

POROSIDADE DE SISTEMAS POLIDISPERSOS COMPACTADOS

Valadares, T. N.¹; Luz, J. A. M.²

1 – Graduando do Departamento de Engenharia de Minas – DEMIN/UFOP

Campus Universitário, sn – bairro Bauxita – Ouro Preto – MG

engemine@yahoo.com.br

2 – Escola de Minas da Universidade Federal de Ouro Preto – Departamento de Engenharia de Minas – UFOP

Campus Universitário, sn – bairro Bauxita – Ouro Preto – MG

jaurelio@demin.ufop.br

Em inúmeras instâncias das engenharias surge o problema de se quantificar a porosidade de sistemas polidispersos. O valor da porosidade é necessário para se estimar a pressão de filtragem de tortas de material granular. Na flotação de minérios, a porosidade da espuma deve ser conhecida para se simular a vazão de polpa hidrofílica carregada pela espuma e que, por assim dizer, contamina o fluxo de concentrado hidrofóbico. Por vezes, é necessário cubar arenito petrolífero, tendo-se apenas a análise granulométrica dos grãos constituintes da rocha hospedeira dos hidrocarbonetos. A porosidade da mistura de sínter impacta a potência dos exaustores da máquina de sinterização. A porosidade de leitos recheados tem grande influência na cinética de reações onde haja difusão de reagentes e de produtos nas interfaces, como em resinas de troca iônica e na carga de altos-fornos. Não obstante a sua grande importância, a previsibilidade da porosidade ainda é problemática. Classicamente, são citados os estudos de Furnas, sobre a porosidade resultante de mistura em proporções diversas, de partícula de dois tamanhos distintos, e, eventualmente, ábacos de isovalores de porosidade para leitos de partículas esféricas com três tamanhos diferentes. Estudos similares com sistemas polidispersos são insuficientes. Esse projeto se insere nesse contexto, e buscou preencher essa lacuna de amplo impacto técnico e econômico. Usando-se amostras sintéticas de distribuição granulométrica controlada, a porosidade de leitos de esferas de vidro, granulometricamente descritas por distribuições de Rosin-Rammler diversas, foi determinada experimentalmente, sob compactação padronizada. O resultado principal deste trabalho foi a obtenção de uma equação para a porosidade de leitos esféricos, em função do parâmetro de agudez, n , da distribuição de Rosin-Rammler.

Palavras-chave: porosidade, sistemas particulados, Rosin-Rammler, empacotamento aleatório.

Área Temática: Tratamento de Minérios

INTRODUÇÃO

Em inúmeras instâncias da engenharia química, metalúrgica e de minas surge o problema de se quantificar a porosidade de sistemas dispersos, como se pode atestar nos poucos exemplos listados a seguir. O valor da porosidade é necessário para se estimar a pressão necessária para atender a determinada taxa de filtração de tortas minerais, como se vê da equação de Kozeny-Carman (Kelly & Spotswood, 1982, Perry & Green, 1985). No âmbito da concentração de minérios por flotação, a porosidade da espuma deve ser conhecida para se quantificar a vazão de polpa hidrofílica carregada pela espuma e que, por assim dizer, contamina o fluxo de concentrado hidrofóbico (Luz, 1996). Por vezes, é necessário curar um arenito petrolífero, tendo-se apenas a análise granulométrica dos grãos constituintes da rocha hospedeira, visto que os hidrocarbonetos irão preencher as cavidades conexas, respeitada a ordem arquimediana das densidades das fases fluidas imiscíveis. Por seu turno, é necessário o conhecimento da porosidade da mistura de sínter para se dimensionarem os ventiladores e exaustores da máquina de sinterização. A porosidade de emulsões ou leito de resinas de troca iônica é parâmetro de grande influência para se prever a cinética de reações onde há troca de reagentes e difusão de produtos nas interfaces, em vários casos da engenharia química. Em metalurgia, a porosidade das partículas e da carga é um dos parâmetros mais importantes na operação de altos-fornos.

Não obstante a grande importância da porosidade, estudos técnicos sobre a previsão dessa propriedade, no âmbito de sistemas dispersos ainda são escassos e de pouca generalidade. Classicamente, são citados os estudos de Furnas, sobre a porosidade resultante de mistura em proporções diversas, de partícula de dois tamanhos distintos (Silva, 1979).

Norton, em um livro clássico sobre tecnologia cerâmica (Norton, 1973) apresenta uma figura com linhas de isovalores de porosidade, em função das proporções relativas de partículas esféricas de três tamanhos diferentes.

Trabalhos similares com sistemas particulados polidispersos, ainda são insuficientes. Especialmente naqueles casos de partículas não esferoidais. Borkovec e colaboradores estudaram a compactação de sistemas polidispersos segundo o algoritmo de empacotamento de Apolônio. A dimensão fractal do sistema assim empacotado foi determinada a partir da simulação computacional de 31.944.875.541.924 esferas. Uma visualização desse empacotamento é mostrada na figura 01 (Borkovec e colaboradores, 1994).

Este trabalho se insere nesse contexto, e buscou preencher essa lacuna de amplo impacto técnico e econômico em vários setores das engenharias, em especial no campo de engenharia de reservatórios, através da busca de uma equação que permita a previsibilidade da porosidade de sistemas polidispersos compactados.

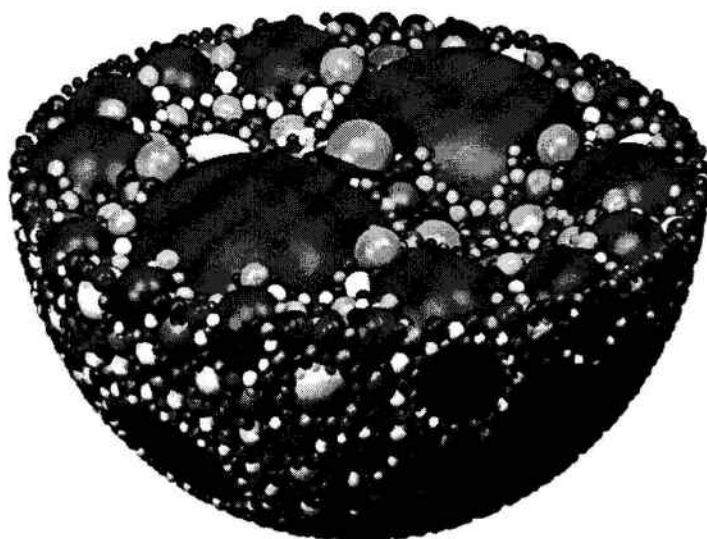


Figura 01 – Simulação em supercomputador (*cluster* de 20 microcomputadores, calculando durante * uma semana) de um empacotamento apoloniano em 3D (Fonte: Borkovec e colaboradores, 1994).

DESENVOLVIMENTO

A descrição detalhada das propriedades das partículas na população deve ser suficientemente simples e genérica, de forma que não seja necessário definir as propriedades de cada partícula, individualmente (Almeida e colaboradores, 2002). As funções de distribuição de frequência de ocorrência, simples ou acumuladas, são extensivamente usadas. Dentre essas funções de densidade de probabilidade que descrevem quantitativamente a distribuição de tamanhos, ou granulometria, de um sistema particulado, citam-se: distribuições log-normal, de Harry, de Gates-Gaudin-Schumann, de Gaudin-Meloy, e a de Rosin-Rammler-Sperling-Benet, mais conhecida como de Rosin-Rammler. Essa última é um caso particular da distribuição de Weibul.

Este trabalho teve por objetivo obter equações generalizadas da porosidade de um leito particulado, para cuja descrição possa ser adotada com razoável acurácia a distribuição de Weibul-Rosin-Rammler, dada abaixo:

$$y = 100 \left(1 - e^{\left(-\left(\frac{x}{x^*} \right)^n \right)} \right)$$

Onde y descreve o percentual passante acumulado em uma malha estabelecida, x^* é o parâmetro de escala e n é o parâmetro de agudez da distribuição.

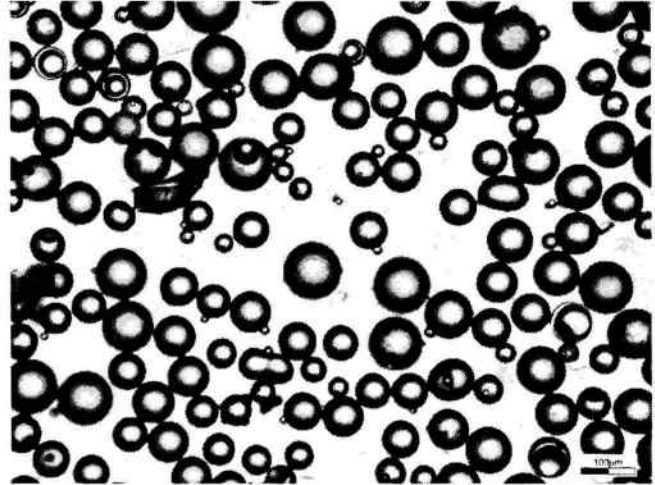
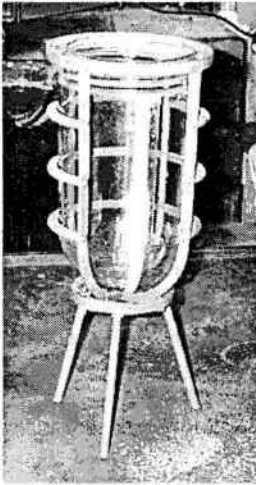


Figura 02 – Campânula de vidro graduada (altura: 450 mm) e fotomicrografia de esfera de vidro (AF).

O conhecimento da morfologia e propriedades físicas das micro-esferas de vidro é muito importante. As especificações comerciais para as esférulas de vidro utilizadas são mostradas na tabela 01. A análise microscópica do material indicou a existência de partículas irregulares, principalmente nas frações mais grosseiras, e aspirando-se a obter melhor arredondamento individual das partículas e uniformidade global das mesmas, as amostras foram submetidas a tratamento, o qual constou de revolvimento em moinho de porcelana (diâmetro de 0,2 m, a 70 % da velocidade crítica) durante 4,0 horas, sem a presença de carga moedora.

O referido procedimento justificou-se pela característica abrasiva do próprio material, que em processo de atrição e rolamento coletivo, resulta em um desgaste de eventuais arestas e superfícies irregulares. Compararam-se os resultados, antes e após este processo, tendo sido constatada leve melhora no grau de esfericidade das partículas.

Análise granulométrica foi feita para determinação das distribuições de Rosin-Rammler equivalentes para cada um dos tipos de esférulas utilizadas. As condições básicas do peneiramento foram: alíquotas de 0,300 kg; peneiramento a seco; tempo de peneiramento: 900 s (15 minutos).

Tabela 1 – Faixas granulométricas das esferas de vidro industriais e graus de esfericidade, de acordo com fabricante.

tipo	nome comercial	Tamanho [micrômetros]	Esfericidade mínima [%]
grossa	AA	210 - 595	70
	AB	177 - 297	70
média	AC	149 - 250	70
	AD	105 - 210	70
	AF	74 - 149	80
fina	AG	53 - 105	80
	AH	44 - 88	80
	AI	53 - finos	80

Compuseram-se leitos particulados individualizados (ensaios com cada uma das amostras) e em diferentes proporções entre as amostras. A massa específica real de mescla binária pode ser calculada por:

$$\rho_s = \frac{1}{\left(\frac{t_A}{\rho_{s,A}}\right) + \frac{(1-t_A)}{\rho_{s,B}}}$$

t_A é o teor (ou proporção) das amostra A no leito; $\rho_{s,A}$ e $\rho_{s,B}$ são as massas específicas das duas espécies.

Para a determinação da porosidade, utilizou-se campânula graduada, com subdivisões de 25 ml e volume total de 2.600 ml, dotada de base de sustentação e com a fundo hemi-esférico, visando à minimização do *efeito parede* no leito. Cabe ressaltar a importância de se manter o nivelamento da superfície de leitura, condição esta alcançada com a utilização de um disco de seção circular e revestimento de borracha (com diâmetro ligeiramente menor que o interno da campânula), solto sobre a superfície do leito de modo padronizado.

A porosidade pode ser calculada a partir da seguinte definição formal (veja-se simbologia abaixo):

$$\varepsilon = \left[\frac{V_v}{V_t} \right] = \left[\frac{V_v}{(V_s + V_v)} \right]$$

Após algebrismos simples, obtém-se a seguinte equação para o cálculo da porosidade:

$$\varepsilon = \frac{\rho_s - \rho_{ap}}{\rho_s}$$

onde:

- ε : porosidade [-];
- V_v : volume de vazios [m^3];
- V_s : volume do sólido [m^3];
- V_t : volume total [m^3];
- ρ_s : massa específica do sólido [kg/m^3];
- ρ_{ap} : massa específica aparente do sólido [kg/m^3].

A determinação das densidades reais das esferas foi possível mediante ensaios de picnometria, sendo que para cada amostra foram realizados simultaneamente três ensaios.

A amostra AF apresentou caráter extremamente hidrofóbico, característica inerente ao material (segundo o fabricante).

RESULTADOS E DISCUSSÃO

A tabela 02 e a figura 03 sistematizam os resultados de caracterização das diversas amostras utilizadas e os valores da porosidade de sistemas dispersos obtidos pela mescla controlada das amostras citadas, em função do parâmetro de agudez da distribuição de Rosin-Rammler.

Tabela 02 – Parâmetros descritivos por amostra isolada, onde ρ , x^* , n e ε representam, respectivamente, a massa específica das amostras, o parâmetro de escala, o parâmetro de agudez e o valor da porosidade.

Amostra (especificação comercial)	ρ [kg/m ³]	x^* [-]	n [-]	ε [%]
AA	2410	499	5,05	34
AB	2470	267	11,8	35
AC	2410	227	6,88	35
AD	2430	143	5,15	39
AF	2450	128	5,81	38
AG	2440	90,1	6,36	41
AH	2420	92,6	9,24	39
AI	2430	66,8	12,4	45

Tratando-se estatisticamente os resultados empíricos da porosidade de leitos simples e mesclados, obteve-se a seguinte equação geral (com 96,35 % de correlação), a qual possibilita estimar a porosidade nos leitos particulados polidispersos, a partir dos parâmetros de Rosin-Rammler característico de cada um.

$$\varepsilon[n] = 0,476 \times \left[\frac{e^{\left[\frac{n}{1114}\right]} - 1}{e^{\left[\frac{n}{1114}\right]} - 0,9984} \right]$$

$\varepsilon[n]$ = valor da porosidade [-];

n = parâmetro de agudez do sistema polidisperso (mistura final) [-].

Porosidade Empírica e Simulada em Sistemas Polidispersos

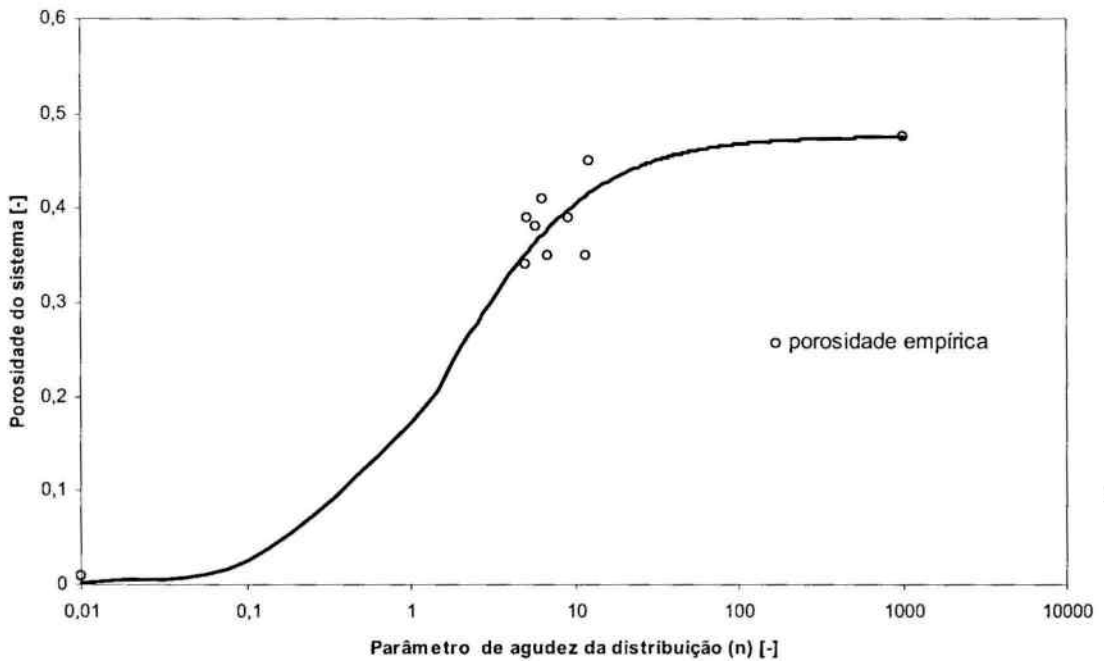


Figura 03 – Porosidade de sistema polidisperso em função do parâmetro de agudez da distribuição de Rosin-Rammler.

CONCLUSÕES

A equação para a previsão da porosidade constitui-se em poderosa ferramenta no âmbito da engenharia de reservatórios, flotação, etc, para os quais apresenta grande aplicabilidade. A equação aqui obtida, apesar de apresentar boa correlação com os dados empíricos, tem ainda caráter preliminar e é objeto de estudos suplementares, os quais estão sendo realizados; pois, conforme se vê na figura 03, a nuvem gerada compreendeu região bastante limitada da curva simulada. A obtenção de valores de porosidade a partir de ensaios em recipiente com seção esférica na parte inferior e cilíndrica graduada na superior (pescoço) torna-se boa alternativa, pois tal procedimento diminuiria os erros de medição, em virtude da minimização de efeito parede (parte esférica) e da maior facilidade de leitura (pescoço de pequena seção transversal). Naturalmente a parte do leito acima do balão esférico deve ser a mínima requerida para leitura na escala graduada.

Como continuação a este trabalho, espera-se a generalização das equações para sistemas reais (com partículas não necessariamente esféricas), possibilitando maior acurácia de resultados em várias áreas do conhecimento, como cubagem de reservas petrolíferas, modelamento de operações unitárias de flotação e separação com o concurso de emulsões, bem como estimativa do potencial aquífero de formações areníticas porosas, para citar poucos exemplos.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem ao CNPq, à CAPES e à FAPEMIG, pelo suporte financeiro a este trabalho.

REFERÊNCIAS

- ALMEIDA, S. L. M. de; LUZ, A. B. da; MONTE, M. B. de M, SAMPAIO, J. A., **Tratamento de Minérios** (3a Edição). Rio de Janeiro: CETEM, 2002.
- BORKOVEC, M.; DE PARIS, W.; PEIKERT, R.. The Fractal Dimension of the Apollonian Sphere Packing. **Fractals**, Vol. 2, No. 4 (1994) 521-526.
- KELLY, E. G. & SPOTSWOOD, D. J. **Introduction to Mineral Processing**, New York: John Wiley, 1982.
- LUZ, José. Aurélio Medeiros da. **Flotação Aniônica de Rejeito Itabirítico: Estudo de Reagentes Alternativos e Modelamento Polifásico do Processo** (tese de doutoramento). Belo Horizonte: UFMG, 1996.
- NORTON, F. H. **Introdução à Tecnologia Cerâmica**. São Paulo: Edgard Blücher, 1973.
- PERRY, R. H. & GREEN, D. **Perry's Chemical Engineers' Handbook** (6th ed.). New York: McGraw-Hill, 1984.
- SILVA, Alberto. Teixeira da. **Tratamento de Minérios**. Ouro Preto: UFOP, 1979.