzidos pelo efeito da temperatura, sendo o nodular o mais afetado.

Com base nos resultados obtidos, a seguir será mostrada a Tabela 5.1 determinando o grau de usabilidade dos cinco tipos de ferros fundidos apresentados neste estudo comparativo para todos parâmetros de comparação abordados, bem como a aplicação de cada ferro fundido.

Tabela 5.1 - Tabela comparativa do grau de usabilidade dos ferros fundidos de acordo com o comportamento do limite de fadiga para os parâmetros de comparação, bem como suas melhores aplicações.

Tipos de ferros fundidos	Parâmetros de comparação para análise do limite de fadiga						Aplicações
	Dureza	Resistência à tração	Superfície		Meio ambiente e corrosão	Temperatura 20 até 400 °C	
			Bruta	Usinada			
Nodular	MB	B	B	MB	R	B	Girabrequim
Cinzento	B	M	M	M	R	MB	Bloco de motor de combustão interna
Vermicular	B	MB	R	B	-	M	Bloco de motor diesel; discos de freio para trens
Maleável	MB	MB	-	-	B	MB	Correntes; suspensões de mola
Branco	MR	MR	-	-	B	-	Pás de escavadeiras; rodas de trem

Conceito: MR – Muito Ruim, R – Ruim, M – Mediano, B – Bom, MB – Muito Bom.

5.1 Sugestão para trabalhos futuros

Alguns estudos extras poderiam ampliar ou complementar este trabalho, como segue:

- Analisar a relação da microestrutura do material com o limite de fadiga dos ferros fundidos presentes nesse estudo, tendo em vista que as características internas de um material pode influir diretamente em suas propriedades, devido não só as formas na qual o grão se forma, mas também os defeitos que podem ocorrer em seu interior durante o processo de solidificação do mesmo.
- Devido à falta de capacidade de realizar ensaios, este estudo utilizou somente dos valores encontrados nas literaturas presentes, sendo assim pode-se realizar ensaios relacionando os parâmetros estudados com o limite de fadiga dos ferros fundidos englobando também o número de ciclos suportado pelo material, ao qual o mesmo não possui valores determinados.

6 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ASM HANDBOOK, VOL.19; **ASM Handbook, Fatigue and Fracture**. Volume 19, 1º edition by ASM International, 1996.

ASM HANDBOOK, VOL.1; **ASM Handbook, Properties and Selection: Irons Steels and High Performance Alloys**. Volume 1, 10º edition by ASM International, 1990.

ASM HANDBOOK, VOL.13A; **ASM Handbook, Corrosion: Fundamentals, Testing, and Protection**. Volume 13A, 6º edition by ASM International, 2003.

ASM HANDBOOK, VOL.20; **ASM Handbook, Materials Selection and Design**. Volume 20, 5º edition by ASM International, 1997.

ASM HANDBOOK, VOL.15; **ASM Handbook, Casting**. Volume 15, 9º edition by ASM International, 1992.

ASTM A247-10; **Standard Test Method for Evaluating the Microstructure of Graphite in Iron Castings**. 2006.

ISO 945-1; **Microstructure of cast irons - Part 1: Graphite classification by visual analysis**. 2008.

JIS G 5502; **Spheroidal graphite iron castings**.2001.

NORTON, ROBERT L.; **Projeto de Máquinas - Uma Abordagem Integrada**. 4º Edição, 2013.

BRANCO, C. A. G. M., FERNANDES, A. A e CASTRO P. M. S. T.; **Fadiga de Estruturas Soldadas**. 2 ed, Fundação Calouste Gulbenkian, Lisboa. 1986.

BRAZ, M. H. P., **Propriedades de Fadiga de Soldas de Alta resistência e Baixa liga com diferentes Composições Microestruturais**. – Dissertação de mestrado – USP, São Carlos, 1999.

BONIATTI, D. L.; **Análise do Comportamento de Fadiga para estruturas submetidas a temperaturas elevadas aliadas a esforços cíclicos.** – Dissertação de Mestrado – UFRGS, Porto Alegre, 2003.

CALLISTER, W. D.; **Ciência e Engenharia de Materiais: Uma Introdução.** 7º Edição, 2007.

CALLISTER, W. D.; **Ciência e Engenharia de Materiais: Uma Introdução.** 8º Edição, 2009.

CALLISTER, W. D.; **Ciência e Engenharia de Materiais: Uma Introdução.** 9º Edição, 2016.

CHIAVERINI, V.; **Aços e Ferros Fundidos.** 7ª ed. São Paulo: ABM, 2005.

CHIAVERINI, V.; **Aços e Ferros Fundidos.** 8ª ed. São Paulo: ABM, 2007.

COLPAERT, H.; **Metalografia dos Produtos Siderúrgicos Comuns.** 4ª ed. São Paulo: Editora Blucher, 2008. 652 p.

DE MARCO FILHO, F.; **Propagação de Trincas de Fadiga em Juntas Soldadas Circunferenciais de aço API Grau X-65 para utilização em Risers Rígidos.** – Tese de Doutorado – UFRJ, Rio de Janeiro, 2002.

DIETER, G. E.; **Mechanical Metallurgy.** 2 ed Mc-Graw Hill, 1976.

FERREIRA I.; **Fadiga e Degradação,** apostila FEM/UNICAMP, 2008.

GUESSER, L. W.; **Ferro Fundido com Grafita Compactada.** Metalurgia e Materiais. 2002.

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

MACHADO, J. M.; **Planejamento Baseado em Risco de Inspeção a Fadiga em Unidades Estacionárias de Produção.** - Dissertação de Mestrado - COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, 2002.

SHY, Y.H. et al.; **Effects of titanium addition and section size on microstructure and mechanical properties of compacted graphite cast iron.** Materials Science and Engineering, 1999.

VAN VLACK, I.H.; **Principios de Ciências e Tecnologias dos Materiais.** 4^a ed. Rio de Janeiro: Campus, 1984.