

PONTIFÍCIA UNIVERSIDADE CATÓLICA
DO RIO DE JANEIRO



Carlos Alberto Torres de Mello

**Vida em Fadiga de um Ferro Fundido Nodular
Ferrítico com Variações Microestruturais.**

Dissertação de Mestrado

Dissertação apresentada como requisito parcial para obtenção do grau de Mestre pelo Programa de Pós-graduação em Engenharia Metalúrgica do Departamento de Ciência dos Materiais e Metalurgia da PUC-Rio.

Orientador: Prof. Marcos Venicius Soares Pereira

Rio de Janeiro, janeiro de 2003



Carlos Alberto Torres de Mello

**Vida em Fadiga de um Ferro Fundido Nodular
Ferrítico com Variações Microestruturais.**

Dissertação apresentada como requisito parcial para obtenção do grau de Mestre pelo Programa de Pós-Graduação em Engenharia Metalúrgica do Departamento de Ciência dos Materiais e Metalurgia da PUC-Rio. Aprovada pela Comissão Examinadora abaixo assinada.

Prof. Marcos Venicius Soares Pereira

Orientador

Departamento de Ciência dos Materiais e Metalurgia
PUC-Rio.

Prof. Fathi Aref Ibrahim Darwish

Departamento de Ciência dos Materiais e Metalurgia
PUC-Rio.

Sidnei Paciornik

Departamento de Ciência dos Materiais e Metalurgia
PUC-Rio.

Prof. Cesar Roberto Ouro

Centro Federal de Educação Tecnológica – RJ.

Prof. Ney Augusto Dumont

Coordenador Setorial de Pós-Graduação do Centro
Técnico Científico da PUC-Rio.

Rio de Janeiro, 06 de janeiro de 2003

Todos os direitos reservados. É proibida a reprodução total ou parcial do trabalho sem autorização da universidade, do autor e do orientador.

Carlos Alberto Torres de Mello

Graduou-se em Engenharia Mecânica na Fundação Técnico Educacional Souza Marques em 1988. Especializou-se em fundição de ferro fundido. Realizou vários cursos de especialização da área no SENAI – Itaúna, MG, Escola da Metalurgia. Atualmente é professor na Universidade Católica de Petrópolis, no Departamento de Engenharia Mecânica.

Ficha Catalográfica

Mello, Carlos Alberto Torres de

Vida em fadiga de um ferro fundido nodular ferrítico com variações microestruturais / Carlos Alberto Torres de Mello; orientador: Marcos Venicius Soares Pereira. – Rio de Janeiro : PUC, Departamento de Ciências dos Materiais e Metalurgia, 2003.

[14], 81 f. : il. ; 30 cm

Dissertação (mestrado) – Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Departamento de Ciências dos Materiais e Metalurgia.

Inclui referências bibliográficas.

1. Ciência dos Materiais e Metalurgia – Teses. 2. Curvas S-N. 3. Tratamentos térmicos. 4. Metalografia quantitativa. I. Pereira, Marcos Venícius Soares. II. Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro. Departamento de Ciência dos Materiais e Metalurgia. III. Título.

CDD: 669

A Creusa Mello, minha esposa, pelo incentivo, amor, carinho e as minhas filhas, Carla e Camilly Mello, pela motivação e compreensão.

Aos meus pais, Eliseu e Elizeth, meus primeiros professores.

Agradecimentos

A DEUS, a quem devo toda Honra e toda Glória.

Ao Professor Marcos Venicius S. Pereira, orientador da tese e de vários momentos, pela amizade construída no caminho trilhado.

A minha amada igreja, Congregação Batista do Quitandinha II, pela compreensão, carinho e principalmente pelas orações.

Ao Professor Ricardo Grecchi Pacheco e ao Professor José Simões Bordeira, pela oportunidade, apoio e confiança depositada.

Ao Professor Carlos Renato Alves de Sousa, reitor da UCP, pelo incentivo e apoio financeiro.

As meus alunos, que me apoiaram demonstrando verdadeira amizade, em especial, Eduardo e Michelle.

Aos grandes amigos da PUC, formados durante a jornada, entre eles, Luzinete P. de Araújo, secretária, Marcelo Malheiros, do laboratório metalográfico e MEV e outros.

Aos professores Fathi Darwish, Sidnei Paciornik, Hélio Kohler e Roberto Avillez, pela grande ajuda e interesse nas pesquisas.

Ao aluno de graduação da PUC, Flávio Martinho e Amauri Louzada pelo apoio no tratamento digital de imagens.

Aos amigos e colegas da UCP, que sempre contribuíram com palavras de incentivo: Prof. J. Fontanella, Prof. G. Quadrelli, Prof^a Henriete, Prof^a. Gisela, Prof. André, Prof. Aldo, Prof^a Cristina, Gilson, Paulo, Carlos, Marlene, e outros.

A Prof^a Sheila Ferreira Neiva, pela correções ortográficas.

Aos demais que, diretamente ou indiretamente contribuíram para realização deste trabalho.

Resumo

Mello, Carlos Alberto Torres de; Pereira, Marcos Venicius Soares Pereira (Orientador). **Vida em Fadiga de um Ferro Fundido Nodular Ferrítico com Variações Microestruturais**. Rio de Janeiro, 2002. 95p. Dissertação de Mestrado – Departamento de Ciência de Materiais e Metalurgia, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

Esta pesquisa teve como objetivos promover variações microestruturais em um ferro fundido nodular ferrítico tipo ASTM A536 60-40-18, pelo do uso de resfriadores durante a solidificação do material e pela adoção de tratamentos térmicos pós-fundição, bem como avaliar a influência de tais variações microestruturais sobre as propriedades mecânicas e vida em fadiga do material.

Inicialmente, amostras do material foram fundidas em areia com e sem o uso de resfriadores. Após a fundição, algumas amostras de ambas as condições de resfriamento sofreram normalização, enquanto outras foram recozidas, perfazendo seis diferentes condições microestruturais: sem resfriador bruta de fundição (SRB); sem resfriador normalizada (SRN); sem resfriador recozida (SRR); com resfriador bruta de fundição (CRB); com resfriador normalizada (CRN) e com resfriador recozida (CRR).

Em seqüência, corpos de prova de todas as condições mencionadas acima foram ensaiados em tração e, posteriormente, sofreram análises metalográficas qualitativas e quantitativas. Dando continuação a etapa experimental, levantaram-se as curvas tensão versus número de ciclos para a falha das condições microestruturais SRB, SRR, CRB e CRR, por meio de ensaios de fadiga em flexão rotativa. A vida em fadiga do material também foi relacionada com às características metalúrgicas de cada condição.

A análise metalográfica indicou que o uso de resfriadores resultou num aumento da quantidade de nódulos de grafita, diminuição do tamanho médio dos nódulos e otimização da morfologia esférica. Entretanto, tais modificações microestruturais não influenciaram de maneira significativa as propriedades mecânicas do material. Por sua vez, os tratamentos térmicos de normalização e recozimento não promoveram variações sensíveis nas propriedades mecânicas das condições brutas de fundição.

Quanto a resistência à fadiga do material nas condições brutas de fundição, as amostras CRB obtiveram um melhor comportamento sob carregamento cíclico do que as amostras SRB, o que foi atribuído ao fato de que as primeiras apresentaram uma maior quantidade de nódulos de grafita da classe VI. Comparando-se as condições brutas com aquelas recozidas, constatou-se que as condições microestruturais SRR e CRR apresentaram um pior comportamento em fadiga do que as condições SRB e CRB, respectivamente. Associou-se tal comportamento com as características microestruturais das condições brutas de fundição, isto é, um menor tamanho dos nódulos de grafita, maior microdureza da matriz e a presença da estrutura “olho de boi”. Finalmente, as curvas experimentais tensão *versus* número de ciclos para a falha foram modeladas pela equação de Coffin-Manson, que se mostrou eficiente no tratamento dos dados da vida em fadiga do ferro fundido nodular ferrítico.

Palavras-chave

Curvas S-N; Tratamentos Térmicos; Metalografia Quantitativa.

Abstract

Mello, Carlos Alberto Torres de; Pereira, Marcos Venicius Soares (Advisor). **Fatigue Life of a Ferritic Nodular Cast Iron of Different Microstructures**. Rio de Janeiro, 2002. 95p. M.Sc. Dissertation – Department of Materials Science and Metallurgy, Catholic University of Rio de Janeiro.

The objectives of the present work were to promote microstructural variations in an ASTM A 536 60-40-18 ferritic nodular cast iron, making use of cast coolers during and adopting heat treatments after casting, as well as to evaluate the influence of the microstructural variations on the mechanical properties and fatigue life of the material.

Initially, samples of the material were cast in sand moulds with and without internal coolers. After casting, a number of samples in both cooling conditions were subjected to normalizing and annealing heat treatments and, therefore, six different microstructural conditions were obtained: as-cast without cooler (SRB), normalized without cooler (SRN), annealed without cooler (SRR), as-cast with cooler (CRB), normalized with cooler (CRN) and annealed with cooler (CRR).

Tensile test were carried out on specimens representing the above mentioned conditions and their microstructures were analysed by qualitative and quantitative metallography. In the sequence of the experimental procedure, rotating bend fatigue test were performed in order to establish the stress-life curves for the SRB, SRR, CRB and CRR microstructural conditions. The fatigue life of the material was also related to the metallurgical characteristics of each condition.

The metallographic analysis has indicated that the use of coolers increases the number of graphite nodules, reduces the graphite nodule size and optimizes the spherical morphology. However, these microstructural modifications seem to have no significant influence on the mechanical properties of the material. As to the effect of normalizing annealing, both treatments not imply in significant changes in the mechanical properties of the as-cast conditions.

Regarding the fatigue resistance of the material in the as-cast conditions, the CRB sample showed a longer fatigue life than the SRB samples and this performance under cyclic loading was attributed to the fact that the CRB condition is characterized by a higher number of graphite nodules of class VI. A comparison between the as-cast and annealed conditions indicated that the microstructural conditions SRR and CRR presented a lower fatigue resistance than the conditions SRB and CRB, respectively. This behaviour was associated with the microstructural features of the as-cast conditions, namely the smaller graphite nodule size, the higher microhardness of the matrix and the presence of the “bull’s-eye” structure. Finally, the experimental stress-life curves were modelled by means of Coffin-Manson law, which was considered efficient in the fatigue life data of ferritic nodular cast iron.

Keywords

S-N Curves; Heat Treatments; Quantitative Metallography.

Sumário

1. Introdução	15
2. Revisão bibliográfica	17
2.1. Ferros fundidos	17
2.1.1 . Definição	17
2.1.2. Classificação	17
2.2 . Fatores de influência na microestrutura do ferro fundido	18
2.2.1 . Velocidade de resfriamento	19
2.2.2 . Composição química	21
2.3 . Ferro fundido nodular	22
2.3.1. Fabricação do ferro fundido nodular	22
2.3.1.1 . Tratamento de esferoidização	23
2.3.1.2 . Tratamento com magnésio	24
2.3.1.3 . Quantidade de liga recomendada	24
2.3.1.4 . Método de tratamento com liga de magnésio	25
2.3.2 . Tratamento térmico do ferro fundido nodular	25
2.4 . Influência do nódulo de grafita na resistência mecânica do ferro fundido	27
2.5. Fadiga	29
2.5.1 . Origem da fadiga	29
2.5.2 . Ensaio de fadiga	34
2.5.3 . Modelagem da curva S-N	34
2.5.4 . Limite de resistência à fadiga	36
2.6 . Tratamento digital de imagem	36
2.6.1. Conceito	
3. Material e procedimento experimental	38
3.1 . Material	38
3.2 . Preparação das amostras fundidas	40
3.3. Tratamentos térmicos	42

3.3.1 . Normalização	42
3.3.2 . Reozimento	42
3.4 . Nomenclatura das amostras fundidas	43
3.5 . Posição de retirada e geometria dos corpos de provas	43
3.5.1 . Corpo de prova para ensaio de tração	43
3.5.2 . Corpo de prova para ensaio de fadiga rotativa	45
3.6 . Ensaio de tração	46
3.7 . Ensaio de fadiga	46
3.8 . Caracterização microestrutural	49
3.9 . Dureza	50
3.9.1. Dureza Rockwell	51
3.9.2 . Dureza Vickers	51
3.10 . Análise das superfícies de fratura	
4 . Resultados	52
4.1. Propriedades mecânicas	52
4.2. Resultados de fadiga	57
4.3 . Resultados de caracterização microestrutural	67
4.4. Resultados de dureza	67
4.5 .Superfícies de fraturas.	
5. Discussão geral	77
5.1 . Influência dos resfriadores no fundido	77
5.2 . Tratamentos térmicos	78
5.3 . Fadiga	79
5.3 . Modelagem das curvas S-N	86
6. Conclusão	92
7. Referências bibliográficas	94

Lista de figuras

Figura 1.1 – Pirâmide de processo	16
Figura 2.1 - Velocidade de resfriamento	19
Figura 2.2 - Nódulo de grafita em uma superfície de fratura	25
Figura 2.3 – Propagação de trinca entre os nódulos de grafita	30
Figura 2.4 – Ciclo de tensões de fadiga	32
Figura 2.5 – Representação esquemática de fratura por fadiga	32
Figura 3.1 - Geometria do tipo “Y-block”	39
Figura 3.2 – Dimensões em mm do “Y-block”	39
Figura 3.3 – Posicionamento dos resfriadores nos “Y-block”	40
Figura 3.4– Dimensões em mm dos resfriadores no “-block”	41
Figura 3.5 – C.P. cabeça lisa para ensaio de tração	44
Figura 3.6 – Dimensões em mm do cp de ensaio de tração	44
Figura 3.7 – CP para ensaio de fadiga	45
Figura 3.8 – Dimensões em mm do cp de ensaio de fadiga	45
Figura 3.9 – Diagrama de esforços durante o ensaio de fadiga	47
Figura 3.10- Esquema da máquina de fadiga	47
Figura 3.11–Classificação da grafita ISO 945	50
Figura 4.1 – Gráfico de resistência à fadiga – condição SRB	55
Figura 4.2 – Gráfico de resistência à fadiga – condição SRR	55
Figura 4.3 – Gráfico de resistência à fadiga – condição CRB	56
Figura 4.4 – Gráfico de resistência à fadiga – condição CRR	56
Figura 4.5 – Amostra na condição SRB – sem ataque	57
Figura 4.6 – Amostra na condição SRB – com ataque	57
Figura 4.7 – Amostra na condição CRB – sem ataque	58
Figura 4.8 – Amostra na condição CRB – com ataque	58
Figura 4.9– Amostra na condição SRN – sem ataque	59
Figura 4.10–Amostra na condição SRN – com ataque	59
Figura 4.11–Amostra na condição CRN – sem ataque	60
Figura 4.12–Amostra na condição CRN – com ataque	60
Figura 4.13- Amostra na condição SRR – sem ataque	61
Figura 4.14–Amostra na condição SRR – com ataque	61

Figura 4.15–Amostra na condição CRR – sem ataque	62
Figura 4.16–Amostra na condição CRR – com ataque	62
Figura 4.17- Amostra SRB – ataque com metabissulfito de potássio	65
Figura 4.18- Amostra SRR – ataque com metabissulfito de potássio	65
Figura 4.19- Amostra CRB – ataque com metabissulfito de potássio	66
Figura 4.20- Amostra CRR – ataque com metabissulfito de potássio	66
Figura 4.21–Superfície de fratura condição SRB 14X – 125 MPa	68
Figura 4.22–Superfície de fratura condição SRB 200X - 125 MPa	68
Figura 4.23–Superfície de fratura condição SRB 14X – 125 MPa	69
Figura 4.24–Superfície de fratura condição SRB 200X – 180MPa	69
Figura 4.25–Superfície de fratura condição SRR 14X – 120 MPa	70
Figura 4.26–Superfície de fratura condição SRB 200X – 120MPa	70
Figura 4.27–Superfície de fratura condição SRB 14X – 180 MPa	71
Figura 4.28–Superfície de fratura condição SRB 200X – 180MPa	71
Figura 4.29–Superfície de fratura condição CRB 14X – 135 MPa	72
Figura 4.30–Superfície de fratura condição CRB 200X – 135 MPa	72
Figura 4.31–Superfície de fratura condição CRB 1000X –135 MPa	73
Figura 4.32- Superfície de fratura condição CRB 14X – 180 MPa	73
Figura 4.33- Superfície de fratura condição CRB 200X – 180 MPa	74
Figura 4.34- Superfície de fratura condição CRB 1000X – 125 MPa	74
Figura 4.35- Superfície de fratura condição CRR 14X – 100 MPa	75
Figura 4.36- Superfície de fratura condição CRR 200X – 100 MPA	75
Figura 4.37- Superfície de fratura condição CRR 14X – 180 MPa	76
Figura 4.38- Superfície de fratura condição CRR 200X 180 MPa	76
Figura 5.1 – Comparação da resistência à fadiga do material na condição microestrutural SRB e SRR	80
Figura 5.2 – Comparação da resistência à fadiga do material na condição microestrutural CRB e CRR	81
Figura 5.3 – Comparação da resistência à fadiga do material na condição microestrutural SRB e CRB	82
Figura 5.4– Comparação da resistência à fadiga do material na condição microestrutural CRR e SRR	84
Figura 5.5 – Comparação global da resistência à fadiga do ferro fundido nodular nas quatro condições apresentadas	85
Figura 5.6 – Modelagem dos dados experimentais de fadiga de alto ciclo para a condição microestrutural SRB	87
Figura 5.7 – Modelagem dos dados experimentais de fadiga de alto ciclo para a condição microestrutural SRR	87
Figura 5.8 – Modelagem dos dados experimentais de fadiga de alto ciclo para a condição microestrutural CRB	88
Figura 5.9 – Modelagem dos dados experimentais de fadiga de alto ciclo para a condição microestrutural CRR	88

Lista de tabelas

Tabela 3.1 – Composição química do ferro fundido nodular	38
Tabela 3.2 – Nomenclatura das amostra fundidas	43
Tabela 3.3 – Relação de carga e tensão de flexão atuante nos cps.	48
Tabela 4.1 – Características mecânicas dos materiais	52
Tabela 4.2 – Parâmetros de ensaio de fadiga na condição SRB	53
Tabela 4.3 – Parâmetros de ensaio de fadiga na condição SRR	53
Tabela 4.4 – Parâmetros de ensaio de fadiga na condição CRB	54
Tabela 4.5 – Parâmetros de ensaio de fadiga na condição CRR	54
Tabela 4.6 – Quantidade de nódulos de grafita do material	63
Tabela 4.7 – Tamanho médio dos nódulos	63
Tabela 4.8 – Fração volumétrica dos constituintes micrográficos	63
Tabela 4.9 – Tamanho médio do grão de ferrita	64
Tabela 4.10 – Classificação da grafita segundo Iso 945	64
Tabela 4.11 – Tabela de dureza Rockwell	67
Tabela 4.12 – Tabela de dureza Vickers	67
Tabela 5.1 – Tabela do coeficiente de linearidade	89
Tabela 5.2 – Tabela do coeficiente da equação de Coffin-Manson	89
Tabela 5.3 – Tabela de valores do coeficientes de fadiga e da resistência monotônica real da fratura	90

