

# AVALIAÇÃO DA QUALIDADE METALÚRGICA EM FERROS FUNDIDOS NODULARES E CINZENTOS<sup>1</sup>

*Wilson Luiz Guesser<sup>2</sup>  
Eitan Melleras<sup>3</sup>  
Carlos de Souza Cabezas<sup>4</sup>  
Isaias Masiero<sup>5</sup>*

## **Resumo**

É discutida a aplicação de parâmetros de avaliação de qualidade metalúrgica que relacionam resultados de propriedades mecânicas. Em ferros fundidos cinzentos emprega-se a relação entre Limite de Resistência medido e Limite de Resistência calculado a partir do valor de dureza medido. Para ferros fundidos nodulares é apresentada uma equação que considera o Limite de Resistência e o Alongamento, e que avalia quanto os resultados medidos distanciam-se dos valores previstos em norma técnica. Discute-se o efeito de algumas variáveis de fundição, como teor de carbono equivalente, tempo de desmoldagem, geometria da peça, avaliados segundo estes parâmetros de qualidade.

**Palavras-chave:** parâmetro de qualidade; propriedades mecânicas, ferros fundidos cinzentos, ferros fundidos nodulares, limite de resistência, dureza, alongamento

## **Abstract**

It is discussed the application of a criteria for assessing the metallurgical quality which correlates the mechanical properties results. For gray cast iron it is used a relation between the measured ultimate tensile strength and the ultimate tensile strength calculated from the measured hardness value. For ductile irons it is presented an equation that considers the ultimate tensile strength and the elongation, which evaluates how much the measured values distance from the values predicted in the technical standards. It is also discussed the effect of casting variables such as carbon equivalent, shake out time, casting geometry, evaluated according to these quality parameters.

**Key words:** quality parameter, mechanical properties, gray cast iron, ductile iron, ultimate tensile strength, hardness, elongation

<sup>1</sup> 15º Congresso de Fundição – CONAF 2011

<sup>2</sup> Doutor em Engenharia Metalúrgica pela EPUSP. Tupy S.A. e UDESC.

<sup>3</sup> Mestre em Engenharia Metalúrgica pela UFSC, Tupy S.A.

<sup>4</sup> Doutor em Engenharia Metalúrgica pela EPUSP, Tupy S.A.

<sup>5</sup> Engenheiro Químico pela UFPR. Tupy S.A e UDESC.

## 1 INTRODUÇÃO

O processo de fundição de ferros fundidos permite a obtenção de peças de geometria complexa, e sua evolução, no caso de blocos e cabeçotes, permitiu o desenvolvimento recente de motores de desempenho superior (1,2). Registram-se aqui os desenvolvimentos de modernas técnicas de fundição, em particular de macharia, e as novas classes de ferros fundidos, como o vermicular (CGI), os nodulares austemperados (ADI), os cinzentos de alta resistência e os nodulares ferríticos.

Na maioria das peças fundidas destinadas ao mercado automobilístico, as peças fundidas são posteriormente usinadas. O custo das operações de usinagem costuma ser significativo, de modo que a usinabilidade do ferro fundido é um parâmetro importante. Esta propriedade é normalmente avaliada por meios indiretos, destacando-se o ensaio de dureza como uma medida da usinabilidade. Assim, a dureza representa uma especificação usual de peças automotivas, ao lado das propriedades de resistência e ductilidade. Em outras palavras, normalmente deseja-se o atendimento às especificações de propriedades mecânicas, associado à menor dureza possível.

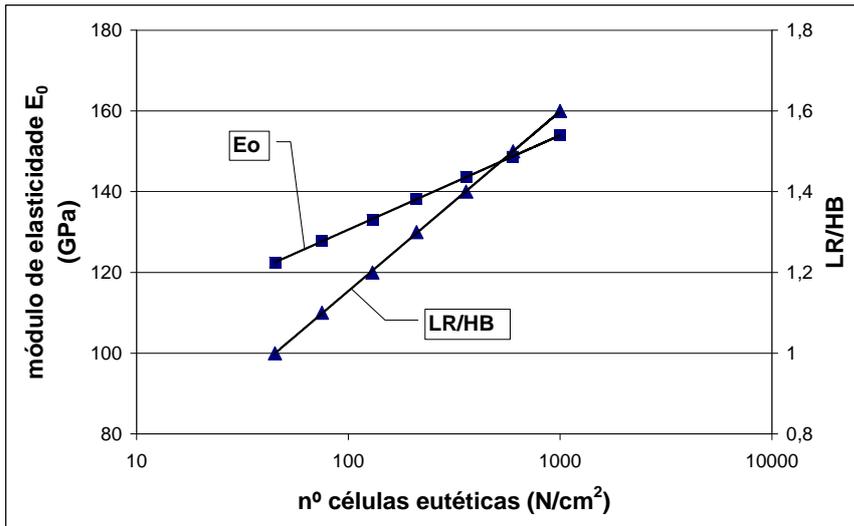
No caso dos ferros fundidos nodulares, as especificações de propriedades mecânicas contemplam valores de resistência (LR, LE) e de ductilidade (alongamento, resistência ao impacto), desejando-se que os valores obtidos excedam os valores especificados para ambas as propriedades.

As normas técnicas prevêm este comportamento, estabelecendo valores mínimos de propriedades mecânicas e faixas de dureza, para cada classe de ferro fundido. Entretanto, como será visto, o atendimento à norma técnica pode ser feito com diferentes conjuntos de propriedades, ou seja, com diferentes níveis de “qualidade metalúrgica”.

São apresentados parâmetros de avaliação de qualidade para ferros fundidos cinzentos e nodulares, aplicando-se estes parâmetros para a análise de variáveis de fundição, empregando-se resultados publicados na literatura e resultados obtidos pelos autores.

## 2 PARÂMETROS DE AVALIAÇÃO DE QUALIDADE EM FERROS FUNDIDOS CINZENTOS

Ao longo do tempo diversos parâmetros têm sido sugeridos para avaliar a qualidade metalúrgica dos ferros fundidos cinzentos, tais como grau de maturação, grau de dureza, parâmetro  $\underline{m}$  de Czikel (relação entre LR e HB) e dureza relativa (Pieske et al, 1976). A figura 1 mostra a utilização do parâmetro  $\underline{m}$  de Czikel na avaliação do efeito do número de células eutéticas. Verifica-se que o aumento do número de células eutéticas (diminuição do tamanho das partículas de grafita) aumenta o valor de  $\underline{m}$ , aumentando assim o nível de qualidade do ferro fundido cinzento.

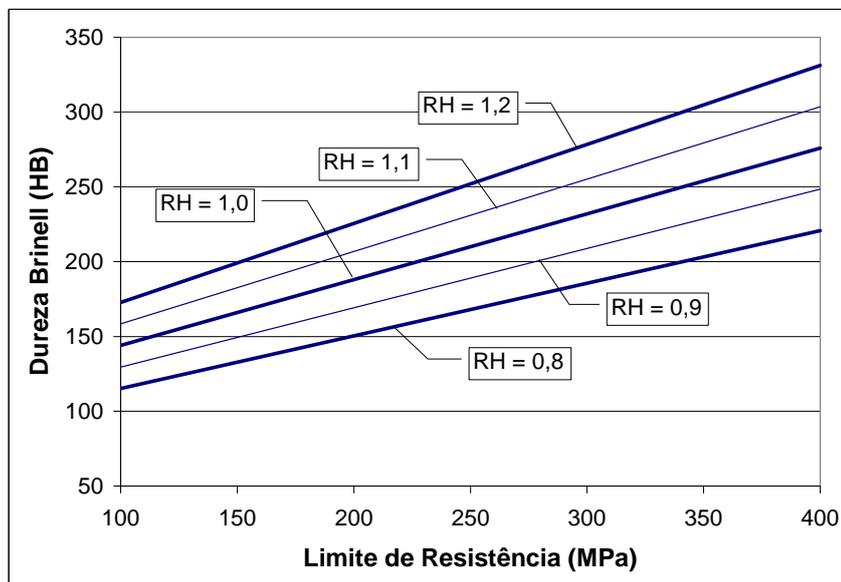


**Figura 1** – Efeito do número de células eutéticas sobre o módulo de elasticidade e sobre a relação Limite de Resistência / Dureza (denominada por Czikel de Parâmetro de Qualidade  $\underline{m}$ ). Adaptado de Czikel & Hummer (1992).

O parâmetro mais utilizado é a dureza relativa (Goodrich, 2003), constando inclusive dos anexos das Normas EN 1561/1997 e ISO 185/2005.

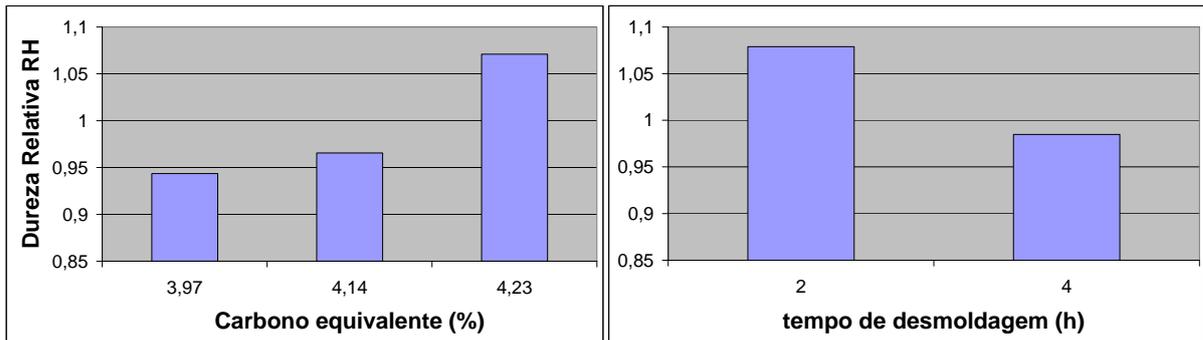
$$\text{Dureza Relativa (RH)} = \text{HB} / (100 + 0,44\text{LR}) \quad (1)$$

Este parâmetro avalia quanto a dureza medida se distancia da dureza estimada a partir da resistência do material (figura 2). De um modo geral, deseja-se que RH seja menor que 1, o que significaria um material de boa usinabilidade, para a classe em questão (Goodrich, 2003), ou ainda, um material de alta resistência para a dureza obtida (Pupava et all, 2003).



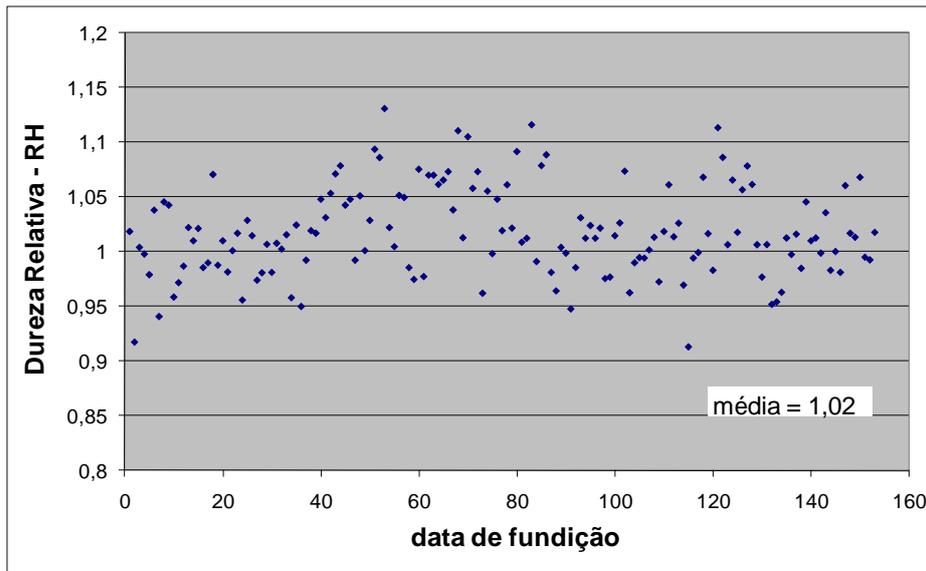
**Figura 2** - Avaliação da qualidade metalúrgica do ferro fundido cinzento através da dureza relativa (RH) (Guesser, 2009).

Os efeitos do teor de carbono equivalente e do tempo de desmoldagem podem ser vistos na figura 3, para duas peças automotivas de ferro fundido cinzento, verificando-se que valores de dureza relativa menores que 1 são obtidos com baixo teor de carbono equivalente e com alto tempo de desmoldagem. O efeito da diminuição do teor de carbono equivalente se explica pela diminuição do tamanho das partículas de grafita (similarmente ao registrado na figura 1). O aumento do tempo de desmoldagem implica em aumento do espaçamento interlamelar da perlita (grande tempo para difusão), que reduz consideravelmente a dureza, pouco afetando os valores de limite de resistência.



**Figura 3** – Efeitos do teor de carbono equivalente e do tempo de desmoldagem na dureza relativa (RH). (a) peça automotiva #1 – 160 kg; (b) peça automotiva #2 - 45 kg. Corpos-de-prova retirados das peças (Guessser, 2009).

A dureza relativa pode ser assim utilizada para comparar diferentes condições de processo, avaliando o seu efeito conjunto sobre a resistência e sobre a dureza. Os resultados das figuras 1 e 3 ilustram as influências de diferentes mecanismos de aumento de resistência em ferros fundidos cinzentos. Elas mostram que aumento de resistência obtido por diminuição do tamanho das partículas de grafita resulta em melhoria de qualidade, enquanto aumento de resistência por endurecimento da matriz perlítica (por ex com diminuição do tempo de desmoldagem) provoca decréscimo no índice de qualidade. A figura 4 ilustra ainda a utilização deste parâmetro de avaliação de qualidade no acompanhamento da produção de uma peça de ferro fundido cinzento.



**Figura 4** – Utilização do parâmetro Dureza Relativa para acompanhamento da produção. Peça automotiva #3, de 300 kg, corpos de prova retirados da peça.

### 3 PARÂMETROS DE AVALIAÇÃO DE QUALIDADE EM FERROS FUNDIDOS NODULARES

Siefer e Orths (1971) sugeriram que a análise conjunta do limite de resistência e alongamento permite uma avaliação de qualidade do ferro fundido nodular. Sua referência foi um levantamento estatístico de propriedades, conduzindo a uma equação do tipo:

$$A \times LR^2 = \text{constante} \quad (2)$$

O valor da constante dependeria da referência adotada, se a média dos valores de alongamento do levantamento estatístico ( $W_u = 50\%$ ), ou se  $W_u = 90\%$ . Abordagem semelhante foi desenvolvida por Albertin (1985), também adotando como referência um levantamento estatístico de propriedades mecânicas, resultando a modificação do expoente do LR para 1,5.

Loper & Kotschi (1974) sugerem que as referências sejam os valores mínimos da Norma ASTM A-536, de modo que os índices de qualidade representem percentuais que excedem os valores mínimos da norma. Como a norma representa a ferramenta comum entre fundições e clientes, este enfoque parece ser uma boa abordagem. Este tipo de análise foi utilizado por Javaid & Loper (1995) para examinar a qualidade de nodulares em peças espessas.

Para unidades métricas (MPa), as diferentes normas resultam nas equações da tabela 1. As equações referentes às normas ISO, EN e ABNT são praticamente coincidentes, e muito próximas das equações fornecidas pelas normas SAE e ASTM. Nas discussões que se seguem adotou-se então como referência a equação fornecida pelos valores mínimos da norma ABNT.

Na figura 5 são apresentadas linhas de índice de qualidade para ferros fundidos nodulares (Guesser, 2009). A curva com índice de qualidade de por

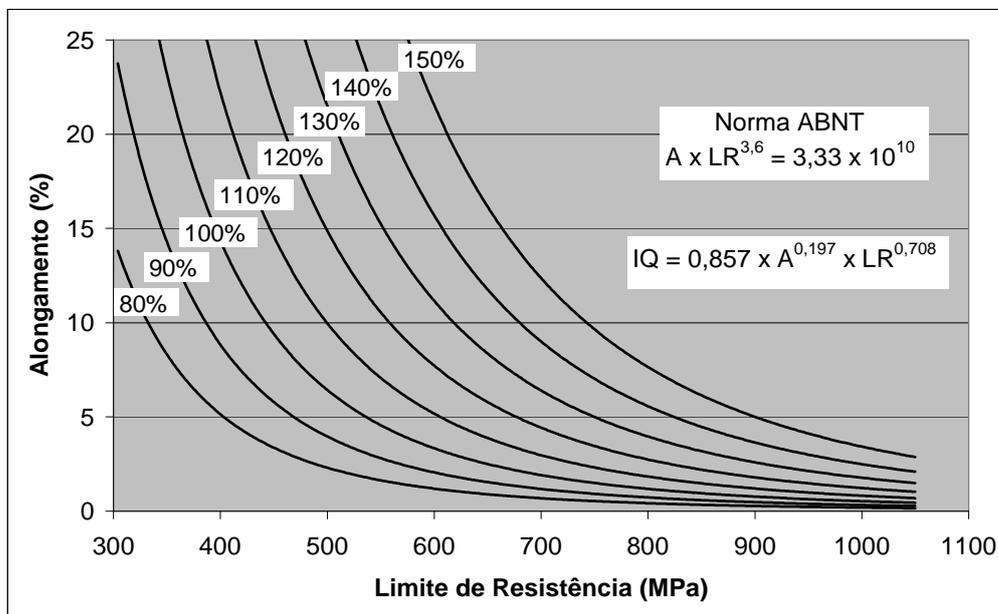
exemplo 110% foi obtida tomando-se os valores mínimos da Norma (along e LR) e multiplicando-se por 1,1.

Isto resulta na seguinte equação para a determinação do Índice de Qualidade:  

$$IQ = 0,857 \times A^{0,197} \times LR^{0,708} \quad (3)$$

**Tabela 1** – Equações que relacionam os valores mínimos de limite de resistência (MPa) e alongamento (%).

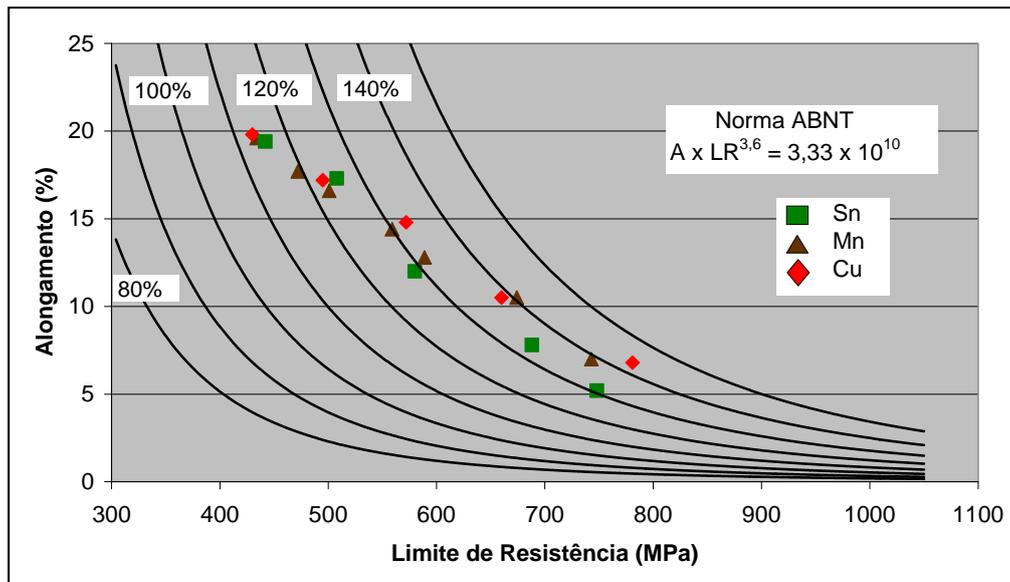
Norma	Equação dos valores mínimos
ASTM A-536	$A \times LR^{3,15} = 2,91 \times 10^9$
SAE J434	$A \times LR^{3,06} = 1,33 \times 10^9$
EN 1563	$A \times LR^{3,71} = 6,78 \times 10^{10}$
ISO 1083	$A \times LR^{3,68} = 5,62 \times 10^{10}$
ABNT NBR 6916	$A \times LR^{3,60} = 3,33 \times 10^{10}$



**Figura 5** - Linhas de índice de qualidade para ferros fundidos nodulares. O índice de qualidade igual a 100% corresponde aos valores mínimos da Norma ABNT NBR 6916, e representam a equação mostrada no gráfico. A curva com índice de qualidade de, por exemplo, 110% foi obtida tomando-se os valores mínimos da Norma (along e LR) e multiplicando-se por 1,1. Propriedades em bloco Y de 25 mm (Guesser, 2009).

Registra-se na figura 6 um exemplo de análise de resultados, referentes a adições crescentes de elementos perlitizantes. Verifica-se que a utilização de cobre como elemento de liga conduz aos melhores valores de índice de qualidade; os piores resultados obtidos com estanho provavelmente são devidos à segregação deste elemento para contornos de célula.

Os resultados da tabela 2 permitem comprovar que o emprego de elementos de liga com alta tendência à segregação, como Mn e Mo, resulta em decréscimo do índice de qualidade.

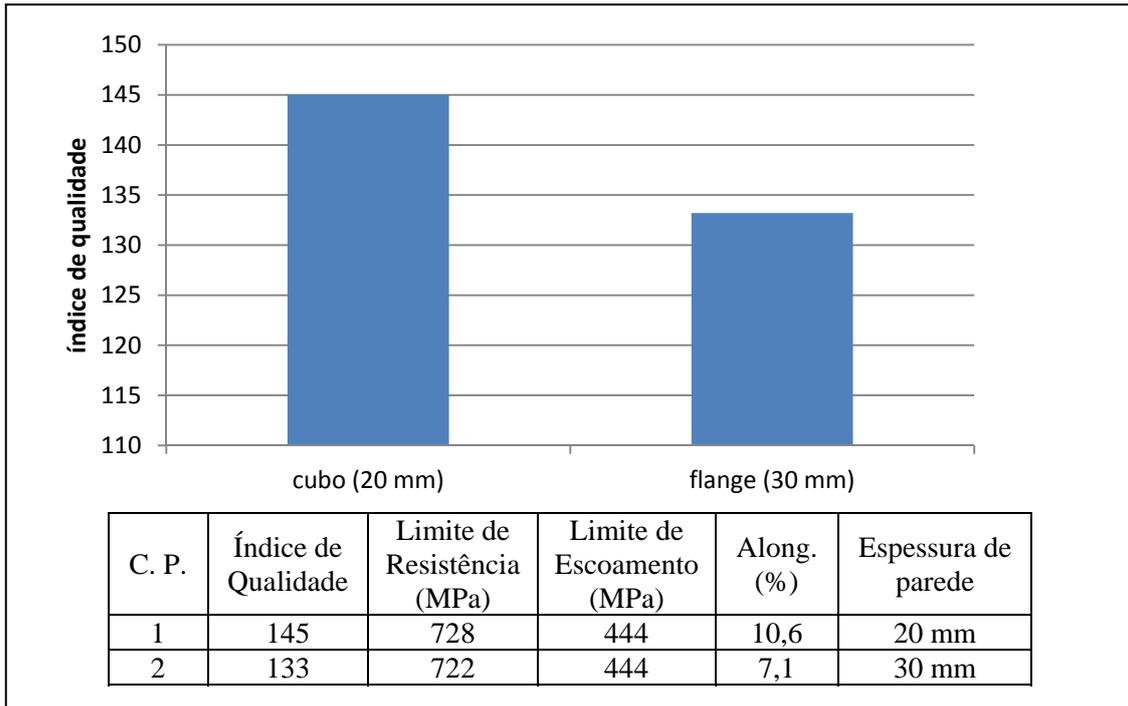


**Figura 6** - Efeitos de adições crescentes de cobre, manganês e estanho sobre as propriedades mecânicas de ferro fundido nodular bruto-de-fundição. As diferenças entre os efeitos dos elementos de liga acentuam-se com altos teores (alto LR, baixo along). Cu = 0,05 a 0,76% - Sn = 0,006 a 0,072% - Mn = 0,13 a 1,02% (Adaptado de Krüger et all, 1998).

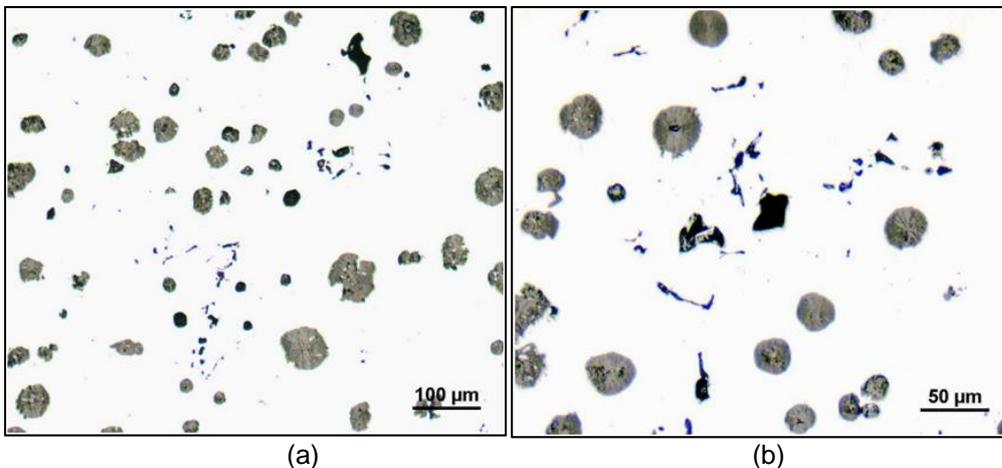
Tabela 2 – Resultados de propriedades mecânicas de ferros fundidos nodulares no estado bruto de fundição. Bloco Y 25 mm, tempo de desmoldagem de 8 h. (Adaptado de Guessser, 1993).

elementos de liga (%)	nódulos (/mm <sup>2</sup> )	perlita (%)	espaçamento interlamelar (μm)	LR (MPa)	LE (MPa)	A (%)	IQ (%)
2,57 Si - 0,20 Mn	183	45	0,4	558	365	11,9	123
2,47 Si - 0,46 Mn - 0,17 Cu	367	56	0,2	582	369	10	122
2,25 Si - 0,45 Mn - 0,58 Cu	246	84	0,2	735	448	6,2	131
2,71 Si - 0,74 Mn - 0,74 Cu - 0,10 Mo	77	98	ND	697	529	2,1	102

A figura 7 apresenta resultados de ensaios em cubo de roda produzido em classe FE 60003. Neste caso foram retiradas amostras de dois diferentes locais da peça, verificando-se menores valores de índice de qualidade na seção mais espessa, o que foi atribuído à presença de inclusões intercelulares, formadas por segregação de elementos para estes locais (figura 8). De qualquer modo, os resultados de índice de qualidade nesta peça são admiráveis (figura 7), revelando uma boa qualidade metalúrgica.



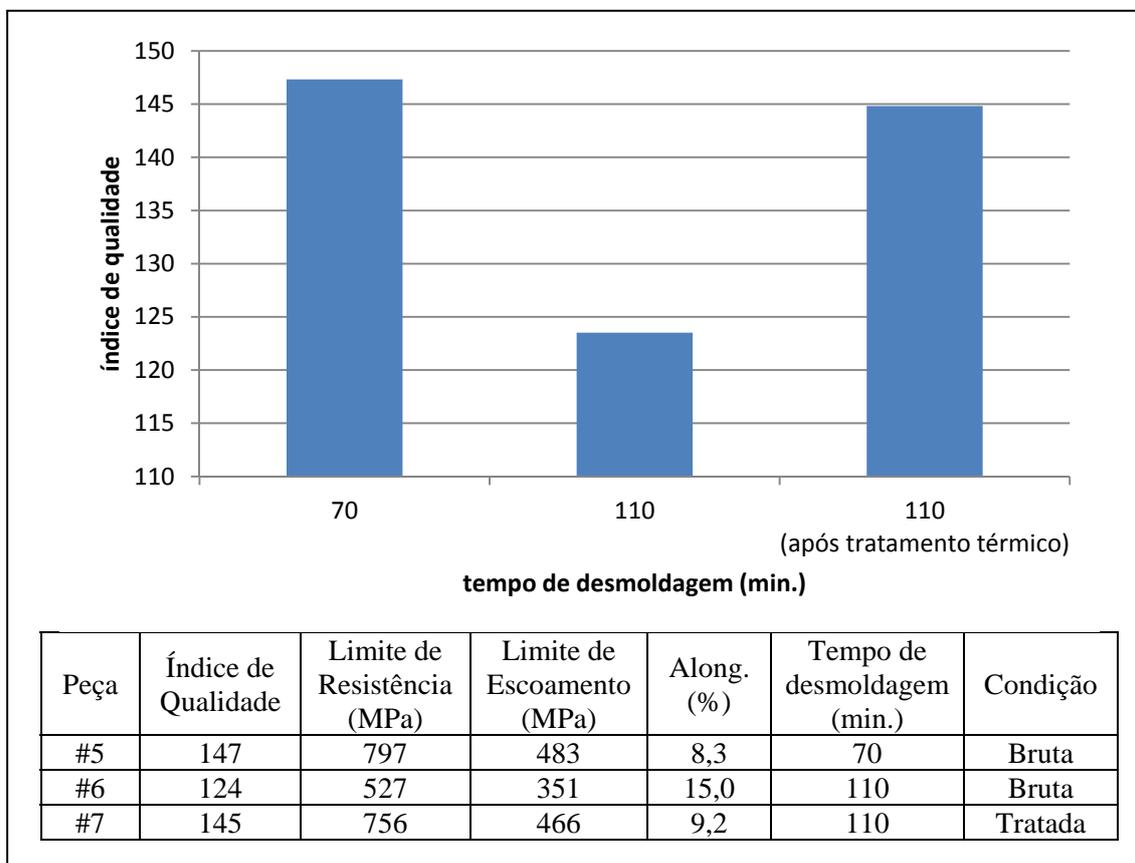
**Figura 7** - Resultados de índices de qualidade em duas regiões de um mesmo cubo de roda em FE 60003 (peça #4): corpo de prova 1, retirado da região do cubo com espessura de 20 mm e corpo de prova 2, retirado da região da flange, com espessura de 30 mm.



**Figura 8** – Micrografias do corpo de prova 2 da figura 7, mostrando microrechupes e inclusões intercelulares, responsáveis pela queda no alongamento do material. (a) – 100x aumento, sem ataque, (b) – 200x aumento, sem ataque.

Na figura 9 constam resultados onde foi variado o tempo de desmoldagem das peças, verificando-se que, para o ferro fundido nodular, um aumento do tempo de desmoldagem resultou em diminuição do índice de qualidade (aparentemente o aumento do alongamento não foi compensado, em igual intensidade, pela queda do valor de resistência). Tratamento térmico posterior de normalização permitiu restaurar o índice de qualidade. O efeito de diferentes tratamentos térmicos de normalização pode ser visto na tabela 3. Todos os valores de índice de qualidade obtidos com tratamentos de normalização são excepcionais. Entretanto, a normalização a partir da zona crítica

(austenitização parcial na região de ferrita + austenita + grafita) conduziu a melhores valores de índice de qualidade que a normalização em 1 etapa (austenitização plena e resfriamento controlado). Isto seria devido à modificação da distribuição de perlita, que no primeiro caso não se concentra apenas em torno dos nódulos de grafita.



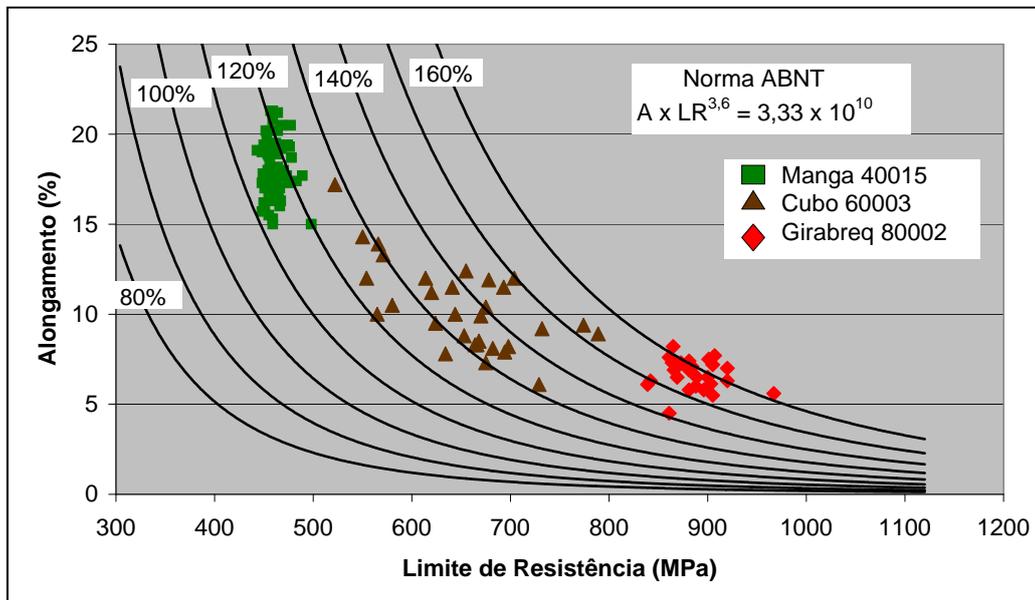
**Figura 9** – Resultados de índices de qualidade em um cubo de roda em FE 60003: peça #5, com 70 minutos de tempo de desmoldagem; peça #6 com 110 minutos de tempo de desmoldagem; peça #7 com 110 minutos, após sofrer tratamento térmico de normalização (a partir da zona crítica).

Tabela 3 – Resultados de propriedades mecânicas de ferros fundidos nodulares após tratamento térmico de normalização. Bloco Y 25 mm (Adaptado de Guessier e Hilário, 2000)

	perlita (%)	LR (MPa)	LE (MPa)	A (%)	IQ (%)
Normalização em 1 etapa	25	600	405	12,2	130
	50	705	465	8,5	136
	75	760	500	6	134
Normalização da zona crítica	25	670	460	12	140
	50	765	510	8,5	144
	75	825	545	6,7	145

Na figura 10 são apresentados resultados de algumas peças, produzidas em diferentes classes de ferros fundidos nodulares. De um modo geral, é mais difícil atingir elevados índices de qualidade em classes ferríticas. Esta mesma tendência havia sido verificada nos resultados da figura 6, com as classes perlíticas revelando maiores valores de índice de qualidade que as ferríticas.

Outra forma de ver esta mesma tendência é comparar os expoentes do Limite de Resistência nas equações das normas, tabela 1 (em geral em torno de 3,5) com os expoentes de equações que representam situações reais, como na equação 2 (1,5 a 2,0). Verifica-se que, nas normas técnicas, os valores de Limite de Resistência recebem ênfase especial, maior que o usualmente apresentado pelos resultados práticos em ferro fundidos nodulares.



**Figura 10** – Resultados de índice de qualidade para cubo de roda em FE 60003 (130 a 150%), girabrequim em FE 80002 (150 a 160%) e manga de ponta de eixo em FE 40015 (110 a 125%) (Guesser, 2009).

## 4 CONCLUSÃO

Verifica-se que a utilização de parâmetros de avaliação de qualidade permite avaliar o efeito de diferentes variáveis sobre a qualidade metalúrgica de ferros fundidos cinzentos e nodulares. Sua utilização amplia o horizonte na avaliação dos ferros fundidos, seja em trabalhos de desenvolvimento, seja no controle de qualidade de produtos fundidos.

## REFERÊNCIAS

- 1 \_\_\_ Castings. Engine Technology International, p. 30-36, abril 2011.
- 2 Hesslinger, M; Böhme, F X E; Lembach, A; Friedmann, K; Achenbach, J; Garza, M. Erstes GJV-Zylinderkurbelgehäuse für hoch aufgeladene direct einspritzende Ottomotoren. Giesserei, vol 97, nº 5, p. 24-32, 2010.
- 3 Czikel, J & Hummer, R. Qualitätsdiagramm für Gusseisen mit Lamellengraphit. In: Röhrig, K & Brunhuber, E. Taschenbuch der Giesserei-Praxis. Schiele & Schön GmbH, 1992.
- 4 Pieske, A; Chaves Filho, L M; Reimer, J F. Ferros fundidos cinzentos de alta qualidade. SOCIESC, 1976.

- 5 Goodrich, G.M. Iron Castings Engineering Handbook. AFS, 2003.
- 6 Pupava, J; Döpp, R; Neumann, F. Beitrag zur metallurgischen Bewertung von elektrisch erschmolzenem Gusseisen mit Lamellengraphit für Automobilguss. Giesserei-Praxis, nº 12, p. 489-497, 2003.
- 7 Siefer, W & Orths, K. Eigenschaftskombinationen in den Werkstoffgruppen Gusseisen mit Kugelgraphit, schwarzer und weisser Temperguss, Stahlguss. Giessereiforschung, vol 23, nº2, p. 1-14, 1971.
- 8 Albertin, E. Obtenção de ferro fundido nodular ferrítico de alta qualidade no estado bruto de fundição. Dissertação de mestrado, EPUSP, 1985.
- 9 Loper Jr, C R & Kotschi, R M. A new quality index for ductile iron. AFS Transactions, vol 82, p. 226-228, 1974.
- 10 Javaid, A & Loper Jr, C R. Quality control of heavy section ductile cast irons. AFS Transactions, vol 103, p. 119-134, 1995.
- 11 Guessser, W L. Propriedades Mecânicas dos Ferros Fundidos. Ed. Edgard Blücher, 2009.
- 12 Krüger, M; Luckow, I C; Bergmann, S J; Souza Santos, A B. Efeitos de elementos de liga na formação de ferrita e perlita em ferros fundidos nodulares. 53º Congresso ABM, Belo Horizonte, p. 13-17, 1998.
- 13 Guessser, W L. Fragilização por hidrogênio em ferros fundidos nodulares e maleáveis pretos. Tese de doutoramento. EPUSP, 1993.
- 14 Guessser, W L & Hilário, D G. A produção de ferros fundidos nodulares perlíticos. Fundição e Serviços, p. 46-55, Nov 2000.