



ESTUDO EXPERIMENTAL DA MORFOLOGIA E ESTEREOLOGIA DE CARACTERÍSTICOS EM UMA MICROESTRUTURA MODELO¹

Álan Cardoso²
Júlio César Dutra³

Resumo

Este trabalho tem como objetivo demonstrar experimentalmente a validade dos modelos matemáticos de morfologia e de estereologia quantitativa utilizados na caracterização das microestruturas dos materiais. Diversas esferas coloridas de massa plástica foram produzidas manualmente e suas medidas de diâmetro foram tomadas. Em seguida, as esferas foram colocadas sobre uma placa de acrílico com o maior empacotamento bidimensional possível. Outra placa de acrílico foi colocada na superfície exposta destas esferas e o conjunto foi comprimido de modo a provocar o preenchimento de espaço entre as esferas. As regras morfológicas foram observadas e comparadas com aquelas descritas por Smith (1951). Também foi possível a medida do número médio de lados das figuras formadas, que é seis. Verificou-se, portanto, que as esferas organizadas, quando expostas em um espaço bidimensional, tendem a respeitar as regras morfológicas como a forma e o número médio de lados do grão. Foi possível ainda relacionar as medidas estereológicas de fração de pontos (P_P) e fração em área (A_A) com a fração volumétrica (V_V), o volume médio e o tamanho médio do característico (no caso, esferas de massa plástica de diferentes cores).

Palavras-chaves: Estereologia; Caracterização microestrutural; Morfologia.

EXPERIMENTAL STUDY OF MORPHOLOGY AND STEREOLOGY IN THE CHARACTERISTICS IN A MODEL MICROSTRUCTURAL

Abstract

This paper aims to demonstrate experimentally the validity of mathematical models of morphology and quantitative stereology used in the characterization of microstructures of materials. Different coloured spheres of plastic mass were manually produced and their diameters were taken. They were then placed on an acrylic plate with the highest possible two-dimensional packing. Another plate was placed on the exposed surface of these spheres and they were compressed so as to fill in the spaces between the spheres. The morphological rules were observed and compared with those described by Smith (1951). It was also possible to measure the average number of sides of the figures formed, which is six. Therefore, arranged balls, when exposed in a two-dimensional space, tend to respect the rules in form and the average number of sides. It was possible to relate the stereological measurements, the point fraction (P_p) and area fraction (A_A) to volume fraction (V_v), the average volume, and the average size of the feature (in this case, spheres of plastic mass of different colours).

Key-words: Stereology; Microstructural characterization; Morphology.

¹ Contribuição técnica ao 65º Congresso Anual da ABM, 26 a 30 de julho de 2010, Rio de Janeiro, RJ, Brasil.

² Aluno do curso de Engenharia de Materiais do Centro Universitário da FEI, alanc@hotmial.com

³ Professor do Departamento de Engenharia Metalúrgica e de Materiais do Centro Universitário da FEI e Diretor do Departamento de Ciências Exatas da Universidade Nove de Julho.

1 INTRODUÇÃO

Sabe-se que as propriedades dos materiais estão relacionadas com a sua microestrutura, podendo ser influenciadas, por exemplo, pelo tamanho e forma do grão ou pela dispersão de uma segunda fase. Através das regras morfológicas e dos fundamentos da estereologia quantitativa, é possível relacionar o espaço bidimensional com o espaço tridimensional, assim como caracterizar e quantificar a forma, o tamanho e a distribuição de fases e defeitos em uma microestrutura.

Em um plano bidimensional, uma microestrutura ou uma matriz de linhas aleatórias obedecem às regras morfológicas como a relação entre o número de polígonos e os seus respectivos números de lados e cantos, assim como o número médio de lados dos polígonos, que é seis. Portanto, em uma estrutura bidimensional, para cada polígono com o número de lados maior que seis, haverá um polígono com o número de lados menor que seis. Relações semelhantes também podem ser observadas em três dimensões, de tal modo que, considerando uma forma poliédrica para os grãos, o número médio de lados é 14, o número médio de cantos é 24 e o número médio de arestas por face é 5,14. Sendo assim, o grão tende a obter a forma do poliedro que atende a essas características, denominado tetracaidecaedro.⁽¹⁾

A estereologia quantitativa fornece meios de quantificar a microestrutura permitindo que medidas realizadas em planos bidimensionais sejam relacionadas com parâmetros em três dimensões de maneira exata ou próxima da realidade da estrutura. A notação dos parâmetros é composta por símbolos que são utilizados para aspectos geométricos ou para quantidades de teste como o número de pontos (P), o comprimento linear ou linha-teste (L), a área plana dos objetos ou área-teste (A), o volume dos objetos ou volume-teste (V) e o número de objetos (N). Os símbolos compostos são sempre uma fração em que o número maiúsculo representa uma quantidade da estrutura e o número minúsculo representa uma quantidade de teste ou referência geométrica como a fração de pontos (P_P), a fração linear (L_L), a fração de área (A_A), e a fração volumétrica (V_V).⁽²⁾

Deste modo, neste trabalho pretende-se comprovar experimentalmente os modelos matemáticos de morfologia e de estereologia quantitativa a partir de uma microestrutura modelo, utilizando uma maneira simples e didática com esferas coloridas de massa plástica.

2 MATERIAL E MÉTODOS

Utilizando massa plástica, diversas esferas com três tamanhos médios distintos foram produzidas manualmente, de tal forma que, para cada tamanho foi atribuída uma cor de massa plástica diferente. Os diâmetros médios das esferas foram de 12 mm para as esferas marrons, 15 mm para as esferas verdes e 18 mm para as esferas amarelas.

Em seguida, as esferas foram colocadas sobre uma placa de acrílico quadrada com dimensões de 150 mm de lado, com o maior empacotamento bidimensional possível, como mostra a Figura 1.



Figura 1 – Esferas coloridas de massa plástica sobre uma placa de acrílico com uma organização de maior empacotamento bidimensional possível.

Outra placa de acrílico com as mesmas dimensões foi colocada na superfície exposta das esferas e aplicando manualmente uma força perpendicular ao plano da placa, o conjunto foi comprimido de modo a provocar o preenchimento do espaço entre as esferas. O arranjo dos característicos obtido pode ser observado na Figura 2.

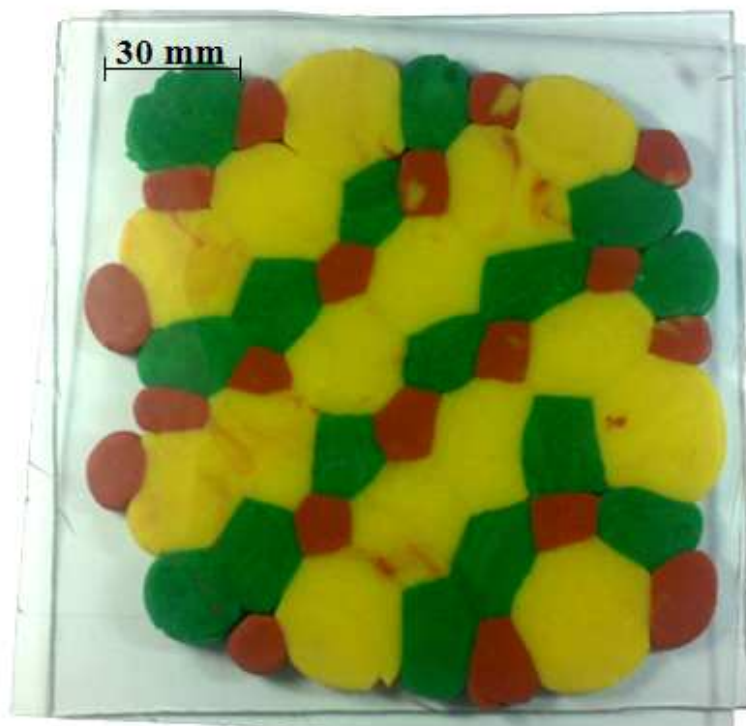


Figura 2 – Arranjo bidimensional de esferas de massa plástica comprimidas entre duas placas de acrílico.



Analisando apenas os característicos formados pelas esferas marrons, uma rede de pontos de papel transparente foi posicionada aleatoriamente sobre o arranjo e a fração de pontos (P_P) foi tomada através da divisão do número de pontos sobre as áreas marrons pelo número total de pontos da rede. As dimensões da rede de pontos utilizada foram de 50 mm por 50 mm e o espaçamento entre os pontos foi de 10 mm. Este procedimento foi repetido diversas vezes a fim de se obter a fração de pontos média ($P_{P_{\text{média}}}$) dos característicos marrons do arranjo.

Também foi tomada a fração de área (A_A) dividindo a área correspondente aos característicos marrons pela área total do arranjo. Devido à dificuldade de calcular a área real do arranjo, foi determinada uma área menor na forma retangular para a realização do experimento. Sendo assim, apenas as áreas dos característicos marrons que se encontraram dentro da área determinada foram contabilizadas.

A fração de pontos (P_P) e a fração de área (A_A) foram relacionadas com a fração volumétrica (V_V) através da Equação 1.⁽³⁾

$$V_V = A_A = P_P \quad (1)$$

Analisando apenas os característicos formados pelas esferas amarelas, uma linha-teste circular foi posicionada aleatoriamente sobre o arranjo e o número de intersecções por unidade de linha-teste (P_L) foi tomado. Com as intersecções entre característicos amarelos, obteve-se $(P_L)_{\alpha\alpha}$. Com as intersecções entre característicos amarelos e não amarelos, ou seja, verdes ou marrons, obteve-se $(P_L)_{\alpha\beta}$. O número de característicos interceptados por unidade de comprimento do círculo-teste (N_L) foi obtido através da Equação 2.

$$(N_L)\alpha = \frac{(2P_{L\alpha\alpha} + P_{L\alpha\beta})}{2} \quad (2)$$

O diâmetro médio experimental do característico amarelo foi calculado através da sua relação com o número de característicos interceptados por unidade de comprimento do círculo-teste (N_L) e comparado com o seu diâmetro médio real obtido antes das esferas serem comprimidas.

$$d = \frac{1}{N_L} \quad (3)$$

Também foram observadas as regras morfológicas e o número médio de lados dos característicos do arranjo bidimensional. A relação dos números de polígonos, bordas e cantos foi verificada através da Equação 4.

$$P - B + C = 1 \quad (4)$$

onde P, B e C correspondem aos números de polígonos, bordas e cantos respectivamente.

3 RESULTADOS EXPERIMENTAIS

Foram realizados 30 experimentos com a rede de pontos para se obter a fração de pontos (P_P) média dos característicos marrons. Os pontos que interceptaram as áreas marrons, o número total de pontos na rede e a fração de pontos média ($P_{P_{\text{média}}}$) estão dispostos na Tabela 1.

Tabela 1 – Frações de pontos parciais (P_P) e fração de pontos média ($P_{P\text{média}}$) dos característicos marrons

Experimento	$P_{\text{interceptados}}$	P_P	Experimento	$P_{\text{interceptados}}$	P_P
01	2	0,0556	16	3	0,0833
02	5	0,1389	17	3	0,0833
03	8	0,2222	18	4	0,1111
04	5	0,1389	19	5	0,1389
05	6	0,1667	20	5	0,1389
06	4	0,1111	21	3	0,0833
07	4	0,1111	22	3	0,0833
08	4	0,1111	23	5	0,1389
09	2	0,0556	24	4	0,1111
10	2	0,0556	25	6	0,1667
11	4	0,1111	26	5	0,1389
12	4	0,1111	27	2	0,0556
13	5	0,1389	28	3	0,0833
14	4	0,1111	29	3	0,0833
15	5	0,1389	30	4	0,1111
Quantidade total de pontos na rede:					36
Fração de pontos (P_P) média:					0,1130

Como a área total do arranjo foi redimensionada para facilitar o cálculo da fração de área (A_A), foram tomadas apenas as áreas dos característicos marrons posicionados dentro do retângulo correspondente a área total do experimento. Na Tabela 2, podem ser observadas as áreas parciais e a fração em área (A_A) dos característicos marrons no arranjo.

Tabela 2 – Áreas parciais e fração de área (A_A) dos característicos marrons

Característico	Área (mm ²)	A_A
01	100,0	0,0099
02	135,0	0,0134
03	130,0	0,0129
04	140,0	0,0139
05	145,5	0,0144
06	120,5	0,0119
07	100,0	0,0099
08	126,0	0,0125
09	150,0	0,0149
10	120,0	0,0119
Área total dos característicos marrons (mm ²):		1.267
Área total do experimento (mm ²):		10.090
Fração de área (A_A):		0,1256



Com o círculo-teste foi tomado o número de intersecções por unidade de comprimento de linha-teste (P_L) dos característicos amarelos e, utilizando a Eq. 2, foi possível calcular o número de objetos interceptados por unidade de comprimento de linha-teste (N_L), como pode ser observado na Tabela 3. Com a rede de pontos, foi obtida também a fração de pontos (P_P) dos característicos amarelos. A Tabela 4 mostra a fração de pontos média ($P_{P\text{média}}$) do característico amarelo. Esses dois experimentos foram realizados 5 vezes.

Tabela 3 – Número de intersecções por unidade de comprimento de linha-teste (P_L) e número de objetos interceptados por unidade de comprimento de linha-teste ($N_{L\text{médio}}$) dos característicos amarelos

Experimento	P_{α} interceptados	$P_{L(\alpha)}$ mm^{-1}	P_{β} interceptados	$P_{L(\alpha\beta)}$ mm^{-1}	$N_{L(\alpha)}$ mm^{-1}
01	1	0,00612	6	0,03673	0,02449
02	2	0,01224	8	0,04897	0,03673
03	0	0,00000	8	0,04897	0,02449
04	3	0,01836	6	0,03673	0,03673
05	3	0,01836	6	0,03673	0,03673
Diâmetro do círculo-teste (mm):					52,00
Comprimento do círculo teste (mm):					163,36
Número médio de característicos interceptados pelo círculo-teste ($N_{L\text{médio}}$):					0,03183

Tabela 4 – Frações de pontos parciais (P_P) e fração de pontos média ($P_{P\text{média}}$) dos característicos amarelos

Experimento	P_{α} interceptados	$P_{P(\alpha)}$
01	21	0,5833
02	19	0,5278
03	18	0,5000
04	22	0,6111
05	19	0,5278
Quantidade total de pontos na rede:		36
Fração de pontos ($P_{P(\alpha)}$) média:		0,5500

4 DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

As esferas localizadas nas extremidades do arranjo podem não obedecer as regras morfológicas devido à liberdade para o seu espalhamento quando expostas a uma força de compressão. Portanto, para a realização de uma análise coerente da morfologia da estrutura formada pelas esferas comprimidas, pode-se desconsiderar os polígonos localizados na borda do arranjo, ou seja, os que contenham arestas que não são compartilhadas com nenhum outro característico. O arranjo com a ausência desses característicos pode ser observado na Figura 3. Os números dispostos no interior dos polígonos representam o número de lados de cada característico.

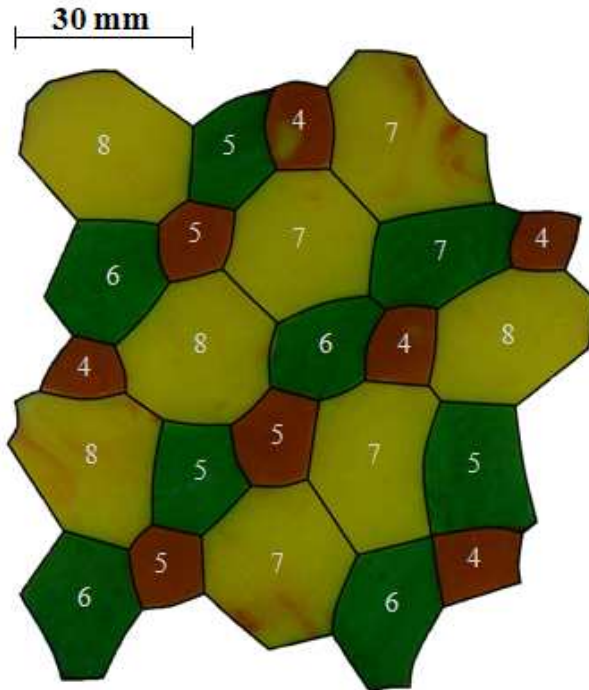


Figura 3 – Arranjo bidimensional de esferas de massa plástica.

Nota-se que os números de lados dos polígonos variam entre 4 e 8. Sendo 141 o número total de lados e 24 o número total de polígonos no arranjo, o número médio de lados dos característicos pode ser calculado e comparado com o proposto por Smith⁽¹⁾ que é seis.

$$\text{Número médio de lados} = \frac{141}{24} = 5,875$$

Observando a Figura 3, os números de polígonos (P), de bordas (B) e de cantos (C) presentes no arranjo podem ser tomados. Dessa forma, a validade da Equação 4 pode ser verificada.

$$\begin{aligned}
 P &= 24 \\
 B &= 89 \\
 C &= 66
 \end{aligned}$$

$$24 - 89 + 66 = 1$$

Analisando quantitativamente o arranjo bidimensional, a fração de pontos (P_p), a fração de área (A_A) e a fração volumétrica (V_V) podem ser relacionadas utilizando a Equação 1 com os resultados das Tabelas 1 e 2, adquiridos nos experimentos realizados com os característicos marrons. Nota-se que a igualdade não é exata, mas próxima. A fração volumétrica (V_V) dos característicos marrons pode ser considerada o valor médio entre A_A e P_p .

$$P_p = 0,1130 \quad A_A = 0,1256 \quad V_V = 0,1193$$

Supondo que o arranjo é composto por duas fases, amarelas e não amarelas (verdes e marrons), a quantidade de característicos amarelos é uma fração da



quantidade total de característicos do arranjo. Portanto, utilizando a Equação 3 com os resultados das Tabelas 3 e 4, o diâmetro médio experimental das esferas tridimensionais amarelas pode ser calculado a partir do arranjo bidimensional e comparado com o diâmetro real (18 mm), tomado antes da compressão das esferas.

$$d_{\text{amarela}} = \frac{P_{P(\sigma)}}{N_{L(\sigma)}} = \frac{0,55000}{0,03183} = 17,23 \text{ mm}$$

Nota-se que os resultados obtidos são próximos do esperado. Nas análises morfológicas, os erros devem ser associados ao baixo número de polígonos utilizados no experimento, pois, estatisticamente, quanto maior for o número de polígonos, mais próximo do real será o resultado. Nas análises de estereologia quantitativa, além do baixo número de polígonos, há também uma imprecisão nas medições onde foram utilizados a rede de pontos e o círculo-teste já que esses experimentos foram realizados manualmente e sem instrumentos de alta precisão. É importante ressaltar que mais do que resultados precisos, este experimento visa comprovar os conceitos envolvidos na caracterização de materiais através da morfologia e estereologia quantitativa, de uma maneira simples, didática e sem a necessidade de grandes estruturas ou instrumentos mais sofisticados, proporcionando facilidade na obtenção e uso do conhecimento sobre o assunto, que é um dos propósitos de um engenheiro de materiais.

5 CONCLUSÕES

Do presente trabalho pode-se concluir que:

- ✓ Os modelos matemáticos de morfologia e de estereologia quantitativa utilizados na caracterização de materiais foram validados com um experimento relativamente simples, barato e eficiente;
- ✓ Os conceitos da morfologia e da estereologia quantitativa podem ser observados e testados por meio de experimentos simples como o realizado neste trabalho;
- ✓ O método utilizado neste trabalho proporciona ao aluno uma maior percepção e compreensão da caracterização das microestruturas de materiais através da morfologia e da estereologia quantitativa.

Agradecimentos

Agradeço ao Professor Dr. Júlio César Dutra pelo apoio e acompanhamento em todo o processo deste trabalho.

REFERÊNCIAS

- 1 SMITH, C.S. Grain Shapes and Other Metallurgical Applications of Topology. In: National Metal Congress and Exposition, 33., Detroit, 1951. **Metal Interfaces**. Ohio, American Society for Metals, 1951, p. 65-113.
- 2 PADILHA, A. F.; AMBROSIO FILHO, F. **Técnicas de análise microestrutural**. São Paulo; Hemus, 1985, Cap. 5, p. 113-42: Fundamentos de Metalografia Quantitativa.
- 3 UNDERWOOD, W.A. **Quantitative Stereology**. Massachusetts, Addison-Wesley Publishing Company, 1970. Cap. 3, p. 45-75: Measurement of Volume in Volume.