

MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO  
UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL  
Escola de Engenharia

Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais

PPGE3M

COMPARAÇÃO DAS PROPRIEDADES MECÂNICAS E DE FADIGA ENTRE FERRO  
FUNDIDO VERMICULAR E CINZENTO UTILIZADOS EM BLOCOS DE MOTOR  
DIESEL

Ruth Renati Ractz Martins

Dissertação para obtenção do título de Mestre  
em Engenharia

Porto Alegre  
2012

MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO  
UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL  
Escola de Engenharia

Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais

PPGE3M

COMPARAÇÃO DAS PROPRIEDADES MECÂNICAS E DE FADIGA ENTRE FERRO  
FUNDIDO VERMICULAR E CINZENTO UTILIZADOS EM BLOCOS DE MOTOR  
DIESEL.

RUTH RENATI RACTZ MARTINS  
Engenheira Mecânica

Trabalho realizado no Departamento de Metalurgia da Escola de Engenharia da UFRGS, dentro do Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais – PPGE3M, como parte dos requisitos para obtenção do título de Mestre em Engenharia.

Área de Concentração: Ciência e Tecnologia dos Materiais

Porto Alegre  
2012

Esta dissertação foi julgada adequada para obtenção do título de Mestre em Engenharia, área de concentração em Ciência e Tecnologia dos Materiais, e aprovada em sua forma final, pelo orientador e pela Banca Examinadora do Programa de Pós-Graduação.

Orientador: Prof. Dr. Telmo Roberto Strohaecker

Banca Examinadora:

Prof. Dr. André Ronaldo Froehlich, UNISINOS

Dr. Marcio Levi Kramer de Macedo, DEMET/UFRGS

Dr. Rubem Manoel de Braga, DEMET/UFRGS

Prof. Dr. Telmo Roberto Strohaecker  
Coordenador do PPGEM

*Dedico este trabalho:  
À minha família, pelo apoio e compreensão, em  
todos os momentos desta e de outras caminhadas.*



## **AGRADECIMENTOS**

Ao Prof. Dr. Eng. Telmo Roberto Strohaecker, pela orientação, apoio e oportunidades concedidas a mim no laboratório de pesquisa LAMEF.

Ao MSc. Eng. Leandro Pereira Costa, por ser incansável nas ajudas e pelo apoio na realização dos ensaios de fadiga.

A todos os colegas da Engenharia do Produto da MWM International que me incentivaram para realização deste trabalho, em especial aos MSc. Omar Hildinger pela persistência e ensinamentos.

A MSc. Samanta Vearick pela ajuda desde o tempo da graduação.

Aos meus pais Ruth e Renato pela paciência e apoio incondicional durante toda minha vida.

A empresa MWM International pela oportunidade e parceria neste trabalho.

Enfim, agradeço a todos os amigos e colegas que contribuíram com experiência profissional e conhecimento, ou mesmo aqueles que, com palavras, contribuíram de alguma forma.

## SUMÁRIO

LISTA DE FIGURAS.....	IX
LISTA DE TABELAS .....	XV
LISTA DE ABREVIATURAS E SÍMBOLOS.....	XVII
RESUMO.....	XVIII
ABSTRACT .....	XIX
<b>1 INTRODUÇÃO .....</b>	<b>1</b>
<b>1.1 Objetivo.....</b>	<b>2</b>
<b>2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA .....</b>	<b>3</b>
<b>2.1 Bloco de Motor Diesel.....</b>	<b>3</b>
<b>2.2 Ferro Fundido.....</b>	<b>8</b>
2.2.1 Definição de Ferro Fundido .....	8
2.2.2 Composição Química - Elementos de liga .....	10
2.2.3 Velocidade de Resfriamento .....	11
2.2.4 Componentes estruturais dos Ferros Fundidos .....	11
2.2.5 Classificação dos Ferros Fundidos.....	15
<b>2.3 Ferro Fundido Cinzento .....</b>	<b>16</b>
<b>2.4 Ferro Fundido Vermicular.....</b>	<b>19</b>
2.4.1 Classificação .....	20
2.4.2 Método de Fabricação .....	20
<b>2.5 Propriedades do Ferro Fundido Cinzento x Vermicular .....</b>	<b>23</b>
<b>2.6 Fadiga.....</b>	<b>27</b>
2.6.1 Aspectos gerais da Fadiga.....	27
2.6.2 Enfoques da Fadiga .....	33
2.6.3 Curvas de Wohler (Curvas S-N) .....	34
2.6.4 Mecânica da Fratura Aplicada a Fadiga.....	36
2.6.5 Fadiga em Ferro Fundido Cinzento x Vermicular .....	40
2.6.6 Fadiga em Blocos de Motores Diesel.....	43
<b>3 MATERIAIS E MÉTODOS.....</b>	<b>45</b>

<b>3.1</b>	<b><i>Corpos-de-prova do Bloco.....</i></b>	<b>45</b>
<b>3.2</b>	<b><i>Materiais.....</i></b>	<b>49</b>
3.2.1	Análise Química.....	49
3.2.2	Análise Metalográfica.....	49
3.2.3	Análise Fractográfica.....	50
<b>3.3</b>	<b><i>Propriedades Mecânicas.....</i></b>	<b>50</b>
3.3.1	Dureza.....	50
3.3.2	Resistência a Tração, Limite de escoamento e Alongamento.....	51
3.3.3	Tenacidade ao Impacto.....	51
3.3.4	Resistência a Fadiga.....	52
<b>4</b>	<b>RESULTADOS E DISCUSSÃO.....</b>	<b>54</b>
<b>4.1</b>	<b><i>Análise Metalográfica.....</i></b>	<b>54</b>
4.1.1	Análise Metalográfica - Ferro Fundido Vermicular.....	54
4.1.2	Análise Metalográfica - Ferro Fundido Cinzento.....	56
4.1.3	Análise Metalográfica - Comparativo Ferro Fundido Vermicular X Cinzento.....	58
<b>4.2</b>	<b><i>Dureza.....</i></b>	<b>59</b>
4.2.1	Dureza - Ferro Fundido Vermicular.....	59
4.2.2	Dureza - Ferro Fundido Cinzento.....	59
4.2.3	Dureza - Comparativo Ferro Fundido Vermicular X Cinzento.....	60
<b>4.3</b>	<b><i>Resistência a Tração, Limite de Escoamento e Alongamento.....</i></b>	<b>61</b>
4.3.1	Resistência a Tração, Limite de Escoamento e Alongamento - Ferro Fundido Vermicular.....	61
4.3.2	Resistência a Tração – Ferro Fundido Cinzento.....	64
4.3.3	Resistência a Tração – Comparativo Ferro Fundido Vermicular X Cinzento.....	66
<b>4.4</b>	<b><i>Tenacidade ao Impacto.....</i></b>	<b>67</b>
4.4.1	Tenacidade ao Impacto – Ferro Fundido Vermicular.....	67
4.4.2	Tenacidade ao Impacto – Ferro Fundido Cinzento.....	68
4.4.3	Tenacidade ao Impacto - Comparativo Ferro Fundido Vermicular X Cinzento.....	69
<b>4.5</b>	<b><i>Fadiga.....</i></b>	<b>70</b>
4.5.1	Fadiga – Ferro fundido Vermicular.....	70
4.5.2	Fadiga - Ferro Fundido Cinzento.....	72

4.5.3	Fadiga - Comparativo Ferro Fundido Vermicular X Cinzento .....	73
<b>5</b>	<b>CONCLUSÕES .....</b>	<b>75</b>
<b>6</b>	<b>SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS .....</b>	<b>77</b>
<b>7</b>	<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....</b>	<b>78</b>

## LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1 – Modelo de bloco de motores. ....	3
Figura 2.2 - Correlação de peso do veículo com o consumo de combustível de motores a gasolina e a Diesel. (Adaptado a HOFBAUER 2001).....	4
Figura 2.3 – Relação do percentual de motores Diesel em relação ao total produzido. (Adaptado a BUCHHOLZ 2003) .....	5
Figura 2.4 - Comparação entre materiais para fabricação de blocos. (Adaptado a DAWSON 2001) .....	6
Figura 2.5 - Resistência vs Temperatura dos materiais. (Adaptado a MARTIN 2003) .....	6
Figura 2.6 - Solicitações locais nos blocos de motores. (Adaptado a VOLLRATH 2003) ..	7
Figura 2.7 - Diagrama de fase Ferro – Carbono. (Adaptado de CALLISTER 2007) .....	9
Figura 2.8 - Tipos de grafita em ferros fundidos, aumento de 100X. (Adaptado de ASTM A247:2006).....	12
Figura 2.9 - Formas típicas da grafita. (Adaptado ISO 945:2008).....	13
Figura 2.10 - Formas típicas de Grafita Lamelar, Nodular e Vermicular verificadas através de microscópio eletrônico de varredura. (Adaptado de COLPAERT 2008).....	13
Figura 2.11 - Representação do tamanho padrão dos nódulos em grafita forma VI, com ampliação de 100X. (Adaptado ISO 945: 2008) .....	14
Figura 2.12 - Ferro Fundido Cinzento Tipo A – Forma I. (A) Grafita Tipo A Forma I segundo ISO 945, 2008. (B) Microscopia Eletrônica de Varredura do ferro fundido cinzento após ataque profundo. (Adaptado de STEFANECUS 1988).....	16
Figura 2.13 - Ferro Fundido Cinzento Tipo B – Forma II. (A) Grafita Tipo B Forma II segundo ISO 945, 2008. (B) Microscopia Eletrônica de Varredura do ferro fundido cinzento após ataque profundo. (Adaptado de STEFANECUS 1988).....	16
Figura 2.14 - 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. (Adaptado de GUESSER 2002) .....	19

Figura 2.15 - Curva S: Percentual de nodularidade em função da percentagem de Mg residual. (Adaptado a DAWSON 1999).....	21
Figura 2.16 - Forma da Grafita como efeito de concentrador de tensões. (A) Ferro Fundido Nodular 400X sem ataque. (B) Ferro fundido Cinzento 200X sem ataque. (Adaptado a GUESSER 2009).....	23
Figura 2.17 - Comparação entre propriedades dos materiais para bloco de motores. (Adaptado a BICK 2003).....	25
Figura 2.18 - Efeito da quantidade de grafita nodular sobre o limite de resistência. (Adaptado a HORSFALL e SERGEANT 1983).....	26
Figura 2.19 – Ciclo de tensões alternadas presentes no processo de fadiga. (Adaptado a BRANCO 1986).....	27
Figura 2.20 - Tipos característicos de carregamento. (Adaptado a BRANCO 1986).....	28
Figura 2.21- Estágios de propagação de fadiga. (Adaptado a SALERMO 2003).....	28
Figura 2.22 - Nucleação de trincas de fadiga mediante a formação de intrusões e extrusões. (Adaptado a BELTRÃO 2005).....	29
Figura 2.23 - Redistribuição de tensões próximo a trinca. (Adaptado a HERTZBERG 1989).....	30
Figura 2.24 - Tendência a concentração e redistribuição de tensões devido a existência de um defeito. (a) Corpo sem entalhe. (b) corpo com entalhe. (c) Detalhe do estado triaxial de tensões na ponta do entalhe. (Adaptado a HERTZBERG 1989).....	30
Figura 2.25 - Mecanismo de propagação mediante embotamento e afilamento da trinca. (Adaptado a CALLISTER 2003).....	31
Figura 2.26 - Mecanismos de propagação da trinca por deslizamento reverso proposto por Broek. (BROEK 2002).....	31
Figura 2.27 - Marcas de praia. (Adaptado a ASM Handbook, vol.19).....	32
Figura 2.28 - Estágio de propagação de trinca de fadiga. (Adaptado a FERREIRA 2008)	32
Figura 2.29 - Curva típica S-N de ligas ferrosas e não ferrosas - linha contínua ferrosos e linha pontilhada não ferrosos. (Adaptado a SURESH 1998).....	34
Figura 2.30 – Influência da tensão média no limite de fadiga. (Adaptado a BELTRÃO 2005).....	35
Figura 2.31 - Esquema da amplitude do fator de intensidade de tensões ( $\Delta K$ ) em função do tempo. (Adaptado a NEWMAN 2000).....	36
Figura 2.32 – Diagrama de relação entre comprimento da trinca (a) com número de ciclos (N). (Adaptado a REGULY 2004).....	37

Figura 2.33 - 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 ( $\Delta K$ ). (Adaptado a BRANCO 1986).....	38
Figura 2.34 - Desenvolvimento de trincas sob fadiga. (A) Ferro fundido cinzento perlítico - LR=228 MPa. (B) Ferro fundido vermicular - LR=438 MPa, LE=345 MPa. (Adaptado SOCIE e FASH 1982). .....	40
Figura 2.35 - Efeito do tamanho da grafita lamelar no limite de fadiga em flexão rotativa. (Adaptado a RUFF e DOSHI 1980) .....	41
Figura 2.36 - Curvas comparativas para velocidade de crescimento de trincas em ferro fundidos ferríticos. (Adaptado a PUSCH et al 1988) .....	42
Figura 2.37 - Principais regiões solicitadas por fadiga em um bloco de motor. (A) Paredes próximas ao mancal, local para fixação dos parafusos das capas de mancal. (Adaptado a FEV 2001). (B) Região de união do bloco com o cabeçote. (Adaptado BOFF 2003). .....	43
Figura 2.38 - Análise de fadiga realizada na região dos mancais. (Adaptado a FEV 2001).....	44
Figura 3.1 - Motor MaxxForce 13. (Fonte: MWM International).....	45
Figura 3.2 - Motor Acteon 6.12 TCE. (Fonte: MWM International) .....	45
Figura 3.3– Locais onde foram retirado corpos de prova para ensaios na região dos mancais. ....	47
Figura 3.4 - Locais onde foram retirados os corpos-de-prova do Bloco de Ferro Fundido Vermicular. a) Face de Fogo ou Região do cabeçote; b) Face do Carter ou Saia; c) Face traseira (lado volante) e d) Face dianteira (lado Damper). .....	48
Figura 3.5 - Locais onde foram retirados corpos-de-prova do Bloco Ferro Fundido Cinzento. a) Região do Cabeçote – Face de Fogo; b) Região Carter – Saia; c) Região do Volante e d) Face dianteira (lado Damper). ....	48
Figura 3.6 - Dimensionamento do corpo de prova cilíndrico utilizado para ensaios de Tração conforme a norma NBR ISO 6892. ....	51
Figura 3.7 - Dimensionamento do corpo de prova Tipo A utilizado para ensaios Charpy, conforme norma DIN EN 10 045. ....	51
Figura 3.8 - Equipamento Máquina de Ensaio Hidráulica MTS utilizado para Ensaio de Fadiga. ....	52
Figura 3.9 - Desenho esquemático do emprego de extensômetro de fratura para acompanhar a abertura do entalhe. (Adaptado a BRANCO 2006).....	52
Figura 3.10 - Dimensionamento do Corpo de prova W=25 para ensaio de Fadiga $da/dN$ . 53	

Figura 4.1 - CP 42: Micrografias em microscópio óptico da amostra de ferro fundido vermicular mostrando a morfologia da grafita do corpo de prova que apresentou resistência à tração 469,5 N/mm <sup>2</sup> . Grafita: forma III, V e VI. Tamanho: 4 a 5. Dureza: 217 HB. Matriz: Perlita fina. Ataque: S/Ataque e Nital 2%.	55
Figura 4.2- CP 30: Micrografias em microscópio óptico da amostra de ferro fundido vermicular mostrando a morfologia da grafita do corpo de prova que apresentou resistência à tração 489,15 N/mm <sup>2</sup> . Grafita: forma III, IV, V e VI. Tamanho: 5 a 6. Dureza: 229 HB. Matriz: Perlita fina. Ataque: S/Ataque e Nital 2%.	55
Figura 4.3 - CP 16: Micrografias em microscópio óptico da amostra de ferro fundido vermicular mostrando a morfologia da grafita do corpo de prova que apresentou resistência à tração 475 N/mm <sup>2</sup> . Grafita: forma III, V e VI. Tamanho: 4 a 5 . Dureza: 220 HB. Matriz: Perlita fina. Ataque: S/Ataque e Nital 2%.	55
Figura 4.4 – Micrografias em microscópio óptico das amostras de ferro fundido vermicular com matriz perlita fina e algumas concentrações de ferrita livre (10%) no contorno da grafita. Ataque: Nital 2%.	56
Figura 4.5 - CP 27: Micrografias em microscópio óptico da amostra de ferro fundido cinzento mostrando a morfologia da grafita do corpo de prova que apresentou resistência à tração 276 N/mm <sup>2</sup> . Grafita: Tipo A – Forma I. Tamanho: 5 a 6. Dureza: 197 HB. Matriz: Perlita fina. Ataque: S/Ataque e Nital 2%.	56
Figura 4.6 - CP 64: Micrografias em microscópio óptico da amostra de ferro fundido cinzento mostrando a morfologia da grafita do corpo de prova que apresentou resistência à tração 275N/mm <sup>2</sup> . Grafita: Tipo A – Forma I. Tamanho: 5 a 6. Dureza: 196 HB. Matriz: Perlita fina. Ataque: S/Ataque e Nital 2%.	57
Figura 4.7 – CP 07: Micrografias em microscópio óptico da amostra de ferro fundido cinzento mostrando a morfologia da grafita do corpo de prova que apresentou resistência à tração 295 N/mm <sup>2</sup> . Grafita: Tipo A – Forma I. Tamanho: 5 a 6. Dureza: 204 HB. Matriz: Perlita fina. Ataque: S/Ataque e Nital 2%.	57
Figura 4.8 - Micrografias em microscópio óptico das amostras de ferro fundido cinzento com Matriz Perlítica. Ataque : Nital 2%.	57
Figura 4.9 – Resultados de durezas das amostras de material ferro fundido vermicular.	59
Figura 4.10 - Resultados de durezas das amostras de material ferro fundido cinzento.	60
Figura 4.11 - Resultado de dureza das amostras de material dos blocos de motores.	60
Figura 4.12 - Curva Tensão x Deformação de uma amostra do material ferro fundido vermicular em corpo de prova de tração.	61



Figura 4.13 – Resultado do limite de resistência a tração das amostras de material ferro fundido vermicular. ....	62
Figura 4.14 – Resultado do limite de resistência ao escoamento das amostras de material ferro fundido vermicular.....	62
Figura 4.15 – Resultado do alongamento das amostras das amostras de material ferro fundido vermicular. ....	62
Figura 4.16 - Locais identificados com valores do limite de resistência abaixo do especificado. ....	63
Figura 4.17 – Fractografias em MEV dos corpos de prova de tração das amostras de material ferro fundido vermicular (A) Aumento de 100X e (B) Aumento 200X.....	64
Figura 4.18 - Curva Tensão x Deformação de uma amostra do material ferro fundido cinzento em corpo de prova de tração. ....	64
Figura 4.19 - Resultado de limite de resistência a tração das amostras de material ferro fundido cinzento. ....	65
Figura 4.20 - Fractografias em MEV dos corpos de prova de tração das amostras de material ferro fundido cinzento. (A) Aumento de 100X e (B) Aumento 200X. ....	65
Figura 4.21 - Curva Tensão x Deformação das amostras de material dos bloco de motores em corpo de prova de tração.....	66
Figura 4.22 - Resultado de limite de resistência a tração das amostras de material dos blocos de motores. ....	66
Figura 4.23 – Resultados de tenacidade ao impacto das amostras de material ferro fundido vermicular.....	67
Figura 4.24 – Fractografias em MEV dos corpos de prova de impacto das amostras de material ferro fundido vermicular. (A) Aumento de 100X e (B) Aumento 200X.....	68
Figura 4.25 - Resultados de tenacidade ao impacto das amostras de material ferro fundido cinzento.....	68
Figura 4.26- Fractografias em MEV dos corpos de prova de impacto das amostras de material ferro fundido cinzento. (A) Aumento 50X e (B) Aumento 100X. ....	69
Figura 4.27 - Resultados de tenacidade ao impacto das amostras de material dos blocos de motores. ....	69
Figura 4.28 - Curva Taxa de crescimento da trinca da/dN x Amplitude do fator de intensidade de tensões $\Delta K$ das amostras de material ferro fundido vermicular.....	70
Figura 4.29 – Fractografias em MEV dos corpos de prova de Fadiga das amostras de material ferro fundido vermicular. (A) Coalescimento de micro cavidades. Aumento 100X,	

(B) Coalescimento de micro cavidades. Aumento 500X, (C) Clivagem. Aumento 500X e (D) Perfila Fina. Aumento $\approx 2000X$ .....	71
Figura 4.30 - Curva Taxa de crescimento da trinca $da/dN$ x Amplitude do fator de intensidade de tensões $\Delta K$ das amostras de material ferro fundido cinzento.....	72
Figura 4.31 - Fractografias em MEV dos corpos de prova de Fadiga das amostras de material ferro fundido cinzento. (A) Aumento 100X, (B) Aumento 200X, (C) Aumento 400X e (D) Aumento 2000X. ....	73
Figura 4.32 – Curva Taxa de crescimento da trinca $da/dN$ x Amplitude do fator de intensidade de tensões $\Delta K$ das amostras de material dos blocos de motores.....	74

## LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1 - Comparativo das principais características dos ferros fundidos. (CALLISTER 2007).....	15
Tabela 2.2 - Classes ferro fundido cinzento, adaptado a normas EN 1561:1997 e ISO 185:2005 espessura de referência 10-20 mm. ....	18
Tabela 2.3 - Classes ferro fundido vermicular de acordo com a norma VDG W50:2002. (Adaptado de GUESSER 2009) .....	20
Tabela 2.4 - Teor de titânio no CGI. (Adaptado de DAWSON 2001).....	22
Tabela 2.5 - Propriedades ferro fundido cinzento, vermicular e nodular. (Adaptado de DAWSON 2001) .....	24
Tabela 2.6 - Propriedades ferro fundido vermicular x nodularidade. (SINTERCAST 1999) .....	26
Tabela 2.7 - Resistência à fadiga do ferro fundido cinzento das classes 225, 250 e 275. (Adaptado a GUESSER 2009) .....	41
Tabela 2.8 - Resistência à fadiga do ferro fundido vermiculares da classe FV 450.....	42
Tabela 2.9 - Parâmetros de Equação de Paris para ferros fundidos na matriz ferrítica. (Adaptado a PUSCH et al 1988).....	42
Tabela 3.1 - Especificação dos motores utilizados para retirada dos corpos de prova.....	46
Tabela 3.2 - Locais de retirada dos corpos de prova. ....	47
Tabela 3.3 - Análise química dos materiais dos blocos de motores.....	49
Tabela 4.1- Análise metalográfica das amostras de material ferro fundido vermicular e cinzento retirado dos bloco dos motores. ....	58
Tabela 4.2 - Dureza das amostras de material dos blocos de motores .....	60
Tabela 4.3 - Limite de resistência a tração ( $\sigma_r$ ), limite de resistência ao escoamento ( $\sigma_e$ ) e alongamento (%) das amostras de material ferro fundido vermicular.....	62
Tabela 4.4 - Listagem dos pontos abaixo do limite especificado para ensaio de tração para amostras de ferro fundido vermicular.....	63
Tabela 4.5 - Limite de resistência a tração das amostras de material dos blocos de motores. ....	66

Tabela 4.6 – Tenacidade ao impacto das amostras de material dos blocos de motores. ....	69
Tabela 4.7 - Comparação de propriedades entre materiais ferro fundido vermicular e cinzento.....	74

## LISTA DE ABREVIATURAS E SÍMBOLOS

### Abreviações

<i>Ac<sub>1</sub></i>	Temperatura inicial de transformação da austenita;	
<i>Ac<sub>3</sub></i>	Temperatura final de transformação da austenita;	
<i>CCC</i>	Estrutura cúbica de corpo centrado;	
<i>CGI</i>	Compacted Graphite Iron - Ferro Fundido Vermicular;	
<i>FC</i>	Ferro Fundido Cinzento;	
<i>FV</i>	Ferro Fundido Vermicular;	
<i>Fe<sub>3</sub>C</i>	Cementita;	
<i>HB</i>	Dureza Brinell;	[kgf/mm <sup>2</sup> ]
<i>Nf</i>	Vida em fadiga.	

### Letras Gregas

$\gamma$	Fase do ferro gama (Austenita);	
$\alpha$	Fase do ferro alfa (Ferrita);	
$\sigma_r$	Limite de Resistência a Tração;	[N/mm <sup>2</sup> ]
$\sigma_e$	Limite de Resistência ao Escoamento;	[N/mm <sup>2</sup> ]
$\sigma_N$	Tensão Nominal;	[N/mm <sup>2</sup> ]
$\sigma_m$	Tensão Média;	[N/mm <sup>2</sup> ]
$\sigma_a$	Amplitude de Tensão;	[N/mm <sup>2</sup> ]
$\sigma_{m\acute{a}x}$	Tensão Máxima;	[N/mm <sup>2</sup> ]
$\sigma_{m\acute{i}n}$	Tensão Mínima.	[N/mm <sup>2</sup> ]

### Siglas

<i>ASTM</i>	American Society for Testing and Materials;
<i>JIS</i>	Japanese Industrial Standards;
<i>ISO</i>	International Organization for Standardization;
<i>SAE</i>	Society of Automotive Engineers;
<i>VDG</i>	Verein Deutscher Giessereifachleute;
<i>IAC</i>	Instituto Aço Brasil;

## RESUMO

A crescente busca por novos mercados, redução de custos e atendimento a legislação incentivam estudos e pesquisas no aperfeiçoamento dos materiais, processos e produtos. Uma vez que o bloco do motor é o componente mais importante, e que agrega maior peso e volume no motor, o bloco tem sido alvo de pesquisas na busca de motores mais eficientes. O desenvolvimento do material tradicionalmente utilizado para a fabricação de blocos de motores Diesel, o ferro fundido cinzento, alcançou seu limite. Neste contexto, o ferro fundido vermicular ou Compacted Graphite Iron (CGI) se apresenta como um substituto para tal aplicação com características de condutividade térmica e amortecimento próximas ao do ferro fundido cinzento, porém, com propriedades mecânicas superiores, possibilitando uma redução do peso do motor e, conseqüentemente, economia de combustível, redução da emissão de poluentes (CO<sub>2</sub>, NO<sub>x</sub> e particulados) além do nível de ruído. Neste estudo foram determinadas, analisadas e comparadas as propriedades mecânicas e de fadiga do ferro fundido vermicular em relação ao principal material utilizado atualmente em blocos de motores Diesel: ferro fundido cinzento. Os experimentos foram realizados através de ensaios a partir de corpos de prova retirados de blocos de motores recolhidos aleatoriamente da produção, visando determinar as propriedades mecânicas e de fadiga baseado na metodologia da mecânica da fratura. As superfícies de fratura dos ensaios foram analisadas em microscópio eletrônico de varredura (MEV) a fim de caracterizar os micromecanismos de fratura. Resultados dos ensaios realizados evidenciaram as vantagens da utilização de ferro fundido vermicular quando comparado ao cinzento, pois apresentou resultados superiores em todos os ensaios mecânicos e taxa de crescimento de trinca de fadiga uma ordem grandeza menor. Através da análise fractográfica foi possível perceber a influência da morfologia da grafita no efeito concentrador de tensões.

**Palavras chave:** Motores Diesel; Bloco de motor; Ferro Fundido Vermicular; Fadiga.

## **ABSTRACT**

The growing search for new markets, cost reduction, adding value to the product and making products according to the legislation for emissions control have consequently increased studies and research to find improvements in materials, process and products. Considered one of the most important and the heaviest component of the engine, the crankcase has been the main target of the search for more efficient engines. Currently the gray cast iron is the material traditionally used in the fabrication of Diesel engine crankcases, however it has reached its strength limit. In this context, the compacted graphite iron (CGI) comes as an alternative for such applications, with characteristics such as thermal conductivity and damping similar to the gray cast iron, but with superior mechanical properties, allowing the manufacturing of lighter crankcases, better performance and reduced environmental pollution by exhaust gases and fluids. This work was to determine, analyze and compare the mechanical and fatigue properties between gray iron and compacted graphite iron used in Diesel engine crankcases. The experiments were performed by tests on test samples taken from random production crankcases, in order to determine the mechanical and fatigue properties based on fracture mechanical methodology. The fracture surfaces of tests were observed by SEM to characterize the fracture micromechanisms. In this case, results of tests demonstrate the advantages of use compacted graphite iron. In the fracture surfaces was possible to realize the influence of the graphite morphology on the stress concentrating effect.

**KEY WORDS:** Diesel Engines; Crankcase; Compacted Graphite; Fatigue;

# 1 INTRODUÇÃO

Atualmente observa-se na indústria automobilística uma busca por expansão de mercados, redução dos custos, agregação de valor ao produto e diminuição dos impactos ambientais. Neste contexto, a indústria automobilística e seus fornecedores vêm buscando cada vez mais melhorar seus processos e produtos, bem como desenvolver novos materiais que permitam alcançar maiores desempenhos associados a menores emissões de gases (CO<sub>2</sub>, NO<sub>x</sub>, particulados), melhor performance e diminuição de ruído.

No caso de motores, estas características baseiam-se em maiores pressões e temperaturas, o que sujeitam os blocos de motores a solicitações que podem levar a desgaste e falhas prematuras. Sendo assim, as empresas têm intensificado as pesquisas no aperfeiçoamento dos motores. Uma das consequências do aumento desta eficiência é o aumento dos picos de pressão de combustão na câmara de combustão (GUESSER 2009).

O material tradicionalmente utilizado para a fabricação de blocos de motores Diesel, o ferro fundido cinzento, chegou a um limite de resistência, possibilitando o aumento de pressão somente pelo aumento da espessura das paredes do bloco. O aumento de espessura de parede eleva o peso e o custo do motor que, por sua vez, torna o produto menos competitivo diante das exigências de redução de consumo de combustível.

Neste contexto, o ferro fundido vermicular ou Compacted Graphite Iron (CGI) tem se apresentado como um substituto para tal aplicação com características de condutividade térmica e amortecimento próximas ao do ferro fundido cinzento, porém, com propriedades mecânicas superiores, possibilitando um redução do peso do motor e, conseqüentemente, economia de combustível, redução da emissão de poluentes, além do nível de ruído (ANDRADE 2005).

O ferro fundido vermicular permite a fabricação de motores Diesel com ótimas características de peso, emissões e performance, além de apresentar boas propriedades mecânicas (GUESSER 2001).

Em muitos casos, o ferro fundido vermicular aproxima propriedades entre ferro fundido cinzento e nodular, com características como: boa resistência ao desgaste, boa resistência mecânica e à fadiga, boa condutividade térmica e homogeneidade de



propriedades. Estas propriedades elevam esse material a um forte candidato a substituto do ferro fundido cinzento, na fabricação de blocos de motores Diesel e em outras aplicações (DAWSON 2004).

Entretanto, a utilização do ferro fundido de grafita compactada ficou limitada por um tempo, devido a sua dificuldade de ser fabricado e usinado quando comparado com o ferro fundido cinzento, principalmente em processos de usinagem contínuos como torneamento e mandrilhamento, aumentando os custos de fabricação (XAVIER 2003). Estes problemas fizeram com que várias pesquisas fossem desenvolvidas com a intenção de tornar mais fácil e viável a fabricação e competitiva a usinagem do vermicular, envolvendo universidades, empresas automobilísticas, indústrias fabricantes de ferramentas, fundições e empresas de usinagem de blocos de motores.

Considerando o interesse das empresas em processos que atendam ao mercado com menores custos fazem-se necessários estudos que permitam conhecer melhor as propriedades mecânicas e de fadiga dos componentes com diferentes materiais, possibilitando uma decisão madura na troca do processo.

### **1.1 Objetivo**

O objetivo deste trabalho é determinar, analisar e comparar as propriedades mecânicas e de fadiga do ferro fundido vermicular em relação ao principal material utilizado atualmente em blocos de motores Diesel: ferro fundido cinzento, a fim de comprovar as vantagens e desvantagens assim como viabilidade de alta produção de motores com este material.

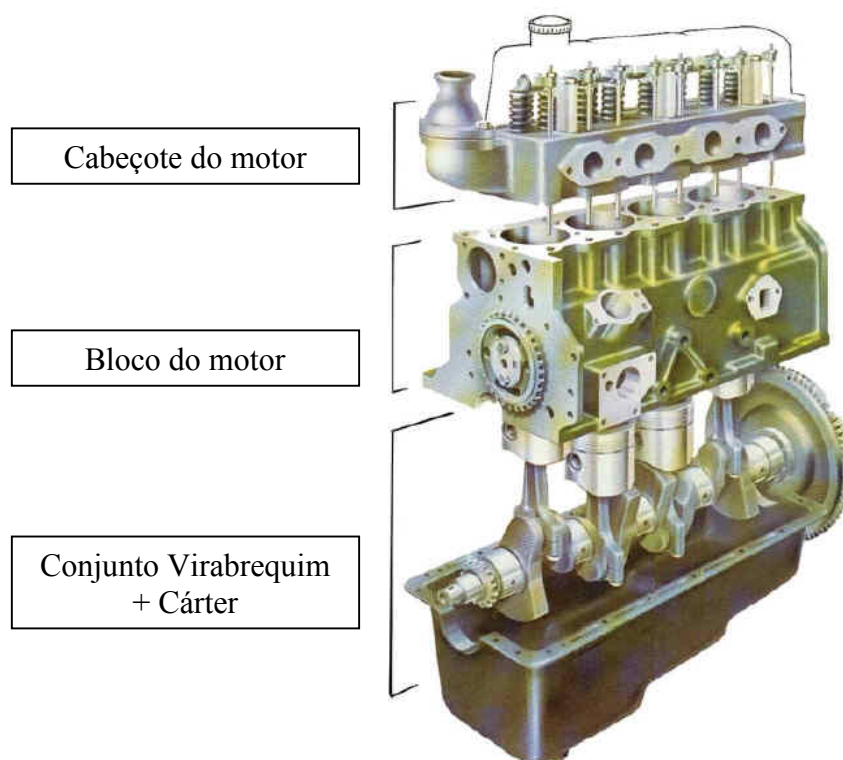
Os experimentos foram realizados através de ensaios a partir de corpos de prova retirados de blocos de motores recolhidos aleatoriamente da produção, visando determinar às propriedades mecânicas e de fadiga baseado na abordagem da mecânica da fratura.

É primordial o conhecimento das propriedades mecânicas e de fadiga, assim como seus mecanismos e micromecanismos de falha nos projetos dos componentes, a fim de compreender e prevenir falhas sistêmicas que possam ocorrer com o componente em uso. Este conhecimento possibilita o desenvolvimento de materiais alternativos, melhorias no projeto, otimização de processos e controle de qualidade dos blocos de motores Diesel.

## 2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

### 2.1 *Bloco de Motor Diesel*

O bloco de cilindros é a estrutura principal do motor. Localizado entre o cárter e o cabeçote, o bloco aloja, entre outros, o virabrequim, os pistões e as bielas (RACHE 2004), conforme a Figura 2.1.



**Figura 2.1 – Modelo de bloco de motores.**

O cabeçote do motor localiza-se na parte superior do motor e atua como tampa para os cilindros. Nele estão contidos os dutos de escape e admissão.

O bloco do motor, constitui a parte mais volumosa e pesada do motor, contém alojamentos cilíndricos (camisas) onde trabalham os pistões, dutos de circulação de água para arrefecimento, óleo para lubrificação e alojamento para virabrequim. Enquanto que o conjunto virabrequim e cárter estão localizados na parte inferior do motor. O virabrequim tem a função transformar o movimento alternativo de sobe e desce dos pistões em

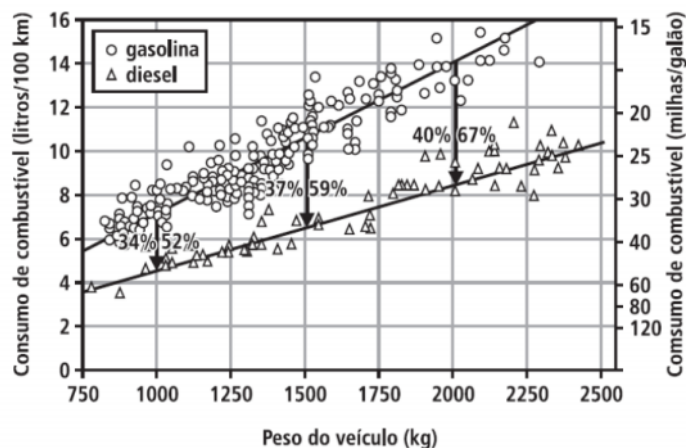
movimento de rotação. O virabrequim é assentado nos mancais de apoio situados na base do motor e o carter apóia e protege o conjunto virabrequim além de acondicionar o óleo lubrificante do motor.

A função deste conjunto de componentes é transformar a energia térmica gerada durante a combustão em energia mecânica, derivada do deslocamento do pistão (devido ao aumento de pressão no cilindro). Este trabalho é transformado em torque útil pelo virabrequim e transmitido ao eixo do motor (BOFF 2003).

O bloco do motor, além da função estrutural, deve suportar todos os esforços oriundos da explosão que se dá nos cilindros no momento da combustão, bem como dissipar o calor que é gerado por este fenômeno (RACHE 2004). Devido ao motor Diesel trabalhar com maiores pressões, um bloco de motor Diesel é muito mais reforçado e consequentemente pesado do que um bloco de motor a gasolina de mesma potência (RACHE 2004).

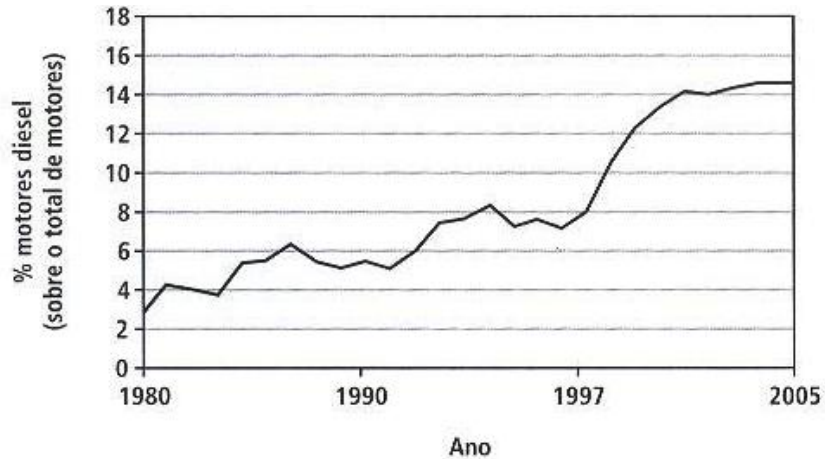
O peso total dos veículos vem aumentando nos últimos anos devido a incorporação de novos sistemas, objetivando aumentar a segurança, o conforto e desempenho (GUESSER 2009).

Sendo o bloco do motor uma parcela considerável no peso do veículo, esta característica impacta diretamente no consumo de combustível de motores, conforme Figura 2.2 que apresenta uma correlação de peso do veículo com o consumo de combustível dos carros.



**Figura 2.2 - Correlação de peso do veículo com o consumo de combustível de motores a gasolina e a Diesel. (Adaptado a HOFBAUER 2001)**

Na Europa o consumo de motores Diesel vem aumentando consideravelmente, sendo particularmente acentuado após a introdução da tecnologia de injeção com “common rail” em 1997 (BUCHHOLZ 2003), conforme pode ser percebido na Figura 2.3 que apresenta a percentagem de motores Diesel em relação ao total produzido na Europa.



**Figura 2.3 – Relação do percentual de motores Diesel em relação ao total produzido. (Adaptado a BUCHHOLZ 2003)**

O crescimento da venda de motores Diesel vem acompanhado de exigências de redução de consumo de combustível, redução de emissões de gases ( $\text{CO}_2$ ,  $\text{NO}_x$ , particulados) e aumento de potência de torque. O aumento da eficiência do motor e de sua densidade de potência tem sido obtido juntamente com o aumento da pressão de explosão (GUESSER 2009).

Em caminhões e ônibus, a busca de redução de peso tem como objetivo primário o aumento do peso transportado, sendo a economia de combustível o segundo objetivo (SCHONFELD 2003).

A necessidade de redução de consumo de combustível tem imposto uma pressão constante para substituição de materiais em veículos, priorizando a utilização de materiais mais leves (GUESSER 2009).

Atualmente os candidatos a materiais para blocos de motores são o ferro fundido cinzento FC 250 (tradicionalmente utilizado), ligas de alumínio e o ferro fundido vermicular classes FV 400 e FV 450. Na Figura 2.4 é realizada uma comparação entre materiais para fabricação de blocos sob diferentes aspectos.

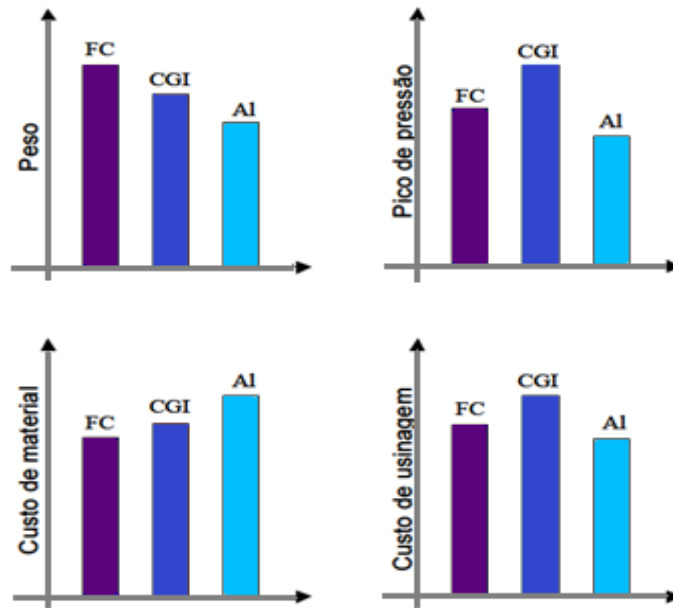


Figura 2.4 - Comparação entre materiais para fabricação de blocos. (Adaptado a DAWSON 2001)

Propriedades como baixa densidade e alta condutividade térmica da liga de alumínio são as principais razões para seu amplo uso em cabeçotes de motores. Entretanto, com o aumento das pressões explosão em motores Diesel, as ligas de alumínio se vêm com dificuldades de manter sua posição. Um ponto particular do alumínio é a queda acentuada da resistência com o aumento da temperatura. Já o ferro fundido cinzento FC 250 e o ferro fundido vermicular FV 450 apresentam resistência estável até cerca de 400°C (MARTIN 2003). A relação do Limite de Resistência x Temperatura para FV 450, FC 250 e Alumínio pode ser verificado na Figura 2.5.

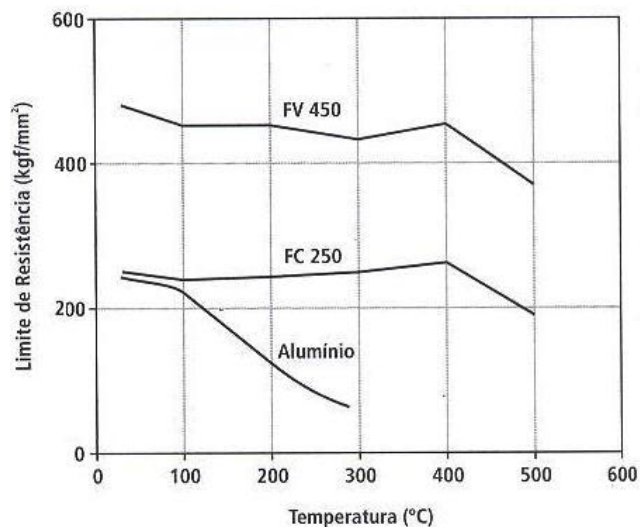
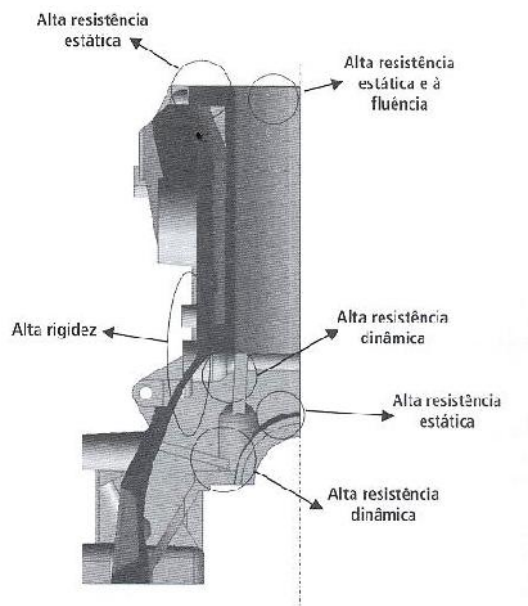


Figura 2.5 - Resistência x Temperatura dos materiais. (Adaptado a MARTIN 2003)

O ferro fundido vermicular vem encontrando aplicação crescente em blocos de motores Diesel, permitindo o aumento da pressão de combustão, que por consequência melhora eficiência da queima de combustível e reduz as emissões de gases. A classe FV 450 é selecionada para a maioria dos novos projetos (GUESSER 2009).

Além disto, estão sendo desenvolvidos conceitos de projetos de blocos de motores considerando-se as solicitações locais nas diversas regiões do bloco associado às propriedades mecânicas do ferro fundido (VOLLRATH 2003).



**Figura 2.6 - Solicitações locais nos blocos de motores. (Adaptado a VOLLRATH 2003)**

Além das regiões citadas na Figura 2.6, a região do mancal de apoio e das roscas para fixação das capas de mancal são áreas de alta solicitação mecânica em blocos de motores (VOLLRATH 2003).

Baseados nos estudos realizados com propriedades mecânicas dos ferros fundidos foram listadas várias possibilidades para obter redução de peso no bloco do motor, conforme MARQUARD 1998, entre elas:

- Redução de espessura na face de fogo;
- Redução de espessura da camisa;
- Redução do comprimento de roscas;
- Redução da altura de camisas d'água;
- Paredes de mancais ocas;
- Redução da espessura do flange do cárter.

Segundo Vollrath (VOLLRATH 2003) a aplicação destes conceitos tem permitido reduções consideráveis de peso em blocos. Como exemplo tem-se um motor de 2,0L Diesel (turbo), onde o bloco teve seu peso reduzido de 42,8 para 29,5kg e para um motor a gasolina (turbo), o peso diminuiu de 38,5 para 28,5 Kg.

A utilização de blocos de motores em ferro fundido vermicular permite ainda que se empregue o processo de fratura das capas dos mancais, que são então fundidas integralmente com o bloco do motor (ROHRING e WERMING 1999).

Com o ferro fundido da classe FV 450 e 500 a fratura ocorre apenas em um plano e sem deformação plástica macroscópica, o que permite a montagem posterior das capas sobre a própria fratura. Este arranjo restringe movimentos laterais entre a capa de mancal e o bloco, aumentando a rigidez do sistema. Além disto, ficam reduzidas as tensões dos parafusos para fixação das capas de mancal (SCHOFFMANN 2004).

## **2.2 Ferro Fundido**

O Ferro tem sido historicamente importante, promovendo grandes mudanças na sociedade. Principalmente após a Idade do Ferro que é considerada o último estágio tecnológico e cultural da pré-história (IAC 2011).

Ligas ferrosas, que o ferro é o principal constituinte, são produzidos em grande escala, sendo mais produzidos que qualquer outro metal. Seu uso difundido é explicado por três fatores (CALLISTER 2007):

- Ferro existe em quantidade abundante na crosta terrestre;
- Podem ser produzido por um processo relativamente econômico;
- São extremamente versáteis e podem ser adaptados para ter alta gama de propriedades mecânicas.

### **2.2.1 Definição de Ferro Fundido**

Ferro Fundido é a liga Ferro - Carbono - Silício, de teores de carbono geralmente acima de 2,0% em quantidade superior à que se pode ser retida em solução sólida na austenita, de modo a resultar carbono parcialmente livre, na forma de veios ou lamelas de grafita (CHIAVERINI 2005).

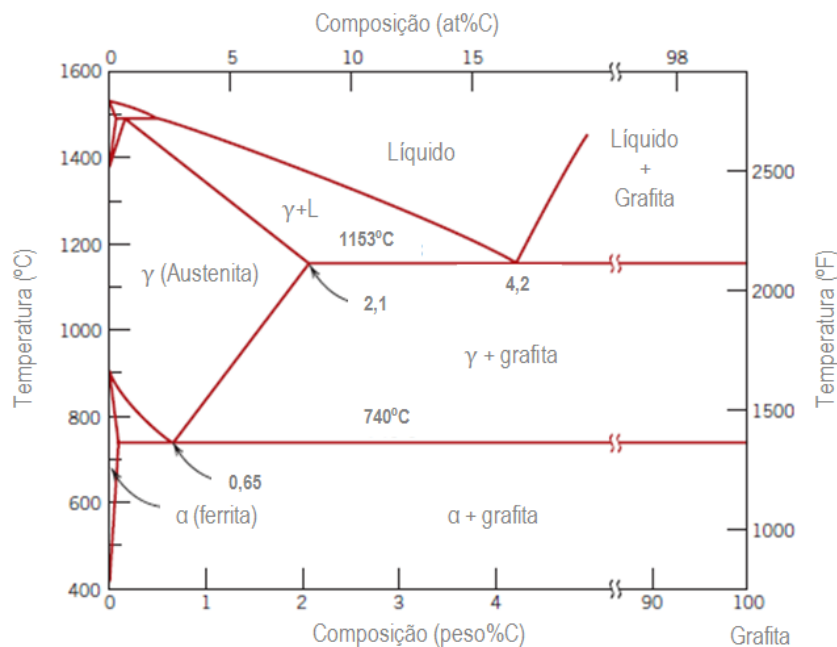
O Silício tem papel importante no produto final, pois aumenta a resistência da ferrita no ferro fundido, sua presença permite uma fusão eutética com 2 - 3,5% de Carbono ao invés de 4,3% Carbono.

No caso de ferros fundidos tomados como ligas ternárias, utiliza-se o conceito de Carbono Equivalente, representado pela Equação 2.1. Este conceito possibilita levar em consideração o efeito do Silício nas transformações estruturais e, portanto, nas propriedades dos ferros fundidos, em que o silício está presente em teores relativamente elevados (CHIAVERINI 2005).

$$C.E = \% C + 1/3 (\% Si + \% P)$$

**Equação 2.1**

O diagrama de fases representado pela Figura 2.7 revela ligas que em uma faixa de composição tornam-se completamente líquidas entre aproximadamente (1150 e 1300°C) o que é consideravelmente menor que para aços (CALLISTER 2007).



**Figura 2.7 - Diagrama de fase Ferro – Carbono. (Adaptado de CALLISTER 2007)**

Tendo os ferros fundidos um relativo baixo ponto de fusão (~1200°C), isto é vantajoso porque requer menos energia e uma relativa fácil moldação. Além disso, o metal fundido preencherá completamente os vazios intrincados dos moldes com certa facilidade. Essas características conduzem a um material barato e de versatilidade considerável para fins de projeto e produto (VAN VLACK 1984).

Dois fatores são determinantes na estrutura dos ferros fundidos segundo Chiaverini (CIAVERINI 2005): Composição Química e Velocidade de Resfriamento.



### 2.2.2 Composição Química - Elementos de liga

Cada elemento de liga presente na composição química do ferro fundido apresentará algum efeito na estrutura final da matriz.

- **Carbono:** determina a quantidade de grafita que pode ser formada (CHIAVERINI 2005).

- **Silício:** elemento essencialmente grafitizante, favorece a decomposição do carboneto de ferro. Sua presença, independente do teor de Carbono, faz o ferro tender para o cinzento em detrimento ao branco (CHIAVERINI 2005).

- **Magnésio:** exerce a função de compactar/confinar a forma da grafita na solidificação. O magnésio tem afinidade com o elemento enxofre, logo, se não houver um procedimento de dessulfuração da liga, o magnésio presente tenderá a formar sulfeto (GEORGIU 2002).

- **Enxofre:** juntamente com o manganês forma o sulfeto de manganês (MnS). O Sulfeto de Manganês é uma das inclusões aceitáveis na liga, pois é favorável a usinagem. Dependendo das condições forma-se uma camada protetora de sulfeto de manganês na superfície da ferramenta, que promove redução de calor na ferramenta e diminui a força de corte (POULACHON 2002).

- **Cromo:** adicionado a liga tem função de aumentar a resistência à tração sob elevadas temperaturas.

Cromo é um potente formador de perlita e age aumentando a solubilidade do carbono no ferro. Recomendável que o teor de cromo esteja abaixo de 0,08%, por incentivar a formação carbonetos (DAWSON 2001).

- **Titânio:** em reações com carbono e nitrogênio presente no ferro fundido formam duras inclusões chamadas carbonitreto de Ti (Ti(C,N)), estas inclusões são formadas ainda no estado líquido, sendo livres para crescer com a forma cúbica, de acordo com a estrutura cristalina. O teor de titânio tipicamente presente nos ferros fundido é na faixa de 0,005% - 0,02% (DAWSON 2001).

### 2.2.3 Velocidade de Resfriamento

A velocidade de resfriamento durante a solidificação varia com a espessura das peças moldadas. Em elevadas velocidades de resfriamento (que ocorrem normalmente em seções finas ou nas áreas junto às paredes do molde) não há tempo para decompor a cementita, de modo que, dependendo dos teores de carbono e de silício, ocorre pouca ou nenhuma grafitação e há tendência para formar-se ferro fundido branco (CHIAVERINI 2005).

Com as velocidades de resfriamento lentas das seções mais espessas, ocorre uma grafitação (dependente sempre do teor de silício) e a estrutura será constituída essencialmente de perlita e grafita (CHIAVERINI 2005).

Um aumento da velocidade de resfriamento diminui o espaçamento intralamelar da perlita, o que proporciona um aumento da resistência da matriz (SANTOS E BRANCO 1989).

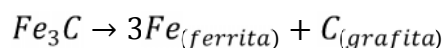
A microestrutura dos ferros fundidos é influenciada pela velocidade de resfriamento, observando-se maiores porcentagem de nódulos em seções que resfriam rapidamente. Em peças complexas como blocos e cabeçotes, as velocidades de resfriamento de diferentes partes não dependem somente da espessura das paredes, mas também do modo como o metal preenche a peça (GUESSER 2002).

### 2.2.4 Componentes estruturais dos Ferros Fundidos

Uma vez que composição química e a velocidade de resfriamento determinarão a forma, distribuição, tamanho e quantidade de Grafita, Ferrita, Cementita, Perlita, Ledeburita e Steadita presentes no ferro fundido é importante conhecer os componentes estruturais que serão formados, a fim de prever as propriedades mecânicas do material.

**Grafita** é o principal componente estrutural do ferro fundido sendo influenciado principalmente pelo Carbono e Silício.

O Carbono determina a quantidade de grafita que se pode formar e o Silício é essencial porque propicia a decomposição da cementita (carboneto de ferro) em ferrita e grafita conforme a reação:



A reação anterior produz grafita em ferro fundido, porque o carbeta de ferro  $Fe_3C$  não é verdadeiramente estável, somente metaestável. Sua instabilidade é acentuada pela presença de silício e prolongada exposição a elevadas temperaturas (VANVLACK 1984).

A velocidade de resfriamento durante a solidificação irá influenciar diretamente na quantidade de grafita formada (CHIAVERINI 2005), bem como influi na forma, distribuição e tamanho dos veios de grafita. Quanto maior for essa velocidade, mais refinada será essa microestrutura.

A diferença na morfologia da grafita é um dos fatores mais importantes na caracterização entre as propriedades do ferro fundido (WARRICK 1999).

A American Society for Testing and Materials (ASTM A 247: 2006), Japanese Industrial Standards (JIS G5502: 2001) e a International Organization for Standardization (ISO 945: 2008) classificam a morfologia microestrutural da grafita.

O aspecto de apresentação da grafita é classificado em cinco tipos, conforme mostra a Figura 2.8.

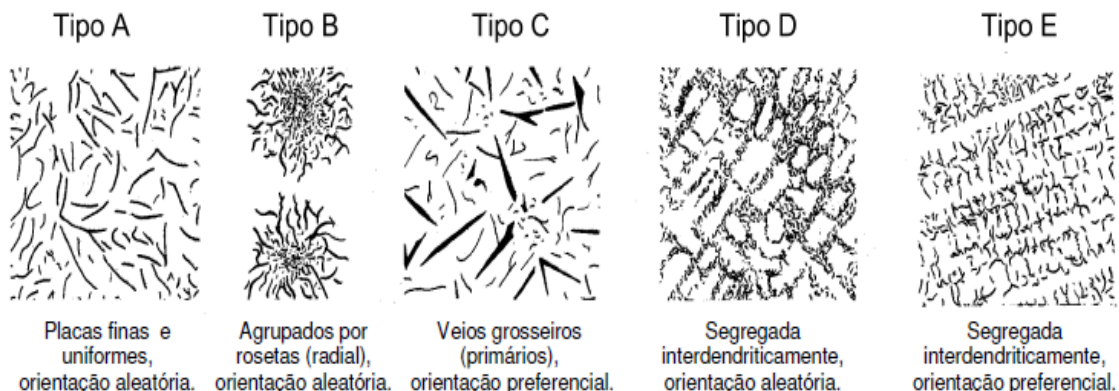
A - Irregular desorientada;

B - Em roseta;

C - Desigual irregular;

D - Interdendrítica desorientada; e

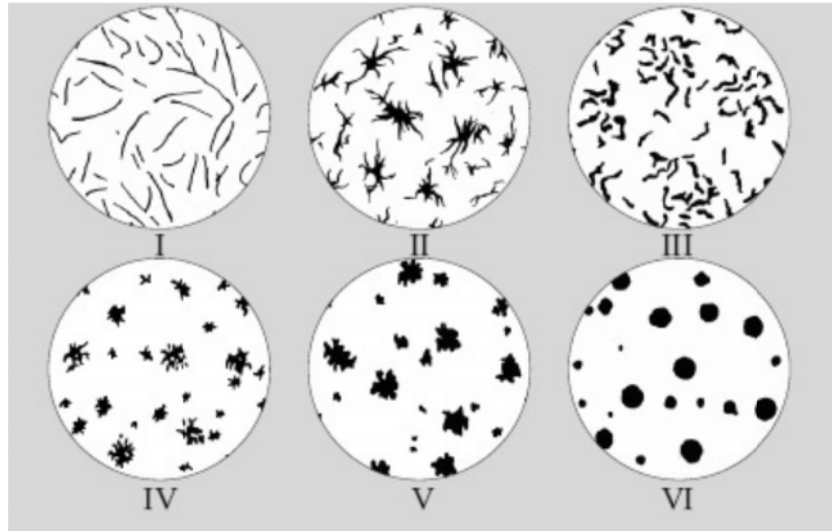
E - Interdendrítica orientada.



**Figura 2.8 - Tipos de grafita em ferros fundidos, aumento de 100X. (Adaptado de ASTM A247:2006)**

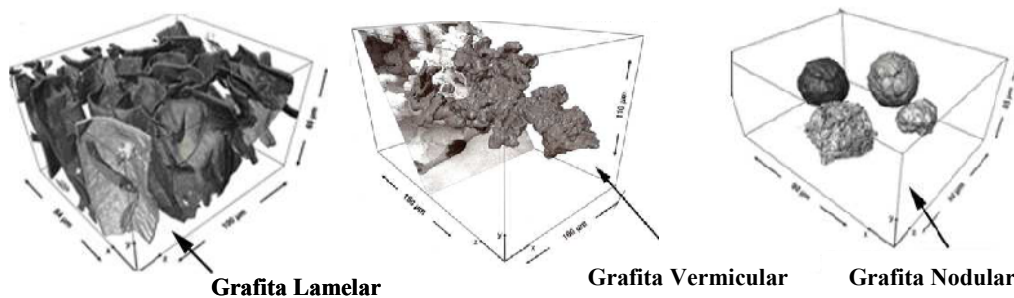
A forma da Grafita é classificada em seis formas típicas, apresentadas na Figura 2.9. As formas das grafitas praticamente determinam o tipo de ferro fundido, por exemplo, a formas I, III e VI são típicas dos ferros fundidos cinzento, vermicular e nodular, respectivamente; ou seja, são as que geralmente surgem em maior quantidade na

morfologia destes. Outras formas, tais como II, IV, V e VI podem aparecer no ferro fundido vermicular e as formas IV e V no ferro fundido nodular, devido a vários fatores, como a quantidade de certos elementos químicos, espessura da seção do fundido, tratamento térmico, entre outros.



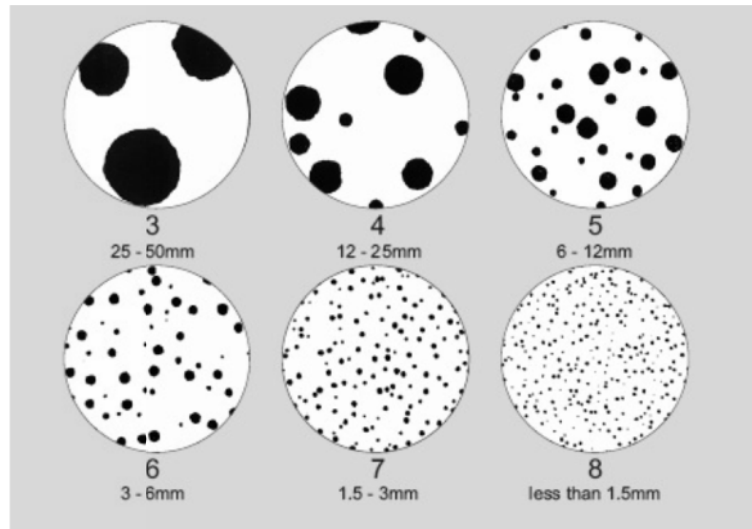
**Figura 2.9 - Formas típicas da grafita. (Adaptado ISO 945:2008)**

A fim de facilitar a visualização das diferenças entre grafitas, a Figura 2.10 mostra imagens utilizando técnicas de reconstrução tridimensional da grafita com imagens obtidas através de Microscopia Eletrônica de Varredura – MEV (COLPAERT 2008).



**Figura 2.10 - Formas típicas de grafita lamelar, nodular e vermicular verificadas através de microscópio eletrônico de varredura. (Adaptado de COLPAERT 2008)**

Os tamanhos das grafitas nos ferros fundidos também são classificados pelas instituições American Society for Testing and Materials (ASTM) e International Organization for Standardization (ISO) através de suas dimensões, em oito tamanhos, de 1 a 8, correspondendo o n° 1 às dimensões maiores (veio mais longos) e o n° 8 às dimensões menores, conforme mostra a Figura 2.11.



**Figura 2.11 - Representação do tamanho padrão dos nódulos em grafita forma VI, com ampliação de 100X. (Adaptado ISO 945: 2008)**

Os outros constituintes estruturais são: ferrita, cementita, perlita, ledeburita e a steadita.

**Ferrita** é a solução sólida do carbono em ferro alfa, de estrutura CCC.

**Cementita** é o carboneto de ferro ( $\text{Fe}_3\text{C}$ ), de estrutura ortorrômbica e alta dureza.

**Perlita**, logo abaixo da linha  $\text{Ac}_1$  do diagrama Fe-C, toda a austenita deverá se transformar em ferrita mais cementita. Entretanto, quando o processo é relativamente rápido, fisicamente a separação se processa em forma de lâminas bastante finas, somente visíveis ao microscópio com elevadas ampliações. Tal estrutura, ferrita e cementita em forma laminar, é chamada de perlita.

**Ledeburita** ocorre nos ferros fundidos brancos e é um constituinte formado de pequenos glóbulos de perlita, sobre um fundo de cementita; por isso, apresenta elevada dureza.

**Steadita** é um constituinte de natureza eutética, compreendendo partículas de fosfeto de ferro ( $\text{Fe}_3\text{P}$ ) e carboneto de ferro ( $\text{Fe}_3\text{C}$ ), com baixo ponto de fusão (inferior a  $980^\circ\text{C}$ ). Ocorre em áreas interdendríticas, formando uma segregação, pois essas áreas são as últimas que solidificam. A steadita ocorre quando a quantidade de fósforo presente é superior a 0,15% e tem como característica ser dura e frágil (CHIAVERINI 2005).

## 2.2.5 Classificação dos Ferros Fundidos

Existem vários tipos de ferro fundido, cada um apresentando características bem distintas. Um estudo da aplicação, as propriedades mecânicas desejadas são fundamentais para a escolha correta do tipo de ferro fundido a ser empregado.

Os tipos mais comuns de ferro fundido são, segundo Callister (CALLISTER 2007):

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

A Tabela 2.1 apresenta as principais características de cada tipo de ferro fundido.

**Tabela 2.1 - Comparativo das principais características dos ferros fundidos.(CALLISTER 2007)**

Classe	Composição	Estrutura	Propriedades Mecânicas		
			Resistência a Tração [MPa]	Resistência ao Escoamento [MPa]	Ductilidade [%EL em 50mm]
<b>Ferro Fundido Cinzento</b>					
SAE G1800	3,4-3,7 C 2,55Si 0,7Mn	Ferrita + Perlita	124	-	-
SAE G2500	3,2-3,5 C 2,2 Si 0,8 Mn	Ferrita + Perlita	173	-	-
SAE G400	3,0-3,3 C 2,0 Si 0,8 Mn	Perlita	276	-	-
<b>Ferro Fundido Nodular</b>					
ASTM A536 60-40-18 100-70-03 120-90-02	3,5 - 3,8 C 2,0 - 2,8 Si 0,05 Mg < 0,2 Ni 0,10 Mo	Ferrita	414	276	18
		Perlita	689	483	3
		Martensita Temperada	827	621	2
<b>Ferro Fundido Maleável</b>					
32510	2,3 - 2,7 C 1,0 - 1,75 Si < 0,55 Mg	Ferrita	345	224	10
45006	2,4 - 2,7 C 1,25-1,55 Si < 0,55 Mn	Ferrita e Perlita	448	310	6
<b>Ferro Fundido Grafita Compactada</b>					
ASTM A842 Classe 250 Classe 450	3,1-4,0 C 1,7-3,0 Si 0,015-0,035 Mg 0,06-0,13 Ti	Ferrita	250	175	3
		Perlita	450	315	1

### 2.3 Ferro Fundido Cinzento

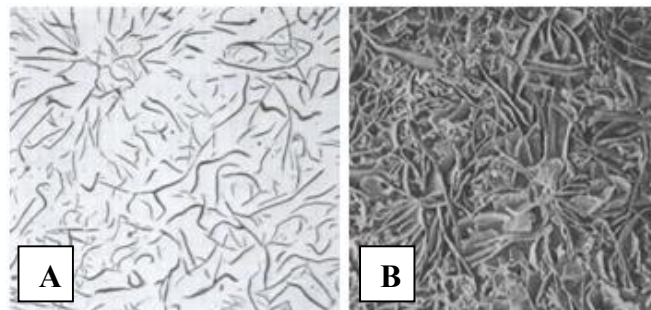
Apresenta-se microestruturalmente com carbono na forma livre, grafita, em morfologia de lamelas e carbono na forma combinada, cementita ( $\text{Fe}_3\text{C}$ ).

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

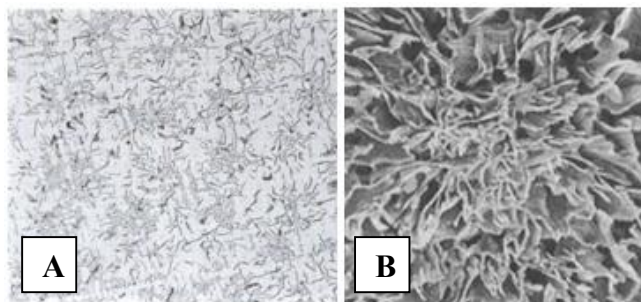
- 2,00 a 4,00 %C;
- 1,00 a 3,00 %Si;
- 0,3 a 1,00 %Mn;
- 0,10 a 1,00 %S; e
- 0,05 a 0,25 %P.

A definição técnica desta liga é dada pelas normas ASTM A247: 2006, JIS G5502: 2001 e ISO 945: 2008, que classificam a liga pelo tipo e forma da grafita.

Conforme a norma ISO 945, 2008 o ferro fundido cinzento pode ser classificado por Tipo, Forma e Tamanho. Tipo de A a E e com Forma I, III e IV que são típicas dos ferros fundidos cinzento, conforme alguns exemplos nas Figura 2.12 e Figura 2.13.



**Figura 2.12 - Ferro fundido cinzento Tipo A – Forma I. (A) Grafita Tipo A - Forma I segundo ISO 945: 2008. (B) Microscopia Eletrônica de Varredura do ferro fundido cinzento após ataque profundo. (Adaptado de STEFANECUS 1988)**



**Figura 2.13 - Ferro fundido cinzento Tipo B – Forma II. (A) Grafita Tipo B - Forma II segundo ISO 945: 2008. (B) Microscopia Eletrônica de Varredura do ferro fundido cinzento após ataque profundo. (Adaptado de STEFANECUS 1988)**

O ferro fundido cinzento tem ductilidade quase desprezível devido a presença das lamelas de grafita. Por outro lado tem capacidade excelente absorver energia de vibração. Em termos de engenharia, sua capacidade de amortecimento é alta, o que permite a este tipo de metal largas aplicações (VAN VLACK 1984).

Dentre os ferros fundidos, o ferro fundido cinzento é a liga mais utilizada, devido suas características de (CHIAVERINI 2005):

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

A classificação dos ferros fundidos cinzento foi desenvolvida por diversas instituições nacionais e internacionais objetivando, assim, o estabelecimento de padrões mínimos de qualidade e redução de custos.

Diversas instituições como SAE, ASTM, ISO, VDG desenvolveram e publicaram normas em termos do limite de resistência a tração e/ou dureza. Atualmente os países se unem para produzir normas internacionais, como as normas européias e as normas ISO, facilitando assim o comércio internacional.

Segundo as normas ABNT NBR 6589: 1986 (antiga EB126) e DIN 1691, os ferros fundidos cinzentos são designados por FC (ABNT) ou GG (DIN), seguidos dos algarismos representativos do limite mínimo de resistência à tração em MPa. Nestas normas estão previstas classes desde FC - 100 (LR = 100 a 150 MPa) até FC - 400 (LR = 400 a 500MPa).

As classes FC-100 e FC-150 correspondem aos ferros fundidos cinzentos comuns, com excelente fundibilidade e melhor usinabilidade.

A classe FC-100 é empregada principalmente para aplicações envolvendo choque térmico ou ainda alta capacidade de amortecimento de vibração (GUESSER 2009).

A classe FC-150 apresenta alta capacidade de amortecimento de vibração. É utilizada, entre outras aplicações, em bases de máquinas, carcaças metálicas e aplicações semelhantes (SILVA 2007).

As classes FC-200 e FC-250, reconhecidas por possuir boa fundibilidade e usinabilidade, apresentam melhor resistência mecânica e são aplicadas principalmente em elementos estruturais, tais como barramentos, cabeçotes e mesas de máquinas operatrizes.



Os blocos de motores normalmente são especificados na classe FC - 250 (GUESSER 2009).

As classes FC-300, FC-350 e FC-400, com maiores dureza e resistência mecânica, são empregadas para aplicações mais específicas, como alguns eixos de comando de válvulas, engrenagens, pequenos virabrequins, bases pesadas de máquinas, colunas de máquinas, buchas e grandes blocos de motor.

A classe FC-400 é a classe de uso comercial que possui a maior resistência mecânica apresentando, para essa finalidade, combinação dos elementos de liga, entre eles, níquel, cromo e molibdênio. Como possui elevada tendência ao coquilhamento (sistema de resfriamento em moldes nas condições apropriadas que reduz o efeito da grafitização), sua utilização é limitada a peças de espessuras médias e grossas.

A norma européia EN 1561: 1997 deu origem a norma ISO185: 2005, de modo que elas são muito semelhantes. Nestas normas também estão previstas classes de ferro fundido cinzento de acordo com o limite de resistência e dureza.

A Tabela 2.2 mostra a classe EN que corresponde às classes ISO e suas especificações.

**Tabela 2.2 - Classes ferro fundido cinzento, adaptado a normas EN 1561:1997 e ISO 185:2005 espessura de referência 10-20 mm.**

<i>Classe da norma EN 1561:1997</i>	<i>Resistência a Tração [MPa] mín</i>	<i>Classe na Norma ISO 185:2005</i>
EN-GJL-100	100	ISO 185/JL/100
EN-GJV-150	130	ISO 185/JL/150
EN-GJV-200	180	ISO 185/JL/200
EN-GJV-250	225	ISO 185/JL/250
EN-GJV-300	270	ISO 185/JL/300
EN-GJV-350	315	ISO 185/JL/350

## 2.4 Ferro Fundido Vermicular

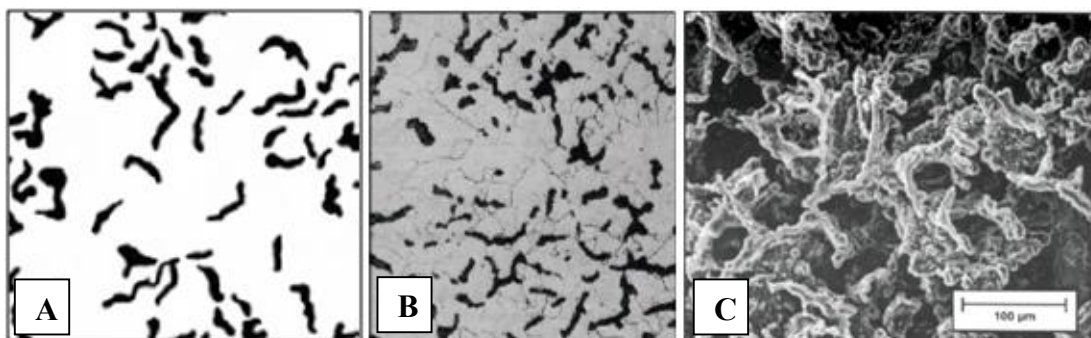
O ferro fundido vermicular, também denominado como CGI – “Compacted Graphite Iron” é conhecido desde a década de 40, quando foi produzido inadvertidamente como um resultado de insuficientes níveis de terras raras (cério e magnésio) para a produção de ferro fundido nodular. Entretanto somente após 1965 que o ferro fundido vermicular ocupou lugar na família dos ferros fundidos como um material com propriedades distintas requerendo uma tecnologia para fabricação (METALS VOL.15 1988).

O ferro fundido vermicular contém tipicamente 2,0 – 2,4% de silício, juntamente com adição intencional de estabilizadores de perlita para conseguir o nível desejado desta. Entretanto, se os estabilizadores de perlita são reduzidos ao teor residual e o teor de silício é aumentado para 3,0% ou mais, vermicular terá uma matriz predominantemente ferrítica (DAWSON 2001) e o carbono se deslocará da matriz para as grafitas.

A grande diferença de composição química entre ferro fundido cinzento e vermicular está na quantidade de magnésio. No ferro fundido vermicular o elemento deve ser mantido numa faixa muito estreita entre 0,015 - 0,035% (CALLISTER 2007) 0,008 - 0,016% (DAWSON 1999) 0,010 - 0,016 (EN1560 e W50) é nesta faixa que se consegue as propriedades requeridas, já ferro fundido cinzento não há este elemento ou a quantidade é residual.

A definição técnica desta liga é dada pelas normas ASTM A247: 2006, JIS G5502: 2001 e ISO 945: 2008, que classificam a liga pelo tipo e forma da grafita.

De acordo com a norma ISO 945: 2008, conforme Figura 2.14 o ferro fundido vermicular pode ser classificado como Tipo III.



**Figura 2.14 - 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. (Adaptado de GUESSER 2002)**

A formação de grafita no ferro fundido vermicular é determinada principalmente pela adição de elementos anti-nodularizantes, tamanho da seção e taxa de resfriamento do fundido. Estes fatores interagem entre si e afetam o resultado da estrutura da matriz (SHY 1999).

#### 2.4.1 Classificação

A classificação dos ferros fundidos vermiculares (FV) foi desenvolvida por diversas instituições nacionais e internacionais como SAE, ASTM, ISO, VDG que desenvolveram e publicaram normas em termos do limite de resistência a tração e microestrutura expressa em termos de nodularidade.

Em 2006 a ISO determinou para o ferro fundido vermicular a abreviação “GJV” e cinco classes baseadas no limite mínimo de resistência a tração (DAWSON 2007):

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

A norma alemã VDG W50, trata-se de uma norma da associação dos fundidores alemães que apresenta as propriedades mecânicas dos GJV da classe 300 a 500, conforme Tabela 2.3.

**Tabela 2.3 - Classes ferro fundido vermicular de acordo com a norma VDG W50: 2002. (Adaptado de GUESSER 2009)**

<i>Classe</i>	<i>Resistência a Tração [MPa]</i>	<i>Resistência ao Escoamento [MPa]</i>	<i>E [%]</i>	<i>HB 30 (resultados típicos)</i>
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

#### 2.4.2 Método de Fabricação

Nos mais de cinquenta anos decorridos desde a sua descoberta, a comercialização do ferro fundido vermicular foi limitada pela falta de habilidade e alto custo em controlar

um processo industrial que assegurasse a obtenção da morfologia da sua grafita obtida nos laboratórios de pesquisa.

Muitos métodos foram estudados e desenvolvidos para garantir a obtenção do ferro fundido, mas apenas dois exibiram resultados positivos para a utilização em escala industrial.

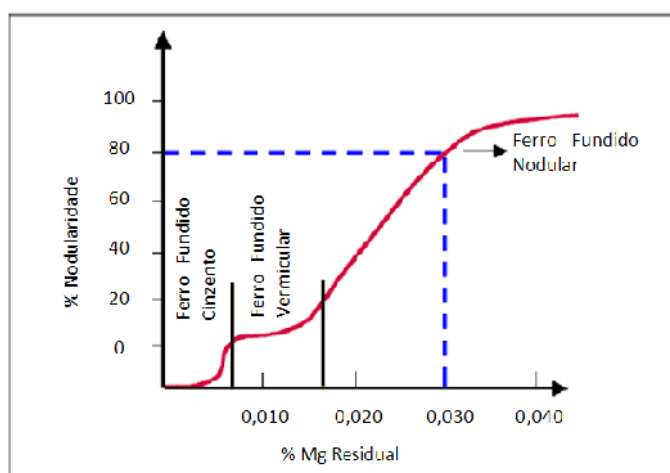
As maneiras de obtenção do ferro fundido vermicular são processos intermediários entre os processos de obtenção do ferro fundido cinzento e do nodular (MOCELLIN 2002). São eles:

- Adicionando a liga elementos nodularizantes como magnésio, porém em uma concentração insuficiente para formar ferro fundido nodular, resultando em material intermediário.

- Adicionando elementos nodularizantes suficientes para formar o ferro fundido nodular, ao mesmo tempo, elementos anti nodularizantes como titânio.

A primeira alternativa requer método mais criterioso de fabricação, utilizando equipamentos especiais que garantam a composição química adequada (DAWSON 1994).

Embora o atual tamanho e localização da curva para CGI estável seja diferente para cada produto, esta geralmente se estende entre 0,008 e 0,016% de magnésio, como mostrado na Figura 2.15.



**Figura 2.15 - Curva S: Percentual de nodularidade em função da porcentagem de Mg residual. (Adaptado a DAWSON 1999)**

Na prática, a faixa usual de magnésio é bem menor. A porcentagem de magnésio residual não deve ser muito próxima ao limite superior da faixa estável do CGI a fim de minimizar a formação de grafita nodular em seções finas no resfriamento rápido (DAWSON 2004).

O magnésio tem afinidade com o elemento enxofre, logo, se não houver um procedimento de dessulfuração da liga, o magnésio presente tenderá a formar sulfeto, o que impede que ele tenha o efeito que se deseja na liga de CGI (GEORGIOU 2002).

O primeiro método exige uma grande habilidade para medir o comportamento do metal líquido após a adição do magnésio e controle da solidificação com interferência no processo anterior ao vazamento.

Pode-se dizer que a segunda alternativa é mais facilmente realizável, pois não exige um controle tão rigoroso da quantidade de magnésio na liga. Porém implica em uma adição de titânio, o qual tenderá a formar carbonetos e carbonitreto duros que comprometem a usinabilidade (GUESSER 2001, DAWSON 1994).

Historicamente grandes quantidades de titânio foram usadas para prevenir a formação de grafita nodular e assim aumentar a faixa estável do magnésio para produção de CGI. O teor de titânio tipicamente presente nos ferros fundido é na faixa de 0,005% - 0,02%. Teores acima de 0,02% são adicionados intencionalmente, conforme representado na Tabela 2.4 (DAWSON 2001):

**Tabela 2.4 - Teor de titânio no CGI. (Adaptado de DAWSON 2001)**

<i>% Ti</i>	<i>Explicação Metalúrgica</i>
0,005 – 0,02	Típico teor residual.
0,04 – 0,07	Adição intencional para melhorar a resistência ao desgaste.
0,10 – 0,25	Adição intencional para aumentar a produção estável do CGI.

A Tupy Fundições utiliza o método SinterCast Process que possui um grande controle do Mg evitando utilizar o método de aplicação de Ti (DAWSON 1994).

Outros cuidados como teor de carbono (C), enxofre (S), silício (Si), velocidade de resfriamento, espessura das paredes entre outros são necessários para produção do ferro fundido vermicular (DAWSON 1994).

Características como tipo de processo de moldagem, a rigidez e compactação do molde, o tipo e composição da areia utilizada na confecção do molde e machos, tempo de desmoldagem disponível para a linha de produção, características do metal base, composição química, tratamentos de nodularização - inoculação e forma de vazamento (manual e automático), são algumas variáveis que podem alterar completamente as características do fundido (ROSA 2009).

O ferro fundido vermicular apresenta desvantagens para o processo de fundição e usinagem. As propriedades por ele apresentada promovem aumentos no desgaste da

ferramenta na operação de usinagem. A vida útil da ferramenta de usinagem de um vermicular é aproximadamente a metade de um cinzento (DAWSON 1999).

## 2.5 Propriedades do Ferro Fundido Cinzento x Vermicular

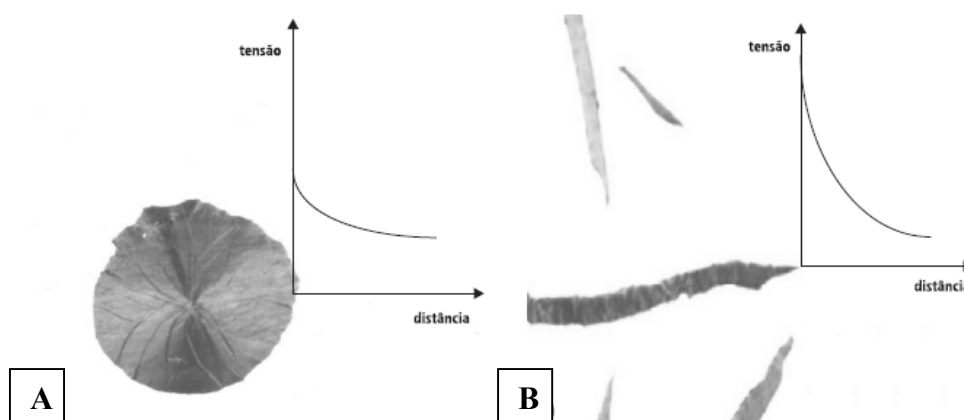
Os componentes e fases presentes nos ferros fundidos estão diretamente relacionados com as propriedades mecânicas.

Durante a solidificação do Fe-C, aproximadamente a 725°C, o material passa da forma de austenita para ferrita ou perlita. Se a velocidade de resfriamento for lenta o suficiente e as condições químicas favoráveis, os átomos de carbono migram para formar partículas de grafita. No entanto, se os átomos não conseguirem sair da matriz ocorrerá a formação de perlita, constituída por uma estrutura lamelar de ferrita e cementita ( $Fe_3C$ ), que reforçam a matriz tornando-a mais dura e resistente (DAWSON 2001).

A razão perlita/ferrita é outro fator determinante na resistência mecânica do material. Um aumento de 15% para 95% de perlita no ferro fundido vermicular mantendo as demais variáveis inalteradas, induz a um aumento de tensão limite de resistência de 300MPa para 480MPa, que dificulta a usinagem (DAWSON 1999).

A forma da grafita determina o tipo de ferro fundido e influencia diretamente nas propriedades do material.

A grafita possui resistência mecânica muito baixa (GOODRICH 2003), de modo que, sob o enfoque de propriedade mecânica sua presença pode ser entendida como uma descontinuidade na matriz, exercendo um efeito de concentração de tensões, conforme pode ser verificado na Figura 2.16.



**Figura 2.16 - Forma da grafita como efeito de concentrador de tensões. (A) Ferro fundido nodular 400X sem ataque. (B) Ferro fundido cinzento 200X sem ataque. (Adaptado a GUESSER 2009)**

No ferro fundido nodular (ou dúctil), a grafita apresenta-se sob a forma esférica ou conhecida como nódulos (WARRICK 1999). As grafitas em forma de nódulos acarretam menor efeito de concentração de tensões, o que confere ao material maior resistência mecânica, ductilidade e tenacidade. Como desvantagens pode-se citar: a menor condutividade térmica da liga em virtude das grafitas presentes não se mostrarem conectadas, menor capacidade de amortecimento e pior usinabilidade quando comparado ao ferro fundido cinzento e vermicular (XAVIER 2003).

No ferro fundido cinzento, a grafita está presente na forma de lamelas, com cantos agudos e superfícies lisas distribuídas aleatoriamente. As lamelas de grafita funcionam como entalhes internos e resultam num material com praticamente nenhum alongamento e baixa resistência a tração. Entretanto influenciam positivamente na capacidade de amortecimento e na usinabilidade.

Já no ferro fundido vermicular a grafita é alongada e possui extremidades arredondadas, o que segundo Colpaert (COLPAERT 2008) inibe a iniciação e crescimento de trincas aumentando a resistência a tração, ductilidade, resistência mecânica e rigidez quando comparado ao ferro fundido cinzento. Todavia, quando comparado ao ferro fundido nodular o vermicular ainda apresenta valores inferiores nas mesmas propriedades.

Comparado aos tradicionais ferros fundidos com grafita lamelar atualmente utilizado, o ferro fundido vermicular (FV) apresentam incrementos de 35 a 40% no módulo de elasticidade, 75% no limite de resistência e o dobro de resistência à fadiga (GUESSER 2002).

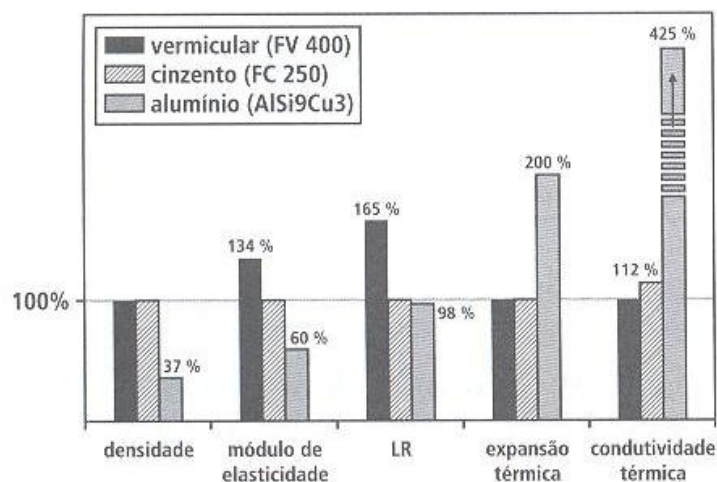
A Tabela 2.5 apresenta algumas propriedades relativas ao ferro fundido cinzento perlítico, vermicular e nodular.

**Tabela 2.5 - Propriedades ferro fundido cinzento, vermicular e nodular. (Adaptado de DAWSON 2001)**

<i>Propriedades</i>	<i>Cinzento</i>	<i>Vermicular</i>	<i>Nodular</i>
Resistência à Tração (MPa)	250	450	750
Módulo de Elasticidade (GPa)	105	145	160
Resistência a Fadiga (MPa)	110	200	250
Condutividade Térmica (W/(mK))	48	37	28
Dureza (HB)	179-202	217-241	217-255
Capacidade de amortecimento relativa	1,0	0,35	0,22

Conforme pode se perceber pela Tabela 2.5, o ferro fundido vermicular possui propriedades intermediárias entre o ferro fundido cinzento e nodular.

A Figura 2.17 apresenta um gráfico comparativo entre propriedades de materiais utilizados em blocos de motores ferro fundido vermicular (FV 400), ferro fundido cinzento (FC 250) e Alumínio (AlSi9Cu3).



**Figura 2.17 - Comparação entre propriedades dos materiais para bloco de motores. (Adaptado a BICK 2003)**

O ferro fundido vermicular com as propriedades apresentadas, é utilizado na fabricação de moldes de lingote, cabeçotes e bloco de motores de combustão, coletores e discos de freios, entre outros componentes (STEFANESCU 1988).

A microestrutura do ferro fundido vermicular pode ser especificada com elevada variação nas propriedades (DAWSON 2004). Na fabricação de cabeçotes e bloco de motores normalmente utiliza-se matriz perlítica ou matriz intermediária ferrítica - perlítica, dentro do intervalo de 60-80% de perlita com o objetivo de aumentar a rigidez dos blocos e cabeçotes e, conseqüentemente, conseguir obter redução de massa (BRETAS 2009).

Na sua estrutura o ferro fundido vermicular inclui algumas partículas (esferoidais) de grafita nodular. Quando a nodularidade aumenta, eleva-se também resistência mecânica e rigidez diminuindo a usinabilidade e a condutividade térmica (DAWSON 2007).

No caso de blocos e cabeçotes, devido a complexidade geométrica e necessidade de uma alimentação perfeita, combinadas com as severas solicitações térmicas e mecânicas, exigem que a microestrutura contenha no máximo 20% de grafita na forma nodular (GUESSER 2002).

A limitação da percentagem de nódulos é devido a diminuição da usinabilidade, aumento da tendência a rechupes e diminuição do amortecimento a vibrações causado pelo



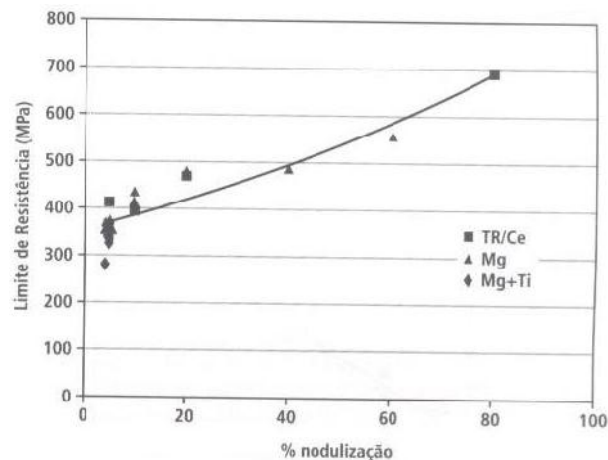
aumento do percentual de nódulos (GUESSER 2009). Deste modo a percentagem de grafita nodular presente no ferro fundido vermicular é sempre um parâmetro importante na microestrutura.

A Tabela 2.6 mostra a influência da nodularidade nas propriedades físicas e mecânicas nos ferros fundidos vermiculares.

**Tabela 2.6 - Propriedades ferro fundido vermicular x nodularidade.(SINTERCAST 1999)**

<i>Propriedades a 25°C</i>	<i>Nodularidade (%)</i>				
	<i>10</i>	<i>30</i>	<i>50</i>	<i>70</i>	<i>90</i>
Resistência à Tração (MPa)	450	520	590	640	700
Limite de Elasticidade 0,2% (MPa)	370	390	410	440	490
Limite de Fadiga (MPa)	210	220	230	240	255
Módulo de Elasticidade (GPa)	145	150	155	155	160
Alongamento (%)	1-2	1-3	2-4	2-5	2-5
Expansão Térmica ( $\mu\text{m}/\text{mK}$ )	11,0	11,0	11,0	11,5	12,0
Condutividade Térmica ( $\text{W}/(\text{mK})$ )	36	33	31	30	28

A atenção a esta característica propicia a otimização dos processos de fabricação de blocos e cabeçotes de motores, como por exemplo, a redução de espessuras, redução de fraturas frágeis, maior resistência mecânica, menor profundidade das roscas, entre outros. Como pode ser visto na Figura 2.18, o efeito da quantidade de grafita nodular no ferro fundido vermicular influencia diretamente sobre o limite de resistência.



**Figura 2.18 - Efeito da quantidade de grafita nodular sobre o limite de resistência. (Adaptado a HORSFALL e SERGEANT 1983)**

## 2.6 Fadiga

### 2.6.1 Aspectos gerais da Fadiga

Os materiais solicitados por carregamento estático, após o limite de escoamento, iniciam o processo de deformação plástica e, com a continuidade do carregamento, podem sofrer colapso mecânico. No entanto, a maior parte dos materiais em engenharia é submetida a carregamentos cíclicos. Esses materiais podem fraturar, nessas condições, a uma tensão inferior ao limite de escoamento e ao limite de resistência. Este processo de dano e fratura devido a carregamentos cíclicos é denominado fadiga (DOWLING 1998).

A norma ASTM E 1150-87 (1993) define fadiga como “o processo de mudança estrutural permanente, progressiva e localizada, produzida por tensões ou deformações flutuantes em algum ponto do material, e que pode culminar em trincas ou fratura completa após um número suficiente de ciclos de carregamento”.

Para que haja fadiga é necessário à presença de um carregamento cíclico ou variável com o tempo.

A Tensão estática aplicada equivale a tensão média, simbolizada por  $\sigma_{méd}$ . As tensões máxima e mínima são simbolizadas por  $\sigma_{máx}$  e  $\sigma_{mín}$  respectivamente. A amplitude de tensão será simbolizada como  $\sigma_a$ , sendo  $\sigma_a$  a amplitude de tensão cíclica que provoca ruptura por fadiga, como ilustra a Figura 2.19 a seguir.

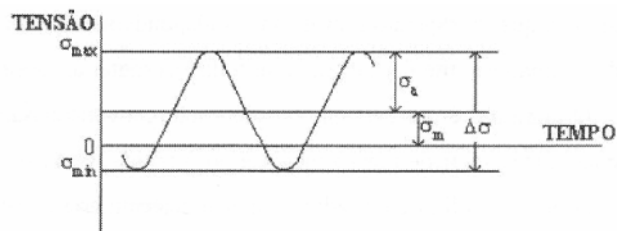


Figura 2.19 – Ciclo de tensões alternadas presentes no processo de fadiga. (Adaptado a BRANCO 1986)

A partir do ciclo de tensão observado, alguns conceitos são adotados:

$$\sigma_m = \frac{\sigma_{máx} + \sigma_{mín}}{2} \quad \text{Equação 2.2}$$

$$\sigma_a = \frac{\sigma_{máx} - \sigma_{mín}}{2} \quad \text{Equação 2.3}$$

$$\Delta\sigma = \sigma_{máx} - \sigma_{mín} \quad \text{Equação 2.4}$$

As cargas solicitantes cíclicas são geralmente classificadas em categorias, conforme Figura 2.20.

I – Carga estática, cujo valor permanece constante ao longo do tempo ou apresenta variação lenta que o efeito de massa pode ser considerado desprezível.

II – Carga repetida, cujo valor varia periodicamente, entre um máximo e zero. A tensão média é igual a tensão alternante e a metade da tensão máxima.

III – Carga alternante (ou cíclica pura), cujo valor varia periodicamente, entre um máximo positivo e um negativo, simétrico em relação ao eixo do tempo. A tensão média neste tipo é nula.

IV – Carga Flutuante é o caso geral de carga dinâmica que pode ser estudado como a combinação dos casos I e III de carga.

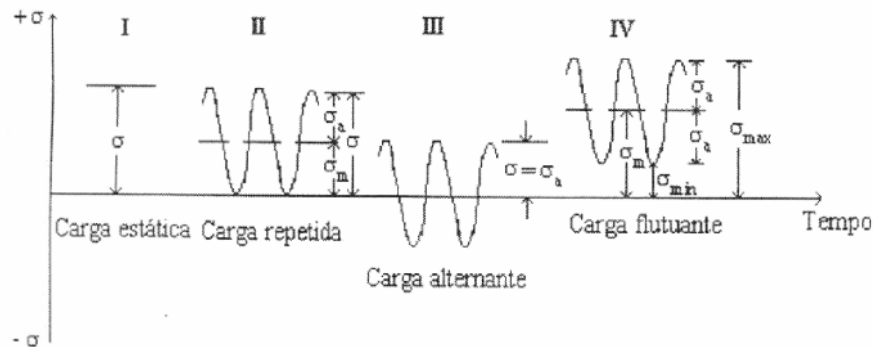


Figura 2.20 - Tipos característicos de carregamento. (Adaptado a BRANCO 1986)

O processo de fadiga consiste em três etapas (estágios): nucleação (iniciação) da trinca, propagação da trinca e colapso da estrutura.

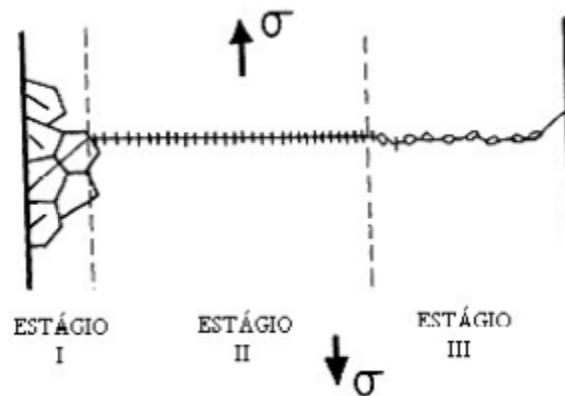


Figura 2.21- Estágios de propagação de fadiga. (Adaptado a SALERMO 2003)

### **Estágio I – Nucleação da Fadiga**

Abrange o período de nucleação da falha, onde a iniciação ocorre devido à máxima tensão principal de cisalhamento a 45° com a tensão principal de tração aplicada.

Segundo De Marco Filho (DE MARCO FILHO 2002), o processo de iniciação de fadiga do material é “quase essencialmente” superficial, mediante deslizamento dos planos cristalográficos, raramente com ocorrência no interior do mesmo. O autor também menciona que esta etapa de nucleação “é aquela que consome a maior parte da vida da estrutura ou do elemento mecânico”.

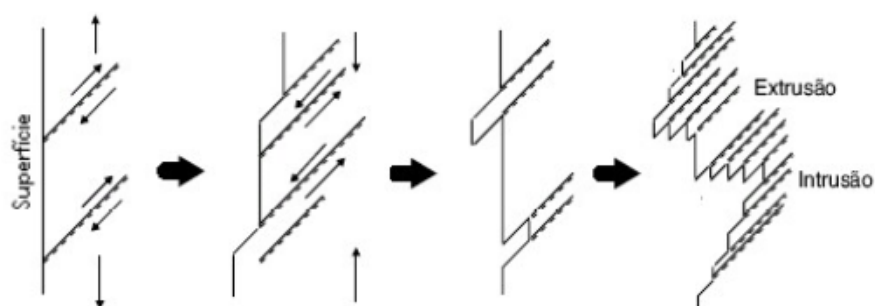
Evidências experimentais revelam que as trincas de fadiga iniciam-se numa região extremamente pequena – menor que 0,5µm (LIN 1986).

Existem várias teorias que explicam o processo de nucleação das trincas de fadiga baseadas em modelos computacionais, além de modelos de discordância e deslizamento (BHAT e FINE 2001).

A nucleação de trincas ocorre em pontos de concentração de tensões, como, por exemplo, locais não homogêneos, defeitos, inclusões e pontos de variação abrupta da estrutura.

Quando se aplica tensão alternada, o deslizamento das discordâncias nos planos de escorregamento é responsável pela criação de bandas de deslizamentos persistentes que, empilhadas, formam extrusões e intrusões (concentradores de tensões), tornando-se locais para nucleação de trincas de fadiga. Conforme apresentado na Figura 2.22 (BELTRÃO 2005).

A trinca formada nesta etapa é produzida pela máxima tensão principal de cisalhamento. Neste estágio as trincas normalmente não são visíveis a olho nu (SHIGLEY 2005).



**Figura 2.22 - Nucleação de trincas de fadiga mediante a formação de intrusões e extrusões. (Adaptado a BELTRÃO 2005)**

## Estágio II – Propagação da Trinca

A propagação da trinca é o estágio mais característico da fadiga, é quase sempre visível a olho nu e corresponde ao crescimento da trinca num plano perpendicular à direção da tensão normal.

Em casos que a concentração de tensões produzida pela nucleação for alta o suficiente, muda a direção de  $45^\circ$  para um plano perpendicular à tensão normal principal. Desta forma a trinca passa a crescer progressivamente e com velocidade crescente na direção deste plano.

A presença de uma trinca em um corpo tensionado leva a uma redistribuição de tensões próxima a trinca, uma análise do campo de tensões a frente desta torna-se imprescindível (RICHARDS e LINDLEY 1972).

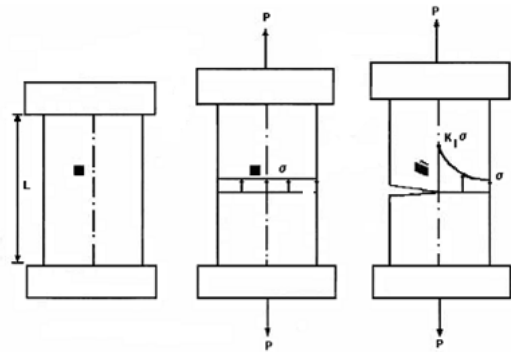


Figura 2.23 - Redistribuição de tensões próximo a trinca. (Adaptado a HERTZBERG 1989)

Um entalhe acarreta uma redistribuição de tensões, conforme pode ser verificado na Figura 2.24.

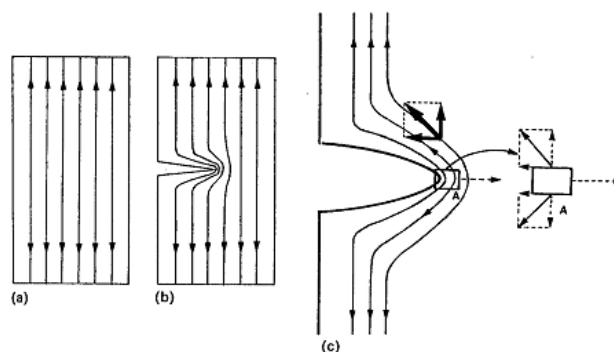
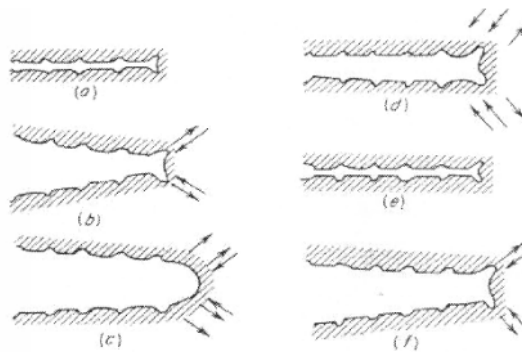


Figura 2.24 - Tendência a concentração e redistribuição de tensões devido a existência de um defeito. (a) Corpo sem entalhe. (b) corpo com entalhe. (c) Detalhe do estado triaxial de tensões na ponta do entalhe. (Adaptado a HERTZBERG 1989)

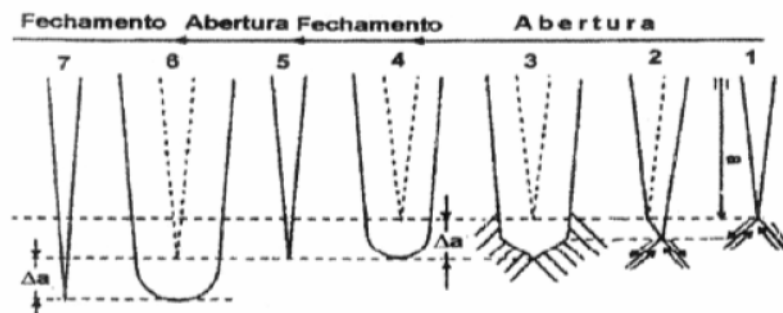
Segundo Laird (LAIRD 1979) a propagação da trinca se dá por processos sucessivos de embotamento plástico e afilamento da própria trinca, como pode ser visto na Figura 2.25. No início do carregamento cíclico a ponta da trinca apresenta a forma de

pequeno entalhe duplo (Figura 2.25 a). A medida que se aplica tensão trativa, o pequeno entalhe duplo na ponta da trinca concentra o deslizamento ao longo dos planos que fazem  $45^\circ$  com a superfície da trinca (Figura 2.25 b). Conforme a trinca alarga para sua extensão máxima – máxima tensão trativa (Figura 2.25 c), ela avança por cisalhamento plástico ao mesmo tempo em que sua ponta se torna rombuda. Quando a carga muda para compressão, as direções de deslizamento na extremidade são invertidas (Figura 2.25 d), até a formação da nova superfície de trinca afilada com entalhe duplo (Figura 2.25 e). A partir daí a ponta da trinca avança para um novo ciclo de tensões mediante a aplicação de uma tração pequena (Figura 2.25 f).



**Figura 2.25 - Mecanismo de propagação mediante embotamento e afilamento da trinca. (Adaptado a CALLISTER 2003)**

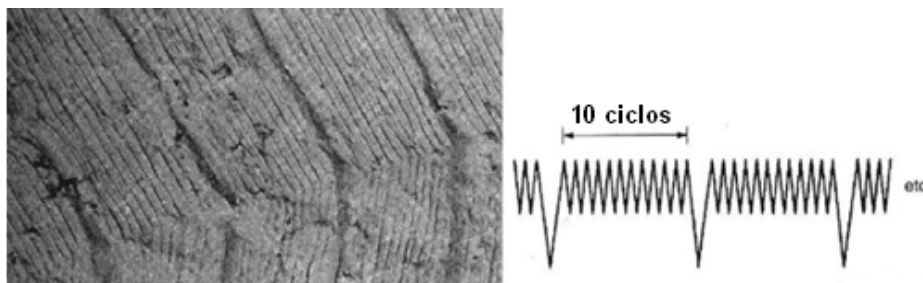
Broek (BROEK 2002) demonstra outro mecanismo onde a trinca cresce por um processo de deslizamento reverso conforme a Figura 2.26, onde a trinca submetida a um campo de tensões pode deslizar ao longo do plano de deslizamento (direção de maior tensão cisalhante) como a (Figura 2.26 (1-3)). Logo o aumento da tensão atuante promoverá a ativação de outros planos de deslizamentos devido ao encruamento o que acarreta a propagação da trinca  $\Delta a$  ver (Figura 2.26 (4)). No descarregamento, a trinca volta a ser aguda, mas a deformação plástica sofrida é irreversível como mostrado na (Figura 2.26 (5)), a partir daí o ciclo recomeça novamente ver (Figura 2.26 (6-7)).



**Figura 2.26 - Mecanismos de propagação da trinca por deslizamento reverso proposto por Broek. (BROEK 2002)**

Na segunda etapa, as trincas geralmente se propagam perpendicularmente à direção das tensões principais de modo estável, até certa extensão, geralmente com o desenvolvimento das chamadas “marcas de praia”.

As marcas de praia podem ser consideradas o mais característico aspecto da fadiga (REGULY 2001). As marcas de praia podem ser originadas através dos diferentes graus de oxidação produzidos nas sucessivas paradas para repouso do equipamento ou pela variação na amplitude ou frequência da solitação. A proporção entre a etapa de propagação e a ruptura final indica o grau de sobrecarga da peça. A posição e a quantidade dos pontos de nucleação, bem como a orientação das linhas de praia, indicam quais os tipos de carga que provocaram a fadiga.



**Figura 2.27 - Marcas de praia. (Adaptado a ASM Handbook, vol.19)**

### **Estágio III – Colapso da Estrutura**

O colapso ligado a fadiga ocorre quando a trinca atinge um tamanho crítico para o componente, acontecendo, então, a falha por colapso plástico, por propagação instável da trinca, ou por uma interação entre os dois modos mencionados (BRANCO 1985)

A superfície do material fraturado por fadiga apresenta três regiões distintas, de fácil identificação, que podem ser associadas diretamente ao processo de fadiga. O esquema de superfície de fratura de um material submetido a fadiga é apresentado na Figura 2.28 (FERREIRA 2008).



**Figura 2.28 - Estágio de propagação de trinca de fadiga. (Adaptado a FERREIRA 2008)**

## 2.6.2 Enfoques da Fadiga

O estudo de fadiga pode ser dividido em três enfoques, segundo Ferreira (FERREIRA 2008):

**a) Fadiga de alto ciclo (“Fatigue High Cycle”) ou fadiga controlada por tensões cíclicas.**

As principais características de componentes classificados dentro deste enfoque são dadas pelas equações 2.5 e 2.6 onde as curvas S-N (curvas de tensão em função do número de ciclos até a fratura) são características deste enfoque.

$$\sigma_N < \sigma_e \quad \text{Equação 2.5}$$

$$N_f > 10^3 \text{ ciclos} \quad \text{Equação 2.6}$$

Nestas equações  $\sigma_N$  é a tensão nominal (tensão aplicada no componente mecânico ou espécime),  $\sigma_e$  é o limite de escoamento do material do componente mecânico ou espécime e  $N_f$  é a vida em fadiga - números de ciclos até a fratura.

**b) Fadiga de baixo ciclo (“Fatigue Low Cycle”) ou fadiga controlada por deformações cíclicas.**

Nesse enfoque os níveis de tensão nominal, dados pela equação 2.7, são superiores ao limite de escoamento e o número de ciclos até a fratura é inferior a  $10^3$  ciclos, de acordo com a equação 2.8. As curvas  $\epsilon$ -N (curvas da deformação em função do número de ciclos até a fratura) são características fundamentais deste enfoque.

$$\sigma_N > \sigma_e \quad \text{Equação 2.7}$$

$$N_f < 10^3 \text{ ciclos} \quad \text{Equação 2.8}$$

**c) Propagação de trinca por fadiga utilizando Mecânica da Fratura.**

Neste enfoque a curva característica é a taxa de propagação da trinca ( $da/dN$ ) em função da variação do fator de intensidade de tensão ( $\Delta K$ ).

Importante ressaltar que os dois primeiros enfoques, alto e baixo ciclos, envolvem os estágios de nucleação e propagação da trinca, por isso também são designados por iniciação, por outro lado, o terceiro enfoque, propagação da trinca utilizando mecânica da fratura, envolve apenas o estágio do crescimento da trinca.

O método da mecânica da fratura assume que uma trinca já esteja presente. Dessa forma ele é empregado para prever o crescimento dessa trinca relativamente a intensidade de tensão (SHIGLEY 2005).

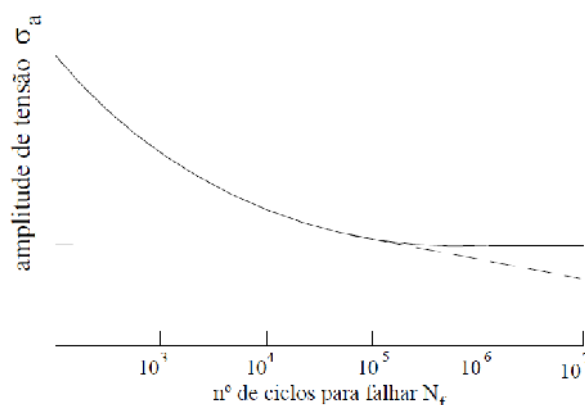


### 2.6.3 Curvas de Wohler (Curvas S-N)

Após anos de estudo August Wohler introduziu o conceito de amplitude de tensão limite (limite de fadiga) na avaliação da resistência à fadiga de estruturas. A curva de Wohler é caracterizada por um gráfico relacionando a amplitude de tensão ( $\sigma_a$ ) com números de ciclos necessários para a fratura, indicando que quanto maior a magnitude da amplitude, menor será o número de ciclos que o material será capaz de suportar antes da falha.

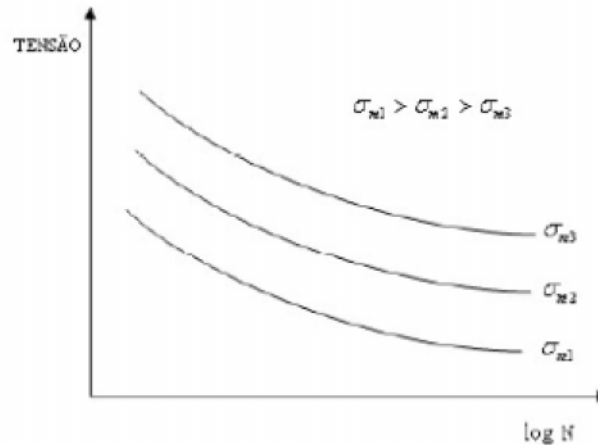
Através da observação das curvas de Wohler, pode-se perceber dois tipos de comportamentos que dependem do tipo de material. Para materiais ferrosos e ligas de titânio, a curva S-N tende a uma horizontal para um determinado número de ciclos e tensão limite, caracterizando o limite de fadiga. O limite de fadiga é a amplitude de tensão máxima a que uma estrutura pode ser submetida a infinitos ciclos de carregamento sem ocorrer rompimento por fadiga. Portanto, abaixo deste limite, o material poderia suportar infinitos ciclos sem que viesse a fraturar (SURESH 1998).

A vida infinita começa com, aproximadamente,  $10^6$  ciclos. Embora a distinção entre a vida finita e porção da vida infinita não seja sempre clara. Uma classificação de vida finita é considerada para um carregamento abaixo de  $10^7$  ciclos para materiais ferrosos (BOANIATTI 2003). Os materiais não ferrosos, como o magnésio e o alumínio não apresentam o limite de fadiga. De acordo com Dieter (DIETER 1976), para estes materiais, as propriedades de fadiga são especificadas como resistência à fadiga para um número arbitrário de ciclos, por exemplo  $10^8$  ciclos.



**Figura 2.29 - Curva típica S-N de ligas ferrosas e não ferrosas - linha contínua ferrosos e linha pontilhada não ferrosos. (Adaptado a SURESH 1998)**

O limite de fadiga do material sofre uma grande influência da tensão média, pois para uma dada amplitude de tensão, o aumento da tensão média diminuirá a vida em fadiga do material, já que será necessário uma menor quantidade de ciclos para ele falhar. Esse comportamento é verificado nas curvas S-N de Wohler, apresentadas esquematicamente abaixo na Figura 2.30 (BELTRÃO 2005).



**Figura 2.30 – Influência da tensão média no limite de fadiga. (Adaptado a BELTRÃO 2005)**

A utilização da abordagem tradicional das curvas de Wohler é amplamente utilizada, entretanto apresenta algumas limitações.

Segundo De Marco Filho (DE MARCO FILHO 2002), a curva S-N de Wohler apresenta limitações no tratamento dos dados, uma vez que não fica explícito as etapas de iniciação e propagação das trincas, acarretando dificuldades na avaliação do comportamento de estruturas que apresentam entalhes agudos ou trincas. Machado (MACHADO 2002) propõe que as curvas S-N não são apropriadas para descrever o estado físico da estrutura para um dado tempo (t). O autor menciona que é necessário uma abordagem que permita a avaliação da evolução de uma trinca ao longo do tempo.

A abordagem que adquire importância crescente no estudo da vida em fadiga de uma material está baseado na Mecânica da Fratura, cuja metodologia de análise permite:

- Medir o grau de segurança de uma estrutura em relação a fratura frágil;
- Avaliação rigorosa das variáveis envolvidas;
- Acompanhar o crescimento da trinca e mecanismos de propagação atuantes;
- Determinar quais as condições necessárias para propagação e não propagação da trinca e;
- Calcular a vida residual de um componente.

## 2.6.4 Mecânica da Fratura Aplicada a Fadiga

O segundo estágio da fadiga, a propagação da trinca, é alvo de muitos estudos e pesquisas, podendo ser equacionado por leis ditadas pela Mecânica da Fratura.

Na Mecânica da Fratura Linear Elástica, a introdução do conceito do fator de intensidade de tensões (K) é de extrema importância, pois descreve o campo de tensões nas proximidades da trinca. É definido de acordo com a equação 2.9:

$$K = Y\sigma\sqrt{\pi a} \quad \text{Equação 2.9}$$

onde:

K é o fator de intensidade de tensões (MPa $\sqrt{m}$ );

Y=f(a/W) é o fator geomérico da trinca;

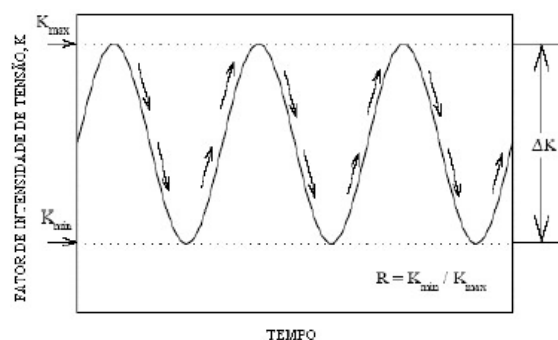
$\sigma$  é a tensão uniaxial atuante perpendicular ao plano da trinca (MPa);

a é o comprimento da trinca;

W é a largura do corpo de prova.

Durante os ciclos de fadiga, para carregamentos de amplitude constante, a variação do carregamento aplicado é responsável pela alternância na tensão entre um valor mínimo e um valor máximo, ou seja, submetendo a estrutura a uma variação de tensão constante  $\Delta\sigma$ , que em um corpo de prova trincado, corresponde à variação entre  $K_{\min}$  e um  $K_{\max}$ . A diferença entre  $K_{\min}$  e  $K_{\max}$  é denominada amplitude do fator de intensidade de tensões  $\Delta K$ .

Portanto: 
$$\Delta K = K_{\max} - K_{\min} = \Delta\sigma \cdot Y \cdot \sqrt{\pi a} \quad \text{Equação 2.10}$$

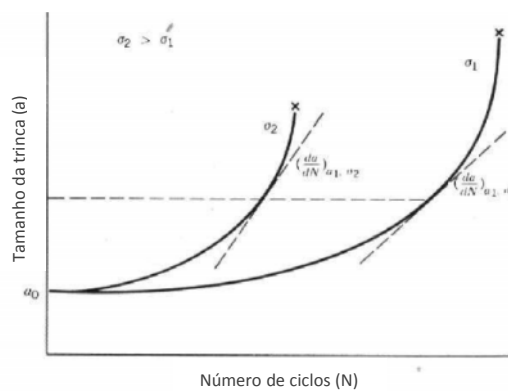


**Figura 2.31 - Esquema da amplitude do fator de intensidade de tensões ( $\Delta K$ ) em função do tempo. (Adaptado a NEWMAN 2000)**

Estudando o crescimento de trincas de fadiga Paris e Erdogan (PARIS e ERDOGAN 1963) observaram que o crescimento da trinca era em função do  $\Delta K$  que atuava na ponta da trinca. Desta forma relacionam a propagação de uma trinca por fadiga com a amplitude do fator de intensidade de tensões.

A relação entre a propagação de uma trinca por fadiga e o número de ciclos de solicitações é um importante dado de projeto para estruturas pois é possível, com isso, estimar a vida útil das estruturas, mesmo com a presença de fissuras em fase de propagação.

A Figura 2.32 é um típico gráfico que relaciona a evolução das trincas de fadiga durante o carregamento cíclico (a) com o número de ciclos (N) para dois níveis de tensões aplicadas. É possível perceber que o maior nível de tensão diminui o número de ciclos necessários para a ruptura e que a taxa de propagação é crescente com o número de ciclos de aplicação de carga (REGULY 2004).



**Figura 2.32 – Diagrama de relação entre comprimento da trinca (a) com número de ciclos (N). (Adaptado a REGULY 2004)**

O perfil das curvas apresentado na Figura 2.32 mostra claramente que a tensão aplicada é um parâmetro importante no crescimento da trinca.

Desta forma a mecânica da fratura aplicada à fadiga relaciona a taxa de propagação de trinca ( $da/dN$ ) com a amplitude do fator de intensidade de tensões  $K$ . A taxa de propagação das trincas de fadiga ( $da/dN$ ) pode ser calculada tomando a derivada de cada ponto da curva, donde pode-se verificar que  $da/dN$  depende de ( $a$ ), ou seja, o valor da taxa de propagação da trinca aumenta juntamente com o tamanho da trinca, pois o valor do fator de intensidade de tensões ( $K$ ) aumenta o valor de  $a$ .

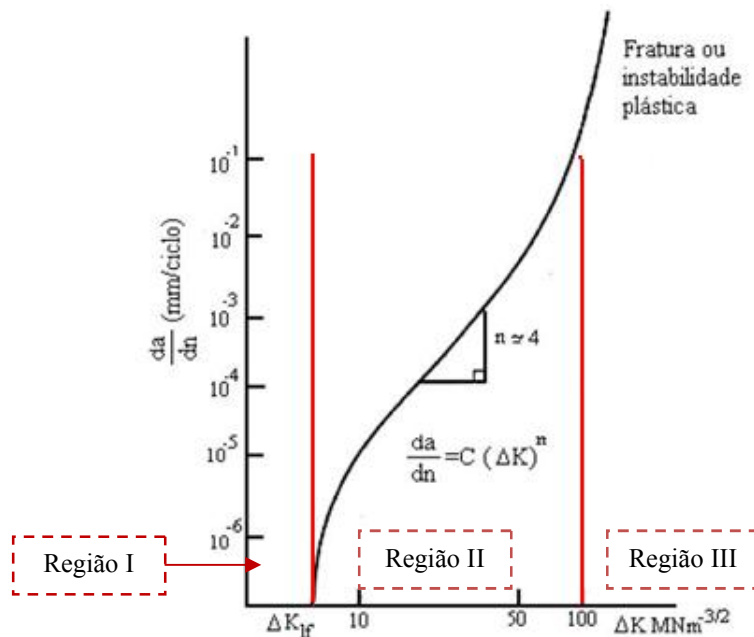
$$\frac{da}{dN} = C(\Delta K)^n \quad \text{Equação 2.11}$$

Onde:

$\frac{da}{dN}$  é a taxa de crescimento da trinca de fadiga;

$C$  e  $n$  não constantes que dependem da tensão média e das condições ambientais. Matematicamente, são os coeficientes linear e angular da reta respectivamente.

Portanto, pode-se concluir que existe uma relação entre a taxa de propagação da trinca e  $\Delta K$ . A relação entre eles é representada pela curva  $da/dN \times \Delta K$  em escala logarítmica, conforme Figura 2.33.



**Figura 2.33 - 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 ( $\Delta K$ ). (Adaptado a BRANCO 1986)**

O gráfico que representa a relação entre a curva  $da/dN \times \Delta K$  se divide em três regiões.

A região I corresponde a velocidades muito baixas de propagação, onde é possível definir um valor  $\Delta K_{th}$  (*threshold*), abaixo do qual não há propagação da trinca de fadiga. É uma região fortemente influenciada pela microestrutura do material (morfologia, dispersão de partículas de segunda fase, tamanho de grão e inclusões), tensão média e ao meio ambiente (BRAZ 1999).

A região II é aquela de maior interesse nos estudos de fadiga. Esta região é menos sensível à microestrutura, tensão média e ao meio ambiente (BRAZ 1999). É nesta etapa que se observam as estrias de fadiga e marcas de praia.

A partir da Lei de Paris e Erdogan pode-se quantificar a resistência à propagação de uma trinca pré-existente de um componente submetido a um carregamento cíclico onde  $\Delta K$  considera a geometria, nível de flutuação de carregamento e o tamanho da pré trinca. O que é altamente desejável, pois possibilita a obtenção de critérios para a seleção de materiais de uma determinada aplicação, além de poder comparar as características de fadiga no desenvolvimento de novas ligas.

Ainda na região II, a taxa de crescimento da trinca (tipicamente entre  $10^{-8}$  e  $10^{-6}$  m/ciclo) a Equação de Paris  $\frac{da}{dN} = C(\Delta K)^n$  **Equação 2.11**

A Equação 2.11 descreve bem o crescimento da trinca, o expoente  $n$  varia entre 1 e 16 dependendo do tipo de material e níveis de tensões (STROHAECKER 2006).

A tenacidade do material ( $K_C$ ) é de vital importância no estudo de um projeto, pois determina de que maneira a fissura irá se propagar ao longo da trinca.

$K \geq K_C \rightarrow$  A fissura propaga de forma instável;

$K < K_C \rightarrow$  A fissura não se propaga de forma instável.

No caso de processo de fadiga ter lugar em ambiente corrosivo, as velocidades de propagação  $da/dN$  são, em geral, mais elevadas. A relação  $da/dN \times \Delta K$  apresenta ainda dependência do valor médio da sollicitação ( $R$ ), usualmente expresso pela Equação 2.12.

$$R = \sigma_{min} / \sigma_{m\acute{a}x} \quad \text{Equação 2.12}$$

A equação de Paris (Equação 2.11) é a mais utilizada no estudo de propagação de trincas de fadiga devido sua simplicidade matemática. No entanto, apresenta algumas deficiências.

A equação de não consegue descrever a influência de fatores como tensão média, temperatura e meio ambiente na vida do elemento além de não reconhecer o efeito de  $\Delta K_{th}$  nem da tenacidade à fratura na taxa de propagação da trinca (DE MARCO FILHO 2002, MEGGIOLARO e DE CASTRO 1997).

Existem equações desenvolvidas por outros autores que incorporam parâmetros como  $\Delta K_{th}$ ,  $K_C - K_{IC}$ ,  $R$ , etc. Estas equações são utilizadas quando se pretende analisar parâmetros específicos (BONIATTI 2003):

- Lei de Walker, 1970, mostrada na Equação 2.13, considera a influência do fator  $R$  (Razão de Carregamento) na fórmula:

$$\frac{da}{dN} = C (\Delta K)^{(n+m)} \times \left(\frac{1}{1-R}\right)^n \quad \text{Equação 2.13}$$

- Lei de Forman, 1967, mostrada na Equação 2.14, considera  $K_{IC}$  ( $K_C$ ) na fórmula:

$$\frac{da}{dN} = \frac{C (\Delta K)^{(n-1)}}{\frac{K_{IC}}{K_{m\acute{a}x}} - 1} \quad \text{Equação 2.14}$$

- Lei de Priddle, 1976, mostrada na Equação 2.15, considera o  $\Delta K_{th}$ ,  $K_C - K_{IC}$  na fórmula:

$$\frac{da}{dN} = C \left(\frac{\Delta K - \Delta K_{IC}}{K_{IC} - K_{m\acute{a}x}}\right)^n \quad \text{Equação 2.15}$$

Esta região intermediária é uma das regiões mais estudadas, pois propicia os dados necessários para projeto sob a filosofia de tolerância de defeitos em estruturas.

A região III apresenta uma taxa de propagação da trinca muito elevada e vida em propagação pequena. É uma região de superposição de mecanismos de estrias e fratura monotônica (BRAZ 1999). Reflete a proximidade da propagação instável da trinca quando o valor de  $K_{m\acute{a}x}$  atinge a tenacidade à fratura (MEGGIOLARO e DE CASTRO 1997).

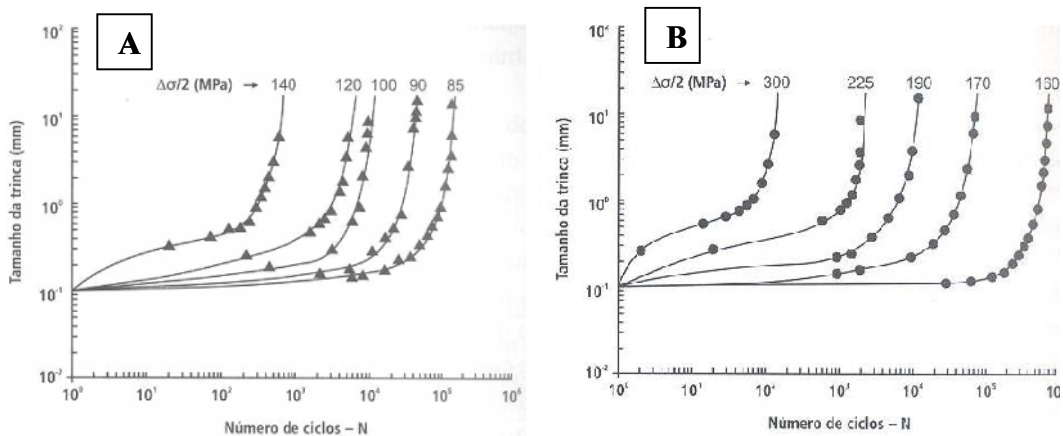
### 2.6.5 Fadiga em Ferro Fundido Cinzento x Vermicular

Os ferros fundidos vermiculares começaram a ser utilizados, para algumas aplicações tais como: coletores de exaustão e cabeçotes de motores em substituição ao ferro fundido cinzento. Nestes casos as principais propriedades mecânicas a considerar eram a resistência à fadiga térmica e resistência a altas temperaturas. Com a introdução de blocos de motores Diesel fabricados em ferro fundido vermicular a principal propriedade em questão tornou-se a resistência à fadiga (GUESSER 2009).

No processo de fratura na situação de vida finita, para ferros fundidos cinzentos, vermicular e nodular, a nucleação da trinca de fadiga está geralmente associada a grafita. Apenas em ferros fundido nodulares a nucleação ocorre junto a pequenos defeitos (SOCIE e FASH 1982, MORTSELL 2003).

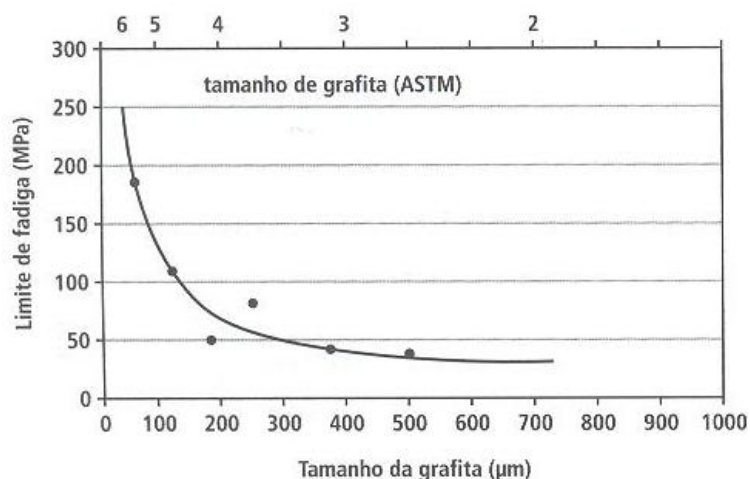
Há indícios que permitem afirmar que a etapa de nucleação de microtrincas não existe em ferro fundidos, e que o limite de fadiga é a condição na qual trincas de fadiga não conseguem propagar devido a barreiras microestruturais (MORTSELL 2003).

Socie e Fash (SOCIE e FASH 1982), apresentam resultados de crescimento de trincas no trecho de tensões correspondente a vida finita. Através deste estudo verifica-se que a maior parte da vida do componente é gasta no crescimento de microtrincas até atingir cerca de 1 a 2 mm de comprimento. A partir daí poucos ciclos são necessários até conduzir a fratura, conforme a Figura 2.34.



**Figura 2.34 - Desenvolvimento de trincas sob fadiga. (A) Ferrão fundido cinzento perlítico - LR=228 MPa. (B) Ferrão fundido vermicular - LR=438 MPa, LE=345 MPa. (Adaptado SOCIE e FASH 1982).**

No caso de ferro fundido cinzento a forma lamelar da grafita, concentrando tensões em sua extremidade, é determinante na resistência à fadiga (GUESSER 2009). Estudo realizado por Ruff e Doshi (RUFF e DOSHI 1980) demonstra o efeito do tamanho de grafita no limite de fadiga, o que pode ser verificado na Figura 2.35.



**Figura 2.35 - Efeito do tamanho da grafita lamelar no limite de fadiga em flexão rotativa. (Adaptado a RUFF e DOSHI 1980)**

Na literatura encontram-se valores de resistência à fadiga dos ferros fundidos cinzentos e vermiculares.

Na Tabela 2.7 são apresentados valores de limite de fadiga sob flexão e sob tração-compressão para ferros fundidos cinzentos das classes FC 225, 250 e 275 obtidos em corpo de prova de 30mm de diâmetro.

**Tabela 2.7 - Resistência à fadiga do ferro fundido cinzento das classes 225, 250 e 275. (Adaptado a GUESSER 2009)**

<i>Propriedade [MPa]</i>	<i>FC 225</i>	<i>FC 250</i>	<i>FC 275</i>
Resistência à Fadiga (Flexão)	105	120	130
Resistência à Fadiga (Tração - Compressão)	55	60	68

Na Tabela 2.8 são apresentados valores de limite de fadiga sob flexão e sob tração-compressão para ferros fundidos vermiculares da classe FV 450 obtidos através de corpos de prova retirados de blocos de motores (região dos mancais de apoio).



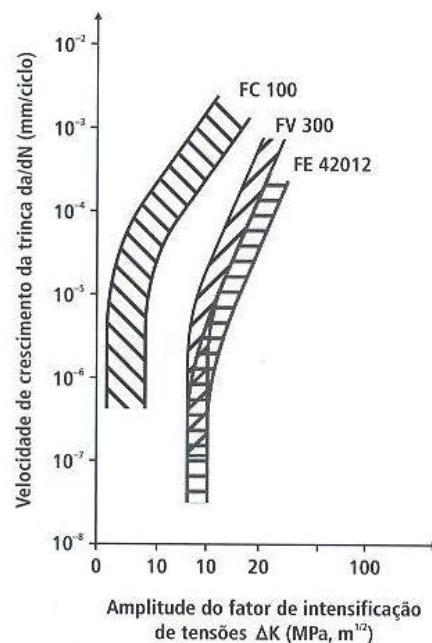
**Tabela 2.8 - Resistência à fadiga do ferro fundido vermiculares da classe FV 450.  
(Adaptado a GUESSER 2004)**

<i>Propriedade [MPa]</i>	<i>Nodularidade 15-20</i>	<i>Nodularidade 9</i>	<i>Nodularidade 2-4</i>
Resistência à Fadiga (Flexão)	200	-	-
Resistência à Fadiga (Tração - Compressão) R=-1	150	185	175

Pusch et al (PUSCH et al 1988) realizaram comparações da velocidade de crescimento da trinca entre ferro fundido ferríticos cinzento, nodular e vermicular. Foi observado que a velocidade de crescimento de trinca nos ferros fundidos cinzentos é maior que nos nodulares e vermiculares. Os parâmetros por ele utilizados podem ser visualizados na Tabela 2.9 e os resultados gráfico na Figura 2.36.

**Tabela 2.9 - Parâmetros de Equação de Paris para ferros fundidos na matriz ferrítica.  
(Adaptado a PUSCH et al 1988)**

<i>Ferro Fundido</i>	$\Delta Ko [MPa.m^{1/2}]$	<i>n</i>	<i>[mm/ciclo]</i>
Cinzento (FC 100)	3,3	2,34	$2,3 \times 10^{-6}$
Nodular (FE 42012)	8,5	4,86	$1,1 \times 10^{-10}$
Vermicular (FV 300)	9	4,71	$1,6 \times 10^{-9}$



**Figura 2.36 - Curvas comparativas para velocidade de crescimento de trincas em ferro fundidos ferríticos. (Adaptado a PUSCH et al 1988)**

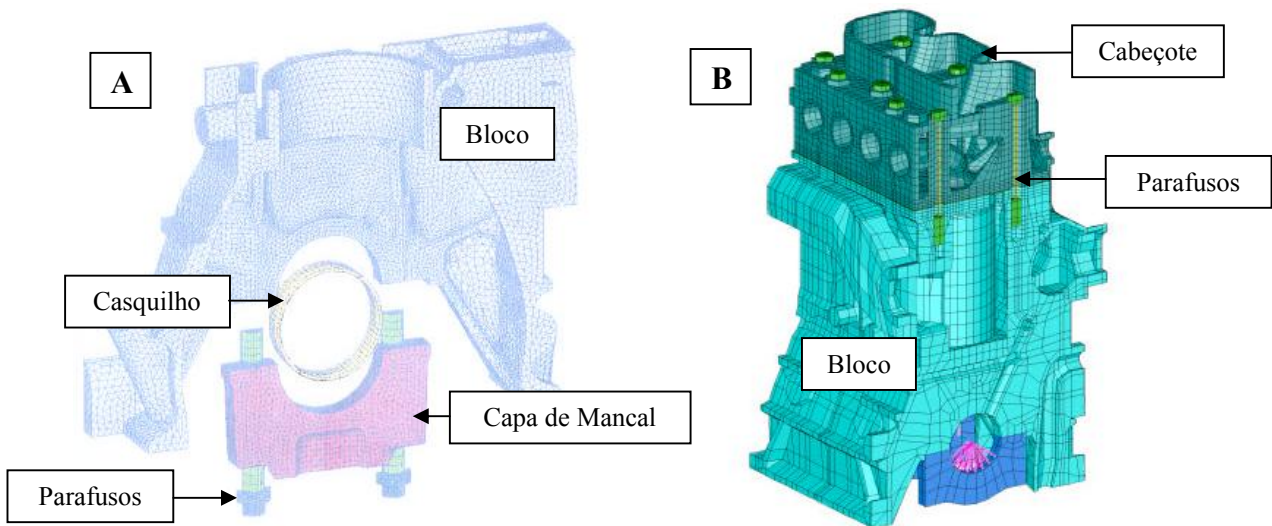
## 2.6.6 Fadiga em Blocos de Motores Diesel

No bloco de motor de combustão interna os principais esforços são gerados pelas grandes pressões decorrentes pela explosão do combustível. Os esforços gerados na explosão são transmitidos para o bloco e para o cabeçote do bloco, que tende a se separar do motor gerando assim grandes solicitações nas regiões de fixação do cabeçote ao bloco.

A transmissão do esforço gerado para o virabrequim, através do pistão e da biela, provoca esforços que tendem a separar o virabrequim do bloco, o que é suportado pela capa de mancal, sua fixação no bloco e pelos mancais de apoio.

Estas são, de um modo geral, as principais regiões solicitadas por fadiga num bloco de motor, exigindo que o material apresente bom comportamento neste tipo de solicitações, ou seja, boa resistência à fadiga.

Os detalhes das regiões podem ser verificados na Figura 2.37.

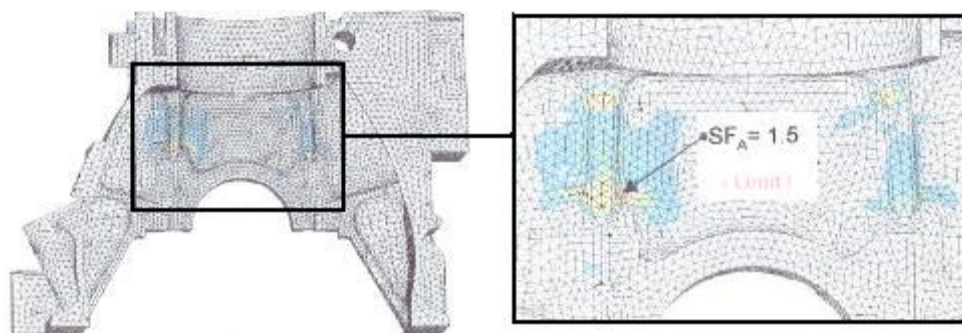


**Figura 2.37 - Principais regiões solicitadas por fadiga em um bloco de motor. (A) Paredes próximas ao mancal, local para fixação dos parafusos das capas de mancal. (Adaptado a FEV 2001). (B) Região de união do bloco com o cabeçote. (Adaptado BOFF 2003).**

O Instituto Fev Motorentechnik (FEV MOTORENTECHNIK 2001) executou uma análise estática com foco na região próxima aos mancais do bloco. Utilizou para tanto, um modelo constituído em computador composto por  $\frac{1}{4}$  do bloco, cabeçote e capa de mancal. Aplicou forças resultantes do pico de pressão, neste caso pressão máxima de  $16 \text{ N/mm}^2$ . Adicionalmente utilizou forças de montagem e teve como observações finais que:

a) A força de montagem da capa no bloco foi suficiente para evitar a separação entre as superfícies durante o funcionamento do motor.

b) Nas paredes próximas ao mancal, na linha da nervura de reforço para fixação dos parafusos das capas, foi localizada uma região crítica, segundo critérios de fadiga e conforme apresentado na Figura 2.38.



**Figura 2.38 - Análise de fadiga realizada na região dos mancais. (Adaptado a FEV 2001)**

Nos estudos realizados por Boff (BOFF 2003), através de simulações em elementos finitos em blocos de motores Diesel, ele constata que na região de fixação da capa e cabeçote o nível de tensões médias é bastante elevado, mas em termos de tensão alternantes é praticamente nulo. Por outro lado, nos arredores dos mancais há uma grande variação de tensão, gerando maiores tensões alternantes.

Neste estudo foi verificado uma das grandes vantagens do uso do ferro fundido vermicular. Com níveis de tensão e deformação bastante próximos, a diferença de mais de oitenta por cento (80%) na tensão limite de fadiga gera coeficientes de segurança altíssimos, acima de dois (2), o que pode permitir a aplicação de carregamentos mais elevados.

Baseado na literatura referenciada verifica-se um grande embasamento para utilização do ferro fundido vermicular como material alternativo para bloco de motores Diesel. Percebe-se, entretanto a necessidade de maiores estudos nesta aplicação que possibilitem comparação madura dos materiais e bases para projetos futuros.

### 3 MATERIAIS E MÉTODOS

#### 3.1 *Corpos-de-prova do Bloco*

Para a realização dos experimentos foram escolhidos, aleatoriamente, blocos de motor normais de produção fabricados pela empresa MWM International. Um bloco de ferro fundido vermicular utilizado no Motor MaxxForce 13 (Figura 3.1) e, para fins de comparação, o material tipicamente utilizado em blocos de motores, um bloco de ferro fundido cinzento utilizado no motor Acteon 6.12 TCE (Figura 3.2).

As especificações dos motores utilizados para retirada de corpo de prova do bloco encontram-se na Tabela 3.1.



**Figura 3.1 - Motor MaxxForce 13. (Fonte: MWM International)**



**Figura 3.2 - Motor Acteon 6.12 TCE. (Fonte: MWM International)**

**Tabela 3.1 - Especificação dos motores utilizados para retirada dos corpos de prova.  
(Fonte: MWM International)**

<b>Ficha Técnica</b>	<b>Ferro Fundido Vermicular</b>	<b>Ferro Fundido Cinzento</b>
Modelo do Motor	MaxxForce 13	Acteon 6.12 TCE
Configurações	6 cilindros - em linha	6 cilindros - em linha
Cilindrada	12.4 l	7,2 l
Diâmetro x Curso	126 x 166 mm	105 x 137 mm
Sistema de Combustão	Direta	Direta
Sistema de Injeção	Common Rail	Common Rail
Aspiração	Turbo Intercooler	Turbo Intercooler
Peso	1089 Kg	540 Kg

Como se pode verificar através das especificações dos motores, os blocos estudados apresentam diferente configuração, design e peso. Entretanto a comparação de material é válida, pois apresentam a mesma funcionalidade e o local de retirada do corpo de prova é semelhante.

Uma vez que o bloco de motores possui galerias internas com paredes relativamente finas foi necessário planejar o corte prévio dos componentes a fim de permitir a obtenção de corpos de prova adequados para os experimentos nas partes de maior interesse do bloco.

Os blocos de ferro fundido vermicular e cinzento foram fatiados e subdivididos com uma serra de corte automática nos locais indicados pelas Figura 3.3, Figura 3.4 e Figura 3.5.

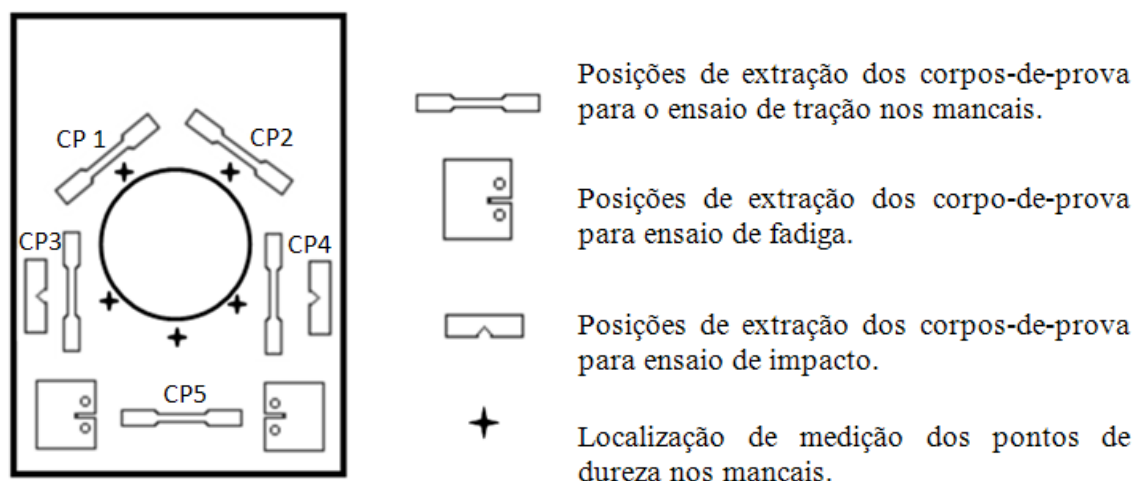
As amostras para ensaios de tração e dureza foram numeradas de 1 a 65, sendo de 1 a 30 provenientes bloco do motor e de 31 a 65 específicas da região dos 7 mancais contendo ao todo 65 corpos de prova para cada ensaio de cada bloco, conforme a Tabela 3.2.

Para ensaios de impacto e fadiga foram retiradas amostras dos 7 mancais devido a limitação de material para retirada de corpos de prova no corpo do bloco. Conforme a Figura 3.3, foram retiradas duas amostras de cada um dos sete mancais, totalizando 14 corpos de prova para cada ensaio.

**Tabela 3.2 - Locais de retirada dos corpos de prova.**

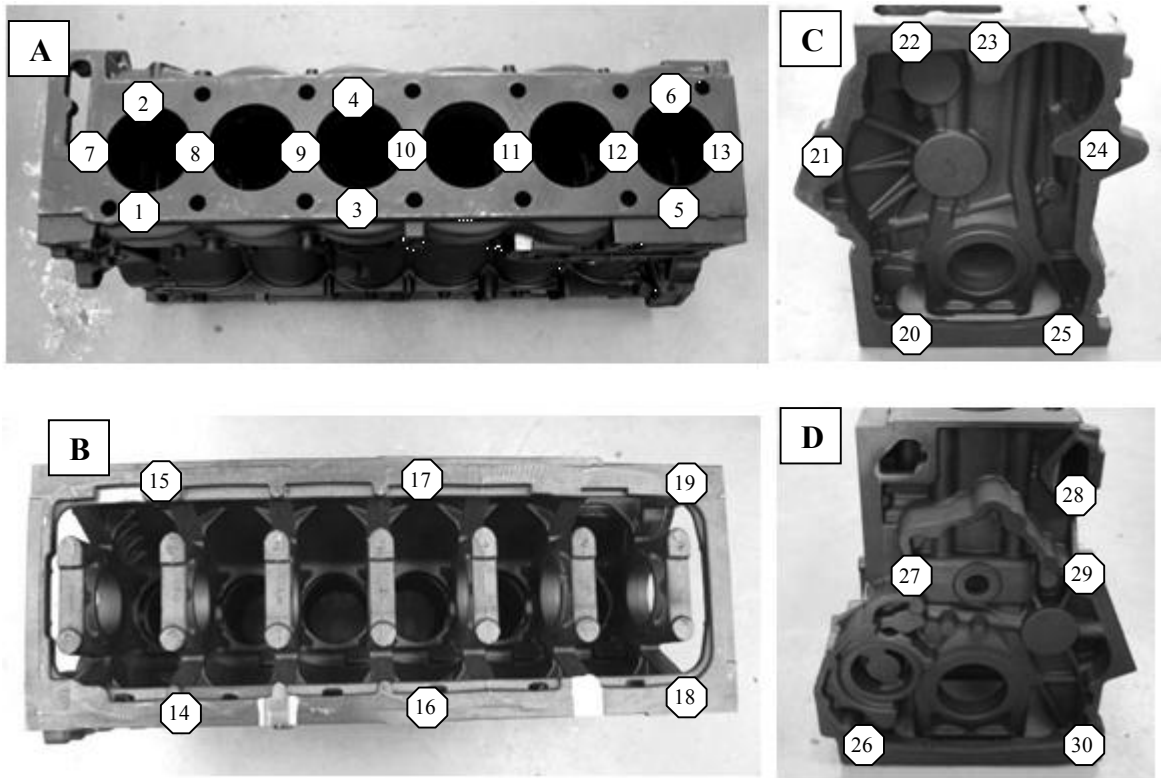
<b>Numeração corpo de prova</b>	<b>Local de estudo</b>
1-13	Face de Fogo ou Região do cabeçote
14-19	Face do Carter ou Saia
20-25	Face traseira (lado Volante)
26-30	Face dianteira (lado Damper)
31-65	Região dos Mancais

A Figura 3.3 apresenta de forma ilustrativa os locais de onde foram retirados os corpos de prova para ensaios de tração, fadiga, impacto e dureza na região dos mancais do bloco do motor.

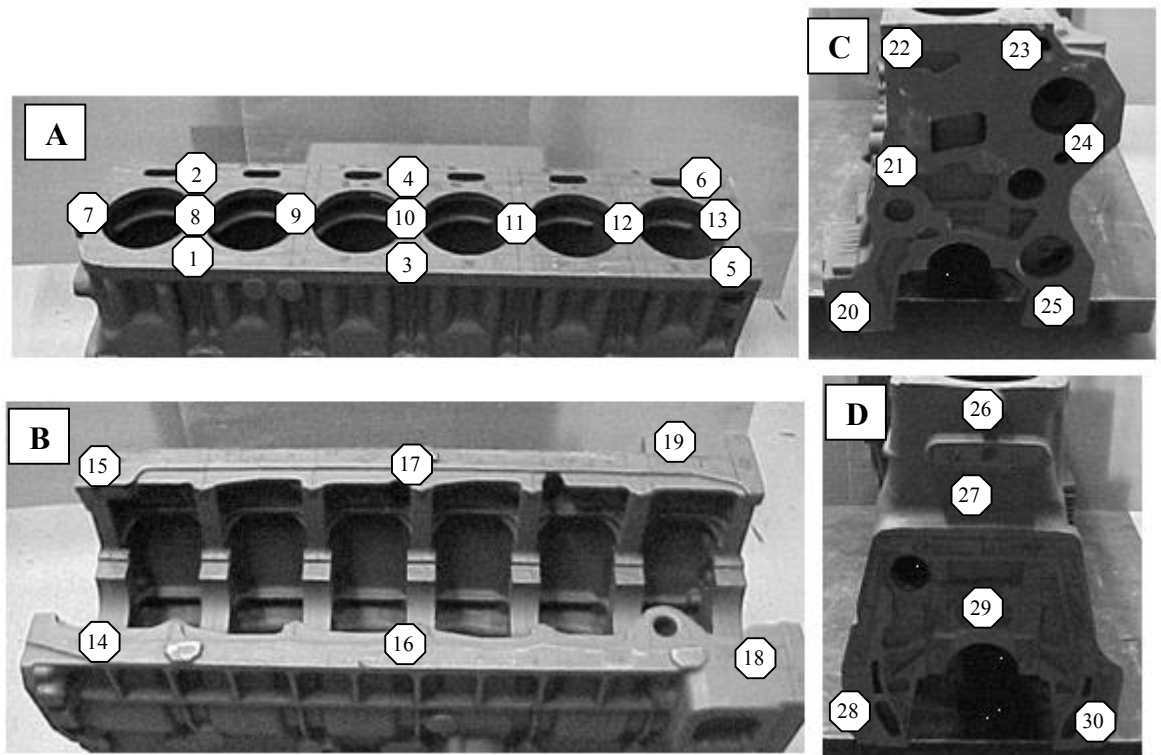


**Figura 3.3– Locais onde foram retirado corpos de prova para ensaios na região dos mancais.**

Na Figura 3.4 e Figura 3.5 observam-se nas vistas superior, inferior e laterais dos blocos os locais de onde foram retirados os corpos de prova para ensaios de tração, dureza e análise metalográfica.



**Figura 3.4 - Locais onde foram retirados os corpos-de-prova do bloco de ferro fundido vermicular. a) Face de fogo ou região do cabeçote; b) Face do carter ou caia; c) Face traseira (lado volante) e d) Face dianteira (lado damper).**



**Figura 3.5 - Locais onde foram retirados corpos-de-prova do bloco ferro fundido cinzento. a) Região do cabeçote – face de fogo; b) Região carter – saia; c) Região do volante e d) Face dianteira (lado damper).**



## 3.2 Materiais

Os blocos de motores utilizados para a realização deste trabalho foram fornecidos pela Empresa MWM International e fabricados pela Tupy Fundições Ltda.

### 3.2.1 Análise Química

Os materiais são especificados pelo fornecedor como:

- Ferro Fundido Vermicular GJV 450 - FV 450;
- Ferro Fundido Cinzento GG 25 - FC 250.

A análise química dos materiais é verificada através do certificado do fabricante dos blocos, os dados estão apresentados na Tabela 3.3.

**Tabela 3.3 - Análise química dos materiais dos blocos de motores.**

<i>Amostra</i>	<i>Elemento (% em massa)</i>						
	<i>C</i>	<i>Si</i>	<i>Mn</i>	<i>P</i>	<i>S</i>	<i>Ti</i>	<i>Mg</i>
<i>Vermicular</i>	3,58	2,25	0,33	0,038	0,017	0,007	0,0125
<i>Cinzento</i>	3,05	1,89	0,77	0,02	0,06	0,008	<0,002

Através dos dados comparativos da análise química entre os materiais, fica claro que a principal diferença entre o ferro fundido vermicular e cinzento é a presença de Magnésio na composição química.

No material ferro fundido vermicular nota-se a presença do elemento nodularizante Mg em uma concentração moderada 0,0125 conforme recomendado por DAWSON 1999 entre 0,008 e 0,016 % e pelas normas DIN EN1560 e VDG W50 entre 0,010 e 0,016% e um pouco abaixo do recomendado por Callister 2007 que estabelece o teor de Mg entre 0,015 e 0,035%.

As composições das ligas dos blocos de motores se encontram dentro das faixas recomendada pela literatura.

### 3.2.2 Análise Metalográfica

A preparação dos corpos de prova foi realizada de acordo com a Norma ABNT NBR 13284 (Preparação de corpos de prova para análise metalográfica) e para obtenção de ataque químico foi utilizado Nital 2%.

Para viabilizar a caracterização metalúrgica foi utilizado um microscópio ótico (OLYMPUS BX60M) equipado com uma câmera digital de imagem (OLYMPUS DP20).



Foram realizadas análises metalográficas de todos os 130 corpos de prova retirados dos blocos dos motores.

As imagens utilizadas para a caracterização dos materiais foram obtidas via microscópio óptico, com aumento de 50x, 100x, 200x, 500x e 1000x. Posteriormente estas imagens foram analisadas com o software AnalySIS Doc nos módulos: Grain Inspector, Grain Planimetry e Cast Iron.

A análise metalográfica visa a caracterização metalúrgica a fim de:

- Quantificar a formas da grafita tipo I, II, III, IV, V e VI;
- Verificar o aspecto da grafita tipo A, B, C, D e E;
- Classificar quanto ao tamanho da grafita;
- Verificar a estrutura da matriz quanto a presença de ferrita, cementita, perlita, ledeburita e steadita;

A preparação das amostras metalográficas foi realizada no Laboratório de Metalurgia Física (LAMEF) e as análises foram realizadas no Laboratório de Materiais da MWM International Motores na planta de Santo Amaro – SP.

### **3.2.3 Análise Fractográfica**

Amostras das fraturas foram analisadas no Laboratório de Metalurgia Física (LAMEF) em um Microscópio Eletrônico de Varredura (MEV) marca Shimadzu SSX – 550 com a finalidade de caracterizar a superfície da fratura.

## **3.3 Propriedades Mecânicas**

### **3.3.1 Dureza**

Os ensaios de dureza foram realizados de acordo com a norma ASTM E 10 – 08, que especifica condições padronizadas para o ensaio, sendo a carga aplicada de 750 kgf com esfera de aço de 5 mm de diâmetro (HB 5/750).

As impressões de dureza foram realizadas nos mesmos corpos de prova das análises metalográficas.

O equipamento utilizado foi o durômetro WILSON INTRON WOLPERT 3000Kg de capacidade do Laboratório de Materiais da MWM International, planta Canoas – RS.

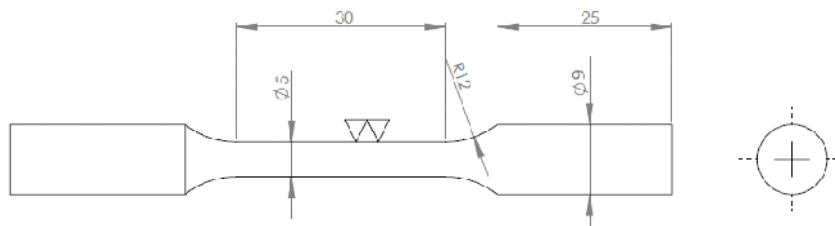
### 3.3.2 Resistência a Tração, Limite de escoamento e Alongamento

Os ensaios de tração foram realizados de acordo com a norma NBR ISO 6892 a fim de determinar o limite de resistência a tração ( $\sigma_r$ ), limite de resistência ao escoamento ( $\sigma_e$ ) e alongamento para o caso do ferro fundido vermicular. Para o ferro fundido cinzento foi analisado apenas o limite de resistência a tração ( $\sigma_r$ ). O limite de resistência ao escoamento ( $\sigma_e$ ) e o alongamento não foram aplicados devido as características do material.

Os gráficos obtidos nos ensaios convencionais de tração são apresentados nas curvas Tensão x Deformação.

Os ensaios foram realizados no Laboratório de Materiais da MWM International Motores na planta Santo Amaro - São Paulo, utilizando o equipamento WOLPERT - 200KN de capacidade, extensômetro EMIC e corpo de prova cilíndrico dimensionado como determina a norma NBR ISO 6892, conforme Figura 3.6.

Parâmetros do ensaio: Temperatura 22°C e Velocidade de 1mm/min;



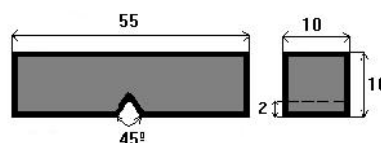
**Figura 3.6 - Dimensionamento do corpo de prova cilíndrico utilizado para ensaios de Tração conforme a norma NBR ISO 6892.**

### 3.3.3 Tenacidade ao Impacto

Para avaliar a tenacidade ao impacto utilizou-se o ensaio de Charpy.

O ensaio foi realizado a seguindo a norma DIN EN 10 045 no equipamento WOLPAERT PW 3015 do Laboratório de Fundição da Universidade Federal do Rio Grande do Sul e corpos de prova normatizados tipo A (entalhe V) como determina a norma DIN EN 10 045, conforme **Figura 3.7**.

Parâmetros do ensaio: Temperatura ambiente 22°C e Peso do Martelo 193,22N.



**Figura 3.7 - Dimensionamento do corpo de prova Tipo A utilizado para ensaios Charpy, conforme norma DIN EN 10 045.**

### 3.3.4 Resistência a Fadiga

Para determinar características de fadiga foi utilizada a abordagem da mecânica da fratura, com ensaios de taxa de propagação de trinca ( $da/dN$ ). Nesta abordagem um corpo de prova normatizado recebe uma pré - trinca e durante o ensaio é submetido a tensões para abertura da trinca, onde características do material determinam a taxa de crescimento/propagação da trinca  $da/dN$  (mm/ciclo).

Os ensaios foram conduzidos segundo a norma ASTM E647-00 em uma máquina de ensaios servo-hidráulica MTS 810 (Figura 3.8) controlada pelo software *Fatigue Crack Growth TestWare*, utilizando-se um extensômetro de fratura para acompanhar a abertura do entalhe, conforme Figura 3.9. A trinca foi medida utilizando o método da *compliance*, e o valor de  $da/dN$  foi calculado pelo método polinomial descrito na norma citada.

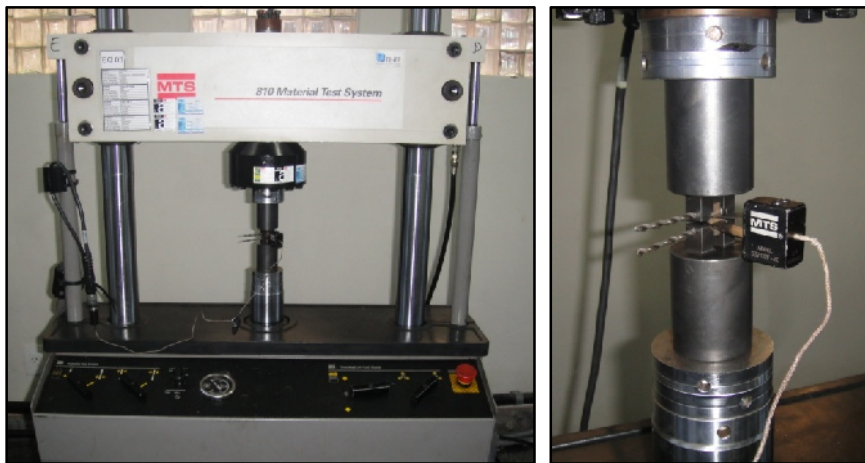


Figura 3.8 - Equipamento Máquina de Ensaios Hidráulica MTS utilizado para Ensaios de Fadiga.

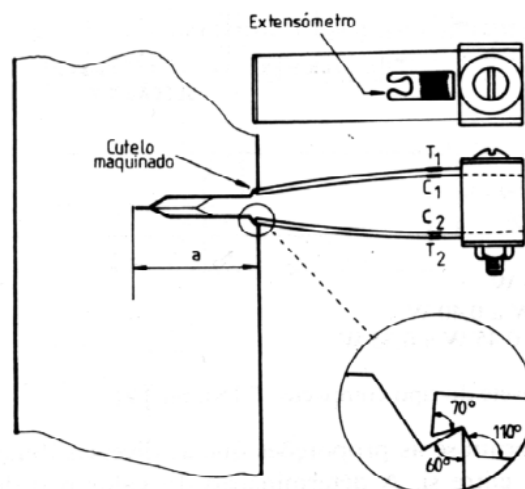
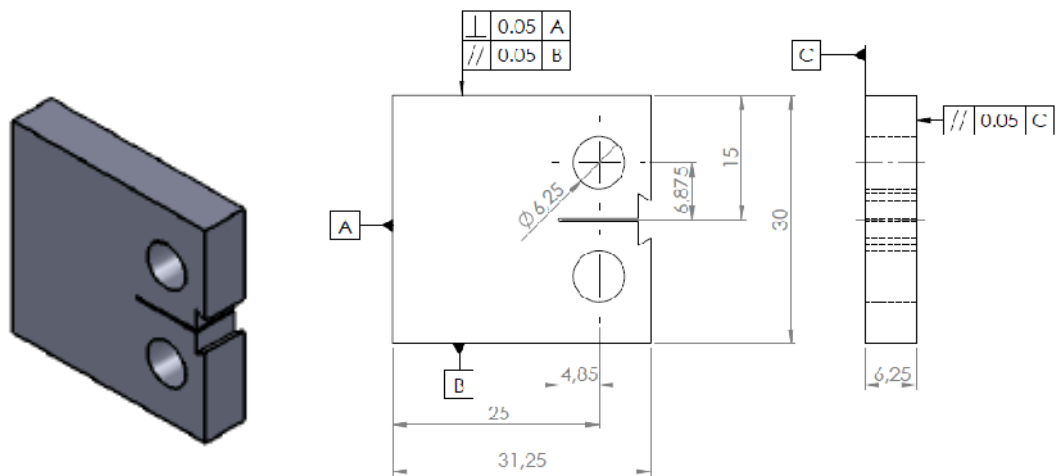


Figura 3.9 - Desenho esquemático do emprego de extensômetro de fratura para acompanhar a abertura do entalhe. (Adaptado a BRANCO 2006)

O corpo de prova utilizado foi conforme a norma ASTM E647-00 com  $W=25$ , relação  $a/W=0,25$ , conforme Figura 3.10.



**Figura 3.10 - Dimensionamento do Corpo de prova  $W=25$  para ensaio de Fadiga da/dN.**

As trincas de fadiga foram iniciadas a partir do entalhe mediante a aplicação de cargas correspondentes a valores de  $\Delta K = 10 \text{MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$  no final da pré-trinca e com valor de razão de fadiga (R) de 0,1. Os ensaios foram realizados também com  $R=0,1$  e controle de  $\Delta K$  crescente e decrescente.

Parâmetros de ensaio:

- Temperatura de ensaio 22°C;
- $c = \frac{d \cdot K}{da} \frac{1}{K} = \pm 0,1 \text{mm}^{-1}$ ;
- A cada mm de trinca propagada  $\Delta K$  varia  $\pm 10\%$ .

A partir dos resultados experimentais foi obtida a curva de taxa de crescimento da trinca - da/dN (mm/ciclo) vs. amplitude do fator de intensidade de tensões  $\Delta K$  ( $\text{MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$ ), em escala logarítmica.

## 4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Neste capítulo, são apresentados os resultados obtidos da análise metalográfica, assim como resultados e discussões das seguintes propriedades:

- Dureza;
- Resistência a Tração, Limite de Escoamento e Alongamento;
- Tenacidade ao Impacto;
- Fadiga;

A comparação das propriedades analisadas entre o ferro fundido vermicular e ferro fundido cinzento também será apresentado e discutido.

### 4.1 *Análise Metalográfica*

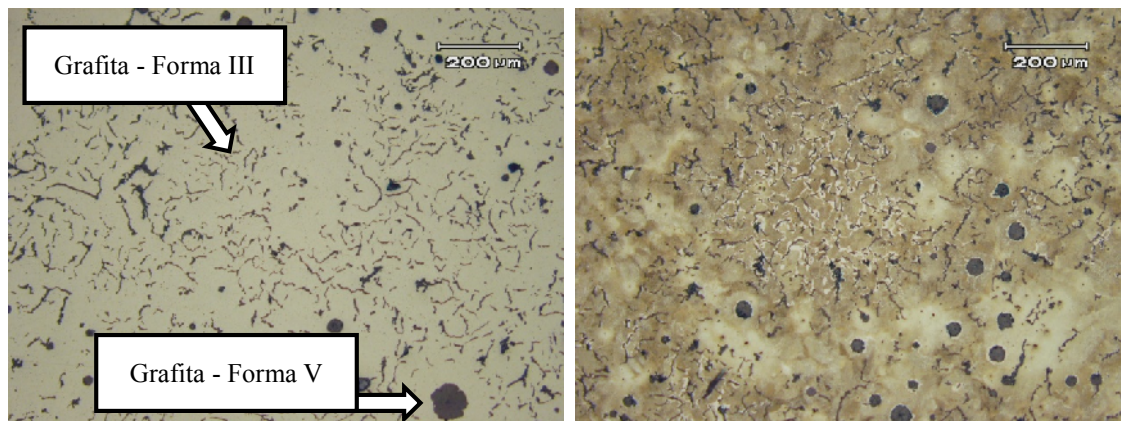
Resultados da análise metalográfica estão apresentados na forma de imagens pelas figuras 4.1 a 4.8 e também na forma descritiva pela Tabela 4.1 que representa a média de várias regiões de amostra dos materiais.

#### 4.1.1 **Análise Metalográfica - Ferro Fundido Vermicular**

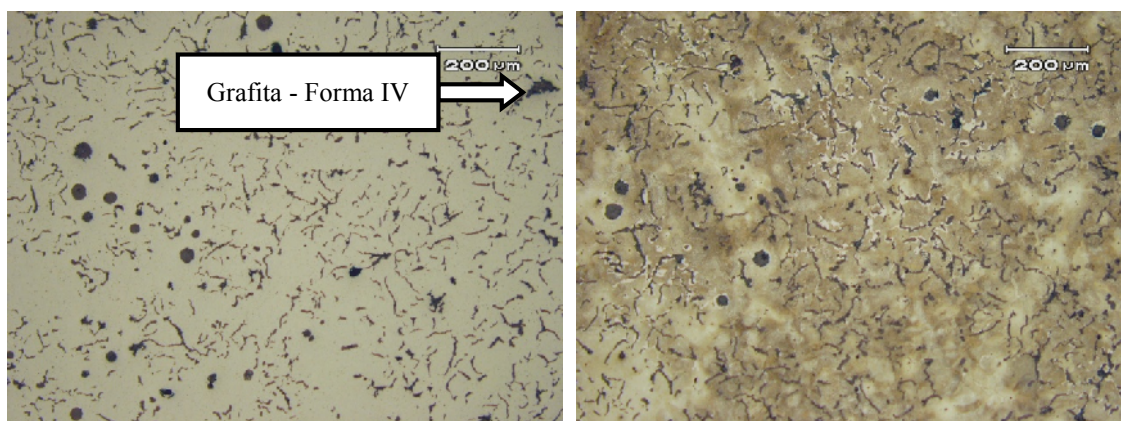
As Figura 4.1 a Figura 4.3 apresentam as micrografias de ferro fundido vermicular sem e com ataque químico de nital 2% através de um aumento de 100X.

Na Figura 4.1 fica clara a presença de grafita das formas III e V, na Figura 4.2 verificamos a forma IV e na Figura 4.3 observamos a forma VI, o tamanho da grafita nas imagens varia de 4 a 6.

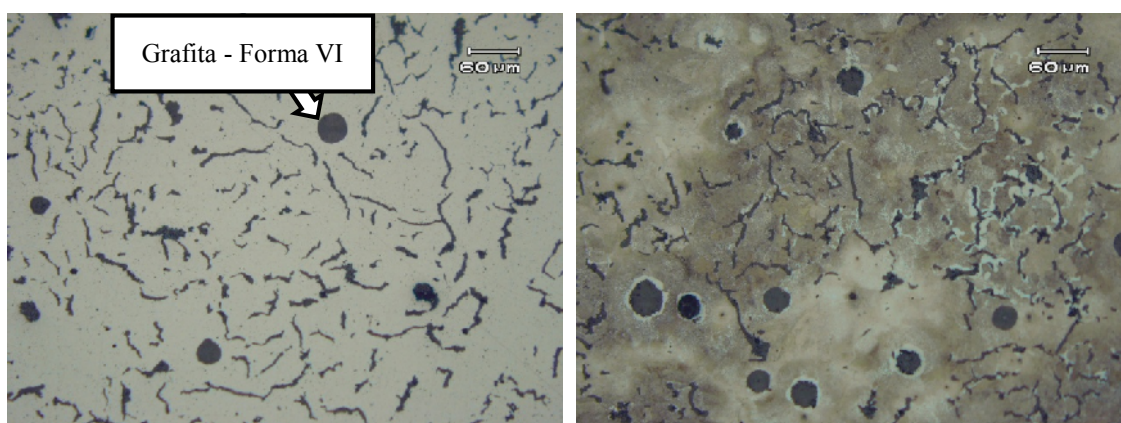
A Figura 4.4 mostra as micrografias do ferro fundido vermicular com aumentos de 500X e 1000X com ataque químico de nital 2% onde é possível verificar a estrutura de matriz perlítica fina com uma pequena quantidade, aproximadamente 10%, de ferrita livre.



**Figura 4.1 - CP 42: Micrografias em microscópio óptico da amostra de ferro fundido vermicular mostrando a morfologia da grafita do corpo de prova que apresentou resistência à tração 469,5 N/mm<sup>2</sup>. Grafita: forma III, V e VI. Tamanho: 4 a 5. Dureza: 217 HB. Matriz: Perlita fina. Ataque: S/Ataque e Nital 2%.**

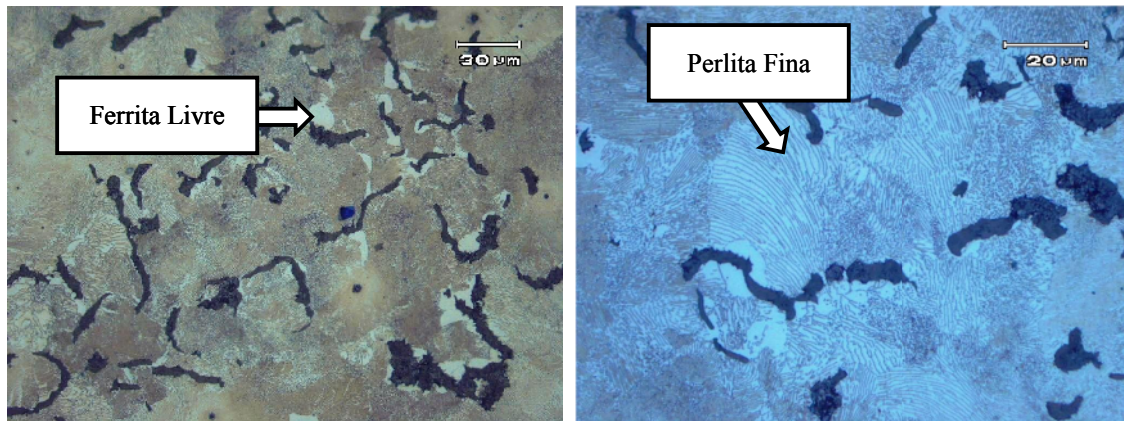


**Figura 4.2- CP 30: Micrografias em microscópio óptico da amostra de ferro fundido vermicular mostrando a morfologia da grafita do corpo de prova que apresentou resistência à tração 489,15 N/mm<sup>2</sup>. Grafita: forma III, IV, V e VI. Tamanho: 5 a 6. Dureza: 229 HB. Matriz: Perlita fina. Ataque: S/Ataque e Nital 2%.**



**Figura 4.3 - CP 16: Micrografias em microscópio óptico da amostra de ferro fundido vermicular mostrando a morfologia da grafita do corpo de prova que apresentou resistência à tração 475 N/mm<sup>2</sup>. Grafita: forma III, V e VI. Tamanho: 4 a 5. Dureza: 220 HB. Matriz: Perlita fina. Ataque: S/Ataque e Nital 2%.**





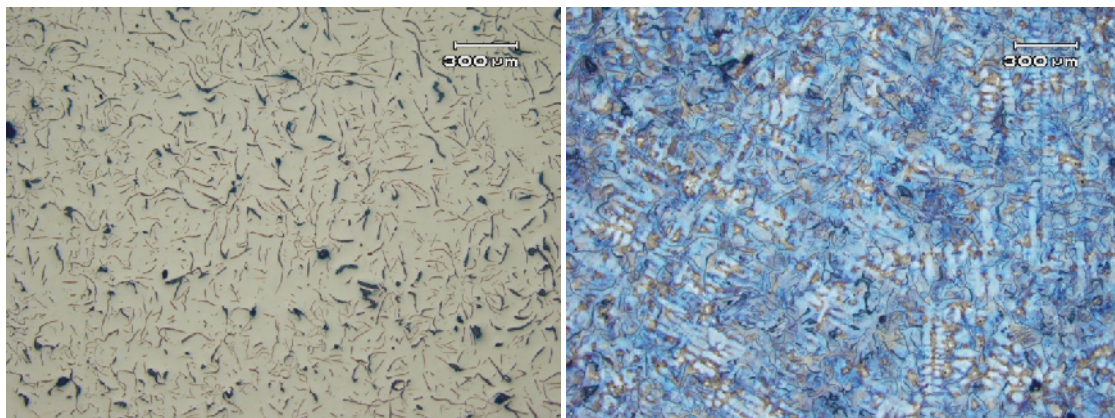
**Figura 4.4 – Micrografias em microscópio óptico das amostras de ferro fundido vermicular com matriz perlita fina e algumas concentrações de ferrita livre (10%) no contorno da grafita. Ataque: Nital 2%.**

#### **4.1.2 Análise Metalográfica - Ferro Fundido Cinzento**

As Figura 4.5 a Figura 4.7 mostram as micrografias do ferro fundido cinzento sem e com ataque químico de nital 2% onde é facilmente perceptível a forma I tipo A da grafita.

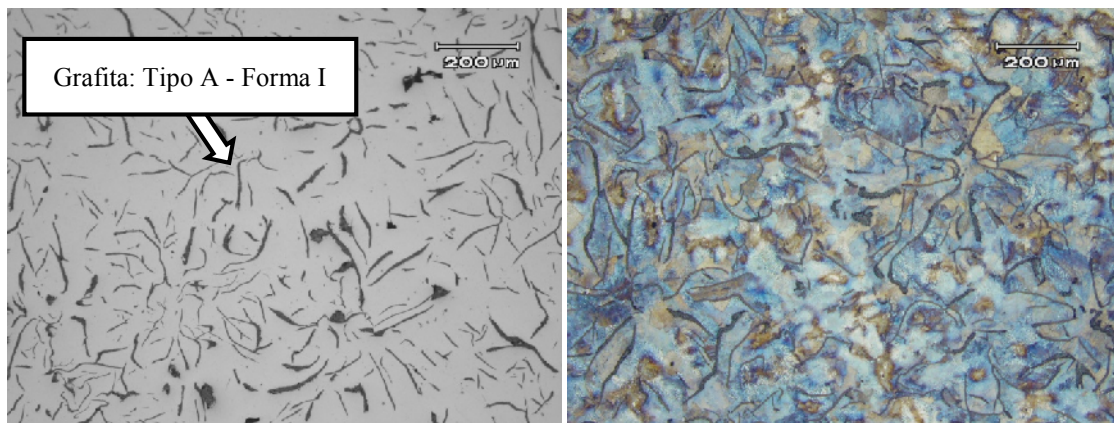
Na Figura 4.5 com aumento 50X é possível observar a estrutura bruta de fusão na forma de dendritas.

A Figura 4.8 apresenta as micrografias do ferro fundido cinzento com aumentos de 500X e 1000X com ataque químico de nital 2% onde é possível verificar a estrutura de matriz perlítica fina.

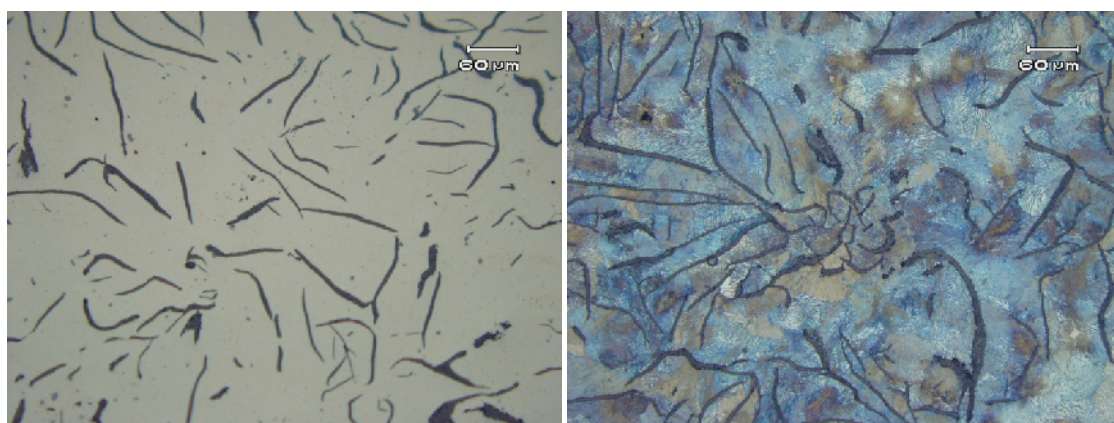


**Figura 4.5 - CP 27: Micrografias em microscópio óptico da amostra de ferro fundido cinzento mostrando a morfologia da grafita do corpo de prova que apresentou resistência à tração 276 N/mm<sup>2</sup>. Grafita: Tipo A – Forma I. Tamanho: 5 a 6. Dureza: 197 HB. Matriz: Perlita fina. Ataque: S/Ataque e Nital 2%.**

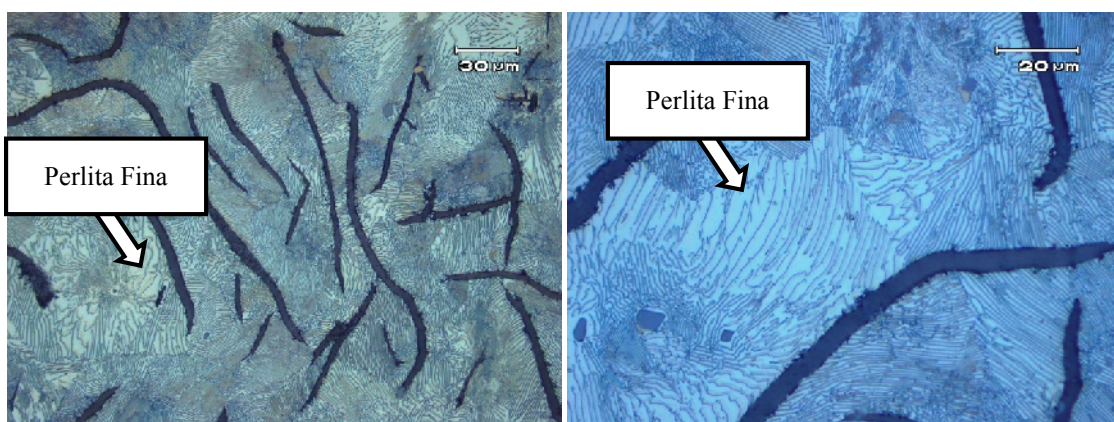




**Figura 4.6 - CP 64: Micrografias em microscópio óptico da amostra de ferro fundido cinzento mostrando a morfologia da grafita do corpo de prova que apresentou resistência à tração 275N/mm<sup>2</sup>. Grafita: Tipo A – Forma I. Tamanho: 5 a 6. Dureza: 196 HB. Matriz: Perlita fina. Ataque: S/Ataque e Nital 2%.**



**Figura 4.7 – CP 07: Micrografias em microscópio óptico da amostra de ferro fundido cinzento mostrando a morfologia da grafita do corpo de prova que apresentou resistência à tração 295 N/mm<sup>2</sup>. Grafita: Tipo A – Forma I. Tamanho: 5 a 6. Dureza: 204 HB. Matriz: Perlita fina. Ataque: S/Ataque e Nital 2%.**



**Figura 4.8 - Micrografias em microscópio óptico das amostras de ferro fundido cinzento com Matriz Perlítica. Ataque : Nital 2%.**



### 4.1.3 Análise Metalográfica - Comparativo Ferro Fundido Vermicular X Cinzento

O resultado compilado da análise metalográfica está apresentado na Tabela 4.1 onde, através das micrografias, é possível verificar a estrutura de matriz, quantificar a forma e classificar o tamanho da grafita das amostras de material ferro fundido vermicular e cinzento retirado dos blocos de motores.

A tabela de resultados representa a média de várias regiões de amostra do material.

Resultados encontrados na análise metalográfica foram comparados a especificação interna MWM International e considerados conforme para todos os parâmetros.

**Tabela 4.1- Análise metalográfica das amostras de material ferro fundido vermicular e cinzento retirado dos bloco dos motores.**

<i>Análise Metalográfica</i>	<i>Vermicular</i>	<i>Cinzento</i>
<b><i>Estrutura da Matriz</i></b>		
Estrutura da Matriz	Perlita Lamelar Fina	Perlita Lamelar Fina
Ferrita Livre	≈10%	Traços
Cementita Livre	Ausente	Ausente
Ledeburita	Ausente	Ausente
Steadita	Traços Isolados	Traços Isolados
<b><i>Forma da Grafita</i></b>		
Forma I	Ausente	100% - Tipo A
Forma II	Ausente	Ausente
Forma III	≈85%	Ausente
Forma IV	Menor que 5%	Ausente
Forma V e VI	≈10%	Ausente
<b><i>Tamanho da Grafita</i></b>		
Forma I	Ausente	4 a 6
Forma II	Ausente	Ausente
Forma III	4 e 5	Ausente
Forma IV	4 (traços)	Ausente
Forma V e VI	5 e 6	Ausente

Analisando resultados comparativos percebe-se que ambos os materiais apresentam uma estrutura de matriz perlítica fina. A principal diferença, sob este aspecto, é a forma da grafita, que, conforme revisão bibliográfica é proveniente da presença de Magnésio na composição química.

## 4.2 Dureza

Resultados dos ensaios de dureza Brinell estão apresentados na forma de imagens gráficas nas Figura 4.9 a Figura 4.11 e na tabela comparativa Tabela 4.2 que representa a média das amostras dos materiais analisados.

### 4.2.1 Dureza - Ferro Fundido Vermicular

Na Figura 4.9 pode se realizar uma comparação dos valores encontrados nas amostras de material ferro fundido vermicular com os limites indicados na norma VDG W50: 2002.

A média de dureza das 65 amostras retirada do bloco de ferro fundido vermicular é 222,81 HB com desvio padrão de 4,48 HB.

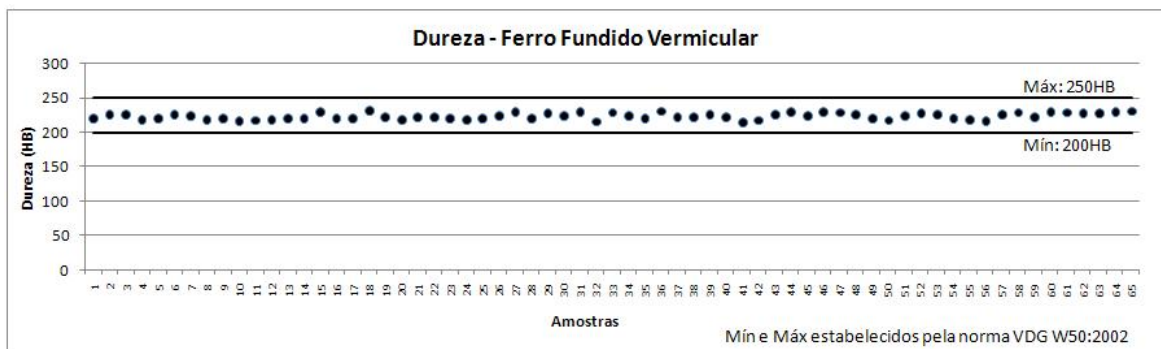


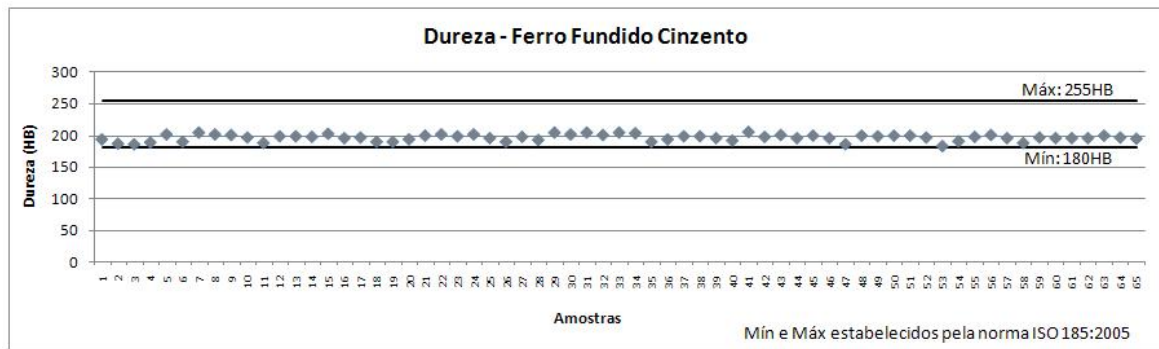
Figura 4.9 – Resultados de durezas das amostras de material ferro fundido vermicular.

Os resultados apresentados indicam que a dureza é compatível com a faixa especificada na norma VDG W50: 2002 para o material FV450, uma vez que todos os valores de dureza se encontram dentro do especificado.

### 4.2.2 Dureza - Ferro Fundido Cinzento

Através da Figura 4.10 é possível realizar uma comparação dos valores encontrados nas amostras de material ferro fundido cinzento com os limites indicados na norma ISO 185:2005.

A média de dureza das 65 amostras retirada do bloco de ferro fundido cinzento é 195,81 HB com desvio padrão de 5,82 HB.

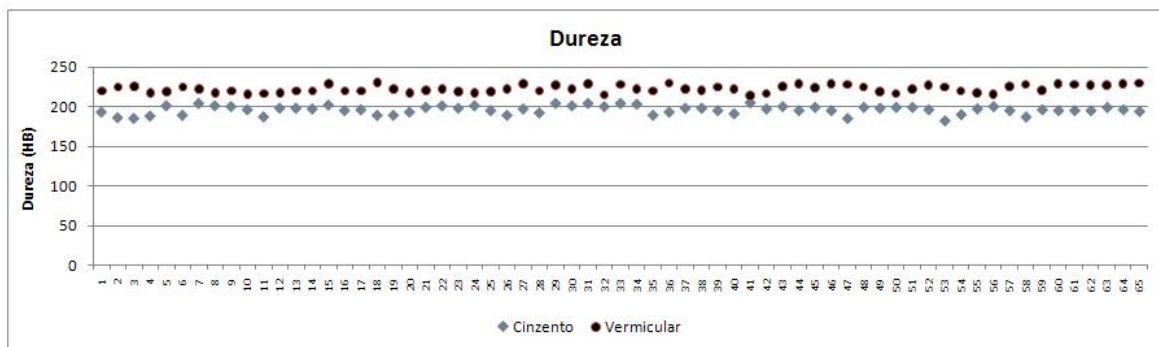


**Figura 4.10 - Resultados de durezas das amostras de material ferro fundido cinzento.**

Os resultados apresentados indicam que a dureza do material é compatível com a faixa especificada na norma ISO 185:2005 para o material FC250, uma vez que todos os valores de dureza se encontram dentro do especificado.

#### 4.2.3 Dureza - Comparativo Ferro Fundido Vermicular X Cinzento

Os resultados comparativos dos ensaios de dureza Brinell estão apresentados de forma gráfica na Figura 4.11 e em forma de média e desvio padrão na Tabela 4.2 onde se pode observar os valores encontrados nas amostras dos dois materiais.



**Figura 4.11 - Resultado de dureza das amostras de material dos blocos de motores.**

**Tabela 4.2 - Dureza das amostras de material dos blocos de motores**

<i>Dureza [HB]</i>	<i>Média</i>	<i>Desvio Padrão</i>
Vermicular	222,81	4,48
Cinzento	195,81	5,32

Observa-se que as amostras do bloco de material do bloco de ferro fundido vermicular apresentam resultados superiores, com dureza 13% maior do que as amostras de material do bloco de Ferro Fundido Cinzento.

### 4.3 Resistência a Tração, Limite de Escoamento e Alongamento

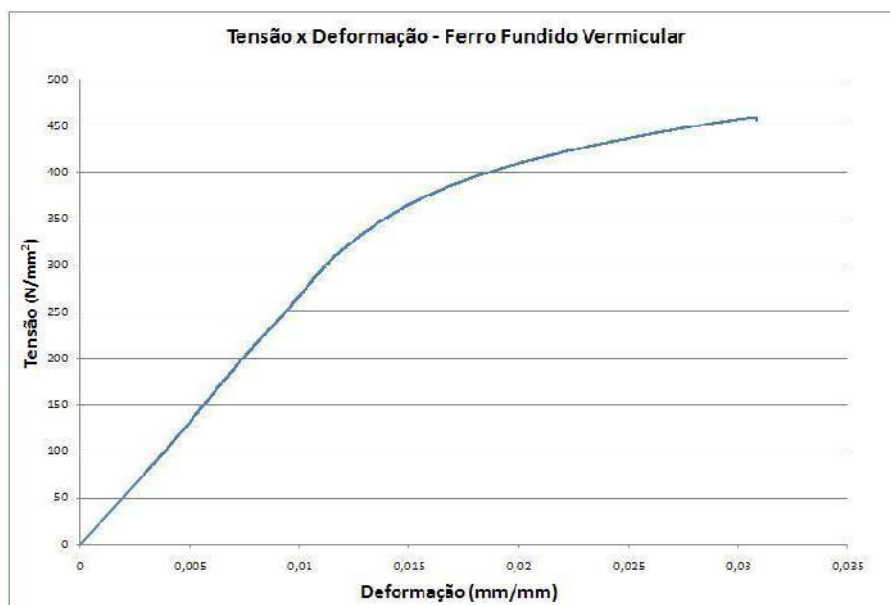
Para apresentação dos resultados do ensaio de tração será ilustrado a curva Tensão x Deformação que representa o comportamento dos materiais no ensaio de tração. Somente está apresentada uma curva de cada material devido a semelhança de comportamento entre as amostras analisadas.

Os resultados das amostras para limite de resistência a tração ( $\sigma_r$ ), limite de resistência ao escoamento ( $\sigma_e$ ) e alongamento está apresentados de forma gráfica comparando com os limites indicados nas respectivas normas.

Os resultados das análises fractográficas dos materiais está apresentado na forma de imagens representativas das fraturas dos ensaios.

#### 4.3.1 Resistência a Tração, Limite de Escoamento e Alongamento - Ferro Fundido Vermicular

Na Figura 4.12 é possível observar o comportamento do material ferro fundido vermicular nos ensaios de tração. A média do limite de resistência a tração das 65 amostras retiradas do bloco de ferro fundido vermicular é 465, 80 N/mm<sup>2</sup> com desvio padrão de 16,41 N/mm<sup>2</sup>.



**Figura 4.12 - Curva Tensão x Deformação de uma amostra do material ferro fundido vermicular em corpo de prova de tração.**

As Figura 4.13 a Figura 4.15, mostram a comparação entre os valores encontrados nas amostras de material e os limites indicados na norma VDG W50: 2002. Resultados consolidados na forma de média e desvio padrão podem ser verificados através da Tabela 4.3.

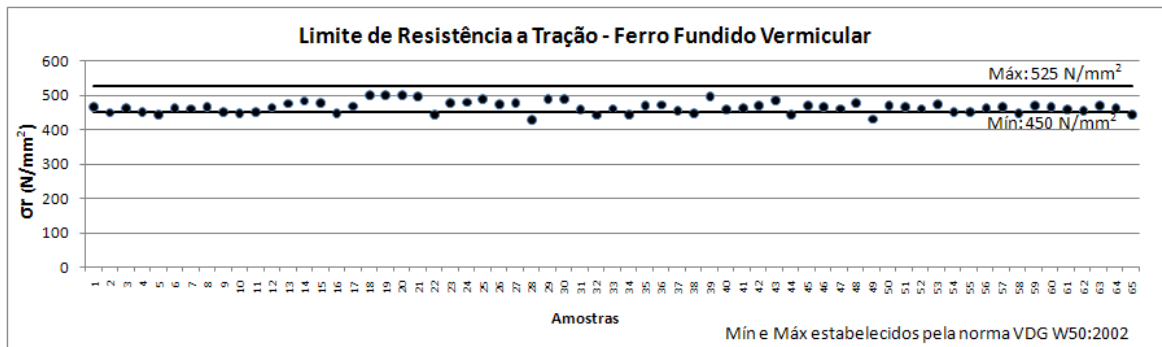


Figura 4.13 – Resultado do limite de resistência a tração das amostras de material ferro fundido vermicular.

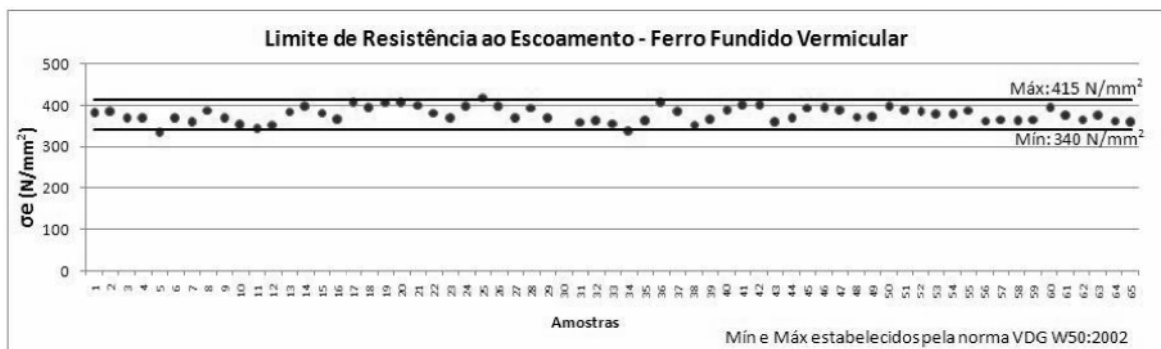


Figura 4.14 – Resultado do limite de resistência ao escoamento das amostras de material ferro fundido vermicular.

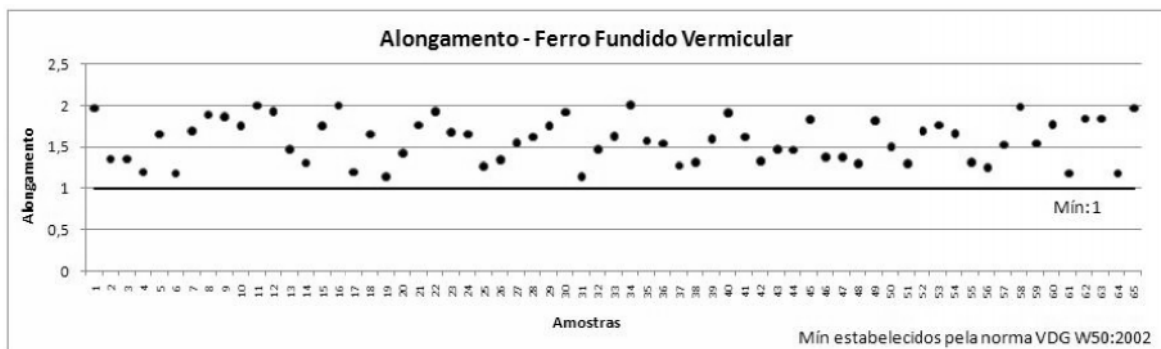


Figura 4.15 – Resultado do alongamento das amostras das amostras de material ferro fundido vermicular.

Tabela 4.3 - Limite de resistência a tração ( $\sigma_r$ ), limite de resistência ao escoamento ( $\sigma_e$ ) e alongamento (%) das amostras de material ferro fundido vermicular.

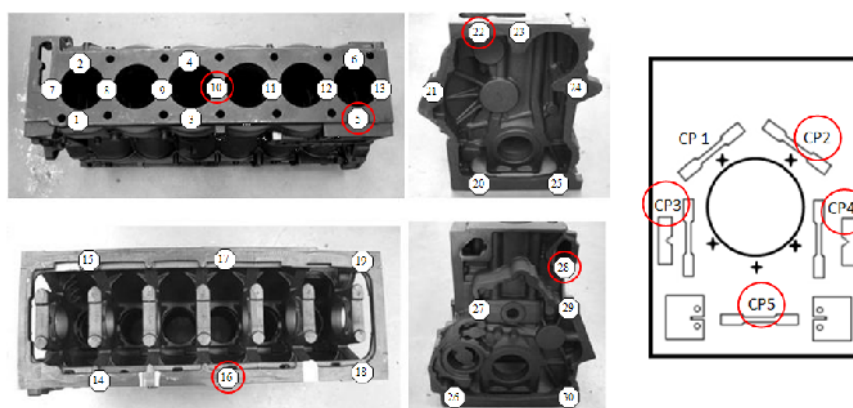
<i>Ferro Fundido Vermicular</i>	<i>Média</i>	<i>Desvio Padrão</i>
$\sigma_r$ [N/mm <sup>2</sup> ]	465,80	16,41
$\sigma_e$ [N/mm <sup>2</sup> ]	376,20	18,08
Alongamento [%]	1,57	0,26

Comparando os resultados obtidos com os limites referenciados na norma VDG W50: 2002 se pode observar (ver Figura 4.13 e Figura 4.14) alguns valores abaixo do limite recomendado.

Ao analisar os pontos abaixo do limite especificado (Tabela 4.4 e Figura 4.16) não é possível identificar nenhuma relação entre os pontos. Sendo assim, uma vez que os valores abaixo do especificados estão próximos do limite inferior, a média dos resultados encontram-se dentro da faixa de especificada e o desvio padrão para as amostras é aceitável, o material ferro fundido vermicular foi interpretado como dentro do especificado para a classe FV 450.

**Tabela 4.4 - Listagem dos pontos abaixo do limite especificado para ensaio de tração para amostras de ferro fundido vermicular.**

<i>Amostra</i>	<i>Localização</i>	<i>Resistência a Tração 450 – 525 (N/mm<sup>2</sup>)</i>	<i>Limite Escoamento 340 – 415 (N/mm<sup>2</sup>)</i>
5	Região Face de Fogo	445,41	333,80
10	Região Face de Fogo	447,50	350,70
16	Região Carter - Saia	447,40	363,50
22	Região do Volante	445,00	381,20
28	Região Polia	429,30	394,00
32 - CP2	Mancal 1	442,50	362,20
34 - CP4	Mancal 1	445,00	336,50
38 - CP3	Mancal 2	449,00	353,10
44 - CP4	Mancal 3	444,50	366,80
49 - CP4	Mancal 4	431,70	370,90
58 - CP3	Mancal 6	449,00	360,40
65 - CP5	Mancal 7	445,00	359,00



**Figura 4.16 - Locais identificados com valores do limite de resistência abaixo do especificado.**

Através de uma análise fractográfica das superfícies de fraturas dos corpos de prova dos ensaios de tração é possível verificar na Figura 4.17 a maioria das regiões com coalescimento de microcavidades e algumas facetas de clivagem, conforme esperado para o material, segundo Guessser (GUESSER 2009).

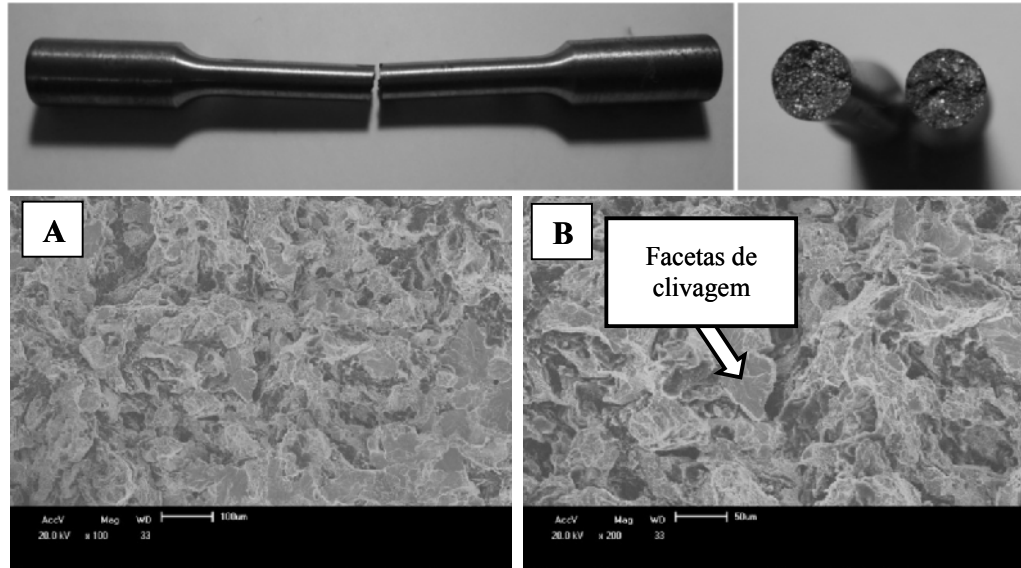


Figura 4.17 – Fractografias em MEV dos corpos de prova de tração das amostras de material ferro fundido vermicular (A) Aumento de 100X e (B) Aumento 200X.

#### 4.3.2 Resistência a Tração – Ferro Fundido Cinzento

Na Figura 4.18 é possível verificar o comportamento do material ferro fundido cinzento nos ensaios de tração. A média do limite de resistência a tração das 65 amostras retiradas do bloco de ferro fundido cinzento é  $282,70 \text{ N/mm}^2$  com desvio padrão de  $13,48 \text{ N/mm}^2$ .

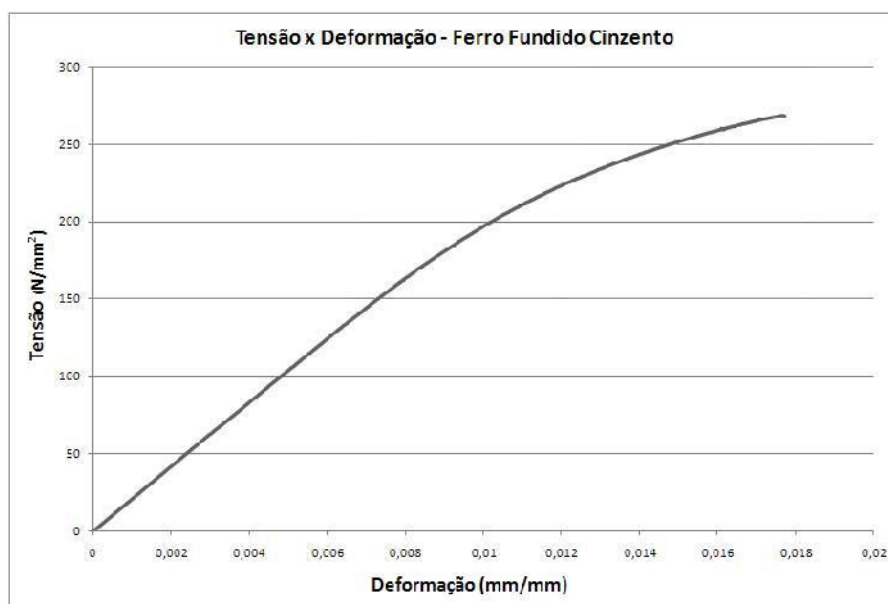
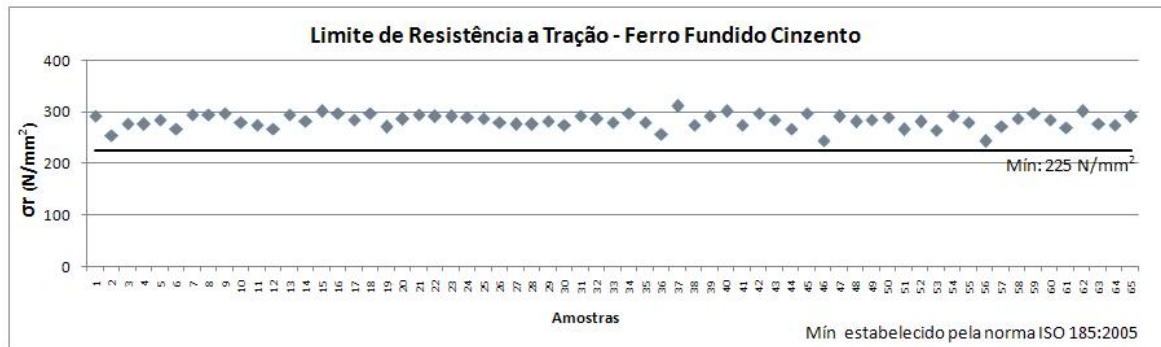


Figura 4.18 - Curva Tensão x Deformação de uma amostra do material ferro fundido cinzento em corpo de prova de tração.



Os resultados das amostras para limite de resistência a tração ( $\sigma_T$ ) está apresentado de forma gráfica na Figura 4.19 onde é possível realizar uma comparação dos valores encontrados com os limites indicados na norma ISO 185: 2005.

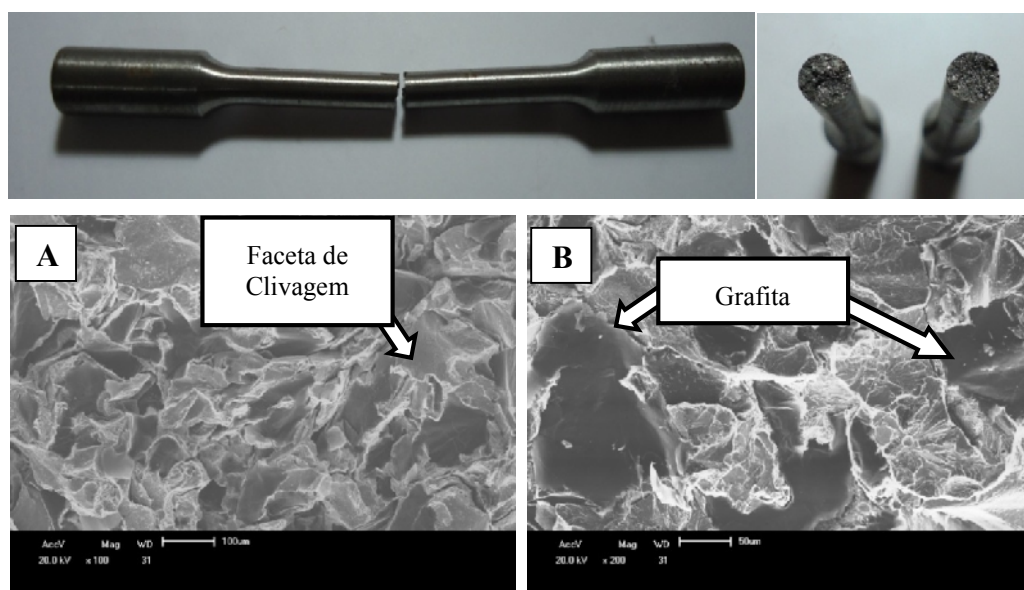
O limite de resistência ao escoamento ( $\sigma_e$ ) e o alongamento não estão apresentados devido as características do material não permitirem esta observação.



**Figura 4.19 - Resultado de limite de resistência a tração das amostras de material ferro fundido cinzento.**

Os resultados apresentados indicam que a resistência a tração do material é compatível com a faixa especificada na Norma ISO 185:2005 para o material FC250, uma vez que todos os valores encontram-se dentro do especificado.

Através de uma análise fractográfica das superfícies de fraturas das amostras de ensaios de Tração é possível perceber na Figura 4.20 uma superfície de fratura mais frágil, onde ocorre pouca deformação de material. Aspectos de clivagem são percebidos em quase toda superfície da fratura, assim como uma superfície lisa nas regiões das grafitas lamelares conforme esperado para material segundo a literatura (GUESSER 2009).



**Figura 4.20 - Fractografias em MEV dos corpos de prova de tração das amostras de material ferro fundido cinzento. (A) Aumento de 100X e (B) Aumento 200X.**



### 4.3.3 Resistência a Tração – Comparativo Ferro Fundido Vermicular X Cinzento

As Figura 4.21 e Figura 4.22 representam os resultados comparativos do comportamento das amostras de materiais ferro fundido vermicular e cinzento no ensaio de Tração. Através da Tabela 4.5 é possível comparar os resultados encontrados na forma de média e desvio padrão.

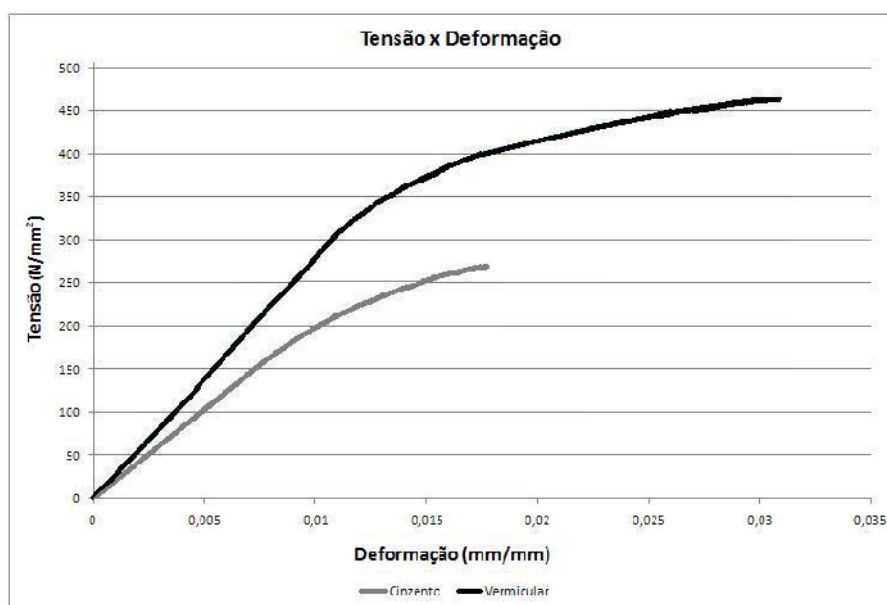


Figura 4.21 - Curva Tensão x Deformação das amostras de material dos bloco de motores em corpo de prova de tração

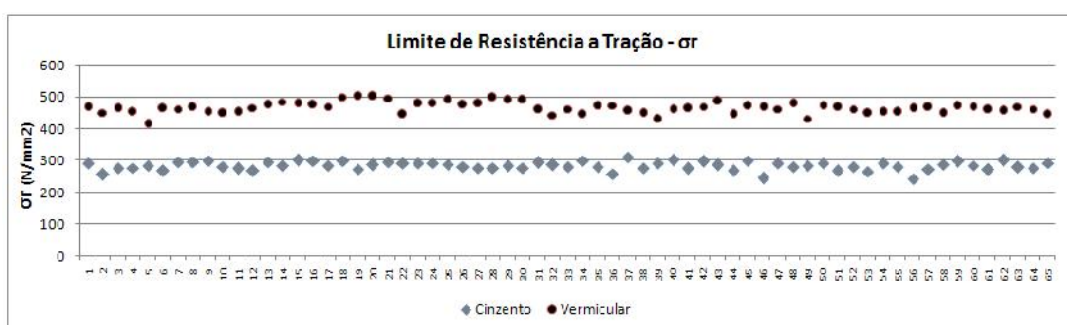


Figura 4.22 - Resultado de limite de resistência a tração das amostras de material dos blocos de motores.

Tabela 4.5 - Limite de resistência a tração das amostras de material dos blocos de motores.

<i>Resistência a Tração [N/mm<sup>2</sup>]</i>	<i>Média</i>	<i>Desvio Padrão</i>
Vermicular	465,80	16,41
Cinzento	282,70	13,48

Analisando os resultados fica clara a superioridade do ferro fundido vermicular comparado ao ferro fundido cinzento, apresentando o aproximadamente o dobro de capacidade de deformação e 65% mais resistência a tração.

A baixa capacidade de deformação e menor resistência a tração do ferro fundido cinzento, quando comparado ao vermicular, deve-se principalmente a quantidade, tipo e forma da grafita presente no material. A grafita Tipo A – Forma I age como um concentrador de tensões e acelerando a ruptura do material.

#### 4.4 Tenacidade ao Impacto

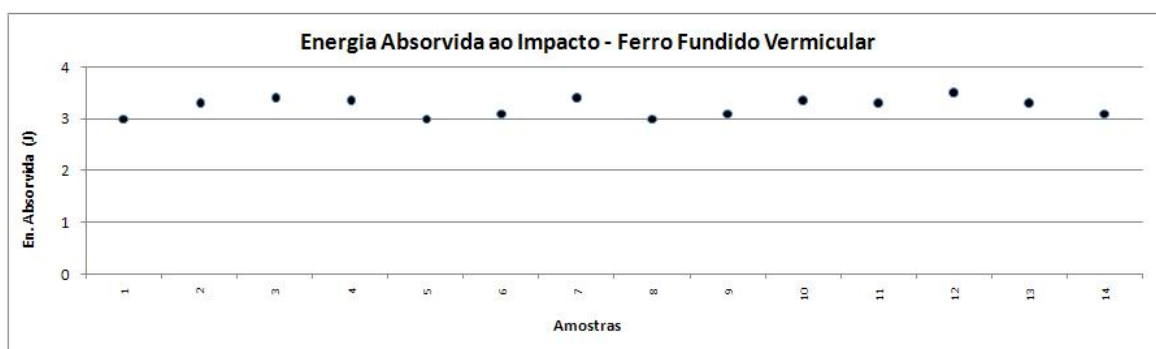
Os resultados dos ensaios de tenacidade ao impacto, através do método Charpy, estão apresentados de forma gráfica nas Figura 4.23, Figura 4.25 e Figura 4.27 e consolidados na forma de média e desvio padrão na Tabela 4.6.

Os valores de energia absorvida ao impacto não estão especificados em normas para estes materiais, desta forma, os valores encontrados serão utilizados para fins de comparação entre os materiais analisados.

Os resultados das análises fractográficas dos materiais estão apresentados na forma de imagens representativas das fraturas dos ensaios, conforme Figura 4.24 e Figura 4.26.

##### 4.4.1 Tenacidade ao Impacto – Ferro Fundido Vermicular

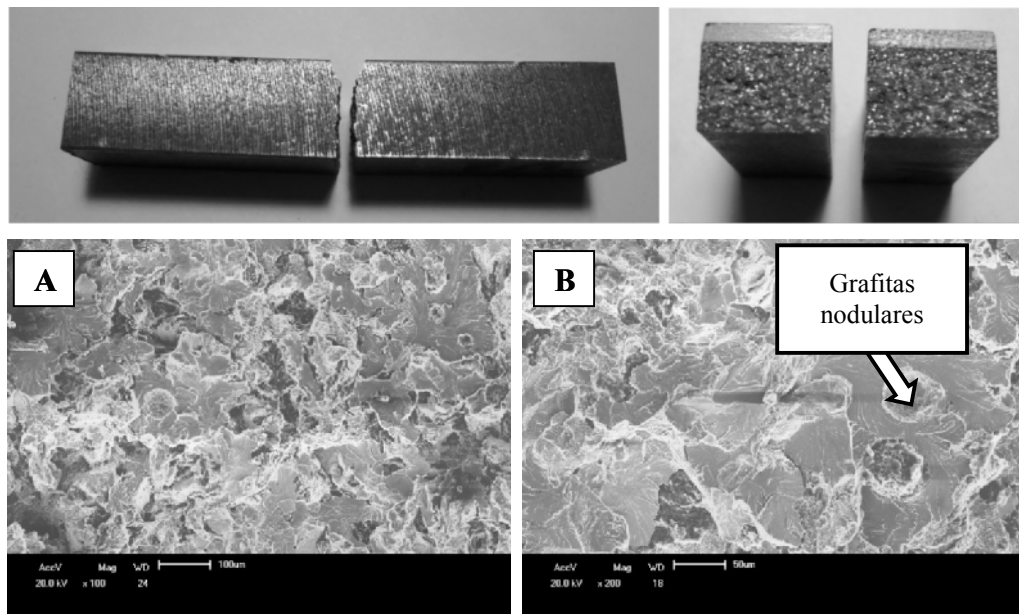
A Figura 4.23 representa o resultado de tenacidade ao impacto das 14 amostras de materiais do bloco de ferro fundido vermicular analisadas com média de 3,22 J e desvio padrão de 0,17 J.



**Figura 4.23 – Resultados de tenacidade ao impacto das amostras de material ferro fundido vermicular.**

Através de uma análise em MEV das superfícies de fraturas das amostras do ensaio Charpy se pode perceber na Figura 4.24 microcavidades coalescidas junto a facetas de

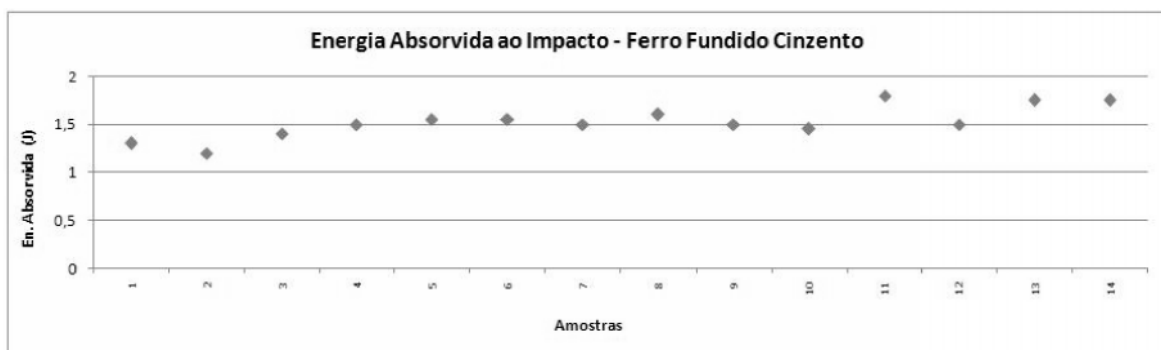
clivagem. Também foi possível observar grafitas nodulares no material, conforme é esperado para este material segundo a literatura (GUESSER 2009).



**Figura 4.24 – Fractografias em MEV dos corpos de prova de impacto das amostras de material ferro fundido vermicular. (A) Aumento de 100X e (B) Aumento 200X.**

#### 4.4.2 Tenacidade ao Impacto – Ferro Fundido Cinzento

A Figura 4.25 representa o resultado de tenacidade ao impacto das 14 amostras de materiais ferro fundido cinzento analisadas com média de 1,52J e desvio padrão de 0,16J



**Figura 4.25 - Resultados de tenacidade ao impacto das amostras de material ferro fundido cinzento.**

Através de uma análise fractográfica em MEV das fraturas do ensaio de Impacto se é possível perceber na Figura 4.26 uma superfície de fratura com micromecanismo predominante de clivagem sem indícios de coalescimentos de microcavidades, conforme esperado para este material segundo Guessser (GUESSER 2009).

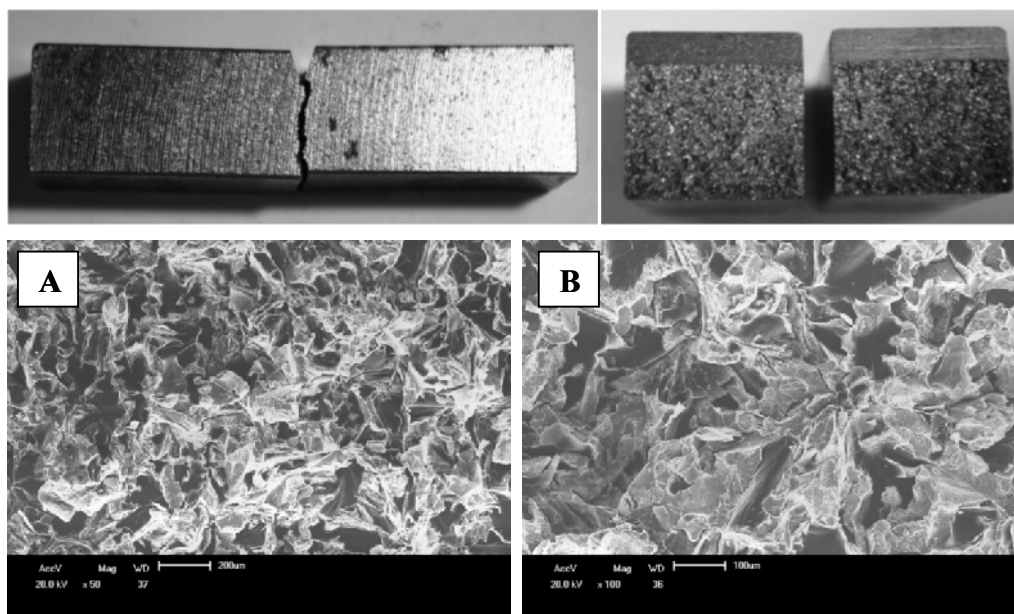


Figura 4.26- Fractografias em MEV dos corpos de prova de impacto das amostras de material ferro fundido cinzento. (A) Aumento 50X e (B) Aumento 100X.

#### 4.4.3 Tenacidade ao Impacto - Comparativo Ferro Fundido Vermicular X Cinzento

Os resultados comparativos do comportamento das amostras de materiais nos ensaios de tenacidade ao impacto estão apresentados de forma gráfica na Figura 4.27 e consolidados forma de média e desvio padrão através da Tabela 4.6.

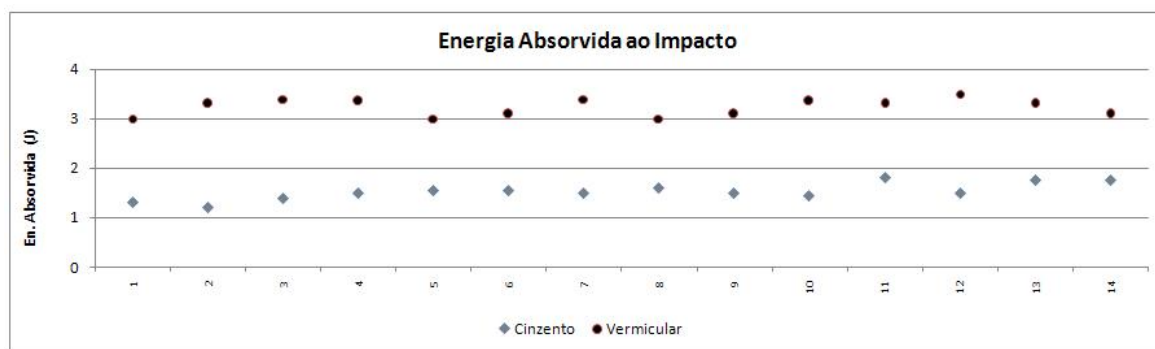


Figura 4.27 - Resultados de tenacidade ao impacto das amostras de material dos blocos de motores.

Tabela 4.6 – Tenacidade ao impacto das amostras de material dos blocos de motores.

<i>Energia Absorvida ao Impacto [J]</i>	<i>Média</i>	<i>Desvio Padrão</i>
<i>Ferro Fundido Vermicular</i>	3,22	0,17
<i>Ferro Fundido Cinzento</i>	1,52	0,16

Vê se que as amostras de material do bloco de ferro fundido vermicular apresentam resultados superiores, indicando uma tenacidade ao impacto 110% maior do que as amostras de material do bloco de ferro fundido cinzento.

A maior capacidade de absorver impacto do ferro fundido vermicular, quando comparado ao cinzento, deve-se ao formato vermicular das grafitas com pontas arredondadas que minimizam o efeito concentrador de tensões e permitem maior deformação da estrutura da matriz.

#### 4.5 Fadiga

Os resultados dos ensaios de fadiga estão apresentados em forma gráfica nas curvas Taxa de crescimento da trinca  $da/dN$  x Amplitude do fator de intensidade de tensões  $\Delta K$  (Figura 4.28, Figura 4.30 e Figura 4.32) que representa o comportamento dos materiais quando submetidos a ensaios de fadiga através da metodologia da mecânica da fratura.

##### 4.5.1 Fadiga – Ferro fundido Vermicular

A curva do gráfico ilustrada na Figura 4.28 é o resultado compilado de todas as amostras analisadas nos 7 mancais do bloco, onde se pode determinar que para as amostras do bloco de ferro fundido vermicular ensaiadas a velocidade de crescimento da trinca  $\frac{dA}{dN} = 3 \times 10^{-13} (\Delta K)^{6,761}$  obtida através de uma linha de tendência com  $R^2 = 0,973$ .

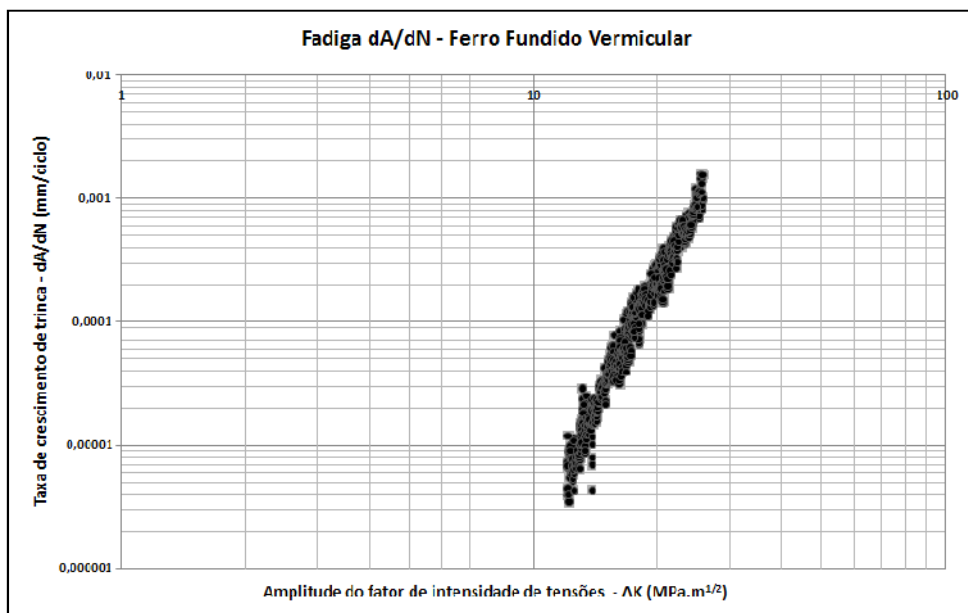
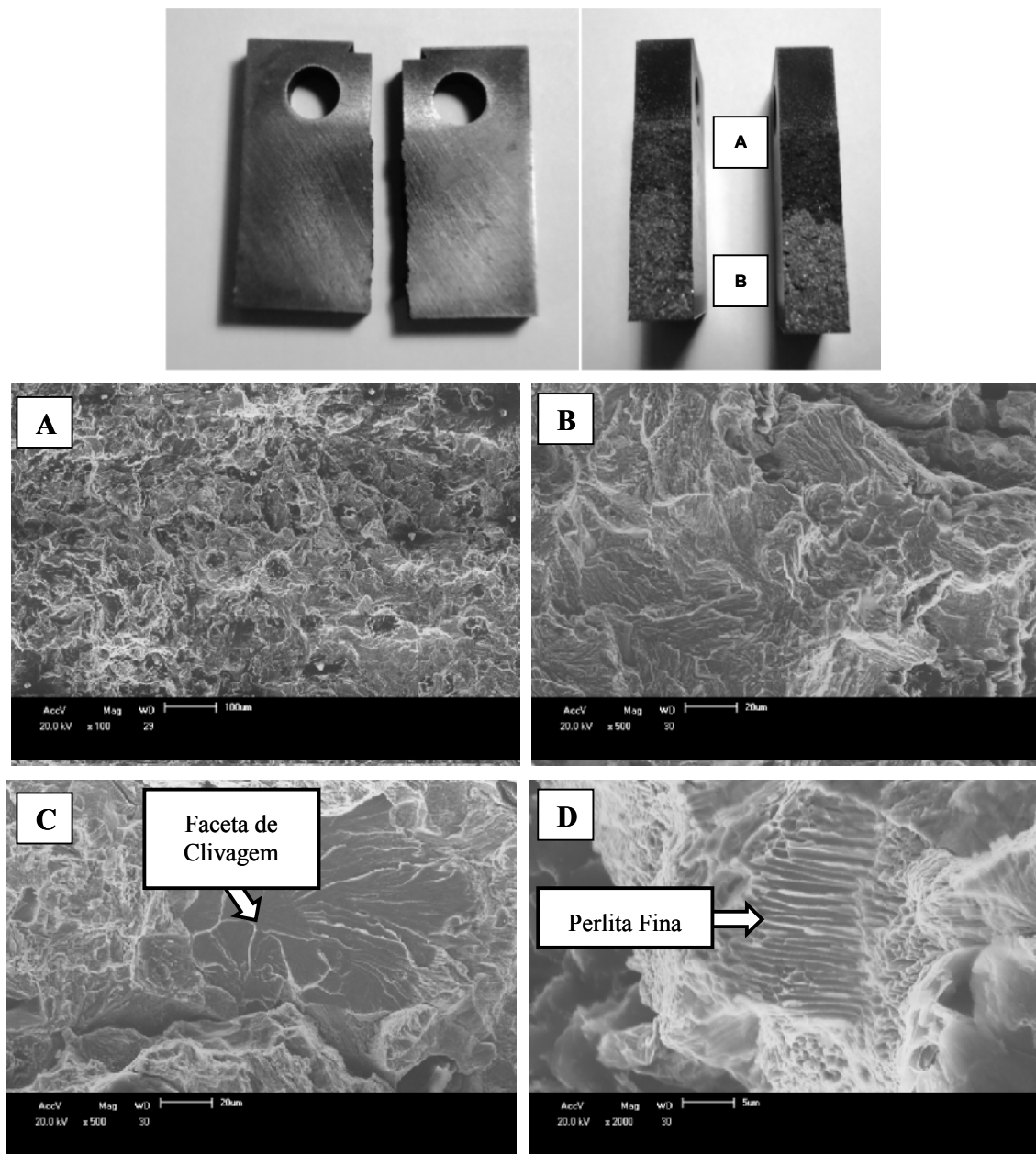


Figura 4.28 - Curva Taxa de crescimento da trinca  $da/dN$  x Amplitude do fator de intensidade de tensões  $\Delta K$  das amostras de material ferro fundido vermicular.

Através de uma análise fractográfica em MEV das fraturas do ensaio de fadiga se pode perceber o aspecto da fratura típico de fadiga, com características como coalescência de microcavidades predominantes no material, conforme mostram as fractografias da Figura 4.29 (A) Início da propagação e (B) propagação avançada, entretanto, também é verificado clivagem em algumas regiões da fratura, conforme Figura 4.29 (C).

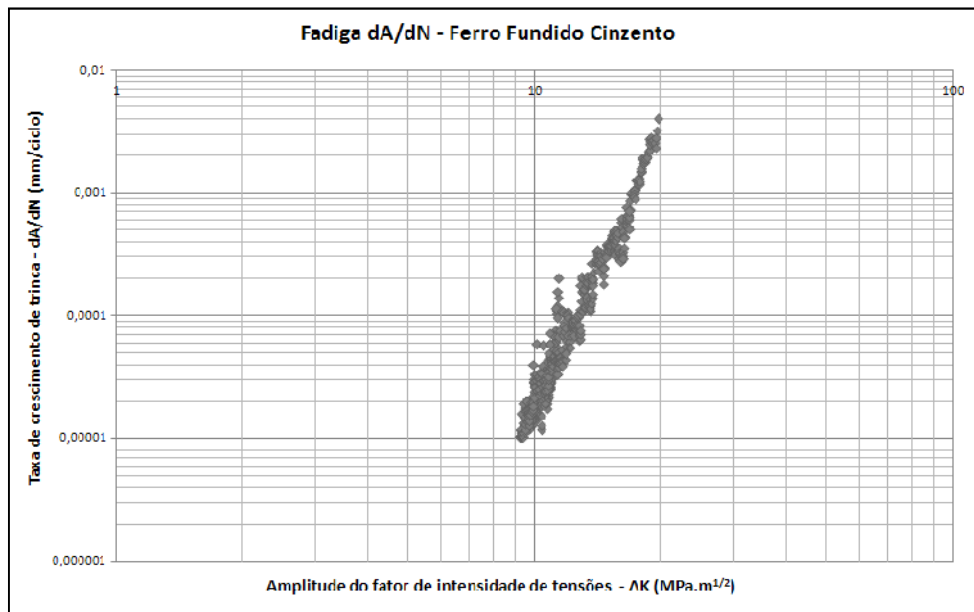
Com aumento em torno de 2000X é possível verificar lamelas de perlita fina, conforme a Figura 4.29 (D), típica deste material, conforme Guessser (GUESSER 2009).



**Figura 4.29 – Fractografias em MEV dos corpos de prova de Fadiga das amostras de material ferro fundido vermicular. (A) Coalescimento de micro cavidades. Aumento 100X, (B) Coalescimento de micro cavidades. Aumento 500X, (C) Clivagem. Aumento 500X e (D) Perlita Fina. Aumento  $\approx$  2000X.**

#### 4.5.2 Fadiga - Ferro Fundido cinzento

A curva do gráfico da Figura 4.30 representa o resultado compilado de todas as amostras analisadas nos 7 mancais do bloco, onde se pode determinar que para as amostras do bloco de ferro fundido cinzento ensaiado a velocidade de crescimento da trinca é  $\frac{dA}{dN} = 2 \times 10^{-12} (\Delta K)^{7,08}$  obtida através de uma linha de tendência com  $R^2 = 0,961$ .



**Figura 4.30 - Curva Taxa de crescimento da trinca da/dN x Amplitude do fator de intensidade de tensões ΔK das amostras de material ferro fundido cinzento.**

Através de uma análise fractográfica em MEV das fraturas do ensaio de fadiga é possível perceber o aspecto da fratura frágil. Características de clivagem são predominantes no material Figura 4.31 (A) e (C). Na Figura 4.31 (B) é possível notar as lamelas de grafita que agem como concentradores de tensões propiciando a propagação da trinca no material.

Com aumento de aproximadamente 2000X é possível verificar lamelas de perlita fina do material, conforme Figura 4.31 (D).

Conforme literatura, as fractográficas encontradas são típicas para o material ferro fundido cinzento com uma estrutura de matriz perlítica fina (GUESSER 2009).



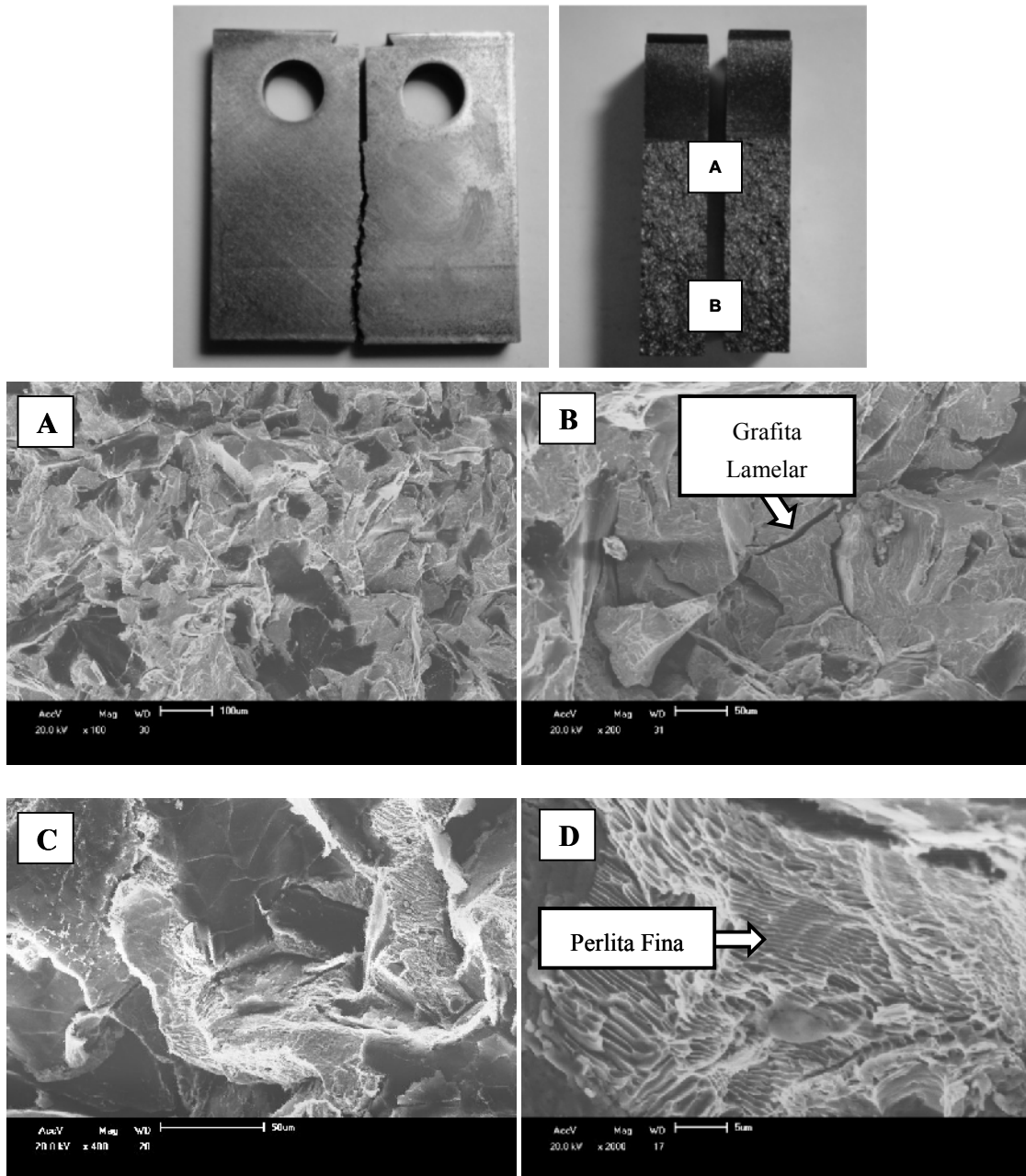
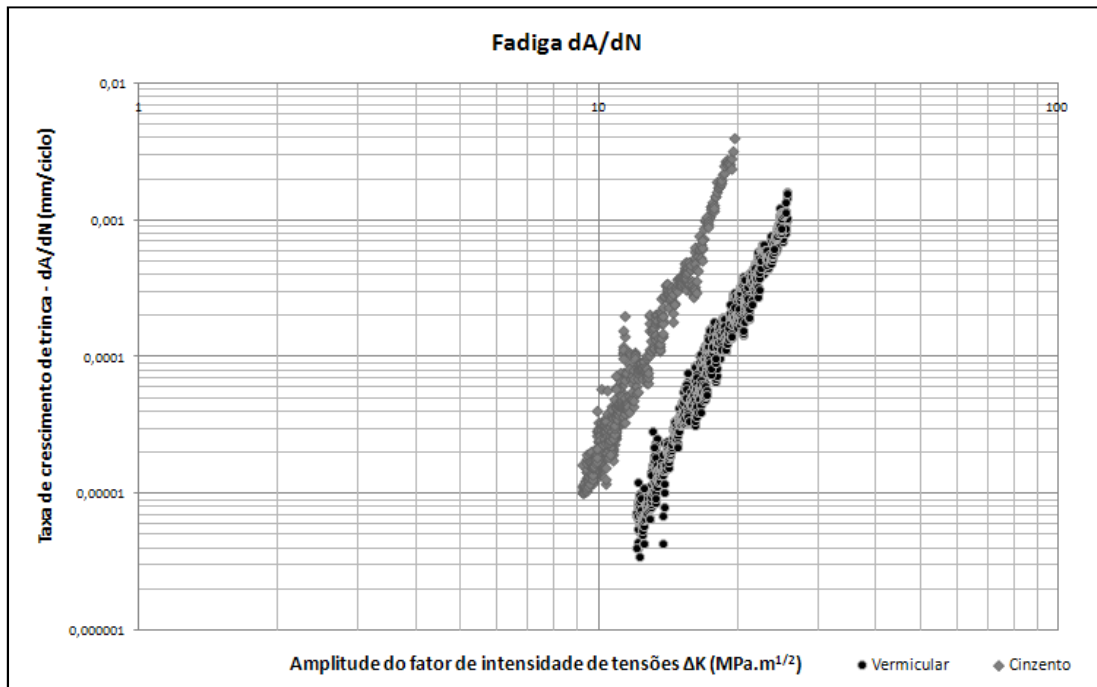


Figura 4.31 - Fractografias em MEV dos corpos de prova de Fadiga das amostras de material ferro fundido cinzento. (A) Aumento 100X, (B) Aumento 200X, (C) Aumento 400X e (D) Aumento 2000X.

#### 4.5.3 Fadiga - Comparativo Ferro Fundido Vermicular X Cinzento

Os resultados comparativos das curvas de fadiga utilizando o método da Mecânica da Fratura são apresentados na Figura 4.32 relacionando a taxa de crescimento da trinca  $da/dN$  (mm/ciclo) com amplitude do fator de intensidade de tensões  $\Delta K$  ( $\text{MPa}\cdot\text{m}^{1/2}$ ).





**Figura 4.32 – Curva Taxa de crescimento da trinca da/dN x Amplitude do fator de intensidade de tensões  $\Delta K$  das amostras de material dos blocos de motores.**

Na Figura 4.32 é possível verificar a superioridade do ferro fundido vermicular quando comparado ao ferro fundido cinzento, onde para uma mesma amplitude de fator de intensidade de tensões, a velocidade de crescimento da trinca das amostras do bloco do material ferro fundido cinzento se mostra uma escala de grandeza mais rápida quando comparada as amostras de bloco do ferro fundido vermicular.

Através das análises realizadas neste estudo, juntamente com a bibliografia consultada é possível comparar as propriedades mecânicas e de fadiga do Ferro Fundido Vermicular (Grafita Compactada) em relação ao Ferro Fundido Cinzento através de Vantagens X Desvantagens, conforme a Tabela 4.7.

**Tabela 4.7 - Comparação de propriedades entre materiais ferro fundido vermicular e cinzento.**

<i>Vantagens</i>	<i>Desvantagens</i>
<ul style="list-style-type: none"> <li>- Superior Limite de Resistência a Tração;</li> <li>- Superior Dureza do Material;</li> <li>- Superior Energia Absorvida ao impacto;</li> <li>- Superior Resistência a Fadiga;</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Limitada usinabilidade;</li> <li>- Processo de produção mais refinado;</li> <li>- Custo mais elevado.</li> </ul>

## 5 CONCLUSÕES

Neste estudo, determinou-se, analisou-se e comparou-se as propriedades mecânicas e de fadiga dos materiais ferro fundido cinzento e ferro fundido vermicular utilizados em blocos de motores Diesel. Para isto realizou-se análise de material, ensaios mecânicos e análise fractográfica das fraturas.

Analisando os resultados obtidos conclui-se que:

- Os ensaios de dureza evidenciam resultados superiores nas amostras de material do bloco de ferro fundido vermicular, com uma dureza 13% maior do que as amostras de material do bloco de ferro fundido cinzento.
- Os ensaios de tração demonstram através dos resultados a superioridade do ferro fundido vermicular quando comparado ao ferro fundido cinzento apresentando dobro de capacidade de deformação e 65% mais resistência a tração.
- Os ensaios de tenacidade ao impacto mostram que as amostras do bloco de material do bloco de ferro fundido vermicular apresentam resultados superiores, apresentando uma tenacidade ao impacto 110% maior do que as amostras de material do bloco de ferro fundido cinzento.
- Os ensaios de fadiga pelo método da mecânica da fratura determinaram velocidade de crescimento da trinca ( $da/dN$ ) para as amostras de material dos blocos ferro fundido vermicular e cinzento.
- Os resultados dos ensaios de fadiga evidenciam o material ferro fundido cinzento tem uma velocidade de propagação de trinca uma ordem de grandeza maior que o ferro fundido vermicular para uma mesma amplitude do fator de intensidade de tensões.
- Os resultados fractográficos evidenciam a influência da morfologia grafita no efeito concentrador de tensões. Onde ambos os materiais apresentam descontinuidades devido a presença de grafita. No material ferro fundido cinzento a presença da grafita na forma lamelar diminui a capacidade de deformação do material, o que justifica uma maior taxa de propagação de trinca quando comparado ao ferro fundido vermicular numa mesma amplitude do fator de intensidade de tensão.

Com base nos resultados obtidos, pode-se afirmar que o material ferro fundido vermicular é a melhor alternativa técnica para novos desenvolvimentos de blocos de motores Diesel baseado nas necessidades do mercado.

Os resultados deste estudo fornecem parâmetros de propriedades mecânicas e de fadiga, que contribuem para a adequação de projetos, processos e controles a fim de otimizar componentes e prevenir falhas.

Através deste estudo pesquisadores e fornecedor podem melhorar processos e produtos, desenvolver novos materiais e alcançar objetivos como: maior performance, maior desempenho, menor emissão e menor ruído.

## 6 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

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

- Analisar a resistência à Fadiga de blocos de motores através de outros métodos como Fadiga de alto ciclo (“Fatigue High Cycle”)/Fadiga controlada por tensões cíclicas e Fadiga de baixo ciclo (“Fatigue Low Cycle”)/Fadiga controlada por deformações cíclicas.
- Utilizar os resultados de obtidos para otimizar o projeto de um bloco de motor fundido atualmente com Ferro Fundido Cinzento, afim de comparar peso, eficiência, performance e resistência com o mesmo bloco projetado e produzido com o material Ferro Fundido Vermicular.

## 7 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABNT NBR 6589; **Peças em ferro fundido cinzento classificadas conforme a resistência à tração.** 1986.

ABNT NBR 13284; **Preparação de corpos-de-prova para análise metalográfica – Procedimento.** 1995.

ABNT NBR ISO 6892; **Materiais Metálicos - Ensaio de tração à temperatura ambiente.** 2002.

ALTSTETTER, J. D.; NOWICKI, R. M.; **Compated Graphite Iron: Its Properties and Automotive Applications.** American Foundry Society Transactions, v. 82-188, p. 959-970. 197-.

ANDRADE, C.; **Análise de furação do Ferro Fundido Vermicular com Brocas de Metal Duro com Canais Retos Revestidos com TiN e TiAlN.** – Dissertação de Mestrado – UFSC, Florianópolis, 2005.

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

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

ASTM E647-00; **Standard Test Method for Measurement of Fatigue Crack Growth Rates.**

ASTM E10-08; **Standard Test Method for Brinell Hardness of Metallic Materials.**

ASTM E1150-87; **Definitions of Terms Relating to Fatigue.** 1993.

BELTRÃO, M. A. N; **Propagação de Trincas de Fadiga em Juntas Soldadas Longitudinais de aço para dutos de classe API 5L X-70.** – Dissertação de Mestrado – UFRJ, Rio de Janeiro, 2005.

BHAT, S. P., FINE, M. E; **Fatigue Crack Nucleation in Iron and a High Strength Low Alloy Steel.** Materials Science and Engineering A v. 314, pp 90 – 96- 2001.

BICK, W. et al.; **Light weight engine concepts for 200 bar peak firing pressure.** 5th CGI Machining Workshop. Darmstadt, Germany, Sept 2003.

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.

BRETAS, R. A.; **Análise da Usinagem de roscas por interpolação helicoidal no ferro fundido vermicular.** – Dissertação de Mestrado - Instituto Superior Tupy, Joenville. 2009.

BROEK, D.; “**Elementary Engineering Fracture Mechanics**”, Martinus Nijhoff, The Netherlands. 612p, 2002.

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.

BOFF, C. R.; **Metodologia de Análise de Bloco de Motores.** – Dissertação de Mestrado - UFSC, Florianópolis, 2003.

BUCHHOLZ, K.; **Why Diesels, why not?** Automotive Engineering International – SAE, pg. 65-66, 2003.

CALLISTER, W. D.; **Materials Science and Engineering: An Introduction.** 7th Edition, pg 358-375, 2007.

CHIAVERINI, V.; **Aços e Ferros Fundidos.** 7ª ed. São Paulo: ABM, 2005. 518 p.

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

DAWSON, S.; **Operational properties of compacted graphite iron: Feedback from ongoing test programmes.** SinterCast S.A. - Technical Publication, 1994.

DAWSON, S.; **Compacted Graphite Iron: Mechanical and Physical Properties for Engine Design.** SinterCast S.A. - Technical Publication, 1999.

DAWSON, S. et al; **The effect of metallurgical variables on the machinability of compacted graphite iron.** SAE World Congress, 2001.

DAWSON, S; SCHROEDER, T.; **Practical Applications for Compacted Graphite Iron.** American Foundry Society Transactions, p. 1-9, 2004.

DAWSON, S.; **Compacted Graphite Iron – A New Material for Highly Stressed Cylinder Blocks and Cylinder Heads.** Internationales Wiener Motoren Symposium, 2007.

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.

DIN EN 10045-1; **Charpy impact test on metallic materials - test method.**

DIN 1691; **Flake graphite cast iron (grey cast iron) Properties.** 1995.

DOWLING N. E.; **Mechanical behavior of materials.** 2º ed. Ed Prentice-Hall, Londres, 1998.

EN 1561; **Founding - Grey cast irons.** 1997.

FERREIRA I.; **Fadiga e Degradação**, apostila FEM/UNICAMP, pp 2-3, 20-21, 50, 74-76, 2008.

FEV **Motorentchnik GmbH.** Disponível em: <http://www.fev.com/content/public/>. Acesso em: Out de 2011.

GOODRICH, G. M.; **Iron Castings Engineering Handbok.** AFS, 2003.

GUESSER, L. W.; SCHROEDER, T.; DAWSON, S.; **Production experience with compact graphite iron automotive components.** American Foundry Society Transactions, p. 1-11, 2001.

GUESSER, L. W.; **Ferro Fundido com Grafita Compactada.** Metalurgia e Materiais. pp 403-404, 2002.

GUESSER, L. W.; **Propriedades Mecânicas dos Ferros Fundidos.** 1ª ed. São Paulo: Editora Blucher, 2009. 336p.

GUESSER, L. W.; DURAN, P. V.; KRAUSE, W. **Compacted Graphite iron for Diesel Engine Cylinder Blocks.** Disponível em: <http://www.tupy.com.br/downloads/> Acesso em: 15 abr. 2009.

HERTZBERG, R.; **Deformation and Fracture Mechanics of Engineering Materials.** 3º ed. Wiley, New York. 1989.

HORSFALL, M. A & SERGEANT, G.F.; **The effect of different amounts of nodular graphite on the properties of compacted graphite irons.** BCIRA Journal, p 212 – 221, Report 1532, 1983.

IAC; **Instituto Aço Brasil.** Disponível em: <http://www.acobrasil.org.br/>. Acesso em: Abril. 2011;

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

ISO 185; **Grey cast irons – Classification.** 2005.

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

LAIRD, C.; **Mechanics and Theories of Fatigue.** Fatigue and Microstruture. pp 121 – 129. 1979.

LIN, M. R.; FINE, M. E.; MURA, T.; **Fatigue Crack Initiation on Slip Bands: Theory and Experiment.** Acta Metallurgica v.34, pp 619 – 628. 1986.

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.

MARTIN, T. et al.; **Dunnwandige Zylinderblocke aus Gusseseisen.** Giesserei-Erfahrungsaustausch n. 8, p. 357-362, 2003.

MEGGIOLARO, M. A., DE CASTRO, J. T. P.; **Comparing Overload-Induced Retardion Models on Fatigue Crack Propagation.** 56 Congresso ABM, Belo Horizonte, 2001.

MOCELLIN, F.; **Avaliação da usinabilidade do ferro fundido vermicular em ensaios de furação.** - Dissertação de Mestrado – UFSC, Florianópolis. 2002.

MORTSELL, M., HAMBERG, K., WASEN, J.; **Crack initiation in ductile cast irons.** *International Journal of Cast Metals Research*, vol 16 n 1-3, p.245-250. 2003.

**MWM International Motores.** Disponível em <http://www.mwm.com.br/>. Acesso em: Nov de 2010.

MUKHOPADHYAY, N. K. et al.; **An Investigation of the failure of low pressure steam turbine blades.** *Engineering Failure Analysis* 5, India . p. 18 1-1 93, 1998.

NEWMAN, J. A.; **The Effects of Load Ratio on Thershold Fadigue Crack Growth of Aluminum Alloys.** – Tese de Doutorado – Faculty of the Virginia Polutechnic Institute and State University, Virginia, USA. 2000.

PARIS, P. & ERDOGAN, F.; **J. Basis Eng. Trans.** ASME, 1963.

POULACHON, G. et al.; **Sulphide inclusion effects on tool-wear in high productivity milling of tool steels.** *Wear*, v.253, n.3-4, p.339-356, 2002.

PUSCH, G., LIESENBERG, O. BILGER, B.; **Beitrag zur bruchmechanischen Bewertung des Rissausbreitungsverhaltens Von Gusseisen bei zyklisch-mechanischen Beanspruchung.** *Giessereiitechnik*, vol 34, nº3, p 77-81.1988.

RACHE, M.; **Mecânica Diesel.** Hemus 2004 529p

REGULY A. et al.; **FADIGA E ANÁLISE DE FALHA.** Apostila LAMEF/UFRGS, 2001.

RICHARDS, C. E. & LINDLEY T. C.; **Eng. Fract. Mech.** 4 ed 1972.

ROHRIG, K. & WERNING, H.; **BMW-V8-Dieselmotor – realisiert mit innovativen Konstruktionen aus Gusseisenwerkstoffen.** *Konstruieren + Giessen*, v. 24, n. 3, p. 21-24, 1999.



ROSA, S.N.; **Influência do teor de titânio no torneamento do ferro fundido vermicular.** - Dissertação de Mestrado - UFC, Campinas. 2009.

RUFF, G. F. & DOSHI, B. K.; **Relation between mechanical properties and graphite structure in cast iron.** Part I – Gray Iron. Modern Casting, vol 70, nº6, p.50-55. 1980.

SALERNO, G.; **Influência da Deformação Média na Previsão de Vida em Fadiga de Baixo Ciclo da Liga AA/175-Ti.** - Dissertação de Mestrado – FEI, São Paulo. 2003.

SCHOFFMANN, W. et al.; **Development of engine structures for high performance Diesel engines.** 7th Machining Workshop for Powertrain Materials. Darmstadt, 2004.

SCHONFELD, F.; **Gusseisenwerkstoffe für Wirtschaftlichkeit und Zuverlässigkeit von NFZ-Dieselmotoren.** Giesserei-Praxis. 6, p 270-274, 2003.

SHIGLEY, J. E., MISCHKE C. R., BUDYNAS R.G.; **Projeto de Engenharia Mecânica.** 7ª edição. Porto Alegre: Buukman, 2005 960p

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, v.278, n.1-2, p. 54-60, 2000.

SILVA J. A.; **Análise Térmica na Solidificação de Ferros Fundidos Cinzentos Hipoeutéticos.** – Dissertação de Mestrado - UFC. Campinas, 2007.

SOCIE, D. F. & FASH, J.; **Fatigue behavior and crack development in cast iron.** AFS Transactions, vol 90, p 385-392. 1982.

SOUZA SANTOS, A. B., CASTELLO BRANCO, C.H.; **Metalurgia dos Ferros Fundidos Cinzentos e Nodulares.** 3ª edição. São Paulo: IPT, 1989. 205 p.

STEFANESCU, D. M.; **Compacted Graphite Iron.** In: ASM Handbook, 9ª ed. v. 15-Casting, Materials Park, ASM International, 1988. 937 p.

STROHAECKER, T. R.; **Mecânica da Fratura.** Apostila LAMEF/UFRGS, 2006.

SURESH, S.; **Fatigue of Materials.** 2ed Cambridge University Press. USA 1998.

VAN VLACK, I.H.; **Princípios de Ciências e Tecnologias dos Materiais.** 4ª ed. Rio de Janeiro: Campus, 1984. 567p. pg 495-502.

VOLLRATH, K; **Motorguss – Werden die Werkstoffarten neu gemischt?** Kontruieren + Giessen, v. 28, n.2, p. 25 – 27, 2003.

VDG W 50; **Gusseisen Mit Vermiculargraphit.** 2002.

WARRICK, R.J, et al., **Development and Application of Enhanced Compacted Graphite Iron for the Bedplate of the New Chrysler 4.7 Liter V-8 Engine.** SAE Paper. pp 99 - 144, 1999.

XAVIER, F.A; **Aspectos Tecnológicos do Torneamento do Ferro Fundido Vermicular com Ferramentas de Metal Duro, Cerâmica e CBN.** – Dissertação de Mestrado – UFSC, Florianópolis, 2003.

ZHANG, M., YANG, P., TAN, Y.; **Micromechanisms of Fatigue Crack Nucleation and Short Crack Growth in Low Carbon Steel Under Low Cycle Impact Fatigue Loading.** International Journal of Fatigue v. 21, pp 823-830. 1999