

DIMENSIONAMENTO ESTRUTURAL DE COMPONENTES FABRICADOS EM FERRO FUNDIDO NODULAR¹

*Elton Franco de Magalhães²
Dirceu Spinelli³*

Resumo

Quando se trata de dimensionamento estrutural de componentes fabricados em ferro fundido nodular, observa-se que as informações sobre as suas propriedades mecânicas, principalmente os parâmetros cíclicos, são bastante esparsos. Sendo assim, foi realizado um levantamento dos parâmetros monotônicos e cíclicos disponíveis na literatura e foi identificada a necessidade de se obter a caracterização complementar deste tipo de material, para que fosse possível a proposição de métodos estimativos destas propriedades a partir da dureza. Neste estudo, a determinação das relações entre os parâmetros monotônicos e cíclicos dos ferros fundidos nodulares com a dureza foram obtidas a partir do tratamento dos dados publicados na literatura e de ensaios mecânicos de tração e estudos realizados de fadiga de baixo ciclo, levando-se em consideração o Índice de Qualidade e a partir do uso de regressões lineares. Além da caracterização mecânica dos materiais foi possível determinar um método contínuo para a estimativa dos parâmetros monotônicos a partir da dureza e um método discreto para os parâmetros cíclicos, que demonstraram não apresentar uma correlação direta com a dureza.

Palavras-chave: Ferro fundido nodular; Propriedades monotônicas e cíclicas; Fadiga de baixo ciclo.

STRUCTURAL DESIGN OF DUCTILE IRON COMPONENTS

Abstract

Regarding to the structural design of ductile iron components it has been noticed limited information about its mechanical properties, specially the cyclic parameters. Therefore, this work aims to characterize the monotonic and cyclic parameters of this material in complementing to the available data in the literature and also make a proposition of methods to estimate these properties from hardness. In this study the determination of the relation between monotonic and cyclic parameters from hardness has been found in the literature and tested data processing taking into account the Quality Index and using linear regression. Beyond the mechanical properties characterizations it has been proposed a continuous method for its monotonic parameters estimation from hardness as well as a discrete parameter for the cyclic conditions that experimentally has showed to remain independent of hardness.

Key words: Ductile cast Iron; Monotonic and cyclic properties; Low cycle fatigue.

¹ *Contribuição técnica ao 68º Congresso Anual da ABM - Internacional, 30 de julho a 2 de agosto de 2013, Belo Horizonte, MG, Brasil.*

² *Engenheiro Mecânico, MSc. Engenheiro de Desenvolvimento de Produto, Embraer, São José dos Campos, SP, Brasil.*

³ *Engenheiro Mecânico, Professor Titular, Departamento de Engenharia de Materiais, Universidade de São Paulo (USP), São Carlos, SP, Brasil.*

1 INTRODUÇÃO

Ferros fundidos, como objetos de arte, armamentos ou em forma de utensílios, são produzidos a mais de 2.000 anos. Como processo comercial, a produção destes materiais é, sem dúvida, um processo de grande sucesso e que causou grande impacto na sociedade devido à sua grande utilização em peças de máquinas, automóveis, equipamentos e outros itens diversos utilizados pela sociedade.

O uso em grande escala deste tipo de material se deve à grande flexibilidade oferecida pelo processo de fundição que permite o emprego do Ferro Fundido em diversos componentes de engenharia, e que permite aos projetistas associar a forma às suas funções. Por exemplo, é possível adicionar metal em regiões de altas tensões para aumentar a capacidade de carga do componente e remover massa de regiões com baixas tensões, de tal forma que haja um balanceamento entre o projeto funcional do componente e os seus custos.

Hoje em dia, os engenheiros de projeto podem aperfeiçoar as formas do fundido a partir do uso de modelagem sólida 3D (CAD), avaliar seu processo de fundição a partir de softwares de simulação de fluxo de material e transformação de fases e avaliar seu desempenho com rapidez. Porém, quando se trata de avaliar a durabilidade estrutural do material não se pode ter grande confiança nos cálculos (CAE – elementos finitos), devido à falta de informações sobre as suas propriedades mecânicas, principalmente à falta de dados sobre o seu comportamento quando submetido à fadiga de baixo ciclo. Além disso, pelas suas características mecânicas sensíveis à solidificação do metal e às características geométricas da peça. Pode-se obter diversas microestruturas e consequentes propriedades mecânicas diferentes em uma mesma peça com grande divergência de propriedades mecânicas inicialmente consideradas no dimensionamento estrutural do componente.

Os ferros fundidos nodulares são comumente utilizados na fabricação de componentes estruturais automotivos, industriais, agrícolas, de construção e em veículos comerciais como, por exemplo, em componentes do sistema de direção, carcaças de redutores para usinas sucroalcooleiras, redutores de rodas para colheitadeiras, cubo de rodas de caminhões e carcaças de eixos para máquinas de construção e tratores, que geralmente falham por fadiga em regiões onde há concentração de tensões (plasticidade local).

Os objetivos deste trabalho foram os de apresentar o conceito do índice de qualidade na avaliação da qualidade de alguns ferros fundidos nodulares, mostrar as vantagens do dimensionamento de fadiga pelo uso da metodologia ϵ -N e apresentar métodos estimativos das propriedades mecânicas a partir da dureza. Com isto, seria possível prever as propriedades mecânicas para diversas regiões de um mesmo componente e, desta forma, aumentar a confiança nos cálculos de durabilidade estrutural destes componentes sem a necessidade de utilização de altos coeficientes de segurança.

2 MATERIAIS E MÉTODOS

O comportamento mecânico dos ferros fundidos é afetado por diversas características microestruturais que possuem estreita relação com as suas propriedades químicas e processos de fabricação, especialmente com as variações do processo em relação à sua taxa de resfriamento que é influenciada também pela geometria da peça.

Dentre os inúmeros fatores que contribuem para as variações das propriedades mecânicas dos ferros fundidos, a Figura 1 ilustra os principais influenciadores que afetam a capacidade dos componentes de suportarem os esforços estruturais.

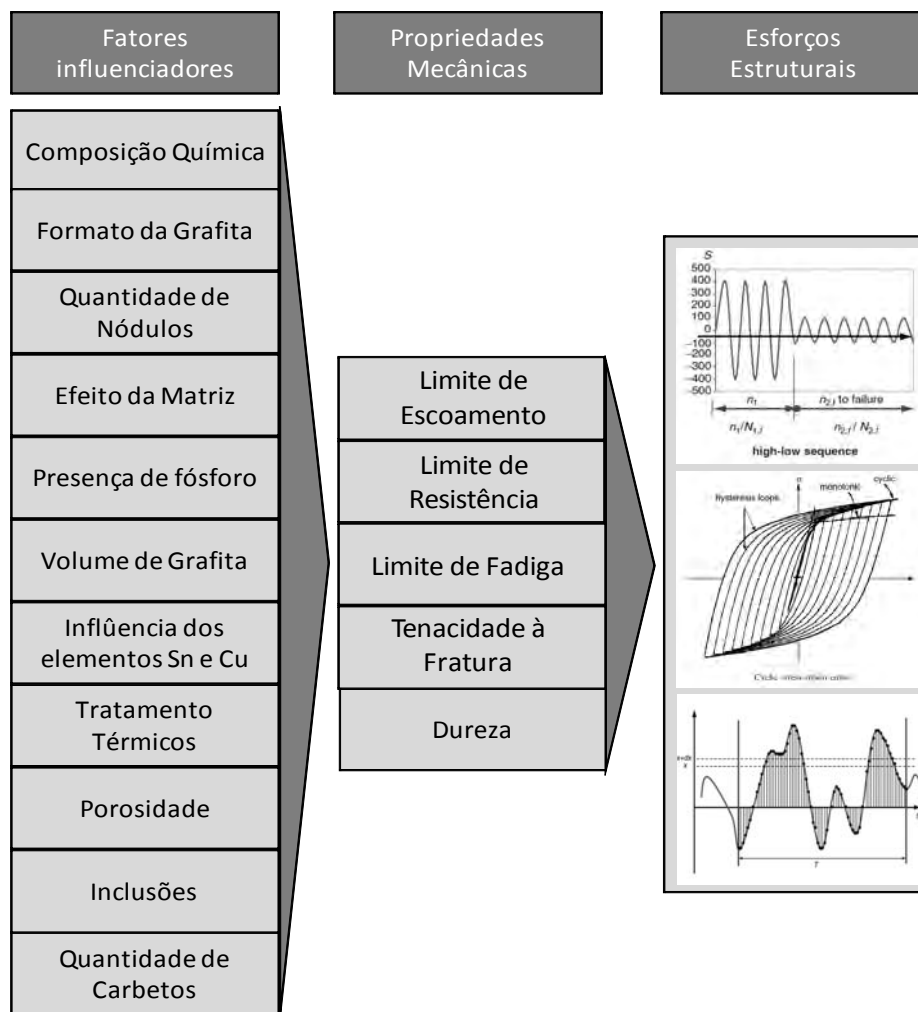


Figura 1. Fatores que influenciam as propriedades mecânicas dos ferros fundidos.⁽¹⁾

Siefer e Orths,⁽²⁾ em 1970, durante a realização de um estudo estatístico das propriedades mecânicas para uma grande amostragem de ferros fundidos nodulares propuseram a relação entre o limite de resistência e o alongamento total (Equação 1).

$$\frac{[S_u (ksi)]^2 . El}{1000} = Q \tag{1}$$

Onde Q representa um parâmetro de medida da qualidade dos ferros fundidos que depende do limite de resistência (S_u) e do alongamento total (El). Altos valores de Q indicam uma combinação de alto limite de resistência e um grande alongamento total, isto é, um material com bom comportamento em tração e fadiga de alto e baixo ciclos. Crews⁽³⁾ definiu Q como sendo o Índice de Qualidade (QI) para os ferros fundidos nodulares.

$$QI = \frac{[S_u (ksi)]^2 . El}{1000} \tag{2}$$

Altos valores de QI para os ferros fundidos nodulares mostraram ser resultados da existência de alta nodularidade, alta porcentagem de grafita no formato esférico ou próximo ao esférico, ausência de grafita intercelular degenerativa, grande quantidade de nódulos, baixa quantidade de carbonetos, baixa porcentagem de fósforo (<0,03%) e ausência de porosidade. Ferros fundidos com altos índices de qualidade podem ser produzidos por fundições competentes e modernas, que possuem controle dos diversos parâmetros de produção que afetam o desempenho do material. A Tabela 1 mostra a evolução da qualidade dos ferros fundidos nodulares entre os anos de 1970 e 1990.⁽¹⁾ Esta evolução decorre das modernizações no processo produtivo e métodos melhores de controle de qualidade. Na Tabela 1 os índices $QI_{99,5}$ e $QI_{50,0}$ representam, respectivamente, o índice de qualidade excedido por 0,5% e 50% da amostras testadas.

Tabela 1. Evolução da qualidade dos ferros fundidos nodulares

	Siefer e Orths (1970)	Venugopalan e Alagarsamy (1990)
$QI_{99,5}$	120	129
$QI_{50,0}$	60	90

Observada a evolução da qualidade dos ferros fundidos apresentada na Tabela 1, foi proposto neste trabalho o estudo para os ferros fundidos nodulares que apresentaram índice de qualidade igual ou superior 80. O objetivo de se analisar os materiais que somente apresentem Índice de Qualidade maior que 80, foi no sentido de eliminar os vários fatores que influenciam as propriedades mecânicas dos ferros fundidos nodulares, de tal forma a se avaliar somente a quantidade dos microconstituintes ferrita e perlita presentes na matriz destes ferros fundidos (Figura 2).

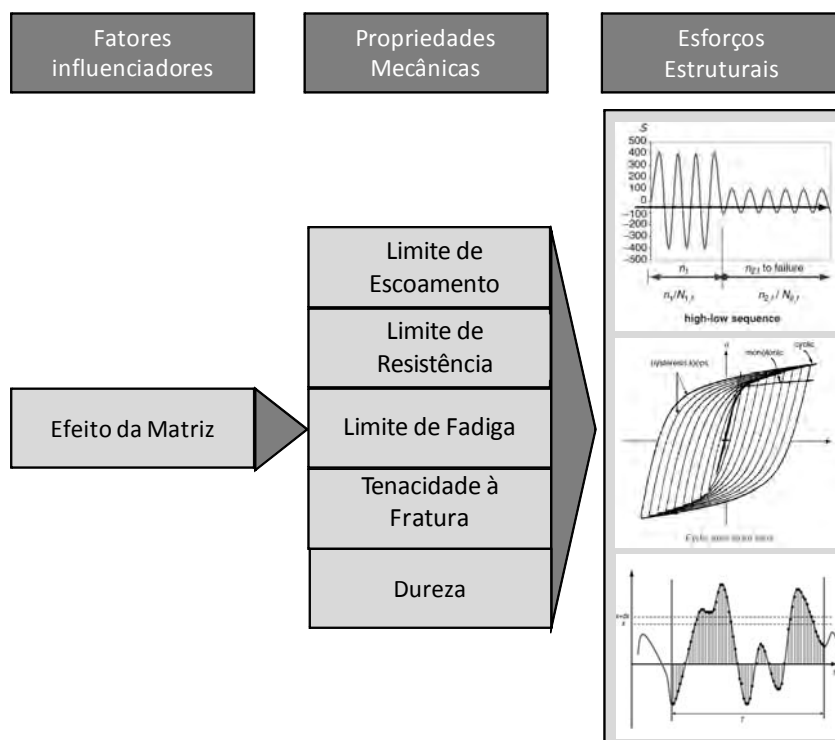


Figura 2. Fatores que influenciam as propriedades mecânicas dos ferros fundidos de alta qualidade ($QI > 80$).⁽⁴⁾

Com a escassez de dados publicados na literatura relacionando as propriedades mecânicas monotônicas e cíclicas dos ferros fundidos nodulares em relação à dureza, além da necessidade de aumentar o espaço amostral, fez-se necessário o planejamento de um experimento que ampliasse os estudos publicados na literatura, de forma que todas as classes de ferros fundidos nodulares fossem contempladas.

A partir das publicações da literatura, nota-se que algumas classes de ferros fundido possuem informações sobre os parâmetros monotônicos e cíclicos relacionados com a dureza e este é o caso das classes SAE D5504 e parcialmente das classes SAE D4512 e SAE D7003. Estes aços foram estudados por Tartaglia et al.⁽⁵⁾ e Tucker,⁽⁶⁾ referentes à classe SAE D5504. Não foram encontrados na literatura publicações das classes denominadas de SAE D4018 e SAE D800.

A premissa principal utilizada neste trabalho para a escolha das amostras dos ferros fundidos nodulares que seriam estudados foi a de apresentar um índice de qualidade maior ou igual a 80, que certamente garantiria uma boa qualidade das amostras de ferros fundidos selecionados, devido à sua alta resistência à tração e ductilidade, isto é, materiais isentos de possíveis defeitos introduzidos durante o processo de fabricação. Esta exigência deve ser cumprida para que haja amostras suficientes para a avaliação das suas propriedades mecânicas de dureza, tração e fadiga de baixo ciclo, sem que haja a influência destes defeitos. Observando a necessidade de ter amostras destes materiais com qualidade satisfatória, com o intuito de correlacionar suas propriedades mecânicas com a dureza, chegou-se à conclusão que seria necessário refazer o estudo para a classe de dureza com 250 HBS. Isto porque as amostras escolhidas para representar esta categoria de dureza, tanto nos estudos de Tartaglia et al.⁽⁵⁾ como nos de Tucker⁽⁶⁾ não atenderam ao critério da qualidade mínima exigida no presente trabalho, isto é, Índice de Qualidade ≥ 80 .

Portanto, confrontando a necessidade de ampliar o estudo com o grau de utilização destes materiais, foi escolhido representar a classe D4018 com duas categorias de dureza, 135 e 160 HBS, denominadas neste trabalho por Classe A e Classe B, respectivamente e obter os resultados para a classe de dureza de 250 HBS, denominada de Classe C.

As categorias de material SAE D7003 e SAE D800 não foram incluídas neste estudo devido à sua baixa utilização na fabricação de componentes estruturais. Na Figura 3 está ilustrada a distribuição das amostras escolhidas com relação às amostras publicadas na literatura.

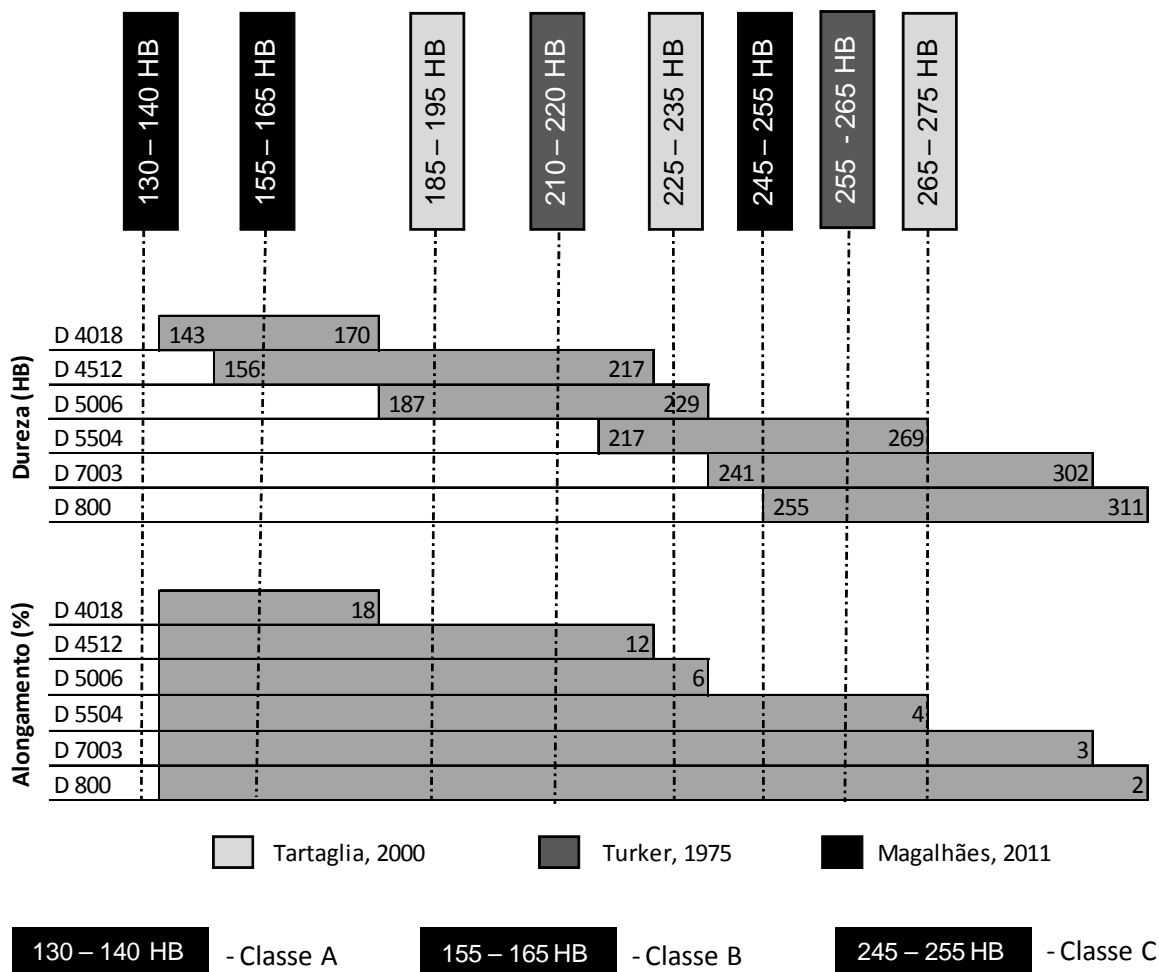


Figura 3. Relação das amostras.

As três classes A, B e C de ferros fundidos selecionados, já na forma de corpos de prova usinados segundo a norma ASTM E8M-09 e ASTM E606-04, foram fornecidas pela empresa Schulz Automotiva, localizada na cidade de Joinville – SC.

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os resultados dos ensaios mecânicos de dureza, tração e fadiga de baixo ciclo obtidos para as classes A,B,C, bem como os resultados obtidos no levantamento bibliográfico para os ferros fundidos nodulares e a partir da seleção das amostras com qualidade satisfatória, $QI > 80$, foram comparados aos ganhos da correlação dos parâmetros de tração e cíclicos dos ferros fundidos nodulares com relação à dureza antes e depois do presente estudo (Tabela 2).

O coeficiente de determinação (R^2) mede a qualidade do ajuste e é definido como a razão entre a soma dos desvios dos dados com relação à equação da regressão linear pela soma dos desvios dos dados com relação à sua média aritmética.

Tabela 2. Comparação da correlação das propriedades mecânicas com a dureza

			Antes do estudo			Depois do estudo			
			R ²	Correlação com a Dureza	Ajuste	R ²	Correlação com a Dureza	Ajuste	
Propriedades Mecânicas	Monotônicas	Limite de Resistência	Su	0,72	sim	fraco	0,98	sim	forte
		Limite de escoamento	Sy	0,82	sim	fraco	0,98	sim	forte
		Alongamento total	El	0,76	sim	fraco	0,85	sim	forte
		Coefficiente de Resistência	K	0,87	sim	fraco	0,94	sim	forte
		Expoente de Endurecimento	n	0,74	sim	fraco	0,92	sim	forte
	Cíclicas	Coef. de Resistência à fadiga	σ'_f	0,65	sim	fraco	0,81	sim	fraco
		Exp. de Resistência à fadiga	b	0,34	não	-	0,00	não	-
		Coef. de Ductilidade à fadiga	ε'_f	0,00	não	-	0,00	não	-
		Expoente de Ductilidade à fadiga	c	0,00	não	-	0,22	não	-
		Coefficiente de Resistência Cíclico	K'	0,64	sim	fraco	0,94	sim	forte
Expoente de Endurecimento Cíclico	n'	0,48	sim	fraco	0,88	sim	forte		

Observa-se que as correlações das propriedades monotônicas com a dureza foram mantidas, porém, os ajustes que eram considerados fracos tornaram-se fortes ($R^2 \geq 0,90$). Pode-se considerar o ajuste da curva de interpolação do alongamento com a dureza um ajuste forte, pois, o valor do R^2 correspondente à correlação com a dureza está muito próximo de 90. Sabe-se que a dispersão dos valores do alongamento ocorre devido às variações dos métodos experimentais para a sua determinação e não devido ao comportamento do material.

Os parâmetros que descrevem a resposta cíclica do material, com exceção do coeficiente de resistência cíclico e do expoente de resistência cíclico não se correlacionam com a dureza, mesmo quando avaliados somente os ferros fundidos nodulares de qualidade satisfatória e como apresentam índice de qualidade maior do que 80, não possuíam defeitos que pudessem influenciar suas características mecânicas.

Uma vez que as relações das propriedades monotônicas dos ferros fundidos nodulares com a dureza tiveram seus ajustes com a dureza melhorados, passando de ajustes fracos para ajustes fortes, é possível utilizar as equações contínuas com relação à dureza para estimar estes parâmetros que descrevem o comportamento monotônico deste tipo de material.

As relações propostas para estimar as propriedades monotônicas são apresentadas nas Equações 3 a 7, no qual o símbolo HB indica a dureza medida pelo método Brinell, com a razão entre a carga aplicada e o diâmetro da esfera ao quadrado igual a 30. Estes modelos são aplicáveis em ferros fundidos nodulares com índice de qualidade igual ou superior a 80:

Modelo para estimativa do limite de resistência, S_u , em MPa:

$$S_u = 3,4 * HB - 63 \quad (3)$$

Modelo para estimativa do limite de escoamento, S_y , em MPa:

$$S_y = 1,5 * HB - 78 \quad (4)$$

Modelo para estimativa do alongamento total, El, em %:

$$El = 43,9 - 1,5e^{-1} * HB \quad (5)$$

Modelo para estimativa do coeficiente de resistência, K, em MPa: (5)

$$K = 5,4e^{-2} * (HB - 210)^2 + 8,9 * HB - 838 \quad (6)$$

Modelo para estimativa do expoente de encruamento, n , (-):

$$n = 10e^{-6} * (HB - 210)^2 + 5,9e^{-4} * HB + 5,2e^{-2} \quad (7)$$

O símbolo (-) significa que o parâmetro em questão é adimensional.

Como o coeficiente de resistência cíclico e o expoente de encruamento cíclico apresentaram uma correlação forte com relação à dureza, foi possível, analogamente às propriedades monotônicas, propor um modelo contínuo da dureza para estimar seus valores. Os modelos estão propostos nas Equações 8 e 9.

Modelo para estimativa do coeficiente de resistência cíclico, K' , em MPa:

$$K' = 2,2e^{-2} * (HB - 206)^2 + 5,9 * HB - 203 \quad (8)$$

Modelo para estimativa do expoente de encruamento cíclico, n' , (-):

$$n' = 4,1e^{-6} * (HB - 206)^2 + 6,2e^{-4} * HB - 2,6e^{-2} \quad (9)$$

Para os demais parâmetros que descrevem o comportamento cíclico dos ferros fundidos nodulares e que são empregados na equação deformação-vida proposta por Manson et al.,⁽⁷⁾ pela notação introduzida por Morrow⁽⁸⁾ que é de σ'_f , ϵ'_f , b e c , por estes parâmetros cíclicos não terem apresentado qualquer correlação direta com a dureza Brinell, são então propostos modelos discretos por faixas de dureza.

Estes modelos discretos consistem em recomendações de valores típicos dos parâmetros cíclicos por faixa de dureza HB. Estes valores foram definidos quando foram analisadas as faixas de dureza no qual as propriedades cíclicas não apresentavam grandes variações. A Figura 4 mostra a metodologia empregada usando como exemplo o coeficiente de resistência à fadiga, σ_f :

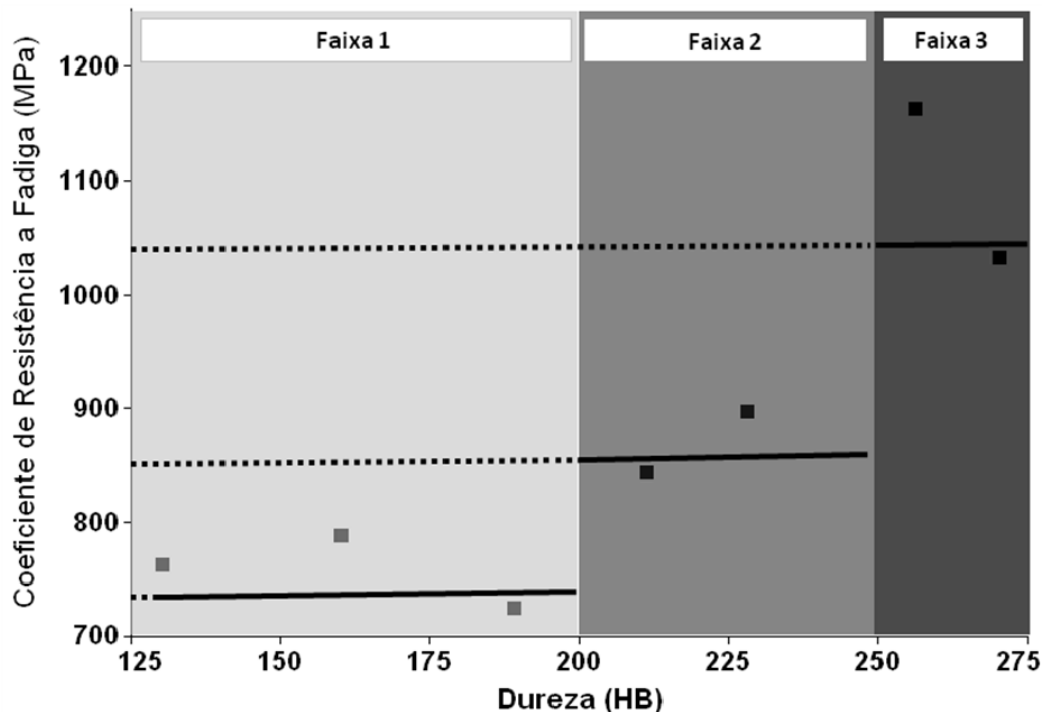


Figura 1. Método discreto para estimativa dos parâmetros cíclicos da equação deformação-vida.

Assim, para o exemplo da figura 4 os valores recomendados para o coeficiente de resistência à fadiga, σ_f , para as respectivas faixas de dureza de 130 -199HB, 200-249HB e 250-275HB seriam de 730 MPa, 850 MPa e 1.050 MPa,

respectivamente. Estes valores recomendados são valores conservativos quando comparados aos valores encontrados nos ensaios mecânicos para cada faixa. Isto pode ser observado no exemplo do coeficiente de resistência à fadiga a partir da distribuição dos pontos dentro de cada faixa de dureza.

Seguindo esta metodologia, são mostradas nas Tabelas 3 a 6, os valores dos parâmetros cíclicos para aplicação na equação deformação-vida de Manson-Coffin-Basquim,⁽⁷⁾ válidos somente para os ferros fundidos nodulares com índice de qualidade ≥ 80 .

Tabela 3. Estimativas dos valores dos coeficientes de resistência à fadiga

	Dureza (HB)		σ'_f, MPa
	Valor Min.	Valor Max.	
Faixa 1	130	199	730
Faixa 2	200	249	850
Faixa 3	250	275	1050

Tabela 4. Estimativas dos valores do expoente de resistência à fadiga

	Dureza (HB)		$b, (-)$
	Valor Min.	Valor Max.	
Faixa 1	130	179	-0,09
Faixa 2	180	249	-0,07
Faixa 3	250	275	-0,11

Tabela 5. Estimativas dos valores do coeficiente de ductilidade à fadiga

	Dureza (HB)		$\epsilon'_f, (-)$
	Valor Min.	Valor Max.	
Faixa 1	130	179	0,60
Faixa 2	180	275	0,45

Tabela 6. Estimativas dos valores do expoente de ductilidade à fadiga

	Dureza (HB)		$c, (-)$
	Valor Min.	Valor Max.	
Faixa 1	130	179	-0,75
Faixa 2	180	249	-0,65
Faixa 3	250	275	-0,70

4 CONCLUSÕES

Com a aplicação do conceito do Índice de Qualidade (QI) proposto por Crew⁽³⁾ foi possível estabelecer uma metodologia simples e de baixo custo de avaliação dos parâmetros monotônicos e cíclicos para uma ampla faixa de dureza de ferros fundidos nodulares que apresentam Índice de Qualidade maior ou igual a 80.

A metodologia de fadiga de baixo ciclo (ϵ -N) se mostra a mais indicada para o projeto de componentes fabricados utilizando ferros fundidos nodulares, principalmente devido à sua capacidade de levar em conta as regiões onde podem ocorrer deformações plásticas localizadas, que são geralmente regiões propensas a nucleação de trinca por fadiga que, se propagar, pode levar o componente a falhar catastróficamente.

Neste trabalho foi possível estabelecer um método contínuo para a estimativa das relações entre as propriedades monotônicas com a dureza Brinell e um método discreto, baseado em faixas de dureza Brinell, para estimar os parâmetros cíclicos para serem usados na equação de Manson et al⁽⁷⁾ com notação de Morrow,⁽⁸⁾ a partir do controle da dureza Brinell.

Os métodos propostos induzem a um aumento de confiança nos cálculos de durabilidade estrutural de componentes fabricados em ferros fundidos nodulares. Com eles será possível a determinação dos parâmetros monotônicos e cíclicos nas regiões de concentradores de tensão de componentes, a partir da medida da dureza Brinell.

Agradecimentos

Este trabalho foi financiado pelo Conselho Nacional de Pesquisa (CNPq), Processo: No. 301967/2010-5. Os autores agradecem ao Sr. Altino Farias, Gerente de Desenvolvimento e Marketing da Empresa Schulz Automotiva, Joinville, SC, pelo suporte, discussões técnicas e fornecimento dos materiais utilizados neste trabalho.

REFERÊNCIAS

- 1 SORELMETAL The Sorelmetal Book of Ductile Iron, Rio Tinto Iron and Titanium Inc., Canada, 2004.
- 2 SIEFER, W.; ORTHS, K. Evaluation of ductile iron in terms of feasible properties of the material. Trans. American Foundrymen's Soc., v.78, p.382-397, 1970.
- 3 CREWS, D.L. Quality and specification of ductile iron. Trans. American Foundrymen's Soc., v.82, p.223-228, 1974.
- 4 MAGALHÃES, E. F. Caracterização e proposição de métodos estimativos das propriedades monotônicas e cíclicas dos ferros fundidos nodulares, Dissertação de Mestrado – Programa de Pós-graduação Interunidades em Ciência e Engenharia dos Materiais, Universidade de São Paulo, São Carlos, 176 p. 2011.
- 5 TARTAGLIA, J.M. et al. Monotonic and cyclic design data for ductile iron castings. Ductile Iron Society, Research Project No. 30, February, 2000.
- 6 TUCKER, L. M. Monotonic stress-strain properties of U.S.-European nodular iron, TM280, Deere & Company, Technical Center, 19 November, 1975.
- 7 MANSON, S. S. et al. Fatigue life relations. In: Fatigue and durability of structural materials. ASM International, Chapter 3, p.50, 2006.
- 8 MORROW, J. Fatigue properties of metals, presented at a meeting of Division 4 of the SAE Iron and Steel Technical Committee, November 4, 1964.