

CONEM 2016
CONGRESSO NACIONAL DE
ENGENHARIA MECÂNICA

21-25
AGOSTO DE 2016
FORTALEZA - CEARÁ

ANÁLISE TEÓRICA E EXPERIMENTAL DA POROSIDADE EM MEIOS SINTERIZADOS BIMODAIS PARA LHP

Maria Eduarda Chiamulera, maria.chiamulera@labtucal.ufsc.br¹
Juan Pablo Flórez Mera, jpablo@labtucal.ufsc.br¹

¹ Laboratório de Tubos de Calor – LABTUCAL, Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Santa Catarina, Campus Universitário Trindade, 88040-900, Florianópolis/SC-Brasil, (+55) 48 3721 9379

Resumo: A estrutura porosa presente no evaporador de tubos de calor em circuito (Loop Heat Pipes - LHP) é responsável pelo bombeamento capilar, transporte de massa e transporte de energia no evaporador. Propriedades ligadas à estrutura porosa como permeabilidade e condutividade térmica efetiva são importantes na modelagem matemática do funcionamento de um tubo de calor e no seu desempenho. Estas propriedades estão associadas a porosidade do material, sendo desejados meios sinterizados com alta porosidade. Um estudo teórico e experimental da porosidade em meios porosos sinterizados é apresentado visando obter estruturas porosas com alta porosidade em função da relação de tamanho de partículas e massa adequada. Um modelo analítico baseado no empacotamento de células unitárias cúbicas para uma mistura binária de partículas é proposto. Materiais particulados com diferentes distribuições de tamanho de partícula ($d_{50} = 83 \mu\text{m}$, $d_{50} = 66 \mu\text{m}$, $d_{50} = 20 \mu\text{m}$) foram obtidos a partir do peneiramento de um material com distribuição de tamanho de partícula dispersa. Amostras de pó de cobre atomizado foram sinterizadas numa atmosfera controlada de hidrogênio a uma temperatura de 850°C. Peças de forma cilíndrica com diâmetro de 20mm foram obtidas para as diferentes misturas. As amostras do material sinterizado de cada material particulado foram embutidas e polidas num equipamento de polimento metalográfico. Imagens obtidas através de microscopia ótica foram processadas e analisadas e sua porosidade foi determinada empregando o software ImageJ®. A porosidade medida para diferentes combinações de material sinterizados de cobre foram comparadas com dados experimentais.

Palavras-chave: porosidade, meios porosos sinterizados, tubos de calor

1. INTRODUÇÃO

Tubos de calor em circuito (LHP, *loop heat pipes*) são dispositivos empregados no controle térmico de componentes eletrônicos. Estes dispositivos possuem uma alta capacidade de troca térmica devido a seu funcionamento baseado na mudança de fase de um fluido de trabalho. Por operar nas condições de mudança de fase, ou seja, com temperaturas constantes, os gradientes de temperatura dentro de um tubo de calor são pequenos.

Basicamente os tubos de calor estão divididos em um evaporador e um condensador unidos por tubulações que constituem a linha de vapor e de líquido. Quando calor é fornecido no evaporador, o fluido contido na estrutura porosa vaporiza. O calor aplicado provoca um aumento de pressão do vapor no evaporador que escoar em direção ao condensador através da linha de vapor. No condensador, o vapor é condensado liberando calor.

As forças capilares existentes na estrutura porosa impulsionam o líquido de volta ao evaporador, fechando o ciclo. A estrutura porosa presente no LHP é responsável pelo bombeamento capilar, transporte de massa e transporte de energia no evaporador. Propriedades ligadas à estrutura porosa como permeabilidade e condutividade térmica efetiva são importantes na modelagem matemática do funcionamento de um tubo de calor e no seu desempenho. A fim de aumentar a performance de um LHP, é necessário um meio poroso com alta porosidade e reduzido tamanho de poros.

Em alguns trabalhos encontrados na literatura, o estudo da porosidade é baseado em modelos de células unitárias com um e diferentes tamanhos de partículas. Normalmente, os trabalhos dedicados ao estudo da porosidade visam à redução dessa propriedade a fim de obter um meio poroso mais denso. Isto porque a metalurgia de pó tem sido empregada para a produção de peças a partir de metais duros, indústrias cerâmica e química. Modelos baseados no preenchimento dos interstícios podem ser encontrados na literatura. Furnas (1931) elaborou um modelo que prevê a máxima densidade teórica em um sólido composto por mais de dois tamanhos de partículas. O modelo é baseado no

fato de que se partículas de tamanhos infinitamente pequenos forem introduzidas num arranjo de grandes poros, as partículas pequenas irão preencher os espaços vazios sem alterar o volume total. Baseado no modelo de Furnas (1931), Zheng et al. (1995) propuseram uma equação empírica para a densidade de misturas binárias que leva em conta a relação entre os raios das partículas, a fração de volume dos pós e a densidade inicial de cada partícula. A fim de adequar a equação aos resultados experimentais, constantes foram ajustadas tornando a previsão da densidade de empacotamento da mistura mais precisa. Rassouly (1999) analisou a densidade de empacotamento de misturas binárias perfeitas formadas por esferas. O estudo levou em conta a dilatação das partículas grandes devido à presença de partículas menores e a distorção das partículas pequenas devido à presença de partículas maiores. O modelo apresentado depende da proporção de tamanho entre as partículas e a densidade de empacotamento entre os componentes. As equações propostas para o cálculo da densidade estão de acordo com os resultados experimentais. Entretanto, a construção do evaporador de LHP requer uma máxima porosidade. Um meio poroso que apresenta maior quantidade possível de poros conectados, favorecerá o bombeamento do fluido.

De outro lado, Florez et al (2014) estudaram a porosidade de meios porosos de cobre sinterizado para aplicação em tubos de calor em circuito LHP empregando o conceito de célula unitária. Eles estudaram a porosidade de cada sistema de empacotamento de partículas e determinaram suas porosidades considerando a influência do pescoço formado no processo de sinterização. Boa comparação com os dados experimentais para o empacotamento cúbico foi encontrada.

Recentemente, encontram-se trabalhos focados na obtenção de materiais porosos empregando material de sacrifício. Nesse tipo de material, após a sua dissolução, há um aumento na quantidade de espaço vazios, apresentando assim, dupla porosidade. Yeh et al (2009) estudaram a influência da temperatura no processo de sinterização de meios porosos bi-porosos e seu comportamento térmico quando empregados como estruturas porosas em tubos de calor. Velasques et al (2015) estudaram a obtenção de meios bi-porosos em diferentes camadas empregando a técnica de deposição de uma suspensão de óxido de cobre em forma de fita. Neste trabalho, foi empregado carvão vegetal como material de sacrifício e foi atingida uma porosidade do 60% para a estrutura bimodal. Os meios bimodais ainda representam um desafio tecnológico devido à aplicação de processos adicionais à sinterização do material particulado. Há grande interesse em explorar a possibilidade de melhorar as características das estruturas porosas analisando o tamanho, distribuição e empacotamento das partículas no meio sinterizado.

Neste trabalho, um estudo teórico e experimental da porosidade em meios porosos sinterizados é apresentado visando obter estruturas porosas com alta porosidade em função da relação de tamanho de partículas e relação de massa adequada. O estudo de células unitárias formadas por esferas empacotadas num arranjo ordenado é empregado para determinar as características de uma mistura binária de materiais particulados com diferentes tamanhos médios de partículas.

2. MODELO MATEMÁTICO

A porosidade ε de um material é definida por Dulien (1979) como a relação entre o volume de poros V_p e o volume total V , podendo variar de 0 até 1. A porosidade pode ser formada por poros abertos e fechados, no projeto de tubos de calor em circuito é de interesse os poros abertos.

$$\varepsilon = \frac{V_p}{V} \quad (1)$$

Onde ε é a porosidade, V e V_p são o volume do bulk e o volume da fase sólida respectivamente. Ou ainda, em função do volume do sólido V_s :

$$\varepsilon = 1 - \frac{V_s}{V} \quad (2)$$

Segundo Randall (1989), existem 4 tipos de empacotamentos de partícula para esferas de igual diâmetro: cúbico, tetragonal, romboédrico e ortorrômbico. Dentre esses arranjos, o empacotamento cúbico apresenta a maior porosidade, sendo esta 47%. Nesse sistema de empacotamento, cada partícula apresenta 6 coordenações, ou seja, está sitiada por outras 6 partículas. Geometricamente, esta configuração pode ser representada posicionando uma partícula de referência na origem de um sistema de coordenada no sistema cartesiano e dispondo outra partícula em contato do lado em cada eixo, como é apresentado na Fig. 1.

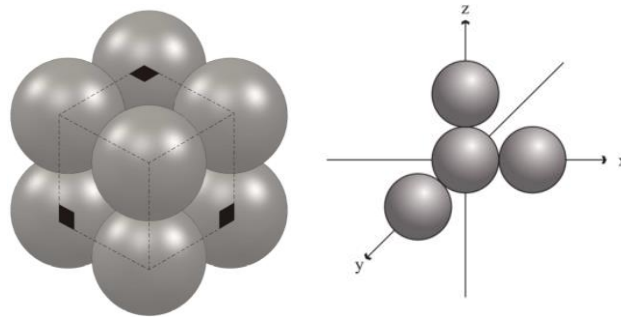


Figura 1. Modelo de empacotamento cúbico em um sistema de coordenadas cartesianas em 3D.

Uma porosidade maior pode ser atingida produzindo interferência no empacotamento, de forma que a rede seja alterada (Rassouly (1999)). No intuito de encontrar uma mistura binária de partículas que forneça uma maior porosidade, são propostos dois sistemas de empacotamentos, representando dois possíveis arranjos. Nesses arranjos, a partícula menor produz a expansão do sistema de empacotamento cúbico. Para definir este sistema, é necessário conhecer a relação de tamanho de partículas adequada e a relação de massa correta entre as partículas.

No primeiro modelo estudado, 2D-xy, é considerado que uma partícula de diâmetro maior é alocada na origem do sistema de coordenadas cartesianas. No eixo x e y (Fig. 2), duas partículas de diâmetro menor são dispostas. As partículas de maior diâmetro estão empilhadas uma acima da outra na direção do eixo z do sistema de coordenadas. A análise da porosidade nesta geometria é estudada definindo uma célula unitária que se repete em toda estrutura porosa formada por esta configuração, como ilustrado na Fig. 2. A célula unitária do modelo 2D-xy é formada por um oitavo de esfera de diâmetro maior e dois oitavos de esfera de diâmetro menor.

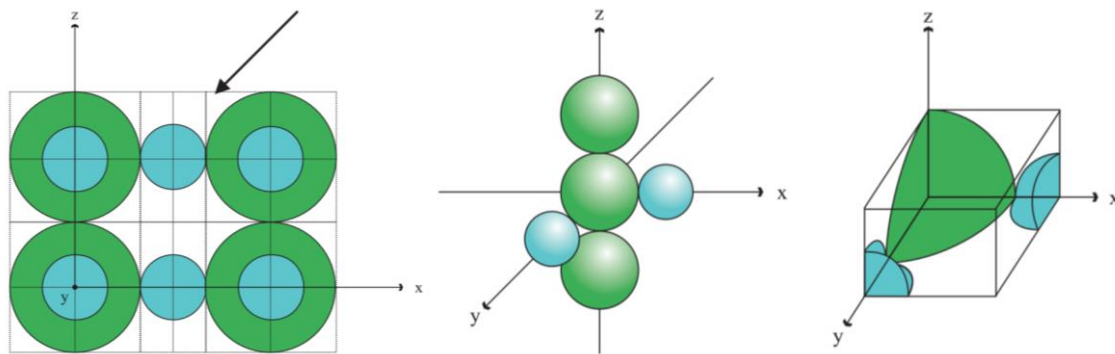


Figura 2. Modelo de empacotamento. a) 2D-xy.

No modelo 3D-xyz é considerado que uma partícula esférica de menor tamanho encosta na esfera de maior tamanho localizada na origem do sistema de coordenadas nas três direções xyz como apresentados na Fig. 3. Analogamente, uma célula unitária é definida para o estudo deste modelo. Já a célula unitária do modelo 3D-xyz é formada por um oitavo de esfera de diâmetro maior e três oitavos de esfera de diâmetro menor. Nesta abordagem, o volume de sólido ocupado pelo pescoço formado no processo de sinterização (*neck*) não é considerado. Os modelos para o cálculo da raio e geometria do pescoço são baseados em esferas de mesmo diâmetro.

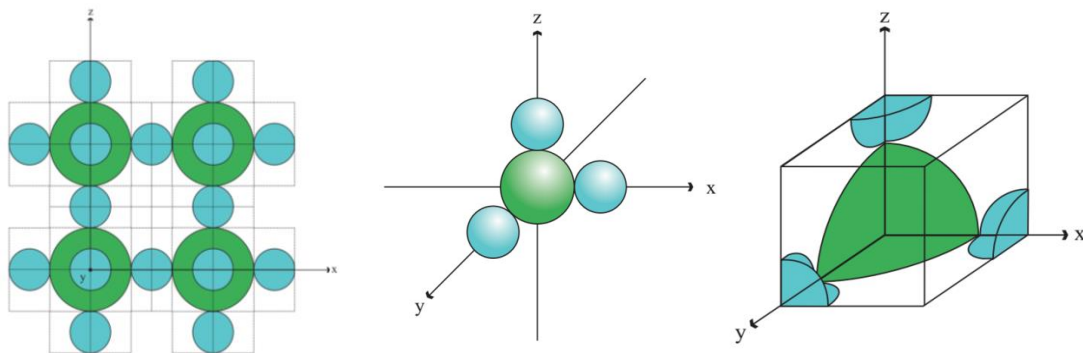


Figura 3. Modelo de empacotamento. b) 3D-xyz.

A solução do modelo matemático requer a adoção de hipóteses simplificadoras, listadas a seguir:

- O diâmetro d_a é maior que d_b .
- Estrutura do poro é homogênea e isotrópica.
- Tamanho médio das partículas representa estatisticamente cada distribuição de partículas empregada.
- As partículas formadoras do meio poroso são esferas perfeitas.

Para cada modelo de empacotamento propostos, calcula-se a porosidade ε segundo a Eq. (2).

Tabela 1. Modelos de porosidade.

Modelo 2D-xy	Modelo 3D-xyz
$\varepsilon_{2D-xy} = 1 - \frac{\frac{\pi}{6} \left[1 + 2 \left(\frac{d_b}{d_a} \right)^3 \right]}{\left[1 + 2 \left(\frac{d_b}{d_a} \right) + \left(\frac{d_b}{d_a} \right)^2 \right]} \quad (3)$	$\varepsilon_{3D-xyz} = 1 - \frac{\frac{\pi}{6} \left[1 + 3 \left(\frac{d_b}{d_a} \right)^3 \right]}{\left(1 + \frac{d_b}{d_a} \right)^3} \quad (4)$

2.1. Relação de Tamanho de Partículas d_b/d_a

A relação entre os diâmetros das partículas maiores e menores que configuram máxima porosidade é encontrada derivando as Eq. (3) e Eq. (4). Os valores máximos calculados a partir de cada modelo são sumarizados na Tab. 2.

Tabela 2. Porosidade máxima.

Modelo	Máxima Porosidade	Relação d_b/d_a
2D-xy	0,71	0,54
3D-xyz	0,79	0,58

2.2 Relação de Massas m_b/m_a

Sabendo a relação d_b/d_a , é possível encontrar a relação de massas entre os dois tipos de pós que caracterizam máxima porosidade. Essa relação é calculada a partir da densidade da mistura de pó com dois tamanhos médios de partícula:

$$\frac{\rho_a}{\rho_b} = \frac{\frac{m_a}{V_a}}{\frac{m_b}{V_b}} \quad (5)$$

Onde ρ_a e ρ_b são as densidades das partículas a e b respectivamente, m_a e m_b são as massas de cada partícula e V é o volume do *bulk*. Como trata-se de uma mistura de mesmo material, a Eq. 5 pode ser simplificada para:

$$\frac{m_a}{m_b} = \frac{V_b}{V_a} \quad (6)$$

Calcula-se então, a relação m_b/m_a para cada modelo proposto:

Tabela 3. Relação de massas para cada modelo.

Modelo 2D-xy	Modelo 3D-xyz
$\frac{m_a}{m_b} = \frac{1}{2} \left(\frac{d_b}{d_a} \right)^{-3} \quad (7)$	$\frac{m_a}{m_b} = \frac{1}{3} \left(\frac{d_b}{d_a} \right)^{-3} \quad (8)$

3. ESTUDO EXPERIMENTAL

3.1. Materiais Porosos Sinterizados

A sinterização é uma das etapas do processamento de materiais a partir do pó. Segundo Coble (1960), o termo sinterização pode ser relacionado às mudanças na forma, redução do poro e crescimento de grãos que as partículas em contato sofrem durante um processo de aquecimento. Por outro lado, Thümmeler e Oberacker (1993) expõem que a sinterização não tem uma definição completa, podendo ser explicada como o transporte de material termicamente ativado em uma massa de pó ou num compactado poroso, onde a superfície específica é reduzida por crescimento do contato entre as partículas. Normalmente, no processo de obtenção de estruturas porosas para tubos de calor, emprega-se o método de pó solto. Neste processo, o pó metálico é acomodado no interior de uma matriz ou dentro de um invólucro com a geometria desejada para a estrutura porosa. Em seguida, o material é submetido ao processo de sinterização, conforme a curva de aquecimento projetada. Diversos autores utilizam a técnica de pó solto para obtenção de meios porosos para tubos de calor, câmaras de vapor e bombas capilares, tais como: Peterson (1994), Reay e Kew (2006) e Faghri (1995). Neste trabalho amostras de cobre sinterizados foram empregadas para medir a porosidade. Pó de cobre atomizado foi depositado em um molde cilíndrico de aço inox e sinterizados numa atmosfera de hidrogênio numa temperatura de 50 °C.



Figura 4. Imagem de pó de cobre sinterizado obtida por microscópio ótica 100x.

Pó de cobre atomizado, conhecido comercialmente como PAM, foi empregue como matéria-prima das amostras. Partículas de diferentes tamanhos foram obtidas através da separação de pó de cobre atomizado. As partículas foram, então, peneiradas e classificadas como A, B, C, D, E e F, em ordem crescente de diâmetro médio. Tabela 4 mostra a classificação dos tipos de pó para as diferentes distribuições de tamanho de partículas devido ao diâmetro médio.

Tabela 4. Classificação das partículas devido ao diâmetro médio.

Classificação	Diâmetro médio da partícula [μm]
A	22,23
B	36,59
C	49,72
D	68,81
E	83,25
F	126,16

3.2. Procedimento de Teste

Amostras cilíndricas com 20 mm de diâmetro e 4 mm de altura foram fabricadas a partir dos pós peneirados como descrito no item anterior. Após o processo de sinterização, as amostras foram embutidas a frio. O embutimento consiste em circundar a amostra com uma resina sintética, formando um corpo único, ver Fig. 5. Esse processo é realizado para facilitar o manuseio de peças pequenas, evitando a danificação da lixa ou do pano de polimento e abaulamento da superfície. As amostras são então lixadas e polidas através de diferentes tipos de lixas a fim de eliminar marcas na superfície, tornando a superfície isenta de riscos. Finalmente, a superfície é polida com um pano impregnado com pó de diamante de 0,25 μm empregando álcool etílico como fluido lubrificante. Deste modo, as amostras tornam-se prontas para o processo de aquisição das imagens.

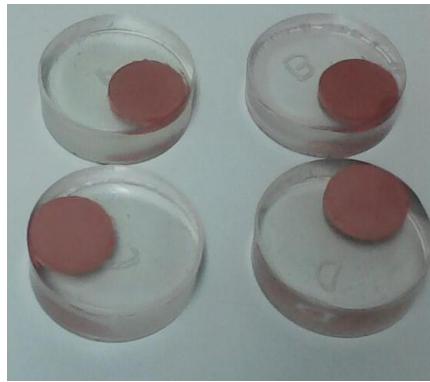


Figura 5. Amostras para análise metalográfica.

A medição da porosidade foi feita através da técnica de análise de imagens. Essa técnica é empregada na análise de meios porosos mediante a aplicação de operações topológicas e através da utilização de algoritmos computacionais que permitem a estimação de propriedades macroscópicas, como a porosidade e a permeabilidade, a partir de imagens 2D ou 3D. O processo de análises de imagens é apresentado na Fig. 6. O segundo passo, depois de definida a informação de interesse, refere-se à aquisição das imagens. Vinte imagens foram obtidas para cada amostra empregando um microscópio mecanográfico. A captura das imagens foi feita numa região central mantendo uma distância aproximada de 1 mm da borda da peça. Imagens com microscopia ótica empregando zoom de 50x, 100x e 200x foram feitas seguindo um padrão de deslocamento através da área disponível, mas em pontos aleatórios da trajetória. O processamento e análise estatístico das imagens foram feitos empregando o software ImageJ. A incerteza da medição foi assumida como o desvio padrão das imagens para cada tipo de amostra em zoom utilizado na aquisição.

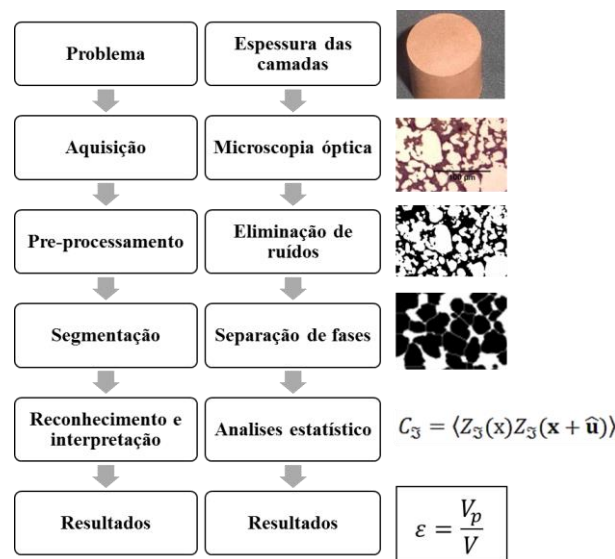


Figura 6. Etapas do processamento de imagens.

As amostras foram fabricadas a fim de atingir a máxima porosidade prevista por cada modelo. Sendo assim, o valor das derivadas das Eq. 3 e Eq. 4 deve ser igual a zero. O limite inferior é dado pelo diâmetro interno formado pela circunferência inscrita no espaço deixado pelas quatro esferas em contato no empacotamento cúbico $d_b/d_a > 0,21d_a$. Sabendo a porosidade máxima prevista por cada modelo, sabe-se também a relação entre o diâmetro da partícula menor e o diâmetro da partícula maior (d_b/d_a). Com essa relação, é possível calcular a relação de massas entre a partícula de menor diâmetro e a partícula de maior diâmetro (m_b/m_a).

Tabela 5. Amostras segundo o modelo ε_{2D-xy} .

Modelo ε_{2D-xy}		
Relações	Pó D + Pó F	Pó B + Pó D
d_b/d_a	0,55	0,53
m_b/m_a	3,00	3,36

Escolheu-se dois tipos de pós de cobre atomizado que satisfazem a relação d_b/d_a que resulta em máxima porosidade. Os pós foram misturados cumprindo a relação de massas m_b/m_a e sinterizados pelo método de pó solto a 850°C. As Tabelas 5 e 6 descrevem as relações de diâmetros e de massas de cada amostra utilizadas no experimento para cada modelo proposto.

Tabela 6. Amostras segundo o modelo ε_{3D-xyz} .

Modelo ε_{3D-xyz}		
Relações	Pó C + Pó E	Pó A + Pó B
d_b/d_a	0,60	0,61
m_b/m_a	1,54	1,47

4. ANÁLISES E RESULTADOS

As Eq. (3) e (4) foram graficadas em função da relação de diâmetro de partículas. A curva do modelo foi comparada aos dados experimentais. Pela Fig. 7, é possível perceber que a porosidade medida é inferior à estimada pelo modelo. Esse resultado pode ser explicado pelo fato de que os pós utilizados possuem uma distribuição de tamanho de partículas. É assumido que cada pó possui um diâmetro de partícula representado pelo diâmetro de partícula médio. Entretanto há uma dispersão, ou seja, cada pó possui diferentes diâmetros de partícula em sua composição, podendo ser essas partículas maiores ou menores que o tamanho médio. Possivelmente, esses diâmetros não satisfazem as relações indicadas pelas Eq. (3), (4), (7) e (8). A presença de partículas menores pode melhorar o empacotamento, pois apesar de distorcerem as partículas grandes, como esperado pelo modelo proposto, elas preenchem os espaços vazios, aumentando assim a densidade e diminuindo a porosidade.

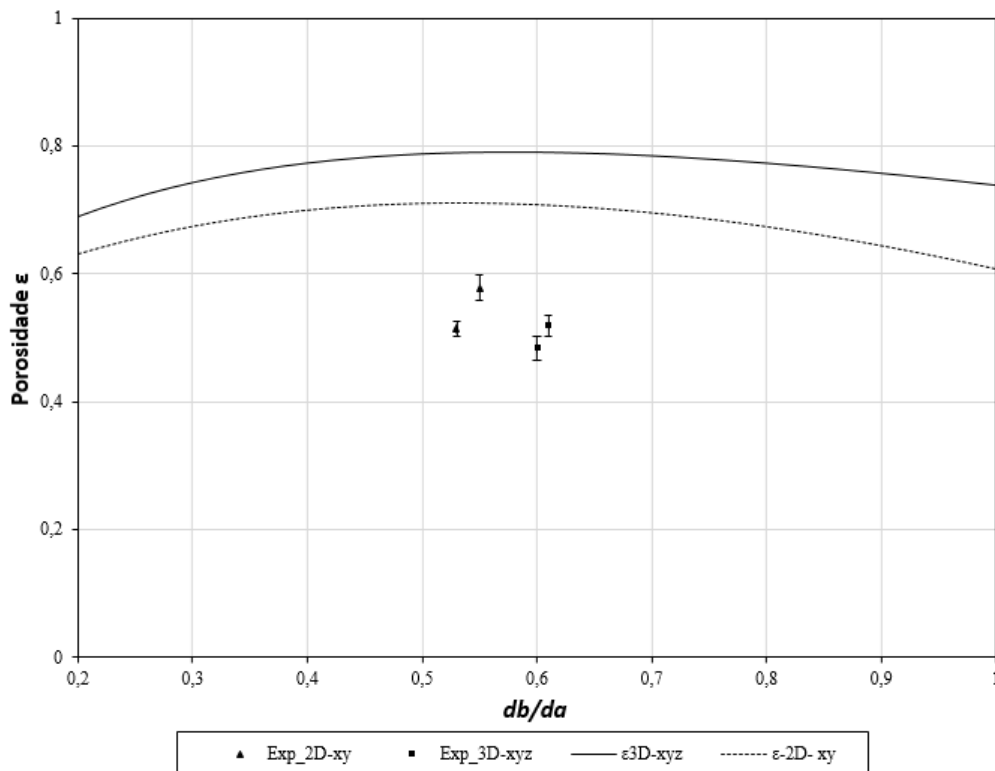


Figura 7. Porosidade ε versus relação entre diâmetro de partículas d_b/d_a .

As porosidades medidas experimentalmente são apresentadas na Tab. 7:

Tabela 7. Resultados experimentais da porosidade.

Modelo ε_{2D-xy}		Modelo ε_{3D-xyz}	
Pó B + Pó D	Pó D + Pó F	Pó C + Pó E	Pó A + Pó B
0,5142	0,5782	0,4835	0,5288

Apesar de não atingirem as porosidades previstas pelas Eq. (3) e (4), os resultados experimentais correspondentes a cada modelo apresentaram valores próximos. Para o modelo 2D-xy, os valores experimentais foram 51,42 % e 57,82%. Já para o modelo 3D-xyz, os valores experimentais foram 48,35 % e 52,88%. Desta forma, é possível ter o controle da porosidade estimada misturando dois pós com diferentes tamanhos médios de partículas. Isso se deve ao fato de que as amostras foram feitas baseadas em uma mesma relação de diâmetros e de massas, que foram calculadas pelo modelo.

Pode-se observar que a menor relação d_b/d_a , encontrada pelo modelo 2D-xy, apresentou melhores resultados. Isso sugere que partículas menores equivalentes a 50% das maiores favorecem a distorção do empacotamento das partículas maiores, por isso a porosidade foi maior.

A porosidade para as diferentes amostras sinterizadas de pó de cobre separados a partir de peneiramento é apresentada na Tab. 8.

Tabela 8. Classificação das partículas devido ao diâmetro médio.

Classificação	Diâmetro médio da partícula [μm]	Porosidade Experimental [%]
A	22,23	38,19 $\pm$ 2,86
B	36,59	42,31 $\pm$ 3,87
C	49,72	53,31 $\pm$ 1,45
D	68,81	53,46 $\pm$ 1,30
E	83,25	52,77 $\pm$ 2,33
F	126,16	56,04 $\pm$ 1,44

Observa-se que a menor porosidade corresponde ao pó A, de menor diâmetro de partícula (22,23 μm). Os valores da porosidade aumentam com o aumento do tamanho de partícula. Para os pós C, D e E (49,72 μm , 68,81 μm e 83,25 μm), a porosidade medida teve valor médio de 53%. A máxima porosidade foi observada no pó F (126,16 μm) que corresponde ao pó de maior tamanho de partícula. Os valores de porosidade nas amostras monodispersas também foram superiores ao estimado pelo empacotamento cúbico simples, que possui uma porosidade de 47,64% sendo essa a máxima porosidade encontrada um empacotamento monodisperso (German 1989). É possível que a dispersão na distribuição de tamanho de partículas para os pós monodispersos contribua para uma maior porosidade.

Percebe-se um bom comportamento nos desempenhos dos modelos, atingindo valores de porosidade semelhantes para mesmas relações de diâmetros de partículas e de massa. Todavia, é necessário levar em conta a dispersão encontrada nos pós empregados como matéria-prima na fabricação das amostras. Como trabalho futuro, os modelos propostos podem ser melhorados adequando-os à dispersão da distribuição de tamanho de partículas. Também são propostos como trabalhos futuros, o estudo de outras propriedades ligadas ao bom funcionamento de LHP's, como permeabilidade e raio crítico em estruturas porosas feitas por dois tamanhos de partículas diferentes.

5. REFERÊNCIAS

- Callister, W. D., 1997, "Materials Science and Engineering an Introduction", Ed. John Wiley and Sons, Canada, 30 p.
- Coble, R. L., 1960, "Sintering Crystalline Solids I. Intermediate and Final State Diffusion Models", Journal of Applied Physics, pp. 787-92.
- Dullien, F. A. L., 1979, "Porous Media Fluid Transport Pore Structure", Ed. Academic Press, San Diego, California, USA
- Faghri, A., 1995, "Heat Pipe Science and Technology", Ed. Taylor & Francis, Washington, USA, 874 p.
- Florez, J., Mantelli, M., Nuerberg, G. and Milanez, F., 2014, "Powder Geometry Based Models for Sintered Media Porosity and Thermal Conductivity", Journal of Thermophysics Heat Transfer, No. 28, pp. 507-517.
- Fernandes, C. P., 2002, "Engenharia de Microestruturas: Análise Quantitativa de Imagens e Simulação de Processos Físicos", Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, Brasil.
- Furnas, C.C., 1931, "Grading Aggregates I. Mathematical Relations for Beds of Broken Solids of Maximum Density", Industrial and Engineering Chemistry, Vol. 23, No. 9, pp. 1052-1058.
- German, R.M., 1989, "Particle Packing Characteristics", Ed. Metal Powder Industries Federation, Princeton, New Jersey, USA, 92-93 p.
- Kaviany, M., 1995, "Principles pf Heat Transfer in Porous Media", Ed. Springer, Nova Iorque, USA, 20-24 P.
- Lawley, A., 1992, "Atomization The Production of Metal Powders", Ed. Metal Powder Industries Federation, Princeton, New Jersey, USA, 8 p.
- Peterson, G. P., Babin, B. R. and Wu, D., 1990, "Steady – State Modeling an Testing of A Micro Heat Pipe, Journal of Heat Transfer", Vol 112, p 595.
- Rassouly, S. M. K., 1999, "The Packing Density of 'Perfect' Binary Mixtures", Powder Technology, pp. 145-150.
- Reay, D. and Kew, P., 2006, "Heat Pipes Theory, Design and Applications", Ed. Elsevier, London, England, 595 p.
- Velasques, S.T.R., Nuernberg, G. V., Florez, J. P. M., Mantelli, M. B. H. e Klein, A. N., 2015. "Development of

Multilayered Porous Media Using Colloidal Processing”, In: Minsk International Seminar Heat Pipes, Heat Pumps, Refrigerators, Power Sources .

Yeh, C. C., Chen, C. N., e Chen Y. M., 2009, “Heat Transfer Analysis of a Loop Heat Pipes with Biporous Media”, International Journal of Heat and Mass Transfer, 52, pp. 4426-4434.

Zheng, J., Carlson, W. B. and Reed, J. S., 1994, “The Packing Density of Binary Powder Mixtures”, Journal of the European Ceramic Society, 479-483 p.

6. RESPONSABILIDADE AUTORAL

Os autores são os únicos responsáveis pelo conteúdo deste trabalho.

ANALYSIS OF POROSITY IN SINTERED POROUS MEDIA WITH BIMODAL DISTRIBUTION OF PARTICLE SIZE

Maria Eduarda Chiamulera, maria.chiamulera@labtucal.ufsc.br¹

Juan Pablo Flórez Mera, jpablo@labtucal.ufsc.br¹

¹ Heat Pipe Laboratory – LABTUCAL, Mechanical Engineering Department, Federal University of Santa Catarina, Campus Universitário Trindade, 88040-900, Florianópolis/SC-Brazil, (+55) 48 3721 9379

Abstract. The porous structure present in the evaporator of loop heat pipes (LHP) is responsible for the capillary pumping, transport of mass and transport of heat in the evaporator. Properties related to porous structure as permeability and effective thermal conductivity are important in the mathematical modeling of the operation of a heat pipe and in the performance of a heat pipe. These properties are associated with porous structure of the material, it is desired sintered media with high porosity. A theoretical and experimental study of porosity in sintered porous media is presented seeking for porous structure with high porosity as function of ratio of the size particle and adequate mass. An analytical model based on the unit cells packing for a binary mixture is proposed. Particulate materials with different distribution of particle size ($d_{50} = 83 \mu\text{m}$, $d_{50} = 66 \mu\text{m}$, $d_{50} = 20 \mu\text{m}$) were obtained from screening of a material with dispersed particle size distribution. Atomized copper powder samples were sintered in a controlled atmosphere of hydrogen at a temperature of 850°C. cylindrical parts with 20 mm of diameter were obtained for the different mixtures. Samples of the sintered material of each particulate material were embedded and polished in a polishing metallographic machine. Images obtained from optic microscopy were processed and analyzed and its porosity was determined using the ImageJ® software. The porosity measured for different combinations of sintered materials of copper were compared to experimental data.

Keywords: porosity, sintered porous media, loop heat pipes.