

ANÁLISE QUANTITATIVA DA MORFOLOGIA DA GRAFITA DOS FERROS FUNDIDOS¹

Kellen Rose de Sousa Lima²
Paulo Rangel Rios²
Luiz Carlos Rolim Lopes²
Mylene Laurindo de Seixas²
Ulysses Monteiro Machado²
Fernando César Lee Tavares³
Márcio Antônio Paulo³

Resumo

Através do emprego de diferentes equipamentos e aliado a modernas técnicas, pode-se analisar pequenas e microscópicas estruturas. O aprimoramento das técnicas de caracterização microestrutural é necessário, pois o desenvolvimento de bons produtos requer, cada vez mais, o real domínio das relações entre os parâmetros dos seus processos de obtenção e suas características microestruturais. A metalografia quantitativa vem sendo beneficiada pelas técnicas de processamento digital de imagens, no que se refere a medições como, tamanho de grão, fração volumétrica de fases e microdureza, devido a um considerável aumento na confiabilidade estatística dos resultados e na velocidade de análise.

O objetivo é apresentar um estudo inicial, realizado dentro de um programa de pesquisa, que visa estabelecer padrões para classificar os diferentes ferros fundidos. O estudo aborda as medidas básicas utilizadas em metalografia quantitativa e determina os parâmetros mais comuns, capazes de identificar a morfologia da grafita dos ferros fundidos cinzento, nodular e vermicular, utilizando um sistema de análise de imagens.

Neste trabalho buscou-se obter novos parâmetros de metalografia quantitativa adimensionais capazes de diferenciar os três tipos de ferros fundidos. Com as medidas efetuadas até o momento foi possível obter a diferenciação destes três tipos de materiais, através de 2 parâmetros metalográficos.

Concluímos através de resultados preliminares, que, depois de várias tentativas de relacionar as diversas medidas efetuadas para obter novos parâmetros, os aqui apresentados são razoáveis dentro de um estudo inicial.

Palavras-chave: metalografia quantitativa, ferro fundido, análise de imagens.

¹ Trabalho a ser apresentado no XXXV Seminário de Fusão & V Seminário de Fundação da ABM – Salvador – BA, 17 a 19 de Maio de 2004

² Departamento de Pós-Graduação em Engenharia Metalúrgica-EEIMVR - UFF, Av. dos Trabalhadores 420 – Vila Sta. Cecília – 27255-125 – Volta Redonda – RJ kellen@metal.eeimvr.uff.br

³ Departamento de Engenharia da Produção e Modelação – ThyssenKrupp Fundições, Barra do Pirai – RJ ftavares@tka-tfk.thyssenkrupp.com

1 Introdução

As propriedades dos materiais estão intrinsecamente ligadas à natureza de suas microestruturas ^(Padilha), podendo citar como exemplo as influências de tamanho de grão e da dispersão de uma segunda fase sobre as propriedades mecânicas. Ao observar-se uma microestrutura no microscópio tem-se uma descrição quantitativa dos diferentes microconstituintes e dos defeitos presentes. A determinação da correlação microestrutura-propriedades exige a obtenção de índices quantitativos e estatisticamente precisos. A metalografia quantitativa fornece meios de quantificar parâmetros microestruturais tais como: forma, tamanho e distribuição de fases e defeitos.

Tanto o aprimoramento como o desenvolvimento de materiais exige, hoje em dia, uma análise quantitativa precisa dos parâmetros microestruturais, a fim de garantir o seu comportamento mecânico. Isto tem se tornado viável, recentemente, devido ao rápido progresso da informática, permitindo criar sistemas totalmente automatizados para avaliação da microestrutura com o emprego das técnicas de processamento digital de imagens ^(Nascimento).

Até a década passada, a análise de imagens obtidas através de microscopia ótica ou eletrônica estava limitada, geralmente, a um plano qualitativo. A análise quantitativa era efetuada, essencialmente, pelo emprego de métodos manuais, para definição e avaliação de parâmetros que caracterizam, por exemplo, tamanho de grãos, porosidade, ou partículas de segunda fase.

A obtenção de dados precisos e representativos requer uma amostragem ampla para permitir o uso dos conceitos estatísticos. A complexidade das microestruturas dos materiais implica na necessidade de se caracterizar quantitativamente numerosos parâmetros que não podem ou que são difíceis de ser avaliados pelos métodos manuais (como distribuição espacial, tamanho, fração volumétrica e morfologia de precipitados) ^(Dehoff).

Mais recentemente, o rápido desenvolvimento da eletrônica e da informática permitiu a criação de sistemas baseados em técnicas de processamento digital de imagens para avaliação microestrutural.

Analísadores de imagens fazem uso dos métodos do processamento e da análise de imagens. Através das técnicas do processamento digital de imagens modifica-se a informação, presente na imagem, com o intuito de torná-la mais adequada à interpretação visual. A análise de imagens, por sua vez, é empregada para quantificar a informação contida na imagem. Os resultados são numéricos e se referem aos parâmetros geométricos da imagem (áreas e perímetros), estatísticas (distribuições), magnitudes estereológicas ou características relativas às texturas. Usualmente, a avaliação destes resultados é feita com base no preenchimento de algum critério de qualidade .

Um número crescente de atividades, rotineiramente desenvolvidas nos laboratórios de pesquisa e na indústria, emprega analisadores de imagens. Embora muitas análises possam ser feitas manualmente, tornou-se evidente que os analisadores impuseram um novo patamar de produtividade e qualidade às rotinas de análise.

Devido à vasta quantidade de dados normalmente presentes numa imagem, pode ser necessário utilizar um analisador para obter e tratar convenientemente as informações disponíveis.

O objetivo é apresentar um estudo inicial, realizado dentro de um programa de pesquisa, que visa estabelecer padrões para classificar os diferentes ferros fundidos, através de novos parâmetros de metalografia quantitativa. O estudo aborda as medidas básicas utilizadas em metalografia quantitativa e determina os parâmetros mais comuns, capazes de identificar a morfologia da grafita dos ferros fundidos cinzento, nodular e vermicular, utilizando um sistema de análise de imagens.

2 Métodos Experimentais

2.1 Materiais

Foram estudados três tipos de ferros fundidos: cinzento, nodular e vermicular. Para cada tipo de ferro fundido foram analisadas três classes com composição química diferente, totalizando 9 amostras. A Composição química dos ferros fundidos estudados é apresentada nas tabelas 1 e 2.

Ferro Fundido	Liga	Elementos									
		C	Si	Mn	S	Cr	Cu	Mg	P	Sn	Zr
Cinzento	FC1	3,30	1,80	0,40	0,05	0,05	0,10	-	-	0,025	0,009
		3,40	2,05	0,60	0,15	0,20	0,25	-	-	0,040	0,019
	FC2	3,30	1,80	0,40	0,05	0,05	0,10	-	-	0,045	0,009
		3,40	2,05	0,60	0,15	0,20	0,25	-	-	0,055	0,019
	FCE	3,40	2,05	0,55	0,05	0,55	0,10	-	-	0,095	0,009
		3,45	2,15	0,65	0,15	0,60	0,20	-	-	0,105	0,019
Nodular	NC3	3,55	2,00	0,20	0,000	0,000	0,25	0,028	0,000	0,000	-
		3,65	2,25	0,30	0,012	0,030	0,35	0,050	0,050	0,0060	-
	NC4	3,55	2,00	0,20	0,000	0,000	0,25	0,028	0,000	0,000	-
		3,65	2,25	0,30	0,012	0,030	0,35	0,050	0,050	0,0060	-
	FNE	3,45	2,35	0,16	0,000	0,000	0,10	0,025	0,000	0,000	-
		3,55	3,55	0,18	0,012	0,030	0,25	0,050	0,040	0,0060	-

Tabela 1 – Composição química dos ferros fundidos cinzentos e nodulares

Ferro Fundido	Liga	Elementos									
		C	Si	Mn	S	Cr	Cu	Mg	P	Sn	Ti
Vermicular	FV1	3,65	1,98	0,18	0,010	0,017	0,10	0,014	0,03	0,0038	0,122
	FV2	3,7	2,09	0,41	0,006	0,165	0,15	0,018	0,018	0,0032	0,130
	FV3	3,66	2,02	0,15	0,004	0,005	0,08	0,02	0,024	0,0032	0,112

Tabela 2 – Composição química dos ferros fundidos vermiculares

2.2 Métodos

• Análise Quantitativa

As medidas para a determinação dos parâmetros utilizados na análise quantitativa foram efetuadas no MICROSCÓPIO METALOGRAFICO LEITZ - METALLOVERT equipado com câmera digital para captação de imagens. O sistema de análise de imagens empregado utiliza o aplicativo IMAGE PRO-PLUS.

O microscópio óptico foi utilizado para a visualização da microestrutura e para captar as imagens a serem utilizadas pelo analisador de imagem. Foram captados 20 campos para cada amostra.

O analisador de imagem foi utilizado para tratar as imagens e efetuar as medidas utilizadas na metalografia quantitativa. As medidas foram feitas sobre os vinte campos captados.

Medidas efetuadas na metalografia quantitativa

Foram efetuadas no analisador de imagem as seguintes medidas ^(Dehoff).

Número de pontos – P

Número de objetos – N

Fração volumétrica – V_V

Comprimento da linha teste - L

Os cálculos dos parâmetros foram efetuados pelas seguintes equações ^(Dehoff).

$$P_L = \frac{N}{L} \quad (\mu\text{m}^{-1}) \quad \text{Número de interseções por unidade de linha-teste}$$
$$S_V = 2 P_L \quad (\mu\text{m}^{-1}) \quad \text{Área superficial por unidade de volume-teste}$$
$$L_A = \frac{\pi S_V}{4} \quad (\mu\text{m}^{-1}) \quad \text{Comprimento de interceptos por unidade de área-teste}$$
$$N_A = \frac{N}{A} \quad (\mu\text{m}^{-2}) \quad \text{Número de objetos interceptados por unidade de área-teste}$$

Neste trabalho buscou-se obter novos parâmetros de metalografia quantitativa adimensionais capazes de diferenciar os três tipos de ferros fundidos. Foram testados diversas relações para determinação dos novos parâmetros, mas foram utilizadas para fins de apresentação de resultados, somente as abaixo.

$$A_M = \frac{A_A}{N_A} \quad (\mu\text{m}^{-2}) \quad \text{Área plana média}$$

$$L_M = \frac{L_A}{N_A} \quad (\mu\text{m}) \quad \text{Comprimento médio do objeto – Novo parâmetro}$$

$$R = \frac{L_M^2}{A_M} \quad (\text{adimensional}) \quad \text{Novo parâmetro}$$

- **Cálculos dos Parâmetros e Seleção dos Materiais**

Para os cálculos dos parâmetros e para facilitar a determinação dos materiais, foi feito um programa em FORTRAN.

3 Resultados e Discussão

Análise Microestrutural

- **Microscopia óptica**

A figura 1 mostra os aspectos micrográficos dos materiais analisados e a tabela 3 mostra os resultados da análise da grafita.

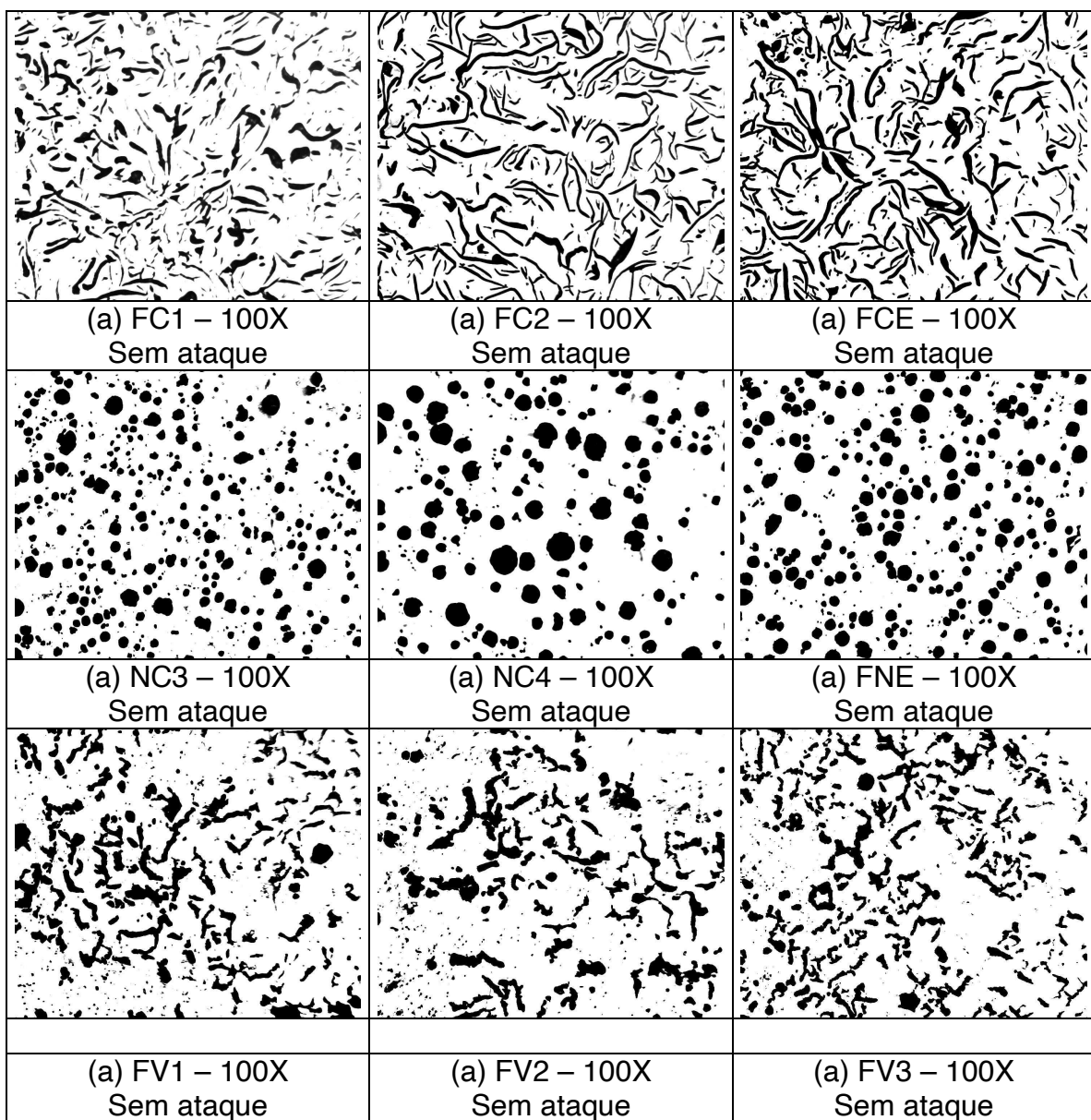


Figura 1– Aspectos micrográficos dos ferros fundidos cinzentos, nodulares e vermiculares

Ferro Fundido	Liga	Grafita		
		Forma	Distribuição	Tamanho
Cinzento	FC1	I	A-C-E	4-5-6
	FC2	I	A-C-E	4-5-6
	FCE	I	A-C-E	4-5-6
Nodular	NC3	V-VI	-	6-7-8
	NC4	V-VI	-	6-7-8
	FNE	V-VI	-	7-8
Vermicular	FV1	III-IV	-	6-7-8
	FV2	III-IV	-	5-6
	FV3	III	-	4-5

Tabela 3 - Análise da morfologia da grafita

A tabela 4 mostra os resultados da análise da matriz metálica dos ferros fundidos estudados.

Ferro Fundido	Liga	Matriz Metálica		
		Ferrita (%)	Perlita (%)	Cementita (%)
Cinzento	FC1	-	100	-
	FC2	-	100	-
	FCE	-	100	-
Nodular	NC3	40	60	-
	NC4	10	90	-
	FNE	5	95	-
Vermicular	FV1	70	30	-
	FV2	60	40	-
	FV3	100	-	-

Tabela 4 – Análise da matriz metálica

- **Microscopia óptica e Analisador de imagem**

Os resultados da fração volumétrica e matriz metálica podem ser observados na tabela 5.

A tabela 6 apresenta os parâmetros utilizados em metalografia quantitativa obtidos pelo analisador de imagem.

Ferro Fundido	Liga	Fração Volumétrica	
		Grafita (%)	Matriz (%)
Cinzento	FC1	24,2	74,2
	FC2	27	73
	FCE	27,6	72,4
Nodular	NC3	21	79
	NC4	18	82
	FNE	23	77
Vermicular	FV1	22,6	77,4
	FV2	19,2	80,2
	FV3	23,6	76,4

Tabela 5 – Fração Volumétrica dos ferros fundidos

Ferro Fundido	Liga	A_A	S_V (μm^{-1})	L_A (μm^{-1})	N_A (μm^{-2})
Cinzento	FC1	0,242	$3,96 \times 10^{-2}$	$31,12 \times 10^{-3}$	$0,77 \times 10^{-3}$
	FC2	0,27	$4,73 \times 10^{-2}$	$37,15 \times 10^{-3}$	$0,68 \times 10^{-3}$
	FCE	0,276	$4,50 \times 10^{-2}$	$32,65 \times 10^{-3}$	$0,63 \times 10^{-3}$
Nodular	NC3	0,21	$2,22 \times 10^{-2}$	$17,43 \times 10^{-3}$	$0,70 \times 10^{-3}$
	NC4	0,18	$1,51 \times 10^{-2}$	$11,85 \times 10^{-3}$	$0,50 \times 10^{-3}$
	FNE	0,23	$2,10 \times 10^{-2}$	$16,48 \times 10^{-3}$	$0,54 \times 10^{-3}$
Vermicular	FV1	0,226	$2,85 \times 10^{-2}$	$22,37 \times 10^{-3}$	$0,88 \times 10^{-3}$
	FV2	0,192	$2,32 \times 10^{-2}$	$18,21 \times 10^{-3}$	$0,87 \times 10^{-3}$
	FV3	0,236	$3,3 \times 10^{-2}$	$28,90 \times 10^{-3}$	$0,95 \times 10^{-3}$

Tabela 6 – Parâmetros A_A , S_V , L_A e N_A

A figura 2 mostra as razões entre a fração de área (A_A) e o número de objetos por unidade de área (N_A) dos ferros fundidos.

Observa-se que a razão A_A por N_A que corresponde a uma área média (A_M) é capaz de diferenciar o ferro fundido vermicular dos ferros fundidos cinzentos e nodulares, porém sendo um parâmetro dimensional (μm^2).

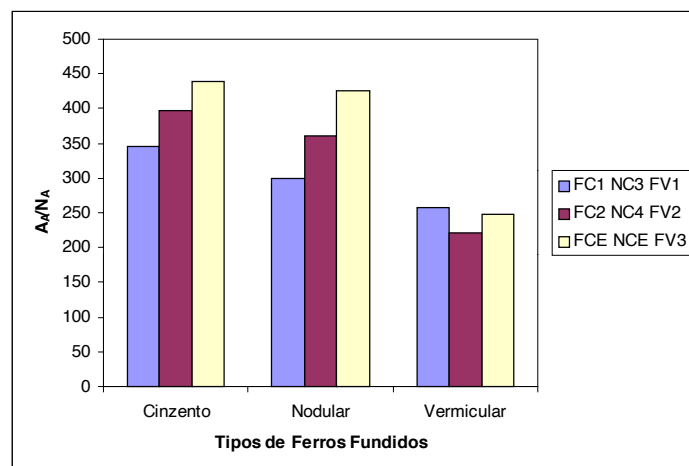


Figura 2 - Razões de A_A por N_A dos de ferros fundidos.

A figura 3 mostra as razões entre o comprimento dos objetos por unidade de comprimento (L_A) e o número de objetos por unidade de área (N_A) dos ferros fundidos.

Observa-se que a razão L_A por N_A que corresponde a uma comprimento médio (L_M) é capaz de diferenciar o ferros fundido cinzento dos ferros fundidos nodulares e vermiculares, portanto sendo também um parâmetro dimensional (μm).

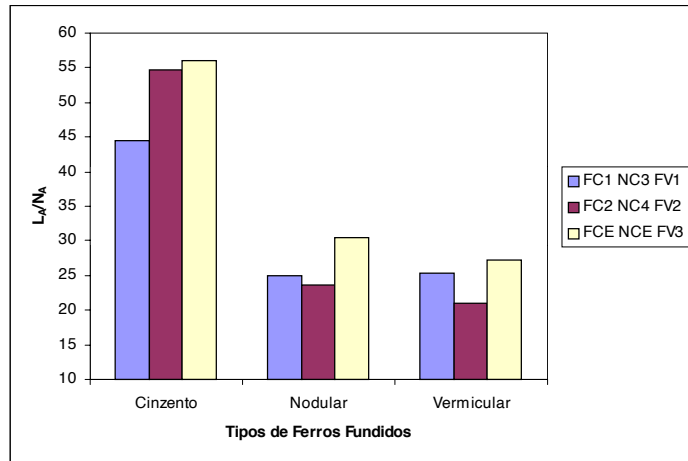


Figura 3 - Razão L_A por N_A dos ferros fundidos

A figura 4 mostra as razões entre o comprimento médio dos objetos (L_M) ao quadrado e a área plana média (A_M) dos ferros fundidos.

Observa-se que dividindo L_M^2 por A_M obtém-se um parâmetro (R) valor adimensional que é capaz de diferenciar também o ferro fundido cinzento dos ferros fundidos nodulares e vermiculares.

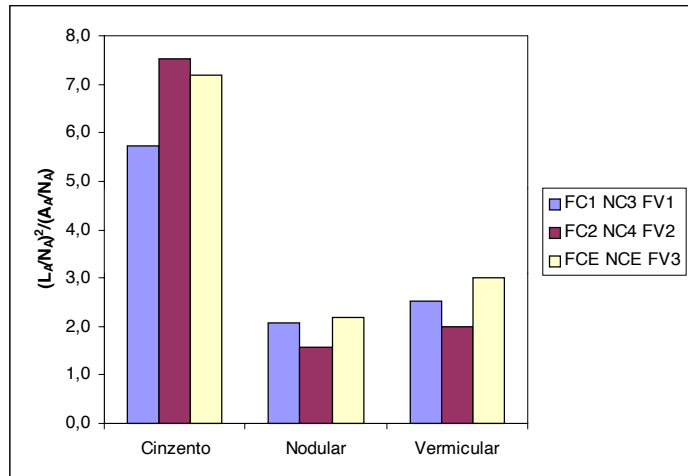


Figura 4 – Razões L_M^2 por A_M

Foi possível obter um parâmetro adimensional (R) capaz de diferenciar o ferro fundido cinzento dos ferros fundidos nodulares e vermiculares, não necessitando utilizar o parâmetro L_M , uma vez que este não foi escolhido por ser dimensional. A tabela 7 apresenta a faixa dos valores de R para a caracterização dos materiais

R	Ferro Fundido
≥ 4	Cinzento
< 4	Nodular ou Vermicular

Tabela 7 – Faixa de valores de R

Foi necessário a utilização de um outro parâmetro para diferenciar o nodular do vermicular. Neste caso não foi possível obter um parâmetro adimensional. Sendo o parâmetro A_M o mais apropriado. A tabela 8 apresenta a faixa dos valores de A_M para a caracterização dos materiais.

A_M (μm)	Ferro Fundido
≥ 280	Nodular
< 280	Vermicular

Tabela 8 – Faixa de valores de A_M

4. Conclusões

Neste trabalho buscou-se obter novos parâmetros de metalografia quantitativa adimensionais capazes de diferenciar os três tipos de ferros fundidos. No entanto não foi possível com as medidas efetuadas até o momento obter apenas 1 parâmetro que seja capaz de diferenciar os três tipos de ferros fundidos.

O parâmetro adimensional R é capaz de diferenciar o ferro fundido cinzento do nodular e vermicular e o parâmetro dimensional A_M , é capaz de diferenciar o ferro fundido nodular do vermicular.

Concluimos neste caso, que podemos utilizar o parâmetro R como um filtro para caracterizar o cinzento e o A_M para separar o nodular do vermicular.

Podemos também concluir que depois de várias tentativas de relacionar as diversas medidas efetuadas para obter novos parâmetros, esses apresentados acima são razoáveis dentro de um estudo inicial.

5 Referências Bibliográficas

1. ROCHA, A. C.; PACIORNIK, S. **Levantamento de Parâmetros e Implementação de Cálculo de Metalografia Quantitativa por Processamento Digital de Imagens**. 49º Congresso da ABM, Vol.: III, São Paulo, SP, 2002.
2. PADILHA, A. F.; FILHO, F. A. **Técnicas de Análise Microestrutural**. Hemus Editora, São Paulo, 1985.
3. DEHOFF, R.; RUSS, J. **Practical Stereology**. 2. Ed. New York, 2000.
4. Nascimento, I. A.; Rosestolato, A.; Baptista, A. L. B. **A Utilização da Análise de Imagem como Ferramenta do Ensaio Metalográfico no Controle de Qualidade de Peças de Ferro Fundido**. 57º Congresso da ABM, São Paulo, SP, 2002.
5. ANDRADE, M. C. **Imageamento Microscópico**. Tese de Mestrado – UGMG. Belo Horizonte, 1983.

QUANTITATIVE ANALYSIS OF THE CAST IRON GRAPHITE MORPHOLOGY¹

Kellen Rose de Sousa Lima²
Paulo Rangel Rios²
Luiz Carlos Rolim Lopes²
Mylene Laurindo de Seixas²
Ulysses Monteiro Machado²
Fernando César Lee Tavares³
Márcio Antônio Paulo³

Abstract

Through the use of different equipments and allied to modern techniques, we can analyse small and microscopic structure. The improvement of the microstructural characterization technique and the development of good products require, once more, the real control of the relation between the parameters of the obtaining process and microstructural characterization. The digital techniques Images processing have benefited the quantitative metallography, in relation to measures as grain size, phase volumetric fraction and microhardness, due to considerable increase in the statistic realibility of the results and analysis velocity.

The work aim is comparing the different cast iron, approach the basic measure used in quantitative metallography and determine the most common parameters able to stablish the graphite morphology of the gray, ductile and vermicular cast iron, using the image analyser.

It's searched in this work the obtaining of new parameters of adimensional quantitative metallography able to difference the three types of cast iron. So it wasn't possible with the measure performed until this moment to obtain only one parameter that is able to differentiate the three types of cast iron.

We conclude through preliminary results, that after many trials to make a list of the various measures performed in order to get new parameters, according to the goal in this work, the results presented were reasonable.

Key Words: quantitative metallography, cast iron, image analyser

¹ Technical contribution to be presented at XXXV Seminar of Melt and V Seminar of Foundry ABM – Salvador – BA, May, 17 - 19 2004

² Pos-Graduation in Metallurgical Engineering - EEIMVR_UFF, Av. dos Trabalhadores 420 – Vila Sta. Cecília – 27255-125 – Volta Redonda – RJ kellen@metal.eeimvr.uff.br

³ Product and modeling Engineering Department – ThyssenKrupp Fundições, Barra do Pirai – RJ ftavares@tka-tfk.thyssenkrupp.com