



**II CONGRESSO NACIONAL DE ENGENHARIA MECÂNICA**  
**II NATIONAL CONGRESS OF MECHANICAL ENGINEERING**  
12 a 16 de Agosto de 2002 - João Pessoa – PB

**CARACTERIZAÇÃO DE FERROS FUNDIDOS NODULARES  
PRODUZIDOS POR FUNDIÇÃO CONTÍNUA.**

**Eng. Edvaldo Casagrande Angelo Júnior**, Pontifícia Universidade Católica do Paraná, Rua Vital Brasil 460, Cep 80320-120, Vila Isabel, Apto 61, Curitiba Paraná, Tel. (041) 345-6931,  
e-mail: [e\\_angelo@hotmail.com](mailto:e_angelo@hotmail.com).

**Dr. Eng. Ricardo Diego Torres**, Pontifícia Universidade Católica do Paraná, Rua Imaculada Conceição, 1155, Prado Velho, Cep 80215-901, Departamento de Engenharia Mecânica, Curitiba Paraná, Tel.(041) 330-1515,  
e-mail: [rdtorres@tecpar.br](mailto:rdtorres@tecpar.br).

**Dr. Eng. Wilson Luis Guessser**, Universidade Estadual de Santa Catarina, Tupy Fundições Ltda, Rua Albano Schmidt, 3400, Cep 89206-900, Joinville Santa Catarina, Tel. (047) 441-8359,  
e-mail: [wguessser@tupy.com.br](mailto:wguessser@tupy.com.br).

**Resumo:** Obtenção de Gradientes Microestruturais em Ferros Fundidos Nodulares produzidos por fundição contínua.

*Ferros fundidos com grafita nodular, obtidos por fundição contínua, apresentam uma matriz de variáveis que estão relacionadas entre si. Neste projeto temos por objetivo conhecer a relação entre as variáveis do processo e a conseqüente resposta mecânica. A taxa de resfriamento e o diâmetro das barras foram identificados como parâmetros importantes nas propriedades mecânicas resultantes. Para determinar o efeito dos parâmetros acima foram escolhidos três barras de ferro fundido nodular FE- 45012, com diâmetros distintos: 50, 100 e 150 mm. Para cada diâmetro foram analisados a microestrutura, dureza e resistência ao impacto em três posições na barra: superfície, médio raio e centro. Verificou-se que para todas as barras o número de nódulos diminui da superfície para o centro, por outro lado, o teor de perlita aumenta. Embora exista este gradiente microestrutural nas barras a dureza HRb ao longo do raio permaneceu praticamente a mesma. Com relação a resistência ao impacto, determinada através do ensaio de Charpy na barra de 50 mm, verificou-se que a superfície apresenta uma temperatura de transição mais baixa que o centro e médio raio. Por outro lado a energia absorvida no platô é mais baixa nos corpos de prova retirados da superfície.*

**Palavras-Chave:** *Ferros Fundidos Nodulares, Caracterização Microestrutural, Fundição Contínua.*

# 1. INTRODUÇÃO

A produção de componentes de ferro fundido cinzento ou nodular por fundição contínua (FUCO) é utilizada desde a década de 50. Este processo é uma alternativa interessante para produção de componentes com geometria simples (perfis redondos, quadrados). O processo FUCO apresenta um custo de moldagem muito inferior aos processos de fundição em areia, pois os perfis produzidos utilizam uma matriz de grafite refrigerada que determina a sua forma. Por outro lado os componentes sofrem uma usinagem intensa para atingir a sua forma final, o que muitas vezes encarece o produto. Uma outra característica deste processo é a variação da microestrutura que ocorre ao longo da espessura do perfil, em função, por exemplo, das diferentes taxas de solidificação.

Em muitas aplicações na engenharia é desejável que gradientes microestruturais existam para compatibilizar, no mesmo componente, propriedades que seriam impossíveis de serem obtidas em componentes com uma distribuição microestrutural homogênea. Em perfis produzidos por fundição contínua deseja-se que o material na superfície apresente uma elevada usinabilidade, enquanto o material no núcleo da barra deve apresentar propriedades mecânicas que sejam suficientes para resistir à solitação ao que o mesmo é submetido. Gradientes microestruturais em barras produzidas por fundição contínua são obtidos pela variação da taxa de solidificação e pela adição de elementos de liga, como silício, cobre, estanho, antimônio. A mudança na taxa de solidificação e nos teores de elementos de liga em ferros fundidos nodulares propicia a obtenção de quantidades distintas de nódulos de grafita, bem como uma variação da relação ferrita/perlita ao longo do raio da barra. Nesta primeira etapa do trabalho o objetivo principal foi caracterizar os gradientes microestruturais em termos de quantidade de nódulos de grafita, a percentagem de grafita, de ferrita e de perlita, correlacionando estes parâmetros com as propriedades mecânicas.

## 2. ASPECTOS FUNDAMENTAIS

### 2.1. Gradientes Microestruturais

Gradientes microestruturais são introduzidos em componentes com o objetivo de aliar propriedades mecânicas difíceis de serem atingidas em partes com microestrutura homogênea. Um exemplo da aplicação deste conceito são os aços cementados, onde apresentam um gradiente microestrutural que aliam resistência ao desgaste, na superfície externa, e tenacidade a fratura no núcleo do componente. Estes gradientes são introduzidos através da variação da composição química e/ou variação dos parâmetros de processo como, por exemplo, taxa de resfriamento ao longo de um ou mais dimensões do componente. Embora o conceito acima descrito seja conhecido há muito tempo pela comunidade científico-industrial, foi somente na segunda metade da década de 80 que surgiu uma área do conhecimento direcionada, especificamente, para produzir e caracterizar materiais com gradientes microestruturais, conhecidos como FGMs (Functionally Graded Materials). O termo FGM originou-se no Japão como a descrição de uma classe de materiais que apresenta uma mudança espacial da microestrutura e, conseqüentemente, das propriedades mecânicas. Vários sistemas foram estudados e desenvolvidos dentro deste conceito, dentre eles podemos destacar: NiAl/TiB<sub>2</sub>, TiC/Ni<sub>3</sub>Al e Ni/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>. Nestes sistemas aliam-se as propriedades mecânicas de boa deformabilidade das fases metálicas e intermetálicas com a resistência a altas temperaturas e desgaste das fases cerâmicas. Entretanto as tensões térmicas residuais nestas junções são elevadas devido a diferença das propriedades físicas e mecânicas que existe entre as fases metálicas e intermetálicas e as fases cerâmicas. Para superar esta desvantagem das junções metal/cerâmica introduz-se um gradiente microestrutural que minimiza as tensões térmicas residuais, através de uma mudança gradual na microestrutura que vai do metal puro de um lado do componente, passando por uma região intermediária aonde as duas fases coexistem, até a cerâmica pura no outro extremo do componente.

## 2.2. Processo de Fundição Contínua

O processo de Fundição Contínua (FUCO), ilustrado na Figura (1), foi desenvolvido na Europa logo após a segunda guerra mundial. O processo de Fundição Contínua de ferro fundido foi introduzido na América do Sul em 1975 pela Fundição TUPY, visando obter um método mais econômico para a produção de peças com qualidade similar ou superior às obtidas a partir de barras de aço.

A geometria do produto FUCO é obtida por uma coquilha refrigerada proporcionando às barras obtidas por este processo, uma elevada sanidade associada a uma estrutura refinada. O processo de fundição contínua permite que se obtenham os mais diferentes formatos geométricos, tais como seções redondas, quadradas, retangulares, ovais e outras como mostra a Figura (2).

Uma das limitações dos produtos obtidos pelo processo FUCO é diferença das propriedades de impactos entre a superfície e o núcleo das barras. A causa desta diferença pode ser explicada pela diferença na estrutura da matriz, microrechupes, segregação e o grau de nodularização, e o número de nódulos. Este problema é mais crítico em barras de ferro fundido nodular com diâmetro acima de 100 mm, pois os gradientes de temperaturas são maiores para as barras com diâmetros acima deste valor.

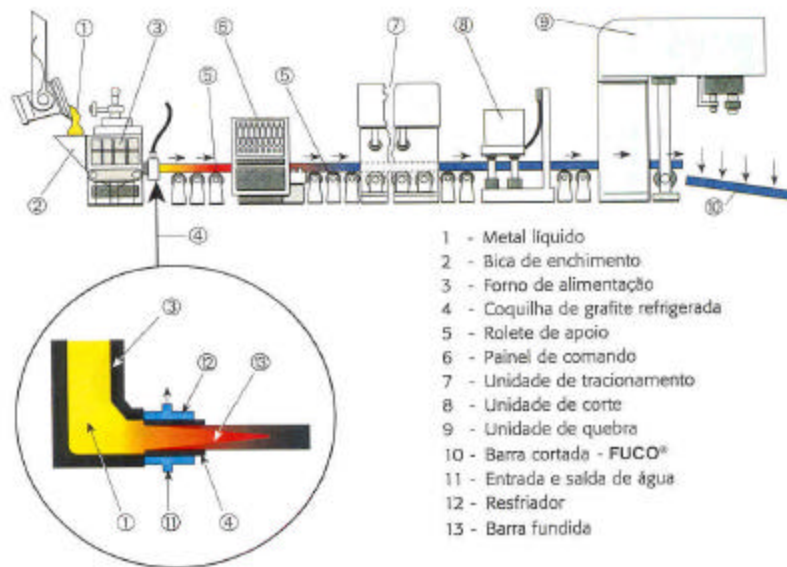


Figura 1. Processo de produção por fundição contínua.

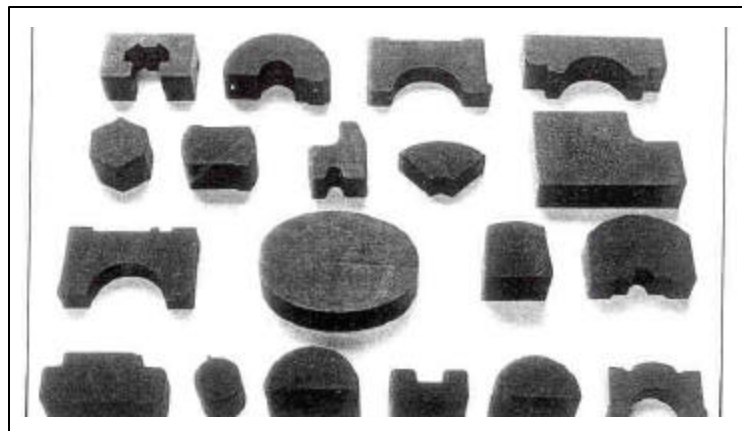


Figura 2. Geometria dos Perfis produzidos por fundição contínua.

### 2.3. Gradientes microestruturais em ferros fundidos nodulares obtidos por fundição contínua:

Como o resfriamento da barra a solidificar ocorre a partir da superfície em contato com a coquilha de grafite, as barras de ferro fundido nodular apresentam, após a solidificação, um gradiente de microestrutura que se caracteriza por alto número de nódulos de grafita na periferia (alta velocidade de solidificação) e baixo número de nódulos no núcleo. A transformação da austenita, que se segue, pode ocorrer segundo as seguintes alternativas:

$\alpha$  + Grafita (1) - transformação eutetóide estável

$\alpha$  + Fe<sub>3</sub>C (2) - transformação eutetóide metaestável

A transformação eutetóide estável, que produz matriz ferrítica, ocorre em maiores temperaturas que a transformação eutetóide metaestável, e a grafita formada deposita-se sobre as partículas de grafita pré-existent, localizando-se então as áreas de ferrita em torno dos nódulos de grafita. À medida que esta transformação prossegue, as distâncias de difusão para deposição do carbono na grafita ficam cada vez maiores, o que mostra a importância do número de nódulos para esta transformação.

A transformação eutetóide metaestável, que resulta em matriz perlítica, processa-se a menores temperaturas que a anterior, e tende a se iniciar em regiões intercelulares, com maiores concentrações de elementos perlitizantes (devido à segregação de solidificação). Uma vez iniciada, esta transformação ocorre rapidamente, já que o crescimento da perlita dá-se por um mecanismo cooperativo.

Diversos fatores afetam a ocorrências das reações eutetóides, dentre os quais se destacam:

- ◆ Velocidade de resfriamento: determina o tempo disponível para difusão de carbono na reação eutetóide estável. Deste modo, baixas velocidades de resfriamento favorecem a formação de ferrita na matriz.
- ◆ Número de nódulos de grafita: a distância de difusão para a reação eutetóide estável é determinada pelo número de nódulos, de modo que aumentando este número resulta em maior tendência à formação de ferrita.
- ◆ Teor de silício: o silício aumenta o intervalo de temperatura onde coexistem austenita e ferrita, aumentando assim o intervalo de temperatura para a ocorrência da transformação estável (2); além disso, o silício aumenta sensivelmente a atividade do carbono bem como o número de nódulos de grafita, de modo que a formação de ferrita fica favorecida.
- ◆ Elementos perlitizantes - Sn, Cu, Sb, Mn: seja reduzindo o intervalo de temperatura de coexistência de austenita e ferrita (Mn) ou então formando barreiras sobre as partículas de grafita (Cu, Sn, Sb), os elementos denominados de perlitizantes dificultam a reação eutetóide estável, promovendo assim a presença de perlita. Uma discussão detalhada dos efeitos dos elementos de liga pode ser encontrada na referência (3).

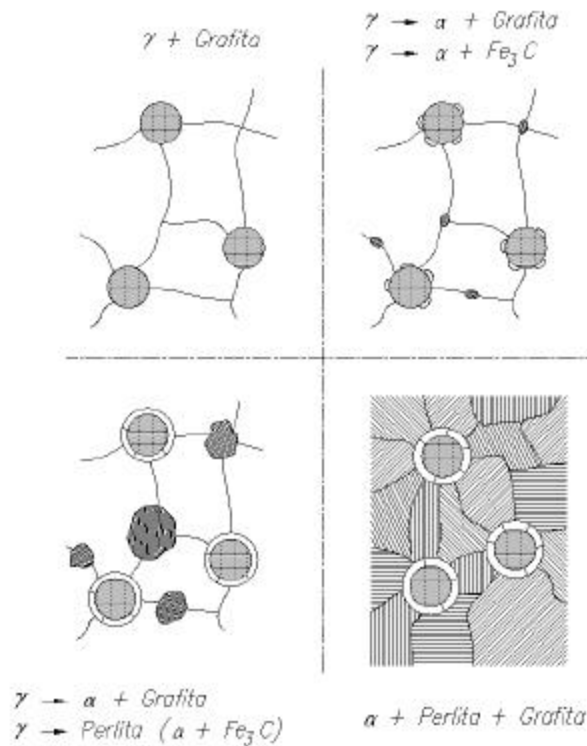


Figura 3. Reações eutetóides estável e metaestável, conduzindo à formação de microestrutura tipo "olho-de-boi" (1).

Verifica-se assim que, devido às diferentes velocidades de solidificação e de resfriamento, barras de ferros fundidos nodulares obtidas por fundição contínua apresentam gradientes naturais de microestrutura, com uma periferia com alto número de nódulos e matriz ferrítica, e um núcleo com menor número de nódulos e matriz perlítica ou perlítico/ferrítica (dependendo do diâmetro da barra). Além disso, o núcleo pode ainda conter segregações. Todos estes fatores combinados devem resultar em gradientes de propriedades, e sua caracterização é então o objeto do presente trabalho.

### 3. MÉTODOS EXPERIMENTAIS

O ferro fundido nodular caracteriza-se pela ductilidade, tenacidade e resistência mecânica. A grafita do ferro fundido nodular apresenta-se de forma esferoidal conforme mostrado na Figura (5). A morfologia esferoidal da grafita não interrompe a continuidade da matriz tanto quanto a grafita na forma lamelar, resultando em uma melhor ductilidade e tenacidade.

Neste trabalho utilizaram-se barras de ferro fundido nodular ABNT FE 45012 produzidas por fundição contínua nos diâmetros de 50, 100 e 150 mm. Na tabela (1) são apresentadas análises químicas típicas deste material.

Tabela 1. Composição do Ferro Fundido Nodular classe FE-45012.

	C	Si	Mn	P	S	Cr	Sn	Cu	Mg	Mo	Sb
Perfil 1	3,63	2,67	0,037	0,044	0,011	0,007	0,007	0,005	0,029	0,004	0,001
Perfil 2	3,71	2,95	0,046	0,042	0,002	0,009	0,004	0,004	0,026	0,002	0,001

### 3.1. Caracterização Microestrutural

Inicialmente é importante lembrar que as propriedades mecânicas dos ferros fundidos nodulares contendo nódulos bem formados dependem da estrutura da matriz, ou seja, da quantidade de cada fase envolvida na estrutura.

Os ferros fundidos nodulares são compósitos naturais, as fases estáveis e metaestáveis são formadas durante a solidificação ou tratamento térmico subsequente. Os maiores constituintes do ferro fundido são química e morfologicamente formadas por carbono dispersa em uma matriz contínua de metal. Outra estrutura importante são os nódulos de grafita, forma estável do carbono puro nos ferros fundidos nodulares, apresentam propriedades físicas importantes, tais como: baixa densidade, baixa dureza e alta condutividade térmica e lubrificidade. A forma, que pode variar de esférica à formato de flocos, contribui com significância nas propriedades mecânicas. A estrutura ferrítica nos ferros fundidos nodulares convencionais produz baixa resistência e baixa dureza, em contrapartida produz uma alta ductilidade. A estrutura perlítica, formada pela reação eutetóide, possui uma estrutura lamelar de cementita em uma matriz ferrítica. Sendo um constituinte comum nos ferros fundidos, fornece uma combinação de alta resistência com a correspondente redução da ductilidade.

O aspecto micrográfico da matriz do ferro fundido nodular é basicamente composto de ferrita, perlita e nódulos de grafita, sendo esta última apresentada de forma esferoidal. As barras de diâmetros 50, 100 e 150mm, fornecidas pela Tupy Fundições, foram fabricadas segundo a norma SAE J 434 c classe D 5012 (ABNT FE 45012), preparadas metalograficamente segundo as normas do ASTM E-112 Handbook e analisadas nas posições raio, médio raio e centro, segundo Figura (4).

As imagens geradas através do Microscópio Eletrônico de Varredura (MEV), modelo PHILIPS LX 20, e as análises quantitativas determinadas pelo analisador de imagens, modelo OMNIMET ADVANTAGE, Figura (5), permitiram a caracterização do número de partículas de grafita, bem como a percentagem das fases grafita, ferrita e perlita.

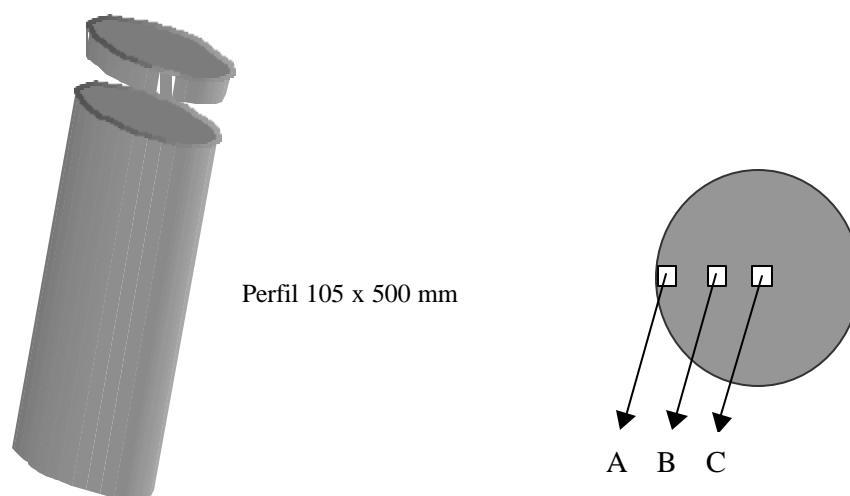


Figura (4). Representação esquemática do perfil e das posições analisadas.  
(A) superfície, (B) intermediária, (C) centro.

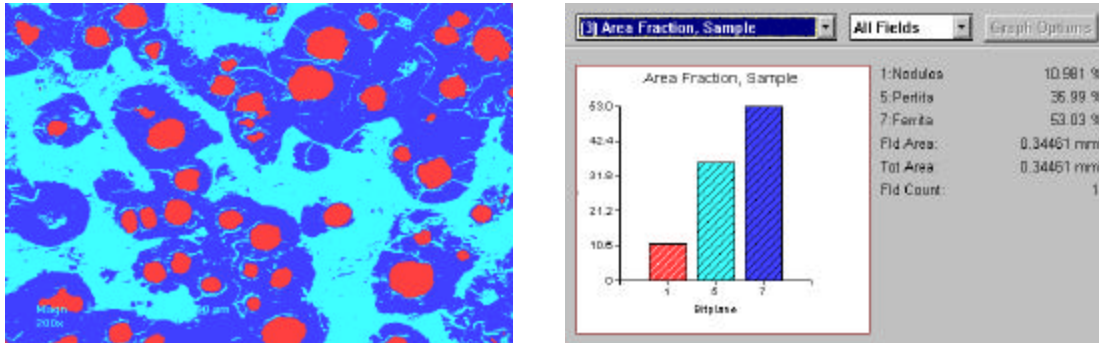


Figura (5). Analisador de Imagens Omnimet Advantage.

### 3.2. Caracterização da Dureza

A dureza dos ferros fundidos nodulares é geralmente melhor avaliada pelo ensaio Brinell ou Rockwell escala B. Os ensaios realizados seguiram os padrões ASTM Handbook para Ferros Fundidos Nodulares onde se determina: Rockwell Escala B - Penetrador 1/16" - máxima carga 100KN. O equipamento utilizado para ensaio foi: Instron Wilson/Rockwell Series 600 - modelo A643 T. Neste trabalho as propriedades mecânicas do Ferro fundido nodular FE45012 foram determinadas através do ensaio de dureza Rockwell, escala B ao longo do raio para as barras de 50mm, 100mm e 150mm. Para cada barra o perfil de dureza foi determinado medindo-se a dureza de 5 em 5mm desde a superfície até o centro da barra.

### 3.3. Caracterização da Resistência ao Impacto

O ensaio de impacto mede a energia absorvida na fratura durante o teste, utilizando uma elevada taxa de deformação. Informações mais precisas podem ser obtidas se o responsável pelo ensaio fornecer um histórico da carga em relação ao tempo de aplicação. Com essa curva é possível determinar a energia requerida para o início da fratura e a energia para a propagação dessa fratura. Um projetista utiliza o teste de impacto na seleção de materiais segundo sua resistência a fratura frágil, fornecido pela curva de temperatura de transição.

Os ensaios foram realizados em uma máquina para ensaio de resistência ao impacto, marca Leipzig, modelo PS30 com as seguintes características: capacidade máxima de 300J, velocidade de choque de 5,6 m/s, curso máximo de 160° e perda por atrito na faixa nominal de 300J de 0,33%.

Os corpos de prova foram usinados conforme norma ASTM E23-96 – *Standard Test Methods for Notched Bar Impact Testing of Metallic Materials*, no formato padrão 10 x 10 x 55mm com entalhe em “v” usinado com uma fresa circular. Os corpos de prova para a caracterização das barras circulares foram retirados nas direções conforme representação mostrada na figura.

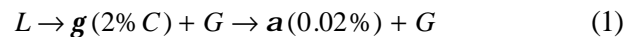
A resistência ao impacto foi determinada através do ensaio Charpy para a barra de 50mm. Foram usinados corpos-de-prova retirados da superfície, meio raio e centro da barra e rompidos no pêndulo de Charpy nas temperaturas de -100° C, -50° C (nitrogênio líquido), 25° C, 100° C e 200° C. Mudanças nas temperaturas de transição podem ser produzidas por mudanças nas composições químicas ou mudanças microestruturais. A maioria das mudanças na temperatura de transição são resultadas da alteração da quantidade de carbono, no caso dos ferros fundidos nodulares. Silício, como percentuais acima de 0,25%, aumentam a temperatura de transição. O tamanho de grão também possui grande efeito sobre a temperatura de transição. O aumento de um número no grão de ferrita, segundo ASTM diâmetro menor, pode resultar na diminuição da temperatura de transição.

O ensaio de impacto possibilitou observar a energia de impacto absorvida pelo material as diferentes posições da barra. A determinação do ponto de transição dúctil-frágil e a energia envolvida nesse processo foram determinadas e analisadas, como podemos observar na figura (7).

#### 4. RESULTADOS E DISCUÇÕES

A Tabela 2 mostra os resultados da análise quantitativa utilizando as imagens geradas no MEV. Verifica-se que o número de nódulos de grafita e o teor de ferrita diminui da superfície para o centro, ao passo que o teor de perlita aumenta. Verifica-se, também, que apesar da variação no tamanho dos nódulos, a percentagem de grafita ao longo do raio permanece aproximadamente constante.

A difusão de carbono desempenha um papel fundamental na microestrutura de ferros fundidos nodulares. Na superfície das barras aonde as taxas de resfriamento são elevadas os nódulos de grafita são pequenos criando em seu entorno uma região rica em ferrita. Os nódulos de grafita são maiores no centro das barras conforme mostra a Figura (5), isto porque no centro a taxa de resfriamento é menor, propiciando a difusão de carbono para a grafita segundo a reação (1). Como os nódulos de grafita são maiores no centro das barras o carbono necessita difundir por distâncias maiores, criando desta forma condições para formação da cementita eutetóide, pois o processo de crescimento da cementita e da grafita são competitivos.



(Onde G significa grafita.)

Estes resultados mostram o efeito da velocidade de resfriamento sobre a nucleação de grafita, obtendo-se alto número de nódulos junto à periferia (figura 6), o que resultou em alta quantidade de ferrita nesta região em todos os diâmetros estudados. A microestrutura da matriz no centro da barra depende, entretanto, não só do número de nódulos de grafita, mas também da velocidade de resfriamento neste local; deste modo, enquanto nos diâmetros menores (50 e 100 mm) a quantidade de perlita cresce em direção ao centro da barra, no diâmetro maior (150 mm) a quantidade de perlita no centro da barra volta a decrescer, como resultado da baixa velocidade de resfriamento neste local.

O comportamento mecânico nos ferros fundidos é determinado pela matriz, pelo número de nódulos e pelo teor de perlita na microestrutura. A dureza das barras de 50, 100 e 150 mm, avaliada pelo ensaio Rockwell B, apresenta pouca variação como mostra a Figura (7), pois a matriz é predominantemente ferrítica em todas as barras. O comportamento ao longo do raio mostra que para barra de 50 mm apresenta uma dureza superior na superfície enquanto que a barras de 100mm a dureza do centro é superior, já na barra de 150 mm a dureza permanece constante ao longo do raio. Como os produtos oriundos do processo FUCO atingem a sua forma de aplicação passando por processo de usinagem pesados é importante ressaltar que os parâmetros de usinagem dever ser otimizados para cada barra, pois o balanço microestrutural varia ao longo do diâmetro das mesmas.

O ensaio Charpy, Figura (8), mostra que a tenacidade à fratura junto à superfície é determinado pela quantidade de nódulos e que no centro da barra de 50 mm a relação ferrita perlita determina o comportamento mecânico em que elevadas taxas de deformação são aplicadas nos corpos-de-prova. Note que a temperatura de transição Charpy é mais baixa nos corpos-de-prova extraídos junto à superfície enquanto que a energia do plateau é mais elevadas nos corpos-de-prova nos corpos de prova extraídos do meio raio e do centro da barra de 50 mm. A temperatura de transição aumenta da superfície para o centro da barra de 50mm. Estes resultados confirmam que os nódulos de grafita atuam, na fratura dútil como locais de início de formação de alvéolos (reduzindo a energia no patamar dútil), enquanto na clivagem os nódulos de grafita atuam como bloqueadores de trincas, pelo arredondamento da ponta da trinca quando esta passa por um nódulo.



Tabela 2. Resultados experimentais de quantificação das fases envolvidas.

Barra 50mm			
Posição	A	B	C
Fases:	Medição	Medição	Medição
Ferrita (%):	$84 \pm 2$	$77 \pm 4$	$72 \pm 2$
Perlita (%):	$7 \pm 2$	$13 \pm 5$	$20 \pm 2$
Grafita (%):	$10 \pm 3$	$9 \pm 2$	$8 \pm 1$

Barra 100mm			
Posição	A	B	C
Fases:	Medição	Medição	Medição
Ferrita (%):	$86 \pm 1$	$64 \pm 6$	$61 \pm 2$
Perlita (%):	$4 \pm 2$	$29 \pm 5$	$31 \pm 2$
Grafita (%):	$10 \pm 2$	$7 \pm 3$	$8 \pm 1$

Barra 150mm			
Posição	A	B	C
Fases:	Medição	Medição	Medição
Ferrita (%):	$86 \pm 1$	$78 \pm 6$	$83 \pm 3$
Perlita (%):	$5 \pm 2$	$15 \pm 7$	$8 \pm 4$
Grafita (%):	$9 \pm 1$	$7 \pm 2$	$9 \pm 2$

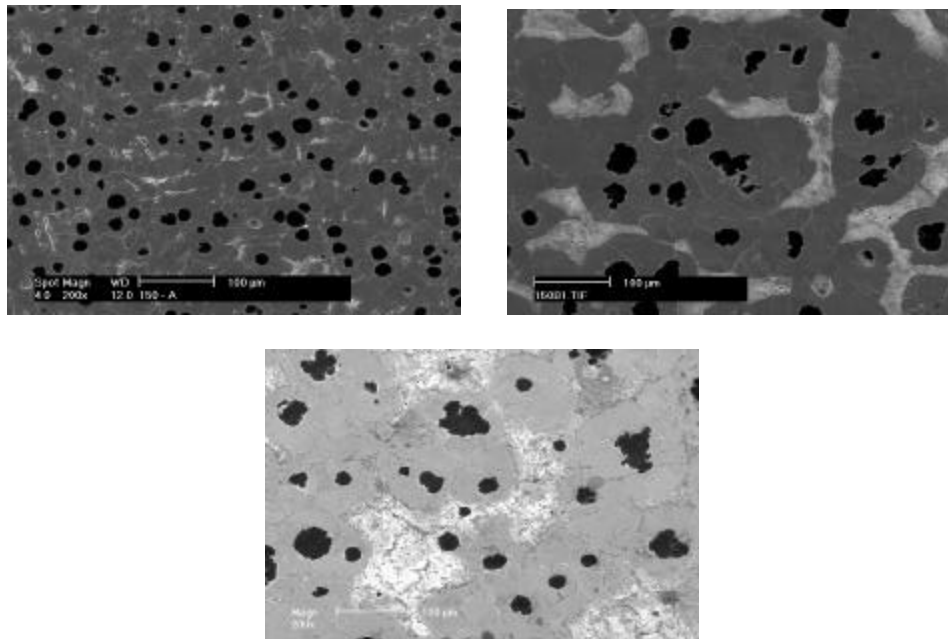


Figura (6). Caracterização e quantificação das fases para as posições Superfície (A), Medio raio (B), Centro (C).

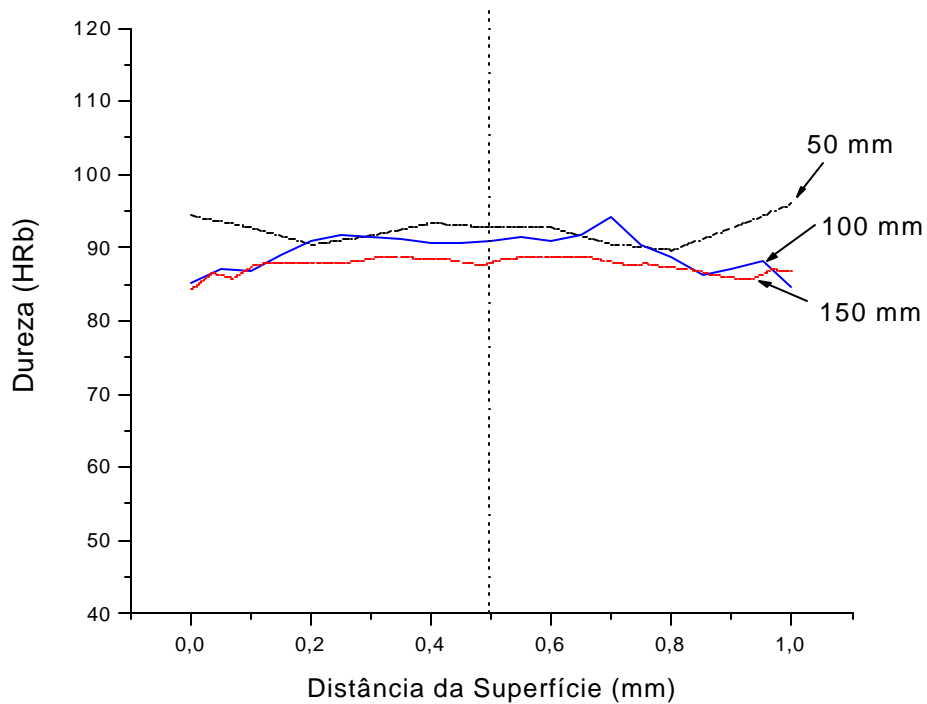


Figura (7). Comportamento da Dureza ao longo do diâmetro nas três barras. O eixo x apresenta a distância normalizada ao longo do diâmetro das barras.

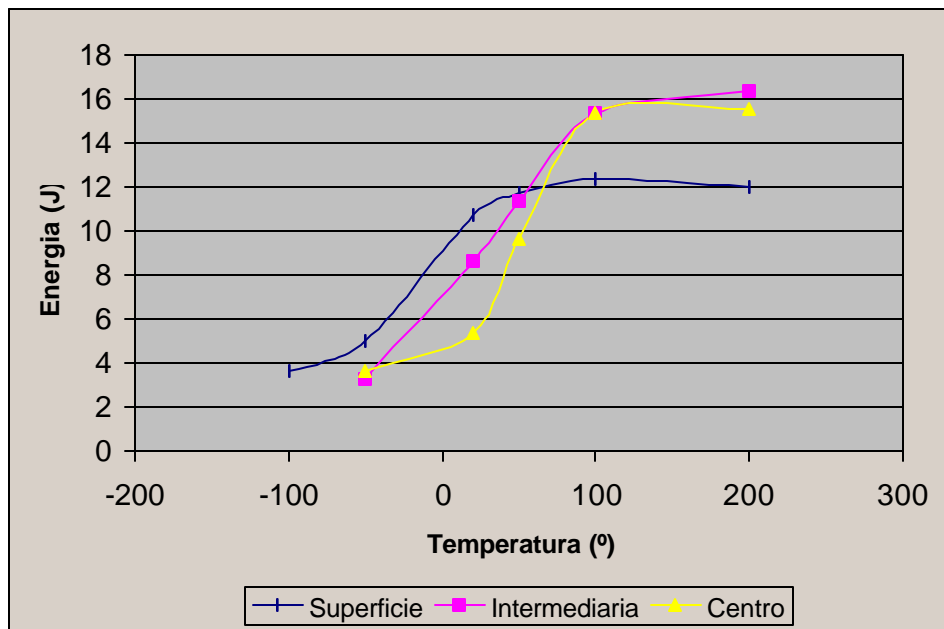


Figura (8). Representação das Curvas de Energia absorvida em impacto para as Posições (A) superfície, (B) intermediária, (C) centro.

## 5- CONCLUSÕES

A microestrutura dos ferros fundidos nodulares é influenciada pela competição entre as reações eutetóides estável e metaestável, cujo resultado é fortemente função da taxa de resfriamento. A microestrutura varia ao longo do raio das barras analisadas, sendo que o diâmetro da barra influencia fortemente o balanço microestrutural. A dureza HRb é fracamente influenciada pela microestrutura uma vez que a matriz do FE 45012 é predominantemente ferrítica. Por outro lado a resistência ao impacto fornecida pelo ensaio Charpy é função dos número de nódulos na superfície e relação ferrita/perlita no núcleo da barra.

## 6 - REFERÊNCIAS

- JOHNSON, W.C. & KOVACS, B.V. **The effect of additives on the eutectoid transformation of ductile iron.** Metallurgical Transactions *9A* :219-29, feb 1978.
- W. L. Guesser and D. Guisi Hilário. **Ferros Fundidos Nodulares Perlíticos.** In: CONAF/ABIFA, São Paulo, 1999.
- A. Mortensen and S. Suresh, **"Functionally Graded Metals and Metal-Ceramic Composites: Part I. Processing"**, International Materials Review, 40 239-265 (1995).
- R.D. Torres, I.E. Reimanis, G.G.W. Mustoe and J.J. Moore, **"Processing and Characterization of Functionally Graded TiB<sub>2</sub>/NiAl Produced by the Combustion Synthesis Process"**, Ceramic Transactions Published by the American Ceramic Society, 76 47-57 (1997).
- L.M. Zhang, R.Z. Yuan, M. Omori and T. Hirai, **"Preparation of TiC/Ni<sub>3</sub>Al FGMs: Sintering and Structure"**, Third International Symposium on Structural and Functional Gradient Materials, Edited by B. Ilschner and N. Cherradi, Lausanne, Switzerland, Presses Polytechniques et Universitaires Romandes, 59-64 (1994).
- H.A. Bruck and B.H Rabin, **"Evaluating Microstructural and Damage Effects in Rule-of-Mixture Predictions of the Mechanical Properties of Ni-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> Composites for Use in Modeling Functionally Graded Materials"**, Journal of Materials Science.
- H.J. Feng and J.J. Moore, **"The Design of an Affordable, One-Step Process for the Production of a Functionally Graded Material (FGM)"**, Journal of Materials Synthesis and Processing, 2 367-377 (1994).
- W. L. Guesser, D. C. Júnior, L. Boehs e N. Friedrich; **Usinabilidade de Perfis Contínuos de Ferros Fundidos Nodulares das Classes FE – 45012 e FE- 50007**; Publicado no SULMAT, Joinville – SC, Setembro –2000.
- R. H. Lochner and Joseph E. Matar; **Designing for Quality – An Introduction to the Best of Taguchi and Western Methods of Statistical Experimental Design**, Quality Resources, New York, 1990.

## **TITLE: PRODUCTION OF MICROSTRUCTURAL GRADIENTS IN DUCTILE CASTING IRON BY CONTINUOUS CASTING.**

**M. Eng. Edvaldo Casagrande Angelo Jr**, Pontifícia Universidade Católica do Paraná, Vital Brasil st, number 460, apto 61, Curitiba Paraná, Brazil,  
e-mail: e\_angelo@hotmail.com

**Dr. M. Eng. Ricardo Diego Torres**, Pontifícia Universidade Católica do Paraná, Imaculada Conceição st, number 1155, Prado Velho, Cep 80215-901, Mechanical Engineer Department, Curitiba Paraná, Brazil, Tel.(041) 330-1515,  
e-mail: rdtorres@tecpar.br.

**Dr. Eng. M. Eng. Chief Metallurgist Wilson Guesser**, Universidade Estadual de Santa Catarina, Tupy Fundições Ltda, Albano Schmidt st, number 3400, Cep 89206-900, Joinville Santa Catarina, Brazil, Tel. (047) 441-8359,  
e-mail: wguesser@tupy.com.br.

**Abstract:** PRODUCTION OF MICROSTRUCTURAL GRADIENTS IN DUCTILE CASTING IRON BY CONTINUOUS CASTING

*Ductile casting irons, produced by continuous casting, have been characterized. The objective of this project is to study the relations between the process variables and consequently the mechanical behavior response. The diameters of the casting bars and cooling rate are the primary factors that determined the microstructure variation along the radius of the bars. To determine the effects of the bar diameter on the microstructure, three bar diameter (50,100 and 150mm) were chosen made by continuous casting of SAE J 434 class 45012. For each diameter, it was studied the microstructure, hardness and impact resistance in three specific position on bars: surface, medium radius and radius. It was observed that for all bars, the number of graphite nodulus decrease from surface to radius, in the other hand, the content of perlite increased. Although exists this microstructural gradient in the bars, the Rockwell Hardness (HRb) along the radius remained practically constant. Regarding to the impact resistance, determined by the Charpy test in 50mm bars, it was verified that the surface presents a transition temperature lower than the center and medium radius, on the other hand, the absorbed energy in plateau is lower on the surface samples.*

**Keywords:** *Microstructure Characteristics, Ductile Iron, Continuous Casting Bars.*