

# EFEITO DO TRATAMENTO TÉRMICO SOBRE AS PROPRIEDADES DE IMPACTO DE FERROS FUNDIDOS NODULARES FERRÍTICOS<sup>(1)</sup>

Cíntia Cristiane Petry Mazzaferro<sup>(2)</sup>

Telmo Roberto Strohaecker<sup>(3)</sup>

Neste trabalho foi verificado o efeito do tratamento térmico de recozimento (pleno e subcrítico) sobre as propriedades de impacto (energia absorvida e temperatura de transição dúctil-frágil) em ferros fundidos nodulares ferríticos.

Três ligas em ferro fundido nodular ferrítico (liga 1: ferro fundido nodular de composição química comercial; liga 2: ferro fundido nodular de composição química comercial, mas com um maior número de nódulos; liga 3: ferro fundido nodular de composição química comercial, mas com um teor de fósforo mais elevado) foram ensaiados em impacto Charpy no estado bruto de fusão e também após serem submetidas a dois tipos de recozimento para a verificação da influência de fatores como teores residuais de perlita e número de nódulos nas suas propriedades de impacto.

As propriedades de impacto das ligas mostraram-se intimamente relacionadas às suas microestruturas e temperaturas de ensaio; suas propriedades de impacto apresentaram-se melhores após serem submetidas aos tratamentos térmicos de recozimento, e as mesmas apresentaram-se mais frágeis com a diminuição da temperatura.

A liga 2 apresentou menores temperaturas de transição dúctil-frágil para todas as condições estudadas, seguida pela liga 1 e por último pela liga 3.

Palavras-chave: tratamento térmico – impacto – nodulares

(1) Contribuição ao V Seminário de Fundição, de 17 a 19 de maio de 2004, em Salvador, BA.

(2) Engenheira Metalurgista, Mestre em Engenharia, Doutoranda no Laboratório de Metalurgia Física – PPGEM – UFRGS.

(3) Engenheiro Metalurgista, Prof. Doutor no Laboratório de Metalurgia Física – PPGEM – UFRGS.

## Introdução

Os ferros fundidos nodulares ferríticos são bastante empregados em componentes submetidos à esforços de impacto, necessitando apresentar grande deformação plástica antes de se romper.

O ensaio de impacto é um ensaio simples, rápido e barato e mostra a tendência de um material de se comportar de maneira frágil.

Para verificar a influência de fatores como estrutura da matriz e número de nódulos sobre as propriedades de impacto de ferros fundidos nodulares ferríticos, foram estudadas três ligas deste material<sup>(1)</sup>: de composição química comercial; de composição química comercial, mas com um maior número de nódulos; de composição química comercial, mas com teor de fósforo mais elevado.

Corpos de prova nas condições bruta de fusão, submetidas a recozimento subcrítico e a recozimento pleno foram ensaiados em impacto Charpy.

## Procedimento Experimental

Os ferros fundidos foram submetidos a dois tipos de recozimento, pleno (900°C, 3h) e subcrítico (700°C, 8h), para a obtenção de matrizes ferríticas, e para a verificação da influência de teores residuais de perlita nas propriedades de impacto.

Os ensaios de impacto foram realizados em corpos de prova Charpy 10x10x55 mm sem entalhe; apesar destes apresentarem temperaturas de transição menores, são mais susceptíveis a variações de teores de perlita na matriz. Salienta-se ainda que corpos de prova não entalhados são adequados para a comparação de variações na temperatura de transição já que são obtidos valores de energia relativamente altos na faixa dúcteis.

Estes ensaios de impacto foram realizados em temperaturas entre -196 e +100°C, com variação de 1°C, conforme a norma ASTM E23-9, utilizando-se um pêndulo Wolpert, com capacidade de 300J. Para a realização dos ensaios a temperaturas menores utilizou-se álcool e nitrogênio líquido, enquanto que para as maiores utilizou-se água quente. As medições de temperatura eram efetuadas com termômetros.

## Resultados e Discussão

A nomenclatura adotada para os ferros fundidos em estudo foi a seguinte:

- liga 1: ferro fundido nodular ferrítico de composição química comercial;
- liga 2: ferro fundido nodular ferrítico de composição química comercial, mas com um maior número de nódulos;
- liga 3: ferro fundido nodular ferrítico de composição química comercial, mas com teor de fósforo mais elevado.

Na tabela I são mostradas as composições químicas das ligas obtidas, assim como o número de nódulos de grafita, e na tabela II podem ser vistos os seus aspectos microestruturais.

	C	Si	Mn	P	S	Cr	Cu	Mg	CE	Nód/mm <sup>2</sup>
Liga 1	3,44	2,98	0,17	0,061	0,017	0,011	0,07	0,046	4,45	110-123
Liga 2	3,48	3,03	0,21	0,062	0,016	0,007	0,03	0,047	4,51	203-225
Liga 3	3,49	2,61	0,18	0,090	0,022	0,032	0,05	0,038	4,39	115-138

Tabela I - Composição química e número de nódulos por mm<sup>2</sup> das ligas.

		% Ferrita	%Perlita	Tam. Grão Ferrita (ASTM)	Tam. Grafita (ASTM)
	Liga 1	95	5	<u>6-7</u>	6-7
BF	Liga 2	> 98	< 2	<u>7-8</u>	7-8
	Liga 3	70	30	<u>6-7</u>	6-7
	Liga 1	>99	<1	<u>6-7</u>	6-7
RSC	Liga 2	>99	<1	<u>7-8</u>	7-8
	Liga 3	>99	<1	<u>6-7</u>	6-7
	Liga 1	>99	<1	<u>6-7</u>	6-7
RP	Liga 2	>99	<1	<u>7-8</u>	7-8
	Liga 3	95	5	<u>6-7</u>	6-7

\*os números sublinhados indicam predominância.

BF: bruto de fusão; RSC: recozimento subcrítico; RP: recozimento pleno.

Tabela II - Quantificação microestrutural das ligas obtidas.

A diferença na quantidade de perlita entre as ligas, no estado bruto de fusão, deve-se ao maior número de nódulos presente na liga 2, pois com o aumento do número de nódulos tem-se, durante o resfriamento, menores distâncias para a difusão do carbono, tendo-se uma menor quantidade deste elemento na austenita nas regiões próximas às partículas de grafita, o que resulta na formação de maiores porcentagens de ferrita na matriz.

As ligas 1 e 3 apresentaram número de nódulos/mm<sup>2</sup> quase equivalente; porém, a liga 3 possuiu um teor de perlita bem maior (no estado bruto de fusão). Isto pode ser atribuído à menor quantidade de Si presente nesta liga em comparação à liga 1 (uma vez que este elemento favorece a formação da ferrita).

Com o tratamento térmico de recozimento subcrítico, as ligas tiveram suas microestruturas refinadas (tabela II), apresentando uma certa diminuição no tamanho de grão da ferrita e eliminação praticamente total da perlita. Com respeito ao tratamento de recozimento pleno (tabela II), após submetidas a ele as ligas também apresentaram uma microestrutura mais refinada em relação ao estado bruto de fusão, mas não houve a eliminação total da perlita no material 3, indicando que o tempo na temperatura de austenitização não foi suficiente para dissolver toda a perlita que estava presente nesta liga.

Nas figuras 1, 2 e 3 é apresentada a influência dos tratamentos térmicos sobre as curvas de transição dúctil-frágil (TDF) de cada liga em estudo, e nas figuras 4, 5 e 6 são mostradas as curvas de TDF das ligas para cada condição.

Verifica-se que todas as ligas apresentaram uma queda das propriedades de impacto com a diminuição da temperatura. Entretanto, todas as ligas apresentaram melhores propriedades de impacto após serem submetidas aos recozimentos (figuras 1, 2 e 3); isto pode ser atribuído à obtenção de estruturas mais homogêneas, mais refinadas (menores tamanhos de grão da ferrita) e com menores teores de perlita.

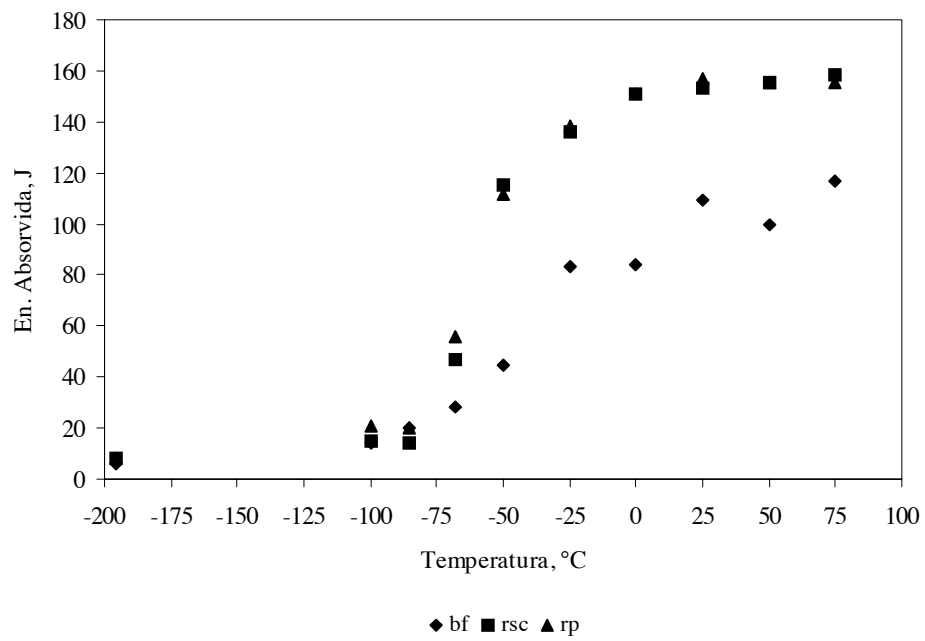


Figura 1 - Influência do tratamento térmico nas curvas de transição dúctil-frágil da liga 1.

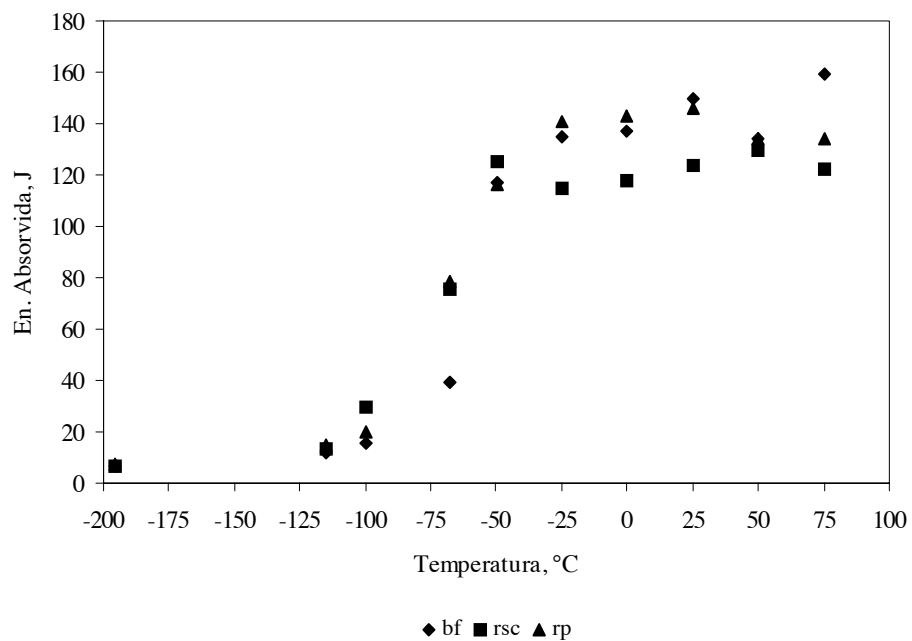


Figura 2 - Influência do tratamento térmico nas curvas de transição dúctil-frágil da liga 2.

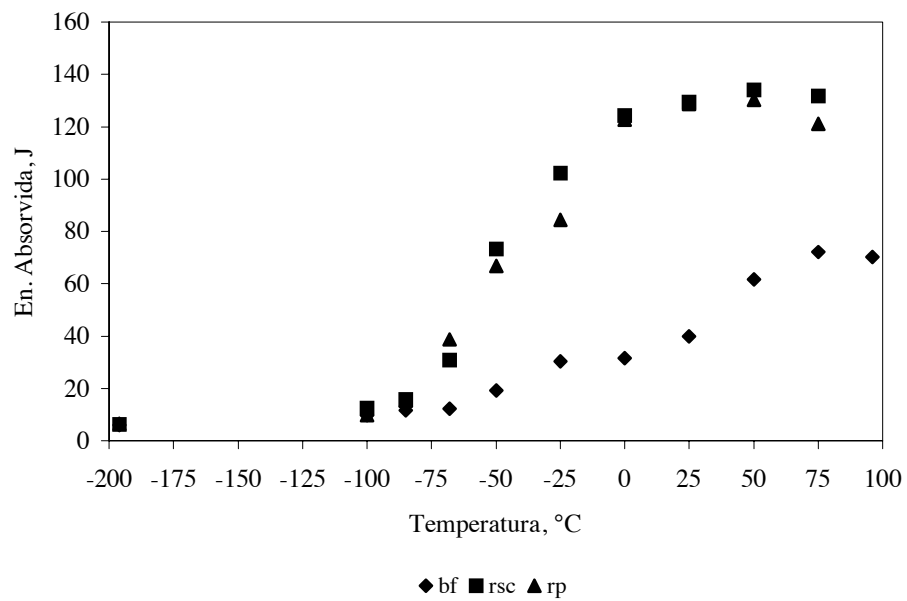


Figura 3 - Influência do tratamento térmico nas curvas de transição dúctil-frágil da liga 3.

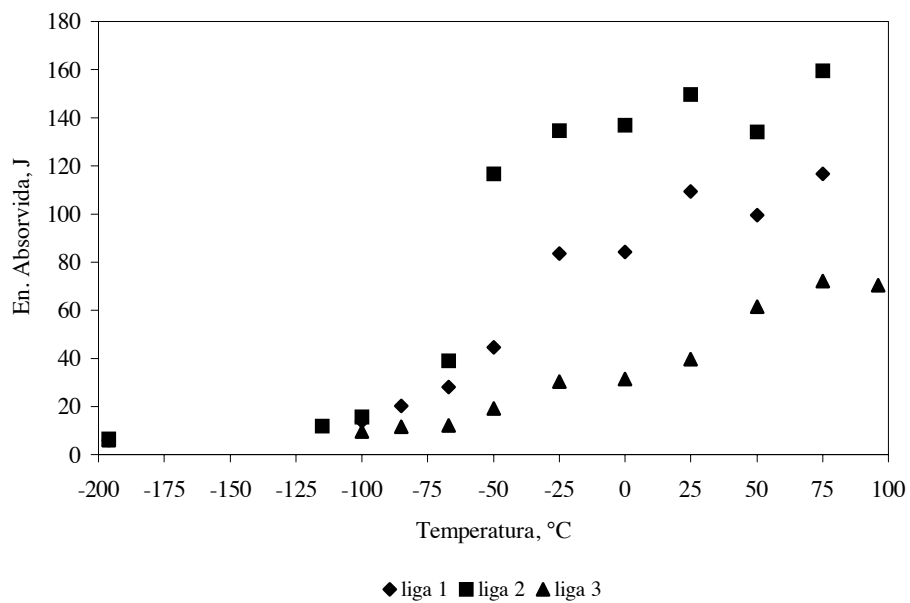


Figura 4 - Influência dos aspectos microestruturais sobre as curvas de transição de cada liga, no estado bruto de fusão.

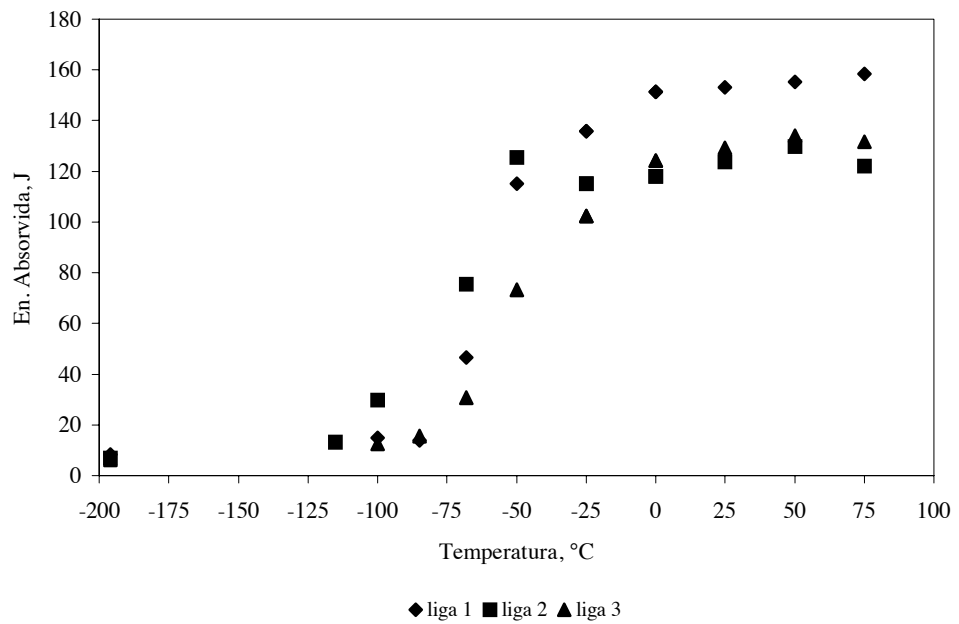


Figura 5 - Influência dos aspectos microestruturais sobre as curvas de transição de cada liga, submetidas a recozimento subcrítico.

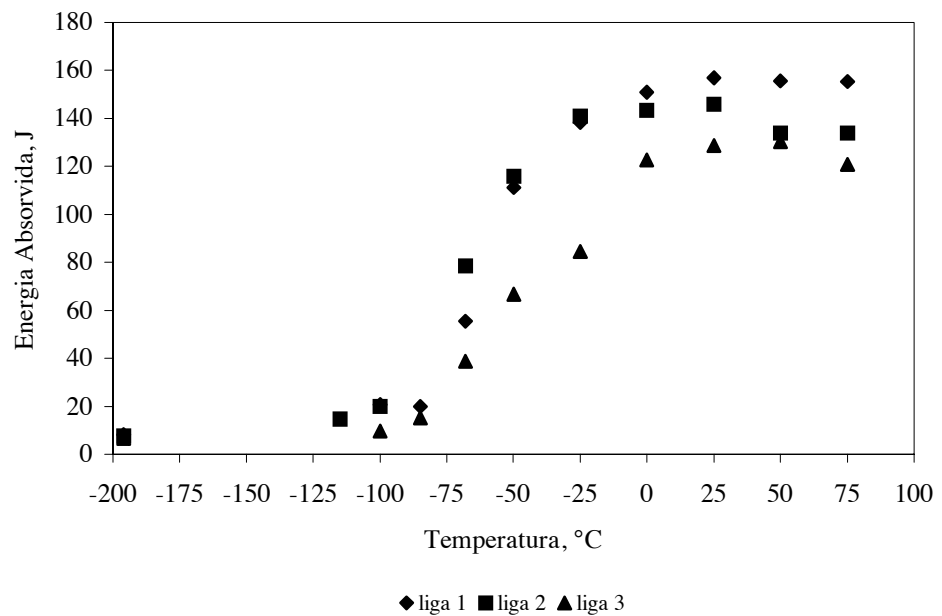


Figura 6 - Influência dos aspectos microestruturais sobre as curvas de transição de cada liga, submetidas a recozimento pleno.

A partir dos dados das curvas de transição, foi possível calcular as temperaturas de transição dúctil-frágil de cada liga, para cada condição, e as energias (médias) absorvidas no patamar dúctil. Estas temperaturas foram calculadas com base na energia de transição (média entre as energias dos patamares dúctil e frágil), e são mostradas na tabela III.

		Temperatura de Transição (°C)	Energia Absorvida (J)
BF	Liga 1	-42	108,5
	Liga 2	-58	147,8
	Liga 3	-5	71,3
RSC	Liga 1	-65	155,5
	Liga 2	-80	125,1
	Liga 3	-58	131,7
RP	Liga 1	-65	156,0
	Liga 2	-75	140,0
	Liga 3	-50	126,7

*BF: bruto de fusão; RSC: recozimento subcrítico; RP: recozimento pleno.*

Tabela III - Temperaturas de transição dúctil-frágil e energias (médias) absorvidas, no patamar dúctil, das ligas estudadas, para cada condição.

Em relação à liga 1 (figura 1 e tabela III), os comportamentos desta submetida a recozimento subcrítico e submetida a recozimento pleno foram similares, tanto em relação à energia absorvida quanto à temperatura de transição. Na condição bruta de fusão, esta liga apresentou maior temperatura de transição e absorveu menor energia no impacto, fatos que podem ser atribuídos ao teor de perlita apresentado pela mesma.

Quanto à liga 2 (figura 2 e tabela III), os maiores valores de energia absorvida foram levemente maiores na condição bruta de fusão, o que leva a crer que o teor residual de perlita (<2%) apresentado nesta condição foi benéfico em relação a este aspecto, pois pode ter atuado como barreira para a propagação de algumas trincas. Após ser submetida aos recozimentos, esta liga tornou-se um pouco menos resistente ao início e propagação de trincas (pois absorveu menor energia no impacto em relação ao estado bruto de fusão), mas também apresentou menores temperaturas de transição. Nota-se que a mesma submetida a recozimento pleno absorveu maior energia no impacto e apresentou temperatura de transição um pouco maior do que com recozimento subcrítico.

Já a liga 3 (figura 3 e tabela III) na condição bruta de fusão apresentou propriedades de impacto significativamente menores do que após a realização dos recozimentos, fato atribuível não somente ao maior teor de perlita da mesma naquela condição, mas também devido à steadita presente em algumas fronteiras de células na condição bruta de fusão, que se dispersou após os tratamentos.

A elevada diferença entre a energia absorvida pela liga 1, com maior espaçamento de nódulos, em comparação à liga 2, ambas na condição bruta de fusão (figura 4 e tabela III), não era esperada, mesmo levando-se em consideração os diferentes teores de perlita apresentados por elas, pois, segundo a literatura<sup>[Petry, 1999]</sup> o estado plástico começa primeiro em materiais de menor espaçamento entre nódulos. Neste caso, pode-se dizer que o teor de perlita na matriz foi o efeito mais

importante em relação à energia absorvida, pois a liga 1 absorveu uma quantidade de energia bem inferior à outra.

Após os tratamentos de recozimento, a liga de menor temperatura de transição foi a 2, seguida das ligas 1 e 3, o que pode ser explicado pelo maior número de nódulos presente na liga 2 em relação às outras. Estes nódulos atuam como nucleadores de microcavidades, favorecendo um mecanismo de fratura dúctil.

Com recozimento subcrítico, a liga que absorveu a maior energia no impacto foi a liga 1, seguida pela 3 e por último pela 2. Nesta condição as ligas apresentaram microestruturas muito semelhantes, sendo o número de nódulos a diferença principal entre elas. A liga 2 absorveu menor quantidade de energia no patamar superior devido à menor distância para o coalescimento de alvéolos, provocada pelo maior número de nódulos.

Submetida a recozimento pleno, a liga que absorveu maior energia no patamar dúctil novamente foi a 1, seguida pela liga 2 e pela 3; estes resultados podem ser explicados pelo teor residual de perlita apresentado pela liga 3 após este tratamento, pois se estes residuais de perlita fossem menores, os resultados seriam provavelmente análogos aos das ligas submetidas a recozimento subcrítico.

## **Conclusões**

Com base nos resultados obtidos, pode-se afirmar que:

- as propriedades de impacto das ligas estudadas mostraram-se intimamente relacionadas às suas microestruturas;
- para uma mesma condição, com a diminuição da temperatura todas as ligas apresentaram-se mais frágeis, deformando-se menos plasticamente e apresentando facetadas de clivagem em suas superfícies de fratura;
- todas as ligas tiveram suas propriedades de impacto melhoradas após serem submetidas aos tratamentos térmicos de recozimento subcrítico ou pleno;
- as menores temperaturas de transição dúctil-frágil, para todas as ligas, foram obtidas após as mesmas serem submetidas a recozimento subcrítico;
- a quantidade de energia absorvida no patamar dúctil para cada liga tratada termicamente foi similar, e inferior no estado bruto de fusão;
- a liga 2 (ferro nodular de composição química comercial com maior número de nódulos) foi a que possuiu menores temperaturas de transição dúctil-frágil para todas as condições estudadas, seguida pela liga 1 (ferro nodular de composição química comercial) e por último pela 3 (ferro nodular de composição química comercial com maior teor de P);
- na condição bruta de fusão, a liga que absorveu maior quantidade de energia no patamar dúctil foi a 2, seguida pela liga 1 e finalmente pela 3;
- com recozimento subcrítico, a ordem decrescente de energia absorvida foi: liga 1, liga 3 e por último liga 2;
- submetida a recozimento pleno, teve-se novamente a liga 1 como a que absorveu maior quantidade de energia, seguida pela liga 2 e por último pela 3;
- teores de perlita residuais da ordem de até 5% pareceram não ser muito prejudiciais às propriedades de impacto dos materiais estudados, quando obtidos após recozimento;



- o teor de P de 0,09% não pareceu ser tão prejudicial quanto o teor de perlita apresentado por esta liga no estado bruto de fusão, pois após os recozimentos a mesma teve suas propriedades de impacto significativamente melhoradas.

### **Agradecimentos**

Os autores agradecem à Tupy Fundições Ltda, pelo fornecimento dos corpos-de-prova.

### **Bibliografia**

1. PETRY, C. C. M. **Avaliação das Propriedades de Impacto e dos Mecanismos de Fratura de Ferros Fundidos Nodulares Ferríticos**. Dissertação de Mestrado. UFRGS, Porto Alegre: 1999. 88 p.

# **HEAT TREATING EFFECT ON IMPACT PROPERTIES OF FERRITIC DUCTILE IRONS**

## **Abstract**

The main aim of this work was to analyze the annealing heat treatment effect on impact properties (absorbed energy and transition temperature) in ferritic ductile irons.

Three ductile irons (alloy 1: commercial ductile iron; alloy 2: commercial ductile iron, with a greater nodule count; alloy 3: commercial ductile iron, with a greater phosphorus content) were tested in Charpy impact test in as-cast condition and after sub-critical and full anneal to verify the influence of residual pearlite and nodule count on their impact properties.

Impact properties are related to cast iron microstructures and test temperature.

The alloy 2 showed the lowest transition temperature for all the studied conditions, followed by alloy 1 and by alloy 3.

**Key-words:** heat treating – impact – ductile irons