

PREVISÃO DA RESISTÊNCIA À FADIGA DE EIXOS VIRABREQUINS EM ADI⁽¹⁾

Denilson José do Carmo⁽²⁾
José Felipe Dias⁽³⁾
Cleber Garcia Menezes⁽⁴⁾
Fernando César Lee Tavares⁽⁵⁾

RESUMO:

Os ferros fundidos nodulares austemperados (ADI) apresentam propriedades que os credenciam para a aplicação em componentes submetidos à fadiga. A sua utilização em eixos virabrequins, possibilita redução de peso e aumento de potência de motores de combustão interna não somente para os casos onde o nodular já é empregado, como também na substituição do aço forjado. Neste sentido, a aplicação de modelos matemáticos de previsão de vida à fadiga que levam em consideração a presença de defeitos e a microestrutura são ferramentas muito importantes no projeto e otimização do processo de produção destes componentes. Avaliou-se neste trabalho a aplicação do modelo de Murakami e Endo que estima o limite de fadiga em componentes metálicos contendo defeitos, inclusões e heterogeneidades microestruturais. Foram feitas adequações no modelo para aplicá-lo ao ADI, utilizando a área projetada da grafita e a microdureza da matriz ausferrítica. Ensaios de fadiga por flexão rotativa, em corpos de prova extraídos de eixos virabrequins austemperados produzidos em condições industriais, comprovaram a eficácia do modelo utilizado.

PALAVRAS-CHAVE:

ADI, Fadiga, Eixo Virabrequim

- (1) Trabalho apresentado no V Seminário de Fundição – 17 a 19 de maio de 2004 - Salvador – Bahia
- (2) Engenheiro Industrial Mecânico, M.Sc, Assistente de Tecnologia, SENAI/CETEF, (Serviço Nacional de Aprendizagem Industrial/Centro Tecnológico de Fundição Marcelino Corradi)
- (3) Engenheiro Industrial Mecânico, M.Sc, Professor, Universidade de Itaúna, Doutorando, EE-UFG.
- (4) Graduando em Engenharia Industrial Mecânica, Faculdade de Engenharia da Universidade de Itaúna.
- (5) Engenheiro Metalurgista, M.Sc, Chefe de Engenharia de Metalurgia da ThyssenKrupp Automotive.

INTRODUÇÃO

O ferro fundido nodular austemperado, conhecido como ADI (*Austempered Ductile Iron*) é um ferro fundido nodular ligado e tratado termicamente por austêmpera. O ADI está ganhando mercado pela sua singular combinação de resistência mecânica e tenacidade. O crescimento da utilização do ADI é observado nos Estados Unidos (Figura 1). O material vem sendo apontado por pesquisadores e industriais como uma opção de mercado para as fundições, pois possibilita a competição com aços forjados e com ligas leves. Como aplicações já estabelecidas do ADI citam-se: engrenagens; caixas de câmbio; parafusos; eixos virabrequins e de comando de válvulas; cruzetas de diferencial; suportes de motor; sapatas de freio; peças de equipamentos para escavação e terraplenagem; carcaças para marteletes pneumáticos; grampos para ferrovias; berços para motores diesel; união articulada de suspensão e capa para mancais de vagões de carga (Carmo e Dias, 2001).

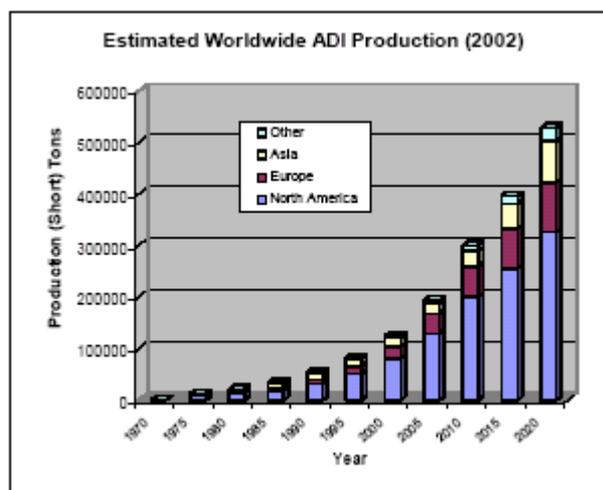


Figura 1 - Produção norte americana comparada à produção de ADI de outras partes do mundo. Período: 1970 a 2020 (Keough, 2002).

A resistência à fadiga do ADI tem atraído a atenção de vários segmentos da indústria. Aplicações recentes do ADI em componentes submetidos à fadiga com carregamento de amplitude variável reforça o potencial deste material como ilustram os componentes apresentados nas Figuras 2 e 3 (Keough, 2002).

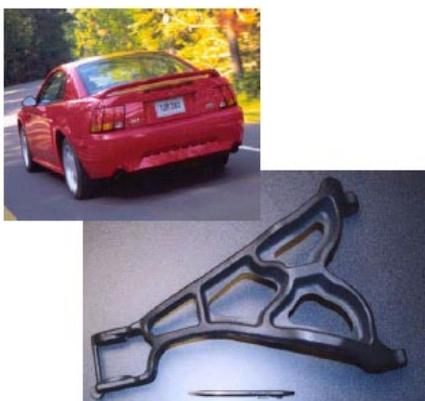


Figura 2 – Braço de direção em ADI para automóvel (Keough, 2002).



Figura 3 – Braço de direção em ADI para trator (Keough, 2002).

O SENAI/CETEF vem desenvolvendo uma linha de pesquisa aplicada, relacionada ao ADI, notadamente para peças submetidas à condição de fadiga o que pode ser observado nas referências apresentadas e por trabalhos de parceria com empresas (Carmo, 1996; Carmo et al., 2001; Meneses et al., 2003; Silva et al., 2003).

FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Determinar a resistência à fadiga de componentes fabricados em ADI se constitui em um problema de estimativa da resistência à fadiga de componentes estruturais e mecânicos contendo defeitos naturais, inclusões e heterogeneidades, provenientes do processo de fabricação. Este assunto é de grande importância tanto do ponto de vista industrial quanto científico (Beretta et al., 1997). Contudo o estudo da influência destes defeitos é complicado devido à variação na forma, no tamanho, na sua localização e quantidade. Então, são utilizados métodos empíricos, capazes de estimar a resistência à fadiga e de permitir a adoção de uma filosofia de projeto adequada à otimização do processo de fabricação.

Os métodos mais utilizados na previsão da resistência à fadiga de componentes contendo defeitos, consideram que os mesmos podem ser tratados como trincas. Estes tipos de previsão têm sido objeto de estudo de engenheiros e pesquisadores, que utilizam diferentes modelos e abordagens (Murakami e Endo, 1993, 1994, Beretta et al., 1997, Reed et al., 2003). Segundo Beretta et al. (1997) entre os modelos existentes destacam-se os propostos por Kazinczy, El-Haddad e Murakami e Endo, pela facilidade de aplicação; sendo este último, o modelo mais completo. A Equação (1) apresenta o modelo proposto por Murakami e Endo, onde se observa a adoção de \sqrt{A} como o parâmetro geométrico do defeito, tornando-o um modelo tridimensional (Murakami e Endo, 1994). Sendo A a área projetada do defeito em um plano perpendicular à máxima tensão normal. Segundo os autores do modelo, a escolha da \sqrt{A} como parâmetro geométrico do defeito originou-se de observações e análise numérica, tendo como base o fator de intensidade de tensão (Murakami e Endo, 1983).

$$\sigma_w = \frac{c_3 \cdot (H_v + 120)}{(\sqrt{A})^{1/6}} \cdot \left(\frac{1 - R}{2} \right)^{0.226 + H_v \cdot 10^{-4}} \quad (1)$$

onde σ_w é o limite de resistência à fadiga determinado por flexão rotativa ou carregamento axial; c_3 , constante (1,43 para defeitos superficiais e 1,56 para defeitos internos); H_v , dureza Vickers; R , razão entre tensões.

Este modelo tem sido utilizado em problemas de fadiga de componentes com pequenas trincas, com pequenos furos, com ranhuras superficiais, rugosidade superficial, inclusões não-metálicas, pontos de corrosão, carbonetos em aços ferramenta, partículas de segunda fase em ligas Al-Si e grafita esferoidal em ferros fundidos nodulares. Verificou-se que o modelo apresenta um erro de $\pm 10\%$ em materiais metálicos, contendo defeitos variando de 16 a $1000\mu\text{m}$ e dureza Vickers entre 70 e 720. (Murakami e Endo, 1994; Beretta et al., 1997). Recentemente Dias et al. (2003) avaliaram o fundamento do modelo de Murakami e Endo, ou seja o parâmetro \sqrt{A} , utilizando o programa computacional FRANC3D/BES. Foram

realizadas análises comparativas de trincas emanando de cavidades ou furos produzidos durante o processo de fabricação do componente. Os autores comparam também o fator de intensidade de tensão de uma trinca nucleada a partir de uma cavidade esférica, representado um esferóide de grafita presente nos ferros fundidos nodulares.

Em função dos resultados obtidos pelas referências citadas, planejou-se o presente trabalho que objetiva através da avaliação do modelo citado, disponibilizar aos engenheiros de projeto e desenvolvimento de elementos estruturais e de máquinas um modelo para a previsão da resistência à fadiga, levando em consideração a influência de defeitos e constituintes do ferro fundido nodular austemperado (ADI).

METODOLOGIA

A Equação (1) que prevê a resistência à fadiga, será avaliada em corpos de prova extraídos de eixos virabrequins fundidos e tratados termicamente. As peças foram produzidas em condições industriais pela ThyssenKrupp Fundições. A fusão foi realizada em forno de indução utilizando como carga metálica: gusa, sucata de aço, retorno de fundição e adições de elementos de liga. A nodulização foi feita pelo processo Tundish com tratamento de pós-inoculação. A temperatura de tratamento foi próxima a 1500°C e a de vazamento situou-se entre 1394°C e 1436 °C.

No tratamento térmico as peças foram colocadas em um forno elétrico tipo poço permanecendo por 2 horas à temperatura de 900°C, sendo resfriadas em banho de sais até a temperatura de austêmpera de 370°C, e mantidas por 1 hora e 30 minutos. Os valores de tempo e temperatura foram definidos em trabalhos anteriores (Costa e Dias, 1995 e Carmo, 2003).

Para determinar a curva S-N e o limite de fadiga em corpos de prova extraídos dos virabrequins utilizou-se uma máquina de ensaio de fadiga por flexão rotativa modelo RBF-200 fabricada pela Fatigue Dynamics Inc, apresentada na Figura 4. O desenho esquemático do corpo de prova para ensaio de fadiga é apresentado na Figura 5 e a Figura 6 mostra o local de retirada dos corpos de prova no virabrequim.



Figura 4 –Máquina de ensaio de fadiga por flexão rotativa – Modelo RBF-200.

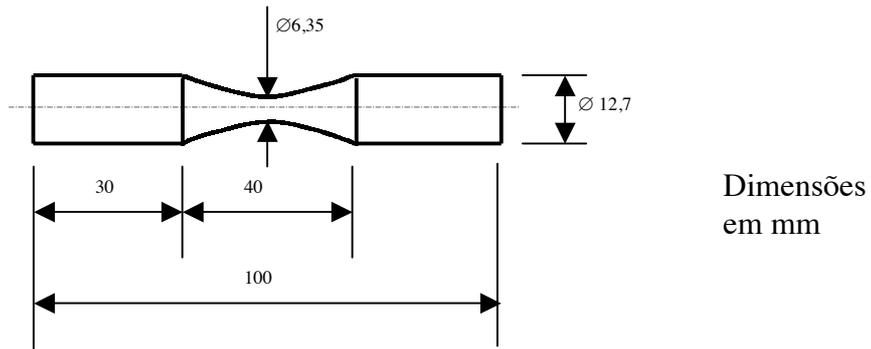


Figura 5 –Corpo de prova utilizado no ensaio de fadiga por flexão rotativa.



Figura 6 – Local de retirada dos corpos de prova no virabrequim.

Para obtenção da curva S-N e do limite de fadiga foram ensaiados 30 corpos de prova variando a tensão entre 400 e 650 MPa a uma frequência de 60 Hz, utilizando-se 3 corpos de prova para cada valor de tensão. Para determinar o limite de fadiga médio a 5×10^6 ciclos, utilizou-se o método “escada” (Menezes et al.) cujo valor é calculado pela Equação (2) e o desvio padrão é dado pela Equação (3). O sinal positivo da Equação (2) é usado quando se consideram os corpos de prova não rompidos e o sinal negativo para análise baseada nos corpos de prova rompidos; devendo-se utilizar o evento que ocorreu em menor número:

$$\sigma_f = \sigma_0 + \Delta\sigma \left(\frac{\sum i \times n_i}{\sum n_i} \pm \frac{1}{2} \right) \quad (2)$$

$$\delta = 1,620 \times \Delta\sigma \left(\frac{\sum n_i \times \sum i^2 \cdot n_i - \sum i \cdot n_i}{(\sum n_i)^2} + 0,029 \right) \quad (3)$$

onde σ_f é o limite de fadiga médio; σ_0 o valor da menor tensão ensaiada onde não ocorreu ruptura; i o número de corpos de prova; n_i o número de corpos de prova relativo ao evento que ocorreu em menor número; $\Delta\sigma$ é o incremento fixo da tensão, crescente ou decrescente da “escada” e δ o desvio padrão.

RESULTADOS

A composição química obtida é apresentada na Tabela I. Os elementos Cu, Ni e Mo objetivam proporcionar a austemperabilidade necessária, ou seja, evitar a formação de perlita. Apresenta-se na Tabela II os resultados da análise da microestrutura

quanto à forma, quantidade e tamanho da grafita, obtidos através de uma adaptação do software de análise de imagem HImage2001.

Tabela I - Composição química dos virabrequins analisados (%).

C	Si	Mn	S	Cu	Ni	Mo	P	Mg
3,45	2,35	0,10	0,006	0,50	1,00	0,20	0,02	0,035

Tabela II – Análise da grafita.

Análise da grafita	Resultados
Nódulos de grafita por mm ²	301
Nodularidade	95,75 %
Tamanho da grafita (ASTM A 247)	6 (20 – 40µm) – 33,7% 7 (10 – 20µm) – 45,6%

Os resultados de tração, dureza e alongamento dos corpos de prova retirados dos virabrequins são apresentados na Tabela III.

Tabela III – Resultados Mecânicos.

Corpos de Prova retirados dos Virabrequins	Dureza (HRC)	Resistência à tração (MPa)	Alongamento (%)
01	23	934,9	17,1
02	22	913,3	16,1

Os valores de dureza, resistência à tração e alongamento, se enquadram na classe 1 da ASTM A 897. Trata-se da classe do ADI de maior ductilidade, correspondendo às classes típicas para peças em ADI submetidos à fadiga.

Para obtenção da curva S-N, Figura 7, foram ensaiados 18 corpos de prova. O ensaio foi interrompido quando o corpo de prova atingia 2×10^6 ciclos. Os resultados dos corpos de prova que romperam antes de atingir 2×10^6 ciclos foram ajustados à Equação (4) proposta por Basquin com um fator de correlação $R = 0,983$:

$$\sigma_N = 1723,9 \times N^{-0,103} \quad (4)$$

onde σ_N é tensão normal a N ciclos; e N o número de ciclos previstos (vida à fadiga).

Utilizando as Equações. 4 e .5 e os dados da Tabela. IV obteve-se para o limite de fadiga médio $\sigma_f = 425 \pm 21,16$ MPa a 5×10^6 ciclos.

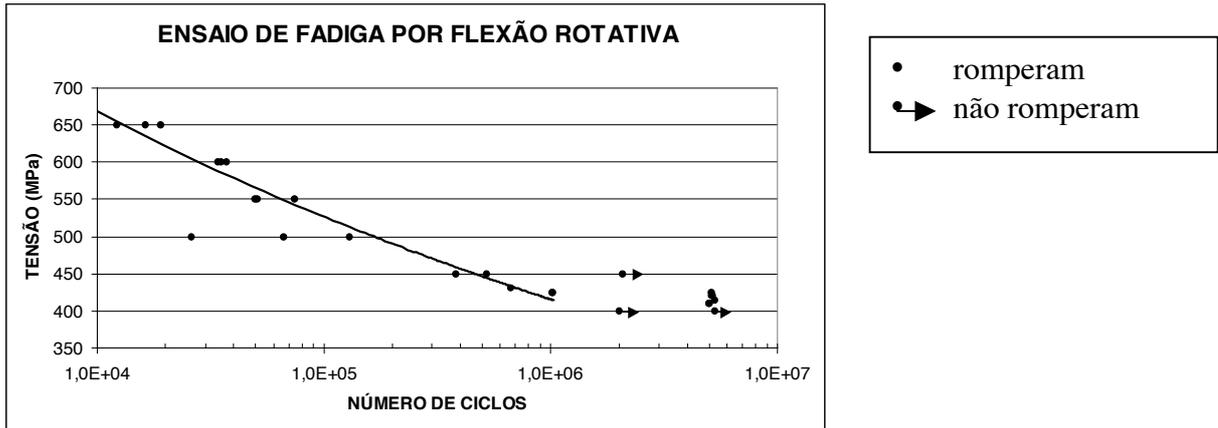


Figura 7 – Curva S-N para corpos de prova extraídos do virabrequim em ADI.

Tabela IV – Resultados para cálculo do limite de fadiga pelo método “escada”

Tensão	<i>i</i>	<i>n_i</i> (rompidos)	<i>i.n_i</i>	<i>i².n_i</i>
410	2	0	0	0
415	3	1	3	9
420	5	3	15	75
425	2	1	2	4
430	1	1	1	1
Σ	13	6	21	89

Aplicação do modelo de Murakami e Endo de previsão do limite de fadiga

Observando o modelo de Murakami e Endo (1994) verifica-se que o mesmo, antes aplicado para nodular convencional, é promissor para a aplicação em ADI, porque considera o efeito da matriz, da grafita e de defeitos de fundição. No entanto, não foi encontrada referência sobre a sua aplicação para o ADI, portanto, não se sabe se as constantes utilizadas na Equação (1) são adequadas a este material. Para verificar a aplicabilidade do modelo para o ADI, utilizando os resultados obtidos, considerou-se a área máxima da grafita. No entanto, Beretta et al.(1997) apresenta um método estatístico, verificado por Murakami e colaboradores, apropriado para se determinar a dimensão máxima de defeitos e heterogeneidades.

Resultados preliminares indicaram a necessidade de adequações no modelo. A mais evidente foi a constante associada à dureza, uma vez que a resistência à fadiga do ADI não é diretamente proporcional à dureza do material (ductile.org, 2003). Então, uma primeira tentativa foi utilizar o modelo proposto por Murakami e Endo (1994) mas com uma pequena alteração como mostra a Equação (5); para R=-1:

$$\sigma_w = \frac{c_3(C_1 - HV)}{(\sqrt{\text{área}})^{1/6}} \quad (5)$$

Nota-se que (HV +120) foi substituído por (C₁ – HV). O sinal negativo de HV deve-se ao fato das classes de menores durezas do ADI superarem as de maiores durezas

quanto à resistência à fadiga, ao contrário do nodular convencional. Utilizando os resultados obtidos, verificou-se que C_1 variou de 887 a 935 HV, utilizando a área máxima da grafita. Adotando o valor médio da constante C_1 , foram determinados os valores para o limite de fadiga utilizando a Equação (5). Os resultados são apresentados na Tabela V e Figura 8, onde se nota uma boa correlação entre os valores previstos pela Equação 6 e os obtidos experimentalmente, indicando então que o modelo poderá ser aplicado ao ADI, desde que se faça as alterações necessárias. É importante destacar a necessidade de um número maior de ensaios para que o valor da constante C_1 seja determinado para outras temperaturas de austêmpera e também, que seja utilizada a análise estatística apresentada por Beretta et al (1997) para determinar a dimensão máxima do defeito ou heterogeneidade; trabalho este que se encontra em andamento.

Tabela V – Comparação entre limite de resistência à fadiga previstos pela Equação 5.

Corpo de prova	Área Máxima	Dureza	Limite de resistência à fadiga (MPa)		Relação
	μm^2		HV0,5	Previsão pela Eq.5, $c=1,43, C_1=910$	
			σ_w	σ_{limite}	
1	1813	367	415	425	1,02
2	2366	335	430	420	0,98
3	1347	390	408	420	1,03
4	1658	313	460	410	0,89
5	1777	333	442	415	0,94
6	1589	366	421	415	0,99
7	1131	369	431	410	0,95
8	1399	379	415	415	1,00
9	1272	380	418	420	1,01
10	1208	399	405	430	1,06

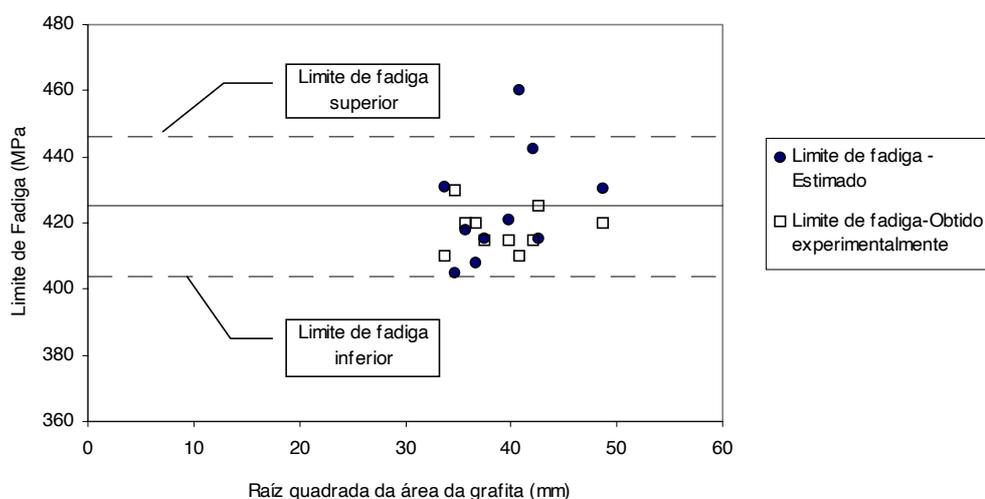


Figura 8 – Comparação entre o limite de fadiga obtido experimentalmente e o limite de fadiga estimado pela Equação (5).

CONCLUSÕES

Através dos resultados do trabalho, pode-se concluir que:

- Os modelos matemáticos encontrados na literatura não se aplicam na previsão de vida da resistência à fadiga do ADI;
- A alteração proposta neste trabalho no modelo de previsão do limite de fadiga de Murakami e Endo, para materiais com defeitos, trincas e heterogeneidades, mostrou-se bastante eficaz para o ADI;
- A estimativa do limite de fadiga do ADI pode ser feita de maneira fácil e rápida através da área da grafita e da microdureza da matriz, podendo contribuir para o processo de desenvolvimento de novos produtos e melhoria ou otimização dos processos de fabricação;
- A utilização do ADI, em eixos virabrequins pode contribuir para a redução de custo, peso e o aumento de potência dos motores de combustão interna, considerando sua notável resistência à fadiga em relação aos materiais concorrentes;

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Beretta, S., Blarasin, A., Endo, M., Giunti, T., Murakami, Y., 1997, **Defect tolerant design of automotive components**, International Journal of Fatigue, vol. 19, n. 4, pp. 319-333.

CARMO, Denilson José do.; ROCHA, Ênio.. **Obtenção de triturador de amostras para análises químicas utilizando o ferro fundido nodular austemperado (ADI)**. Itaúna, CETEF, 1996. 24p., il.

CARMO, Denilson José do; DIAS, José Felipe. **Ferro fundido nodular austemperado ADI**. Itaúna, SENAI-DR/MG, 2001. 110p., il.

CARMO, Denilson José do; MACHADO, Ioná Macedo Leonardo.; LEE, Fernando. **Definição de parâmetros para a produção de peças em ADI para componentes de tratores**. Itaúna, CETEF, 2000. 50p. il.

COSTA, E. e DIAS, J.F. (1995). **Desenvolvimento do processo de obtenção do ADI – Uma experiência vivenciada pelo CETEF**. Congresso Nacional de Fundação. ABIFA 1995.

DIAS, J.F.; TEIXEIRA, R.S.; RIBEIRO, G.O. (2003). **Avaliação numérica do fator de intensidade de tensão em componentes contendo defeitos**. 24º Congresso Ibero Latino-Americano de Métodos Computacionais em Engenharia - CILAMCE Ouro Preto, Brasil.

KEOUGH, J.R. (2002). **ADI Developments in North America – Revisited**. Applied Process Inc. Technologies Div.- Livonia, Michigan, USA.

MENESES, Cleber Garcia; CARMO, Denilson José do; TAVARES, Fernando César Lee. **Análise da resistência a fadiga de virabrequins em ferro fundido nodular austemperado (ADI)**. In: SEMINÁRIO DE FUNDICAO, 4., 2003, VOLTA REDONDA. Anais.... Volta Redonda: ABM, 2003. p.1-11.

MURAKAMI, Y. & ENDO, M., 1983, **Quantitative evaluation of fatigue strength of metals containing various small defects or cracks**, Engineering Fracture Mechanics, vol. 17, n. 1, pp. 1-15.

MURAKAMI, Y. & ENDO, M., 1994, **Effects of defects, inclusions and inhomogeneities on fatigue strength**, Fatigue, vol. 16, April, pp. 163-182.

Reed, P.A.S., Thomson, R.C., James, J.S., Putman, D.C., Lee, K.K., Gunn, S. R., 2003, **Modelling microestructural effects fatigue of austempered ductile iron**, Materials Science and Engineering A, vol. 346, pp. 273-286.

SILVA, Ana Paula; PARREIRAS, Clésio de Souza; CARMO, Denilson José do. **Aplicação do ferro fundido nodular austemperado (ADI) em máquinas para implementos agrícolas**. Metalurgia & Materiais, São Paulo, v.59, n.533, p.3-7, maio, 2003.

www.ductile.org/didata/section4

FATIGUE STRENGTH PREDICTION OF CRANKSHAFT IN ADI

**Denilson José do Carmo
José Felipe Dias
Cleber Garcia Menezes
Fernando César Lee Tavares**

ABSTRACT:

The austempered ductile cast iron (ADI) properties can improve crankshaft applications and compete with forged steels. Models predicting the effects of defects, inclusions and inhomogeneities on the fatigue strength of metals are reviewed and Murakami and Endo's Model is tested. This model was adapted and it was used the graphite area and the ADI microhardness obtained from specimens of rotating fatigue test. The specimens were obtained from crankshaft made at industrial conditions. The obtained results presented the model efficiency.

Key words:

ADI, Casting, Fatigue strength, Crankshaft