

# EFEITO DA ADIÇÃO DE NIÓBIO NA MICROESTRUTURA E NAS PROPRIEDADES MECÂNICAS DE UM FERRO FUNDIDO NODULAR DA CLASSE 70002<sup>1</sup>

*Carlos Henrique Pereira<sup>2</sup>  
Meire Figueira Mendes<sup>2</sup>  
Adonias Ribeiro Franco Júnior<sup>3</sup>  
Marcio Ferreira Hupalo<sup>3</sup>*

## **Resumo**

O presente trabalho avalia a influência do nióbio sobre a microestrutura e propriedades mecânicas de um ferro fundido nodular de classe perlítica. Estuda-se o efeito de adições crescentes de nióbio, variando na faixa entre 0,2 e 1,0% (% em peso). Os materiais estudados foram obtidos por meio de três fusões em um forno de indução de média frequência, utilizando-se uma liga base de ferro fundido nodular da classe 70002. Para confecção dos corpos de prova foram utilizados blocos Y de uma polegada. Amostras no estado bruto de fusão foram caracterizadas com auxílio de microscopia óptica e medidas de metalografia quantitativa. As propriedades mecânicas foram avaliadas por meio de ensaios de dureza, tração e impacto. As amostras com adição de nióbio são caracterizadas pela presença de partículas de Nb(C,N) dispersas em uma matriz predominantemente perlítica. A fração volumétrica e o tamanho destas partículas são maiores para teores mais elevados de Nb. A adição de nióbio aos ferros fundidos nodulares causa aumento do limite de resistência e dureza, com conseqüente diminuição do alongamento e da tenacidade.

**Palavras-chave:** Ferro fundido nodular; Nióbio; Microestrutura; Propriedades mecânicas.

## **EFFECT OF NIOBIUM ON THE MICROSTRUCTURE AND MECHANICAL PROPERTIES OF AN AS-CAST 70002 DUCTILE CAST IRON**

### **Abstract**

The present work evaluates the influence of niobium addition on the microstructure and mechanical properties of an as-cast perlitic ductile cast iron. Five heats were produced with niobium content in the range 0.2-1.0%. The ductile irons were melted in a 350 kg capacity medium-frequency induction furnace. Materials characterization in the as-cast condition was undertaken by optical microscopy and image analysis. Mechanical properties were investigated by tensile, impact and Brinell hardness tests. The microstructure in the as-cast condition is characterized by Nb(C,N) particles dispersed in a predominantly perlitic matrix. The volume fraction of carbide inclusions is higher for increasing niobium levels. Increasing amounts of niobium raises the tensile properties and hardness, as the ductility and impact values are reduced.

**Key words:** Ductile cast iron; Niobium; Microstructure; Mechanical properties.

<sup>1</sup> *Contribuição técnica apresentada na 61º Congresso Anual da ABM, de 24 a 27 de julho de 2006, Rio de Janeiro – RJ*

<sup>2</sup> *Thyssen Fundições Ltda., Barra do Piraí – RJ.*

<sup>3</sup> *Instituto Superior Tupy, Sociedade Educacional de Santa Catarina, Joinville – SC.*

# 1 INTRODUÇÃO

Os ferros fundidos nodulares são materiais que apresentam propriedades mecânicas adequadas a uma grande gama de aplicações. Estas diversas aplicações são decorrentes da possibilidade de obtenção de séries com alta ductilidade ou com alta resistência.<sup>(1)</sup> Os nodulares ferríticos são geralmente utilizados na fabricação de suportes e bases, e em aplicações na indústria automobilística, principalmente em mangas de eixo, caixas de diferencial, capas de mancal e suportes de alternadores. Já as classes perlíticas, que apresentam maiores resistências mecânicas, são utilizadas, por exemplo, na fabricação de virabrequins, engrenagens e pinhões.<sup>(1-3)</sup>

O uso do nióbio em ferros fundidos é mais recente do que nos aços. Entretanto, o nióbio vem sendo utilizado como elemento de liga nos ferros fundidos cinzentos há mais de quatro décadas. Inúmeros trabalhos<sup>(4-8)</sup> relatam o emprego do nióbio na obtenção de ferros cinzentos com melhores propriedades mecânicas, principalmente em temperaturas elevadas. Dentre os inúmeros exemplos de aplicação destes materiais, destacam-se os componentes do setor automotivo, tais como camisas de cilindros, anéis de segmento e discos de freio de caminhões. Nessas aplicações o nióbio é usado como formador de carbonetos de alta dureza com a função de propiciar maior resistência ao desgaste e de refinar o tamanho de célula eutética, proporcionando maior resistência mecânica sem afetar a morfologia da grafita.<sup>(5)</sup> Entretanto, existem poucas referências na literatura quanto à utilização deste elemento em ferros nodulares.

O presente trabalho tem como objetivo principal, analisar o efeito de adições crescentes de nióbio, variando na faixa entre 0,2 e 1,0% (% em peso), na microestrutura e nas propriedades mecânicas de um ferro fundido nodular perlítico da classe 70002.

## 2 MATERIAIS E MÉTODOS

### 2.1 Materiais

No presente trabalho foi utilizado um ferro fundido nodular perlítico, da classe 70002, como ferro base. As fusões foram programadas de modo a se obter ligas com os seguintes teores de nióbio: 0,2%; 0,4%; 0,6%; 0,8% e 1,0% (% em peso), procurando-se manter constantes os teores dos demais elementos. A especificação de composição química para um ferro fundido nodular da classe 70002 é apresentada na Tabela 1. Para o tratamento de nodulização foi utilizada uma liga nodulizante FeSiMg, seguido do tratamento de inoculação, na panela de vazamento, usando inoculante à base de FeSi com granulometria de 5 a 12 mm.

**Tabela 1.** Composição química especificada para um ferro fundido nodular da classe 70002 (% peso).

<b>Fe</b>	<b>C</b>	<b>Si</b>	<b>Mn</b>	<b>P</b>	<b>S</b>	<b>Cu</b>	<b>Mg</b>
Bal.	3,68-3,80	2,3-2,8	0,33-0,38	< 0,10	<0,02	0,33-0,38	0,03-0,06

### 2.2 Fusão das Amostras

Para elaboração das ligas utilizou-se ferro-gusa, sucata de aço, retorno de nodular, Fe-Nb, Fe-Mn, Fe-Si, Fe-Si-Mg, carburante e cobre. Para a fusão das ligas utilizou-se um forno de indução a cadinho com capacidade de 350 kg. Foram

realizadas três fusões experimentais, para obtenção dos teores de Nb descritos anteriormente. A seguinte seqüência de operações foi utilizada durante as fusões:

- a) Carregamento do forno. As cargas foram constituídas de ferro gusa, sucata de aço, retorno de nodular, Fe-Mn e cobre;
- b) Fusão da carga e superaquecimento à temperatura de 1500°C;
- c) Retirada de metal para tratamento de nodularização com Fe-Si-Mg na proporção de 1,7 % (1020 g), em panela de 60 kg. Após o tratamento de nodularização realizou-se o tratamento de inoculação com Fe-Si, na proporção de 0,6% (360 g). Em seguida foi feito o vazamento dos corpos de prova para obtenção das amostras de ferro base;
- d) As ligas com Nb foram obtidas por meio da adição de Fe-Nb em diferentes proporções, visando à obtenção dos teores desejados (vide Tabela 2). Após a adição de Fe-Nb, superaqueceu-se o banho durante 7 minutos (para cada teor estudado) para a completa dissolução deste material. Em seguida foram realizados os tratamentos de nodulização e inoculação, nas mesmas condições mencionadas anteriormente (item c).

As variáveis experimentais utilizadas durante as fusões encontram-se resumidas na Tabela 2. Os corpos de prova do tipo bloco Y de 25 mm foram confeccionados conforme norma NBR 6916.

**Tabela 2.** Parâmetros utilizados durante as séries de fusões.

FUSÃO	% Nb	Carga (kg)	TS* (°C)	Nodulizante 1,7%** (g)	Inoculante 0,6%** (g)	Fe-Nb (g)	TD*** (min.)
1	A	base	200	1500	1020	360	-
	B	0,2	200	1500	1020	360	560
	C	0,4	200	1500	1020	360	320
2	D	0,8	150	1500	1020	360	2500
	E	1,0	150	1500	1020	360	500
3	F	0,6	60	1500	1020	360	720

\* TS – Temperatura de superaquecimento.

\*\*Valor calculado para a panela de vazamento de 60 kg.

\*\*\* TD – Tempo de dissolução.

## 2.3 Análise Química

As composições químicas das ligas fundidas foram determinadas com auxílio da técnica de espectroscopia de emissão óptica. Utilizou-se um espectrômetro do tipo Spectro Lab-S, instalado no laboratório de materiais da SOCIESC. As amostras (moedas) para análise foram obtidas por meio do vazamento em coquilha. Foram retiradas duas amostras para cada composição estudada, sendo uma no forno e outra durante o vazamento dos corpos de prova.

## 2.4 Análise Metalográfica

As amostras para análise metalográfica foram retiradas dos blocos Y. As extremidades da parte útil dos blocos foram descartadas e em seguida realizou-se o corte das amostras. A preparação metalográfica foi feita de acordo com procedimentos convencionais. Realizou-se o lixamento até a grana 1200, seguido do polimento com pasta de diamante de 1 µm. O ataque metalográfico para observação da microestrutura foi feito com solução de Nital a 4%. Para a determinação da fração

volumétrica de partículas de Nb(C,N) foi realizado ataque eletrolítico com solução de KOH em água a 45% em volume.

As microestruturas das ligas foram observadas com auxílio da técnica de microscopia óptica (MO). Medidas de metalografia quantitativa foram realizadas em todas as ligas estudadas. Foram determinados os graus de nodularização, números de nódulos e porcentagem de fases (ferrita e perlita) da matriz. Todas as medidas foram realizadas na região central da parte útil do bloco Y (meio raio). Utilizou-se o analisador de imagens Image ProPlus™ acoplado a um microscópio óptico Olympus BX-51. Em média foram analisados oito campos por amostra.

## **2.5 Ensaio Mecânicos**

Os ensaios mecânicos foram realizados em corpos de prova retirados dos blocos Y. Foi retirado um corpo de prova para ensaio de tração e três corpos de prova para impacto de cada bloco.

Os corpos de prova para ensaio de tração foram confeccionados com comprimento útil de 60 mm e diâmetro de 10 mm, segundo a norma NBR 6916. Os ensaios foram realizados em uma máquina universal de ensaios da marca Kratos, com capacidade para 50.000 kgf, utilizando dispositivos adequados para garantir a fixação dos corpos de prova. A velocidade de ensaio foi de aproximadamente 10 mm/min.

Os corpos de prova para ensaio de impacto foram do tipo Charpy (sem entalhe), com dimensões de 10 x 10 x 55 mm, segundo a norma NBR 6157. Os ensaios foram realizados à temperatura ambiente, utilizando um pêndulo de marca Wolpert, com uma carga aplicada de 15 kgf.

Ensaio de dureza Brinell foram realizados em amostras retiradas dos corpos de prova de tração. Utilizou-se durômetro Brinell da marca Wolpert, com esfera de 5 mm de diâmetro e carga de 750 kgf.

## **3 RESULTADOS E DICUSSÃO**

### **3.1 Análise Química**

As composições químicas analisadas das ligas utilizadas no presente trabalho são apresentadas na Tabela 3. Os resultados mostram que os teores de Nb obtidos foram muito próximos aos desejados. De uma maneira geral, pode-se afirmar que as ligas atendem à especificação de composição química para um ferro nodular da classe 70002 (vide Tabela 1). Para efeito de simplificação, os teores de Nb serão mencionados no texto como 0,2; 0,4; 0,6; 0,8 e 1,0%.

Cabe ressaltar que todas as ligas estudadas apresentaram elevados teores de magnésio residual, variando em torno de 0,065%. Este valor encontra-se acima dos limites recomendados pela literatura (1,2,9). Teores elevados de magnésio podem causar drástica redução do número de nódulos, bem como aumento da expansão eutética durante a solidificação. Neto (9) relata que uma variação no teor de magnésio de 0,02% para 0,06% (em peso) pode causar redução de aproximadamente 70% no número de nódulos.

**Tabela 3.** Composição química analisada das ligas estudadas (% em peso).

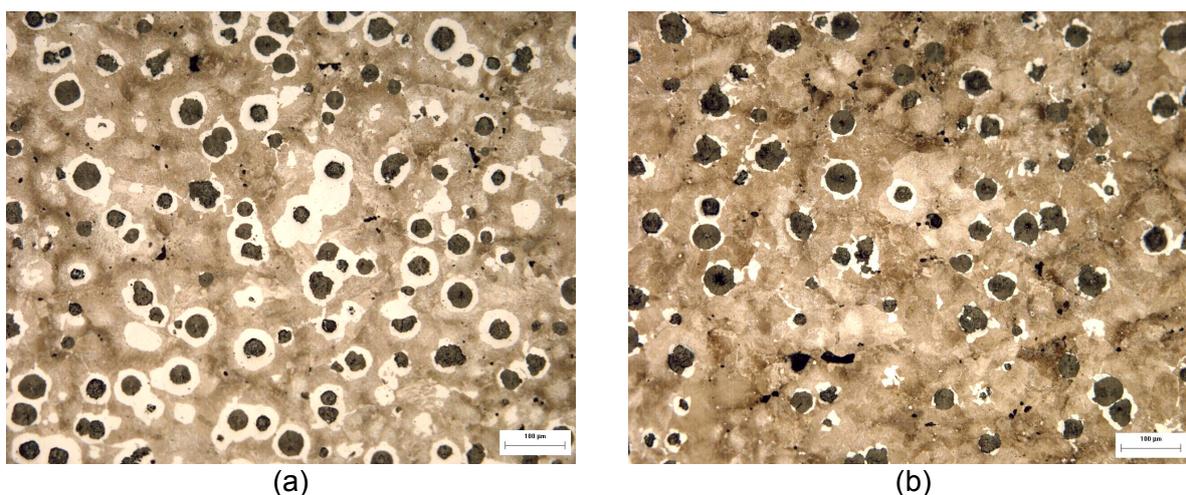
Elemento	Corpos de Prova					
	A	B	C	D	E	F
Fe	Bal.	Bal.	Bal.	Bal.	Bal.	Bal.
C	3,690	3,630	3,520	3,580	3,550	3,300
C.E.*	4,55	4,48	4,36	4,45	4,44	4,19
Si	2,520	2,500	2,480	2,550	2,610	2,610
Mn	0,360	0,370	0,370	0,350	0,350	0,350
P	0,052	0,052	0,053	0,054	0,055	0,052
S	0,011	0,012	0,012	0,012	0,010	0,011
Mg	0,06	0,065	0,068	0,066	0,07	0,057
Cr	0,036	0,042	0,048	0,048	0,054	0,030
Sn	0,003	0,003	0,003	0,004	0,004	0,008
Cu	0,353	0,354	0,357	0,347	0,349	0,330
Al	0,018	0,019	0,019	0,020	0,021	0,015
Pb	0,002	0,003	0,002	0,004	0,004	0,000
Nb	<b>0,002</b>	<b>0,195</b>	<b>0,386</b>	<b>0,787</b>	<b>0,988</b>	<b>0,575</b>

\*C.E.: Carbono equivalente.

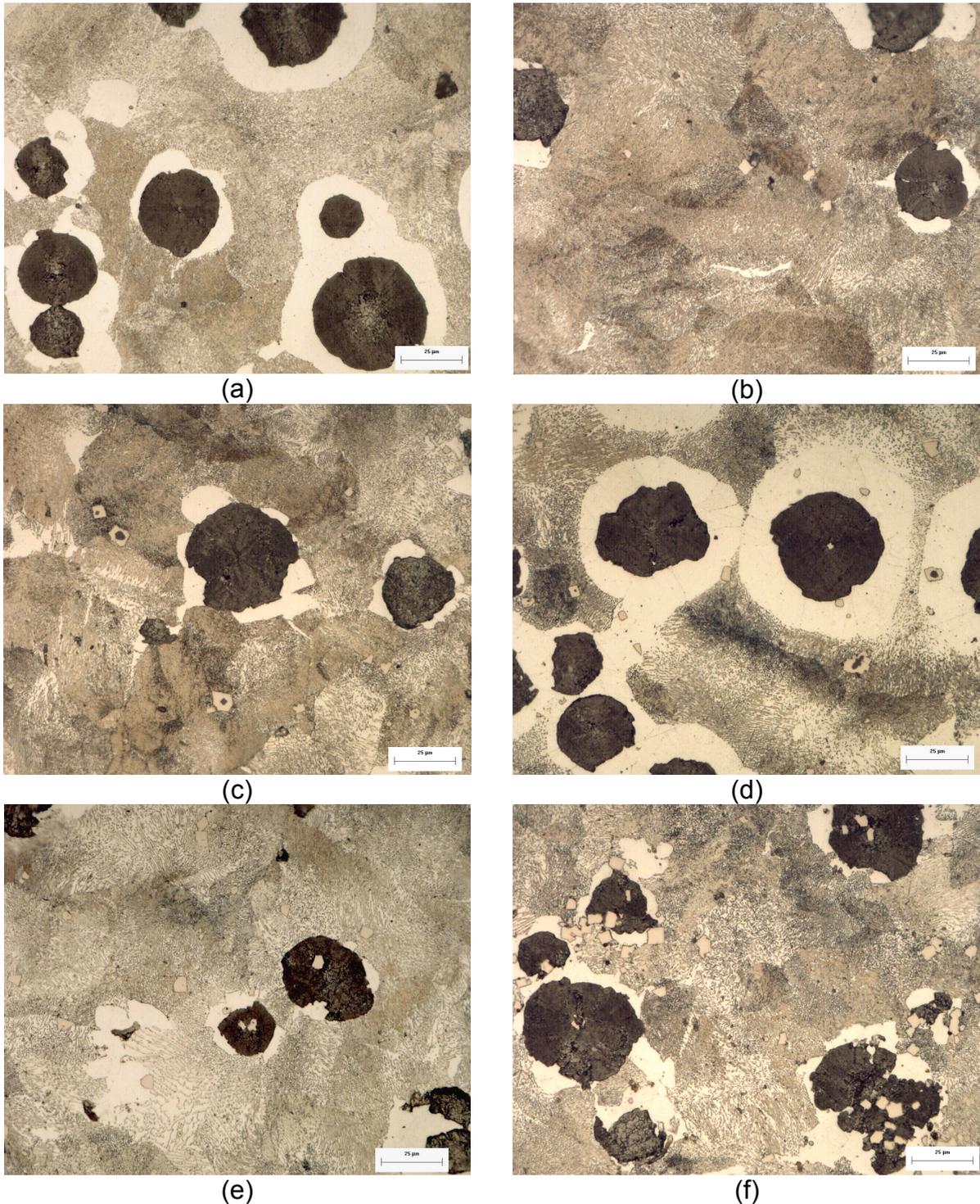
### 3.2 Análise Metalográfica

O ferro base apresenta microestrutura perlítica-ferrítica (Figura 1a). A fração volumétrica de ferrita é de aproximadamente 19%. As amostras com adição de Nb apresentam matrizes predominantemente perlíticas, com teores residuais de ferrita, como demonstrado pela microestrutura da Figura 1b, para amostra com adição de 0,2%Nb.

Nas Figuras 2a a 2f pode-se observar o efeito da adição de nióbio na microestrutura das ligas, particularmente na formação de partículas de Nb(C,N), de morfologia quadrada. A fração volumétrica e o tamanho destas partículas são maiores para teores mais elevados de nióbio.



**Figura 1.** Microestruturas do ferro fundido nodular, MO, 200X, meio raio: (a) ferro base, sem adição de Nb; (b) com adição de 0,2%Nb.



**Figura 2.** Microestruturas do ferro fundido nodular, MO, 1000X, meio raio: (a) ferro base, sem adição de Nb; (b) 0,2%Nb; (c) 0,4%Nb; (d) 0,6%Nb; (e) 0,8%Nb e (f) 1,0%Nb.

O número de nódulos/mm<sup>2</sup> e as frações volumétricas das fases constituintes da matriz e das partículas de Nb(C,N) em função do teor de nióbio das ligas, encontram-se listados na Tabela 4, assim como seus respectivos desvios-padrão.

Os resultados mostram uma tendência à diminuição do número de nódulos com o aumento do teor de nióbio, atingindo-se um valor mínimo de 95 nódulos/mm<sup>2</sup> para a amostra com 0,6%Nb. Para os teores mais elevados de nióbio, de 0,8 e 1,0%, considerando-se apenas os valores médios, observa-se que existe uma leve tendência ao aumento do número de nódulos da matriz. O grau de nodularização

das ligas variou na faixa entre 89 e 95%, valores dentro dos limites recomendados para ferros nodulares de qualidade.

**Tabela 4.** Grau de nodulização, número de nódulos/mm<sup>2</sup> e frações volumétricas das fases constituintes da matriz e de partículas de Nb(C,N), em função do teor de nióbio das ligas.

% Nb	Nodulização (%)	Nódulos/mm <sup>2</sup>	Matriz		% Nb(C,N)
			% Perlita	% Ferrita	
Ferro base	94	143 ± 12	81 ± 4	19 ± 4	n.a.
0,2	92	114 ± 9	96 ± 1	4 ± 1	n.a.
0,4	95	109 ± 10	97 ± 1	3 ± 1	0,2
0,6	91	95 ± 10	92 ± 2	8 ± 2	0,4
0,8	95	106 ± 11	99	1	0,6
1,0	89	112 ± 8	94 ± 1	6 ± 1	1

\*n.a. – não analisado.

Estudos<sup>(7,8,10)</sup> a respeito da adição de nióbio em ferros fundidos cinzentos relatam que as partículas de Nb(C,N) atuam como sítios para nucleação de grafita. A presença de um grande número destas partículas no interior ou nas proximidades dos nódulos de grafita, tal como mostrado nas Figuras 2e e 2f, destaca a possibilidade de existência de um mecanismo semelhante para os ferros nodulares. Este fato poderia justificar a tendência ao aumento do número de nódulos observada nas amostras com 0,8 e 1,0%Nb. Cabe ressaltar que as técnicas de análise microestrutural utilizadas no presente trabalho não permitem uma discussão mais aprofundada desses aspectos.

Os resultados de frações volumétricas das fases constituintes da matriz mostram que, de uma maneira geral, o nióbio atua como perlitzante. A quantidade de ferrita varia de 19% no ferro base, para valores na faixa de 1 a 8% nas ligas com adição de nióbio. Dentre as amostras com adições de nióbio, aquelas com teores de 0,6 e 1,0% apresentam frações volumétricas de ferrita mais elevadas, de 8 e 6%, respectivamente. No caso da amostra com 0,6%Nb, pode-se atribuir este resultado ao baixo carbono equivalente desta liga (C.E.=4,19). Já para a liga com 1,0%Nb, a maior fração de ferrita pode estar associada ao maior número de nódulos presentes nesta amostra. A fração volumétrica de partículas de Nb(C,N) aumentou para teores crescentes de nióbio, chegando a aproximadamente 1% para a amostra com adição de 1,0%Nb.

### 3.3 Ensaio Mecânicos

Os resultados de propriedades mecânicas encontram-se listados na Tabela 5, em função do teor de nióbio das ligas. Observa-se que os valores de LRT aumentam até aproximadamente 0,4% de Nb. Para teores crescentes nota-se, de uma maneira geral, uma tendência à queda dos valores de resistência. As maiores frações de perlita nas amostras com 0,2 e 0,4% de Nb podem ser consideradas as principais responsáveis pelo aumento dos valores de LRT. Soma-se a isso o provável efeito endurecedor das partículas de Nb(C,N) que nestas amostras apresentam-se mais finas e homoganeamente distribuídas. A amostra com 0,6% de Nb apresenta valores de resistência similares ao do ferro base. Isto pode estar atribuído à alta fração volumétrica de ferrita encontrada nesta liga. Entre 0,6 e 1,0% de Nb, a resistência das ligas apresenta ligeiro aumento, mas ainda apresentam valores inferiores àqueles encontrados para adições de até 0,4%Nb. Pode-se destacar, neste caso, o aumento das frações volumétricas e, principalmente, do tamanho e forma de

distribuição das partículas de Nb(C,N). Para os teores de 0,8 e 1,0%Nb, as partículas encontram-se distribuídas de forma mais heterogênea (partículas grandes agrupadas em “clusters”). Partículas de Nb(C,N) grosseiras e distribuídas de forma heterogênea podem causar redução da resistência das ligas, em relação à obtida para distribuições mais finas e homogêneas, como as observadas, por exemplo, nas amostras com 0,2 e 0,4%Nb.

Bedolla-Jacuinde et al.<sup>(11)</sup> relatam um aumento da resistência à tração de ferros fundidos nodulares para adições de até 0,8%Nb. Os autores atribuem este aumento de resistência a três fatores principais: o refinamento da estrutura em função da formação de austenita-Nb(C,N) eutéticos antes da formação de austenita-grafita, à presença de partículas duras de Nb(C,N) homogeneamente dispersas e ao aumento da fração de perlita na matriz das ligas. Cabe ressaltar que, com as técnicas experimentais utilizadas neste trabalho, torna-se difícil estabelecer a extensão do efeito nas propriedades mecânicas de cada um dos fatores citados anteriormente.

**Tabela 5.** Limite de resistência à tração (LRT), limite de escoamento (LE), alongamento (A), dureza Brinell (HB) e energia absorvida em impacto (J), em função do teor de nióbio das ligas.

% Nb	LRT (MPa)	LE (MPa)	A (%)	Dureza Brinell (HB)	Impacto* (J)
Ferro base	732	421	7,9	222	49 ± 4
0,2	779	444	6,2	222	28 ± 9
0,4	780	456	5,8	229	34 ± 6
0,6	738	447	6,8	229	25 ± 2
0,8	752	438	5,3	229	23 ± 7
1,0	765	456	5,2	239	23 ± 2

\*Média de três ensaios.

Os resultados da Tabela 5 mostram, também, que adições crescentes de nióbio causam redução da ductilidade e aumento da dureza das ligas. A amostra com 0,6%Nb apresenta alongamento próximo a 7%, contrariando a tendência global à diminuição desta propriedade, observada nas outras ligas com adição de nióbio. Este resultado pode ser explicado pela presença de uma maior fração de ferrita nesta liga. Vale mencionar que a amostra com 1,0%Nb também apresenta elevada fração volumétrica de ferrita em sua matriz. Entretanto, observa-se nesta liga o menor valor de alongamento entre todas as condições estudadas. Atribui-se este resultado à maior fração volumétrica de partículas de Nb(C,N) nesta amostra, em torno de 1% (Tabela 4).

Estes resultados são coerentes com os encontrados por Bedolla-Jacuinde et al.,<sup>(11)</sup> que observaram uma redução de 8 para 3% no alongamento de um ferro fundido nodular para adições de até 0,8%Nb. Os valores de ductilidade encontrados por estes autores permitem concluir que se poderia esperar um alongamento ainda menor para adições de até 1,0%Nb nas ligas estudadas no presente trabalho, caso a matriz das mesmas permanecessem predominantemente perlíticas.

A dureza variou na faixa entre 222 e 239 HB. A análise destes resultados mostra que, de uma maneira geral, as adições crescentes de nióbio causam aumento da dureza das ligas. Cabe ressaltar que o ferro base e a liga com 0,2%Nb apresentam o mesmo valor de dureza (222 HB). Observam-se valores semelhantes também para as ligas com 0,4; 0,6 e 0,8%Nb (229 HB). A amostra com adição de 1,0%Nb apresenta, como esperado, a maior dureza (239 HB). Atribui-se este

resultado à maior fração volumétrica de partículas de Nb(C,N) observadas nesta amostra.

Bedolla-Jacuinde et al.,<sup>(11)</sup> mencionam que os fatores que levam ao aumento da resistência das ligas, para adições crescentes de Nb, devem ser também considerados para explicar o aumento da dureza. Entretanto, estes autores destacam que a maior fração volumétrica de partículas de Nb(C,N) pode ser considerada a principal responsável pelo aumento desta propriedade. Cabe ressaltar que o efeito no valor de dureza dos ferros fundidos estudados por estes autores foi mais acentuado do que o observado no presente trabalho. Relata-se o aumento da dureza de 27 para 33 HRC, entre o ferro de composição base e uma liga com adição de 0,8%Nb.

Os resultados da Tabela 5 mostram que a adição de nióbio causa redução das propriedades de impacto das ligas. Observa-se que a adição de 0,2%Nb acarreta diminuição de aproximadamente 40% na energia de impacto absorvida, em relação ao ferro base. De uma maneira geral, teores de nióbio acima de 0,2% não afetam de maneira significativa esta propriedade. Para a liga com 1,0%Nb há uma redução da energia absorvida em impacto de aproximadamente 55%. Estes resultados são coerentes com os descritos por Fallon,<sup>(12)</sup> que menciona que adições crescentes de nióbio causam redução da energia absorvida em impacto em ferros fundidos nodulares ferríticos no estado bruto de fusão. Entretanto, este autor relata que adições de nióbio afetam principalmente a temperatura de transição dúctil-frágil. Para uma liga com 0,65%Nb houve um aumento desta temperatura de aproximadamente 75°C.

## **4 CONCLUSÕES**

As principais conclusões do presente trabalho são as seguintes:

- 1) Os teores de Nb obtidos foram muito próximos aos desejados. De uma maneira geral, pode-se afirmar que as ligas obtidas atendem à especificação de composição química para um ferro nodular da classe 70002.
- 2) A adição de nióbio em ferros fundidos nodulares promove a formação de partículas de Nb(C,N). As frações volumétricas e o tamanho destas partículas são maiores para teores de Nb mais elevados.
- 3) As experiências realizadas indicam que o nióbio atua como elemento perlitizante da microestrutura de ferros fundidos nodulares. Entretanto, estudos adicionais são necessários para comprovar e determinar a extensão deste efeito.
- 4) De uma maneira geral, adições crescentes de nióbio causam aumento da resistência à tração e da dureza das ligas, com conseqüente redução da ductilidade e das propriedades de impacto.

## **Agradecimentos**

Os autores agradecem à Thyssen Fundições Ltda. e à Sociedade Educacional de Santa Catarina, pelo suporte e pela oportunidade de desenvolver o presente trabalho.

## REFERÊNCIAS

- 1 SANTOS, A. B. S; BRANCO, C. H. C. Metalurgia dos ferros fundidos cinzentos e nodulares. São Paulo: IPT, 1991.
- 2 SANTOS, A.B.S. Efeito da composição química na produção de ferro fundido nodular. LV Congresso Anual da ABM, Rio de Janeiro, 2000.
- 3 SENAI – MG. Ferros fundidos de grafita esferoidal. 2. ed. Belo Horizonte. Publicações Técnicas, 1987.
- 4 PIESKE, A. et al. Ferros fundidos cinzentos de alta qualidade. 4.ed. Joinville: SOCIESC, 1985.
- 5 GUESSER, W. L; GUEDES, L. C. Desenvolvimentos recentes em ferros fundidos aplicados a indústria automobilística. IX Simpósio de Engenharia Automobilística, AEA, São Paulo, 1997.
- 6 Associação Brasileira de Metais. Tendências e perspectivas na área dos novos materiais. São Paulo: ABM, 1987.
- 7 CASTRO, C. P. et al. Observações relativas alguns efeitos do nióbio em ferros fundidos cinzentos. XX Congresso Anual da ABM, Rio de Janeiro, 1975.
- 8 BRANCO C.H.C; BECKERT, E.A. Niobium in gray cast iron. Niobium Technical Report, NbTR, 1984.
- 9 OLAH NETO, A. Estudo da solidificação de ferros fundidos através de análise dilatométrica São Carlos: Universidade Federal de São Carlos, 1985.
- 10 SENAI – MG. Ferros fundidos ligados. 2.ed. Belo Horizonte: Publicação técnica, 1987.
- 11 JACUINDE-BEDOLA, A. B.; SOLIS, E.; HERNANDEZ, B. Effect of niobium in medium alloyed ductile cast irons. International Journal of Cast Metals Research, v.16, n.5, 2003.
- 12 FALLON, M. J. The effect of niobium on the structure and properties of as-cast ferritic nodular (SG) iron. England, Bcira Journal, v.32, 1984.