



SIMULAÇÃO COMPUTACIONAL DE UM ESCOAMENTO ATRAVÉS DE UM LEITO EMPACOTADO DE ESFERAS

Fábio Alfaia da Cunha

Nikolas Heber Nascimento Costa

Luan Henrique Dos Santos Oliveira

Thiago Ferreira Gomes

fabioalfaia@unb.br

nikolashnc@hotmail.com

luan.unai@gmail.com

fgomes.thiago@gmail.com

Faculdade UnB Gama, Universidade de Brasília, 7244-240, Gama, Brasília-DF.

Resumo. Problemas associados à troca de calor entre um gás e um leito empacotado são bastante comuns em diversos ramos da indústria. Para estudar adequadamente este tipo fenômeno é necessária uma boa previsão da dinâmica do escoamento através do leito. Com base nisso, neste trabalho é apresentado um estudo do escoamento em um leito empacotado através de simulação computacional. O leito empacotado considerado neste estudo é cilíndrico e constituído por esferas. O arranjo de esferas cúbico simples foi considerado para geração da geometria do leito. Para tornar a simulação factível algumas simplificações foram necessárias. A primeira foi de periodicidade do escoamento na direção axial do leito. Outra simplificação foi de simetria em relação a um oitavo do leito. Um caso bem simplificado, considerando uma única célula cúbica simples de esferas, também foi simulado. A geometria e a malha do leito empacotado foram geradas no software Gambit e a simulação do escoamento foi realizada no software Fluent. A avaliação dos resultados foi realizada através de comparação com dados experimentais disponíveis na literatura e boa concordância foi verificada, especialmente para o caso onde foi considerado um oitavo de uma seção do leito.

Palavras-chave: Leito empacotado, Simulação, Fluent, Gambit.

1 INTRODUÇÃO

Os problemas decorrentes de um escoamento atravessar um leito empacotado são comuns em diversos ramos da indústria. O escoamento em leito empacotado se caracteriza quando um fluido incide nas partículas e não consegue promover a movimentação destas, de tal forma que estas partículas possam atingir a velocidade crítica de fluidização. Neste caso o fluido apenas percorre os espaços (poros) existentes no leito.

Segundo Cruz (2014) a altura ou tamanho do leito empacotado influenciam na queda de pressão e no regime de escoamento. Para a realização de uma avaliação do escoamento e para a determinação da queda de pressão é necessário estabelecer as dimensões do leito e a vazão de ar incidente.

Keyser et al. (2005) aborda o papel da distribuição do tamanho da partícula de carvão na queda de pressão de um leito empacotado. No estudo foi realizado com a fluidodinâmica computacional (CFD) e os resultados obtidos na simulação foram comparados com os resultados obtidos através da equação de Ergun. A comparação entre os dois métodos mostrou que para distribuições com mesmo diâmetro médio, porosidade e esfericidade os valores de queda de pressão apresentam o mesmo resultado dado pela equação de Ergun. As estruturas dos leitos de carvão foram simuladas assumindo que as partículas de carvão eram poliedros convexos dispostos de forma aleatória no espaço tridimensional. Sendo assim foram simulados dois leitos compostos por poliedros de formas randômicas, manipulados para obter a mesma esfericidade, porosidade e mesma distribuição de tamanho de partícula, porém com faixa de distribuição granulométrica diferente. Os autores concluíram que o leito com faixa mais larga de distribuição de tamanho de partículas causa uma maior queda de pressão, para a mesma esfericidade e porosidade. Concluíram, ainda, que a simulação em CFD pode ser usada para ajustar as constantes empíricas da equação de Ergun e que esta não é adequada para faixas largas de distribuição de tamanho de partículas.

Com o mesmo objetivo de analisar um método para determinar a queda de pressão através de um leito empacotado, Louw et al. (2013) utiliza de técnicas de CFD para simular um leito poroso de partículas esféricas uniformes. O trabalho se baseou em um sistema de armazenamento de energia térmica através do fluxo de ar sob um leito de rocha. Para caracterizar os meios porosos, três parâmetros principais foram determinados: a condutividade térmica, coeficiente de transferência de calor da partícula e do fluido, a queda de pressão e porosidade. De acordo com Lotenburg (1998), as montagens dos leitos estavam limitadas nas suas capacidades para determinar os parâmetros de transferência de calor em um leito fixo. Esta limitação estava associada às técnicas de medição que perturbavam a geometria do leito e conseqüentemente a queda de pressão do leito influenciada (Eppinger et al., 2010). Foram utilizados três arranjos diferentes de partículas (CS, CFC, CCC) e um arranjo de partículas dispostas de forma aleatória, todos estes foram confinados em um domínio cilíndrico. Desta forma Louw et al. (2013) verificou um aumento da porosidade a medida que a razão diâmetro da partícula-diâmetro do cilindro aumentava, para todos arranjos. Também mencionou que os valores encontrados através da simulação se aproximavam muito dos valores encontrados através da equação de Einfeld/Schnitzlein para a queda de pressão.

Comiti e Renaud (1989) questionam o uso de equações gerais para leitos de partículas não esféricas e de tamanhos não uniformes. Para Comiti e Renaud (1989) este tipo de estrutura possui duas particularidades que não foram consideradas. Uma parte significativa da área superficial das partículas não pode ser alcançada pelo fluxo porque elas se sobrepõem

mutuamente. Outro ponto abordado é o fato de que para leitos firmemente empacotados em uma coluna cilíndrica vertical, a orientação principal das partículas é quase horizontal, parecendo uma estrutura de linhas. Deste modo, o trajeto do fluido, para uma dada espessura, é mais longo através deste tipo de leito do que através de um leito de partículas isotrópicas.

Neste trabalho é apresentada uma modelagem tridimensional do escoamento através de um leito empacotado de esferas. A validação da modelagem proposta é realizada através de comparação com dados experimentais do trabalho realizado por Cruz (2014), que estudou experimentalmente o escoamento através de um leito empacotado de caroços de açaí.

2 LEITO EMPACOTADO DE ESFERAS.

Um leito empacotado pode ser definido como uma matriz sólida fixa (ou quase fixa) com espaços vazios conectados através do qual um fluido possa fluir por meio deste, constituindo um meio poroso (Pop e Ingham, 2002).

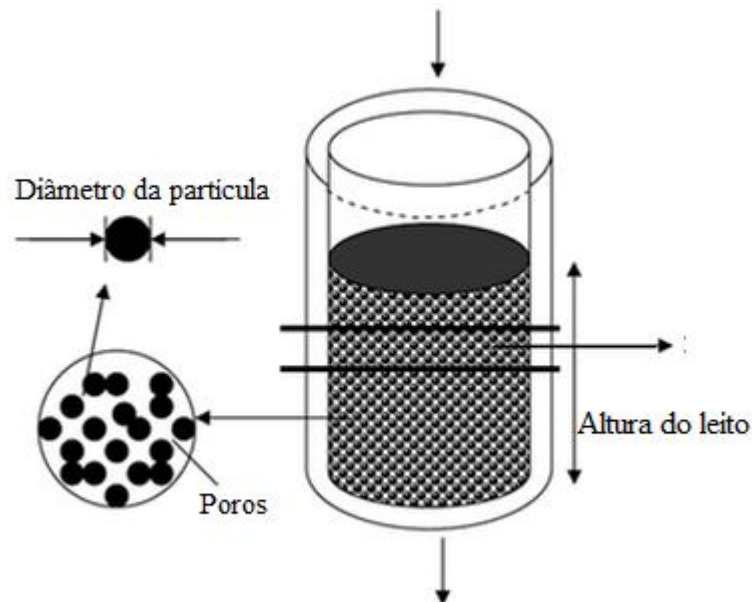


Figura 1. Esquemático de um leito empacotado (Asl e Khajenoori, 2004).

Estes espaços vazios, chamados de poros, possuem diferentes disposições, possibilitando a condição de não uniformidade nos caminhos em que o fluido percorre. A porosidade é a porcentagem de volume não ocupado pelas partículas, em relação a todo volume do leito. Na Fig. 2, a taxa de fluxo de fluido que atravessa a área A do leito é Q . A existência de poros dentro do leito reduz a área para escoamento do fluido. Para preservar a continuidade do fluxo de fluido com o fluxo que entra na área superficial do leito haverá um estreitamento das linhas de corrente após uma redução da área superficial, deste modo a velocidade (V_m) no interior do leito será maior que a superficial, também chamada velocidade de Darcy V_D .

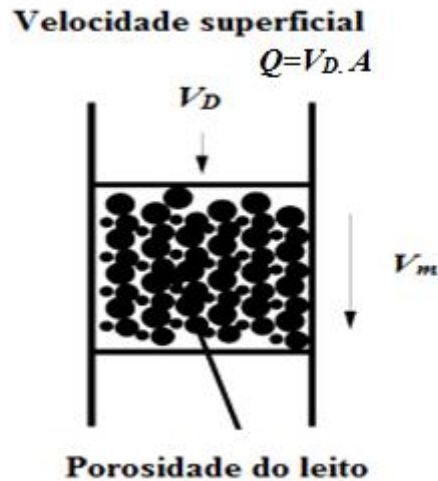


Figura 2. Esquemático sobre velocidade de Darcy e velocidade média intrínseca.

A velocidade de Darcy não é uma velocidade física, esta é uma velocidade superficial baseada na seção transversal completa do meio, não só na seção transversal do fluido. A velocidade de Darcy e a velocidade média intrínseca do fluido, V_m , estão relacionadas com a porosidade do leito (ε) da seguinte forma:

$$V_D = \varepsilon V_m \quad (1)$$

Um parâmetro de grande importância na avaliação de um escoamento interno a um meio poroso é a queda de pressão. Quando um fluido escoar de um ponto para outro no interior de um tubo, haverá sempre uma perda de carga, denominada queda de pressão. Esta perda de carga pode ser oriunda, por exemplo, do atrito do fluido com a superfície interna da parede do tubo. Portanto quanto maior for a rugosidade da parede da tubulação ou mais viscoso for o fluido, maior será a perda de carga (Cruz, 2014). A perda de carga será igual à queda de pressão se:

- O fluido for incompressível ($\rho = \text{constante}$);
- A área de entrada da seção for igual à área de saída ($A_1 = A_2$) e estiver na mesma altura ($Z_1 = Z_2$).

Desta forma sabendo que V_1 e V_2 são as velocidades na entrada e saída respectivamente e que o fluxo volumétrico na entrada deve ser igual ao da saída da seção:

$$V_1 A_1 = V_2 A_2 \quad (2)$$

Conseqüentemente V_1 é igual a V_2 . A partir da Equação de Bernoulli modificada, Eq. (3), infere-se que a perda de energia é igual à queda de pressão, Eq. (4):

$$P_1 - P_2 = \rho g (Z_1 - Z_2) + \frac{1}{2} \rho (V_1 - V_2) + h \quad (3)$$

$$P_1 - P_2 = h \tag{4}$$

2.1 Leito empacotado do trabalho de referência

O leito estudado por Cruz (2014) servirá de referência para o presente estudo. O leito possuía 0,15 m de diâmetro e comprimento do volume empacotado variável. A metodologia de estudo empregada por Cruz (2014) foi experimental. Foram realizadas coletas de dados de queda de pressão para a análise de perda de carga, antes de o escoamento incidir no leito e logo após o escoamento deixá-lo. Foram realizadas também diversas tomadas de pressão para diferentes comprimentos de leitos, descrevendo o processo conforme esta variação. Visando uma disponibilização de diferentes comprimentos de leito, foram montados pequenos leitos de comprimento equivalente a metade do diâmetro do tubo de PVC (0,075 m), sobrepostos e separados apenas por telas de aço, ou seja, a cada interposição do comprimento de leito foi colocado uma tela para a separação do leito. Partindo do tubo vazio, chegando a um total de sete leitos em função do diâmetro do tubo na razão de 0,5 D, como mostrado na Fig. 3, totalizando no final um comprimento de 0,525 m de leito.

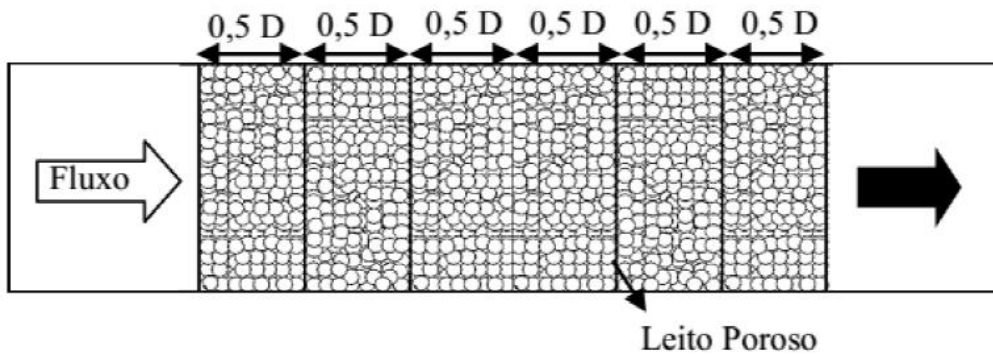


Figura 3. Leito poroso em estudo (Cruz, 2014).

A partir de uma amostra de 230 caroços, Cruz et al. (2010) aferiu o diâmetro médio do caroço de açaí, conforme indicado na Fig. 4. Os dados obtidos podem ser observados na Tabela 1. Após obter o diâmetro médio, obtido em função de cada direção, tirou-se uma média dos três diâmetros e o resultado foi um diâmetro de 1,03 cm, sendo este valor aproximado para 1,0 cm para o caso principal deste trabalho.

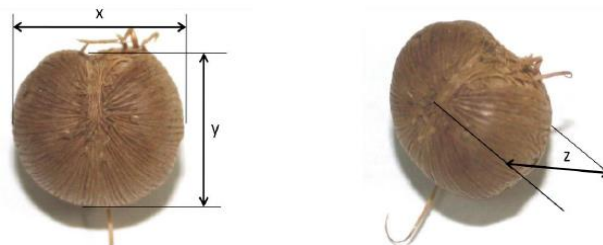


Figura 4. Direções adotadas para o diâmetro médio (Cruz et al., 2010).

Tabela 1. Valores dos diâmetros médios adotados.

Direções	X	Y	Z
Diâmetro médio (cm)	1,1554	0,9737	0,9649

Desvio Padrão (cm)	0,0684	0,0834	0,0644
--------------------	--------	--------	--------

3 METODOLOGIA DE SOLUÇÃO NUMÉRICA

Nesta parte do trabalho será apresentada a metodologia utilizada para construção e simulação do escoamento através do leito empacotado de esferas.

3.1 Equações governantes

Para a análise do escoamento, são utilizadas equações que governam o problema físico: Equações de Conservação de Massa e de Quantidade de Movimento.

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \vec{v}) = 0 \quad (5)$$

Onde ρ é a densidade e \vec{v} é o vetor velocidade.

A Eq. (5) é a forma geral da equação da conservação de massa, válida para escoamentos compressíveis e incompressíveis. A Equação de Conservação de Massa, ou Equação da Continuidade, corresponde à soma da “taxa de variação de massa dentro de um volume de controle” e do “fluxo de massa que cruza a superfície de controle” igual à zero. No caso de escoamento incompressível, a densidade não é uma função do tempo ou do espaço, assim sendo, $\partial \rho / \partial t \cong 0$. No segundo termo do lado esquerdo pode-se retirar o ρ (constante) do operador divergente. Assim a Eq. (5) reduz-se a:

$$\nabla \cdot (\vec{v}) = 0 \quad (6)$$

Já a Equação da Conservação da Quantidade de Movimento é expressa da seguinte forma:

$$\rho \frac{\partial \vec{v}}{\partial t} = -\nabla P + \mu \nabla^2 \vec{v} + \rho \vec{g} \quad (7)$$

O significado de cada termo da Eq.(7) é dado como segue: primeiro termo é a variação da quantidade de movimento que também pode ser entendido como a força por unidade de volume de uma partícula infinitesimal visto que é o produto da densidade pela aceleração material; o segundo e terceiro termos referem-se às forças de superfície que atuam no volume de controle infinitesimal, eles representam a ação das forças resultantes do tensor das tensões no fluido que está subdividido em duas partes: uma resultante do campo de pressões e outra devido às deformações dada pelo campo de velocidades; finalmente o quarto termo representa a força de campo gravitacional por unidade de volume (Fox et al., 2014).

3.2 Código de simulação

Neste trabalho o código comercial de fluidodinâmica computacional *Fluent* foi utilizado para simulação do escoamento. Para calcular o campo de escoamento, o código utiliza uma técnica numérica baseada em volumes de controle, aos quais se aplica o princípio de conservação de uma determinada grandeza escalar, ou seja, o código resolve as equações

governantes do escoamento para cada volume finito. As equações discretizadas são obtidas integrando a equação governante sobre cada um dos volumes de controle no domínio.

Segundo Carcangiu (2008), o método dos volumes finitos consiste na:

- Divisão do domínio computacional em uma malha composta por volumes de controle discretos.
- Integração das equações governantes sobre cada volume de controle resultando em equações que contém variáveis discretas como: velocidade, pressão, temperatura e etc.
- Linearização das equações discretizadas e solução do sistema de equações lineares.

Os valores das variáveis são armazenados no centro dos volumes de controle. Nas faces desses volumes os valores das variáveis discretas são expressos por meio de funções de interpolação (Patankar, 1980).

3.3 Escolha do tipo de arranjo do leito empacotado

No trabalho de Cruz (2014) é difícil definir a disposição de esferas ao longo de todo leito empacotado. Porém, para a simulação numérica é necessário definir um tipo arranjo para geração da geometria do leito e isto deve ser realizado minimizando a complexidade de todo desenvolvimento geométrico, desta forma, selecionou-se três tipos de arranjos para geração do leito empacotado, apresentados na Fig. 5. Cada arranjo é formado por unidades básicas e repetitivas chamadas células unitárias, que possuem características próprias:

- **Cúbica de Face Centrada (CFC).** No arranjo CFC há um oitavo de esfera em cada vértice e metade de uma esfera no centro de cada face do cubo. Em cada célula há quatro esferas e porosidade igual a 0,26. Neste tipo de célula a aresta L do cubo possui $2\sqrt{2}$ vezes o raio R da esfera.
- **Cúbica simples (CS).** Neste tipo de empacotamento há um oitavo de cada esfera em cada vértice do cubo, ou seja, a célula aloca um átomo. A aresta L do cubo possui duas vezes o raio R da esfera e porosidade igual a 0,48.
- **Cúbica de Corpo Centrado (CCC).** O arranjo CCC possui 1/8 de esfera em cada vértice e uma esfera no centro do cubo. Em cada célula há duas esferas. Neste tipo de célula a aresta L do cubo possui $4/\sqrt{3}$ vezes o raio R da esfera e porosidade igual a 0,32.

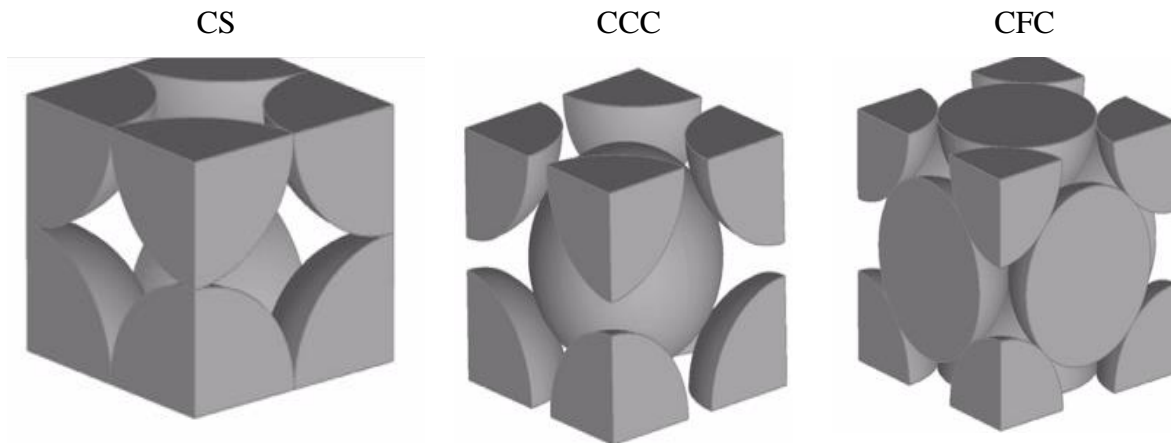


Figura 5. Geometrias CS, CCC, CFC respectivamente (Bu et al., 2014).

Cruz (2014) mediu como a porosidade do leito variava com seu comprimento, o resultado da medida é apresentado na Fig. 6. Como se pode verificar a porosidade se estabiliza em 0,5 à medida que o comprimento de leito aumentava. Com base na porosidade medida experimental por Cruz (2014), decidiu-se utilizar o arranjo que possuísse porosidade similar. Assim, o arranjo escolhido foi o cúbico simples.

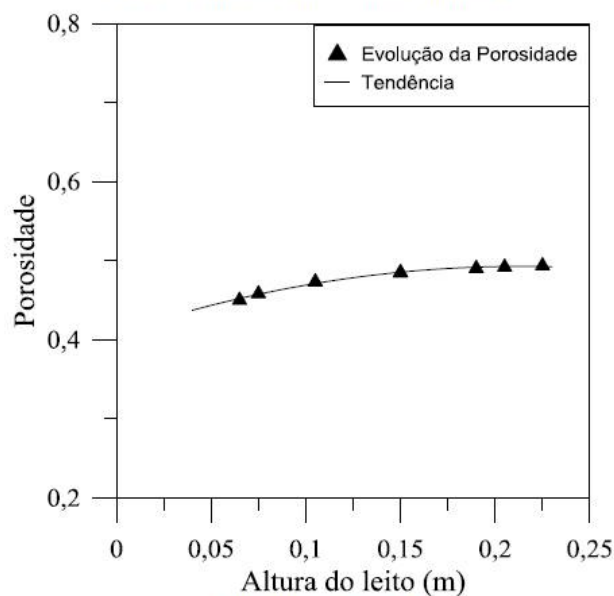


Figura 6. Comportamento da porosidade de acordo com a variação da altura do leito (Cruz, 2014).

3.4 Escolha do tipo de contato entre as esferas

O ponto de contato entre os materiais de empacotamentos é uma região importante, devido a grande dificuldade que existe em gerar malhas computacionais de alta qualidade nesses pontos (entre partículas ou entre a parede e partícula) (Bezerra, 2015). A geometria da malha próxima dos pontos de contato pode ser distorcida, o que pode levar a problemas de convergência e de simulação computacional afetando a precisão. Para diminuir esse efeito, foram avaliados quatro métodos que visam alterar os pontos de contato: lacunas

(encolhimento das partículas), área de sobreposição (aumento da partícula), pontes (pontes cilíndricas) e bonés (remoção de uma capa da esfera).

De acordo com Dixon et al. (2013) os métodos de lacunas e sobreposições mudariam a porosidade do leito, afetando de forma negativa nos resultados das simulações. Já os métodos de pontes e bonés fariam pequenos desvios na porosidade gerando simulações melhores, como consequência gerariam melhores resultados de queda de pressão. Adicionalmente, comparando os métodos de pontes e bonés, Dixon et al. (2013) afirma que o método de pontes representa melhor o contato entre partículas e partícula-parede para queda de pressão. A dimensão do diâmetro da ponte deve ser entre 16% a 20% do diâmetro da partícula, pois diâmetros menores resultam em queda de pressão maiores em relação a dados experimentais (Bu et al., 2014). Assim, com base no exposto acima, no presente trabalho o método de contato ponte foi escolhido, com diâmetro de ponte de 16% do diâmetro.

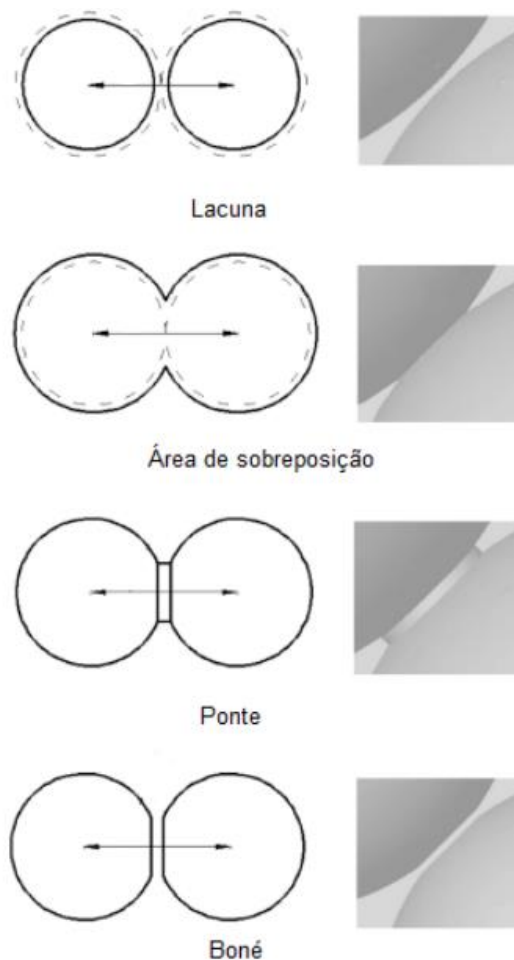


Figura 7. Quatro métodos analisados para a modificação do contato (Bu et al. , 2014).

3.5 Geração das malhas.

A construção das geometrias se baseou no trabalho de Bezerra (2014), a partir das construções utilizando células CS com contato tipo ponte, ajustes foram feitos no trabalho de Bezerra (2014) a fim de que fossem obtidas as geometrias desejadas. A Tabela 2 apresenta as dimensões da célula CS utilizada como base.

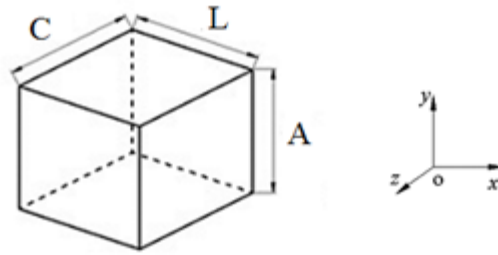


Figura 8. Dimensões da célula.

Tabela 2. Dimensões da célula unitária CS.

$L(x)$	$C(z)$	$A(y)$	ε	p
1 cm	1 cm	1 cm	0,48	0,16 cm

Para a realização das simulações verificou-se que a geração de uma malha do domínio completo, apresentada na Fig. 2, demandaria custo computacional, então para tornar a tarefa possível de ser executada em um computador pessoal, somente parte do domínio foi considerado. Simetria e periodicidade do domínio também foram adotadas. Dois casos foram analisados: o primeiro considerando um setor de um oitavo de todo leito, disposto em CS, conforme figura abaixo, e o um segundo considerando uma única célula unitária CS.

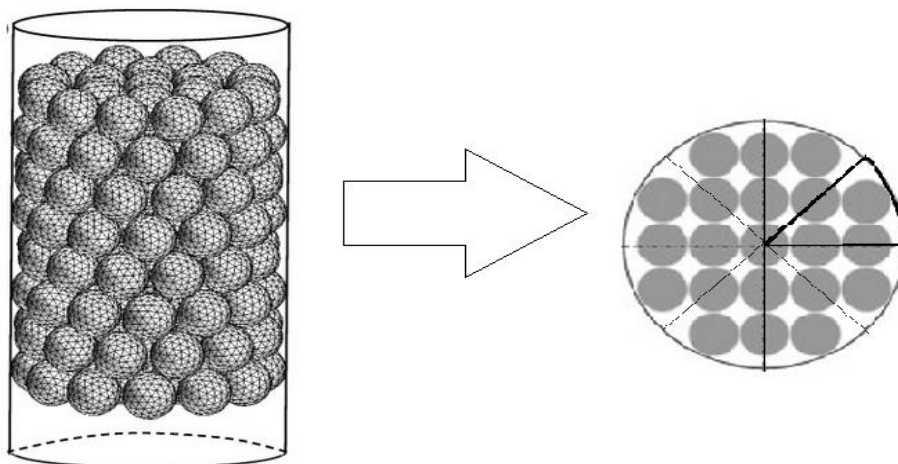


Figura 9. Vista frontal do leito considerado e vista superior do setor analisado.

Para ambos os casos as esferas foram representadas com dimensão próxima ao do caroço de açaí, com raio igual a 0,5 cm. Para que a condição de periodicidade pudesse ser imposta no Fluent foi necessário usar o comando *link edges* existente no *Gambit*, conectando os nós associados às áreas de entrada e saída de massa. O domínio de cálculo foi gerado com a altura de um único caroço, tendo em vista a condição de periodicidade na direção do escoamento considerada. As duas malhas foram geradas com elementos tetraédricos de tamanho aproximado de 0,025 m.

A malha com setor de um oitavo do leito ficou com 1298437 volumes e a malha de célula única ficou com 291504 volumes. As malhas podem ser vistas nas Fig. 10 e Fig. 11.

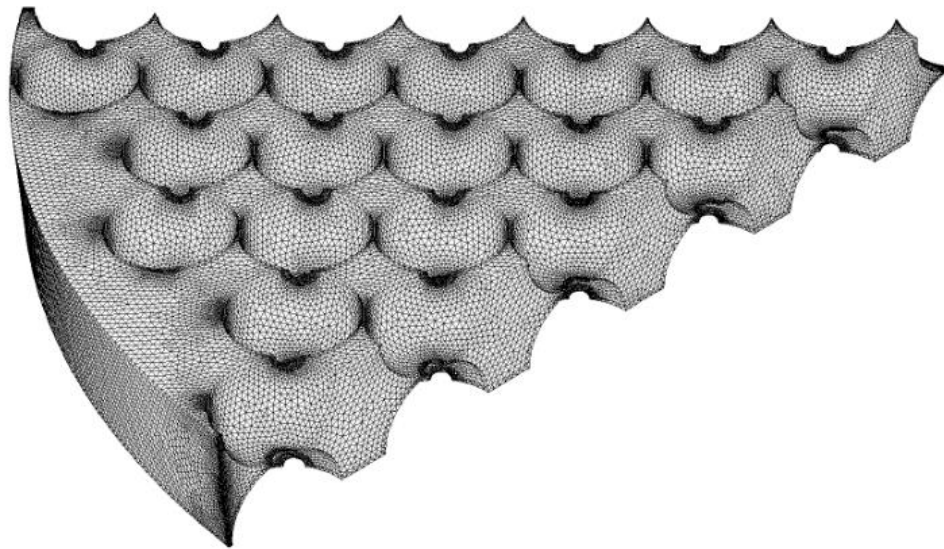


Figura 10. Malha com setor de oitavo do leito e 1298437 volumes.

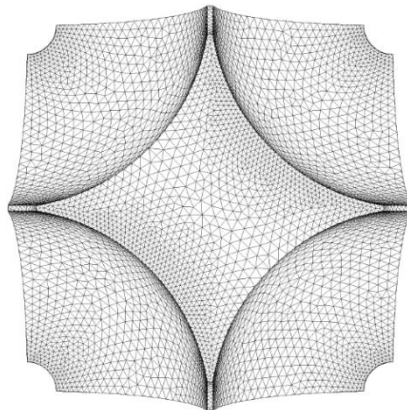


Figura 11. Malha do caso de célula única CS, 291504 volumes.

3.6 Condições de contorno do escoamento

As seguintes condições de contorno foram impostas:

- Não deslizamento nas superfícies das paredes sólidas: $u = v = w = 0$.
- Simetria, que consiste em gradiente e fluxo de massa no contorno.

O escoamento foi tratado como sendo periódico, ou seja, os padrões da geometria física analisada e do fluxo de ar se repetem periodicamente. Ao assumir a periodicidade do escoamento considera-se que as componentes do vetor velocidade v (v_x , v_y , v_z) se repetem ao longo do espaço:

$$v_x(\vec{r}) = v_x(\vec{r} + \vec{L}) = v_x(\vec{r} + 2\vec{L}) = \dots \quad (8)$$

$$v_y(\bar{r}) = v_y(\bar{r} + \bar{L}) = v_y(\bar{r} + 2\bar{L}) = \dots \quad (9)$$

$$v_z(\bar{r}) = v_z(\bar{r} + \bar{L}) = v_z(\bar{r} + 2\bar{L}) = \dots \quad (10)$$

Onde \bar{r} é o vetor posição e \bar{L} é o vetor de comprimento periódico do domínio considerado.

Já a pressão não é periódica, como acontece para a velocidade nas Eqs. (8), (9) e (10), mas a queda de pressão pode ser considerada periódica. Desta forma o *Fluent* analisa o escoamento periódico.

$$p = p(\bar{r}) - p(\bar{r} + \bar{L}) = p(\bar{r} + \bar{L}) - p(\bar{r} + 2\bar{L}) = \dots \quad (11)$$

Assim definiu-se como tipo de condição periódica o gradiente de pressão (Pa/m) ao longo do escoamento.

3.7 Cálculo da velocidade média

O cálculo da velocidade média foi realizado de acordo com a Eq. (12).

$$V_m = \frac{1}{\Delta V_f} \int_{V_f} v \cdot dV \quad (12)$$

Onde V_f é o volume de fluido contido em um volume elementar representativo (ΔV).

A integral apresentada na Eq. (12) é resolvida numericamente pelo *Fluent*.

3.8 Ajustes do Código de Simulação Fluent

Para as simulações o *Fluent* foi utilizado em uma versão 3ddp (*three dimensional double precision*), ou seja, foi especificada a dimensão do problema proposto (3D) e o tipo de precisão requerida, neste caso uma precisão dupla. Foi escolhido o modelo de escoamento laminar em regime permanente, neste caso o *Fluent* resolve as equações da conservação de massa e de quantidade de movimento sem os termos de transientes e de forma iterativa.

Optou-se por utilizar o modo de solução segregada de equações, que consumia menos memória para as simulações que o método de solução acoplada das equações. Assim, o método para resolver as equações que descrevem o escoamento foi o SIMPLE (*Semi-Implicit Method for Pressure-Linked Equations*). O SIMPLE utiliza uma relação entre a velocidade e correções da pressão para reforçar a conservação de massa e obter o campo da pressão.

Um esquema de segunda ordem *upwind* foi utilizado nas equações de conservação de quantidade de movimento. O esquema de segunda ordem é necessário nas equações citadas para minimizar a chamada difusão numérica, que é inerente ao esquema de discretização utilizado. O esquema *upwind* gera difusão numérica, o que é ruim, porém oscilações numéricas são evitadas. O esquema de interpolação PRESTO (*PREssure STaggering Option*) foi utilizado na equação da pressão.

O critério de convergência adotado foi que os resíduos normalizados deveriam ser menores que 10^{-5} .

4 RESULTADOS E ANÁLISES

Nesta parte do trabalho serão apresentados os resultados obtidos através de simulação numérica do escoamento através do leito empacotado de esferas. Uma simulação para cada gradiente de pressão medido experimentalmente por Cruz (2014) foi realizada.

Para os dois casos simulados foram adotados as seguintes condições:

- Não há transferência de calor durante o processo.
- O escoamento é laminar e em regime permanente.
- As diferenças de pressão por unidade de comprimento são utilizadas como dados de entrada.
- As propriedades são avaliadas a uma temperatura de 298 K.

Os valores de velocidade média calculados para cada gradiente de pressão ajustado são apresentados nas Tab. (3) e Tab. (4).

Tabela 3. Valores de velocidade média obtidos para uma célula CS.

$\Delta P / \Delta L (kPa/m)$	$V_m (m/s)$
1,0	3,501
0,5	2,367
0,25	1,540
0,125	0,993
0,0625	0,692
0,022	0,301

Tabela 4. Valores de velocidade média obtidos para um oitavo de leito.

$\Delta P / \Delta L (kPa/m)$	$V_m (m/s)$
1,0	4,58
0,5	3,24
0,125	1,58
0,005	0,28

Os resultados também são apresentados de forma gráfica nas Fig. 12 e 13. Foram considerados os dados experimentais para os leitos de comprimento de 1,5 D e 3,5 D, sendo D igual ao diâmetro do leito, 0,15 m.

Para os leitos simulados considera-se um comprimento infinito, produto da condição de periodicidade do escoamento. Valores de queda de pressão estão expressos em unidades de pressão por unidade de comprimento (kPa/m).

Com relação aos resultados de queda de pressão apresentados na Fig. 12, que considera uma célula única cúbica, é possível verificar certa concordância qualitativa entre os valores medidos e simulados.

Por considerar que o leito é infinito, a curva simulada deveria estar à direita de todos os dados experimentais, o que não acontece. O leito simulado é mais permeável que o leito real, o que não deveria ter ocorrido, pois a porosidade deste caso foi de 0,48, sendo um valor menor que o medido experimentalmente, que ficou em torno de 0,5. Sabe-se que quanto mais poroso é o leito, menor é a resistência que o fluido encontrará para escoar, gastando menos energia ao longo do comprimento. Conclui-se, portanto, que representar o leito por uma única célula que se repete periodicamente não é uma representação adequada do leito empacotado do trabalho de Cruz (2014). Se o diâmetro do leito experimental fosse muito maior que o diâmetro das esferas do leito, a aproximação de célula única poderia ser melhor sucedida.

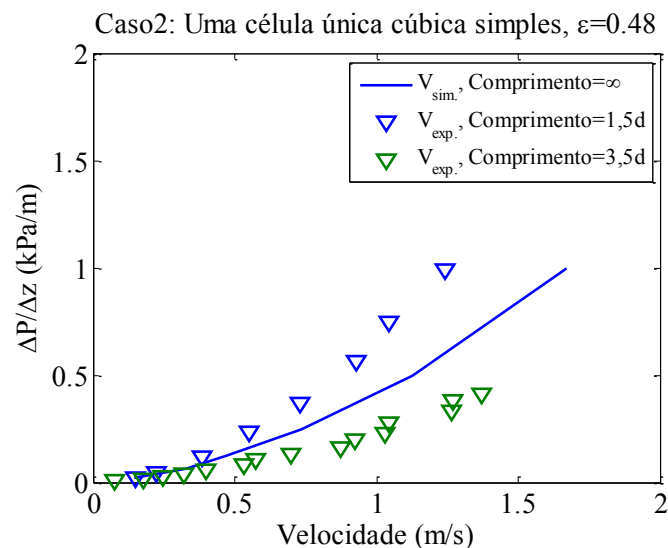


Figura 12. Velocidade versus gradiente de pressão.

Os resultados considerando um oitavo de leito são apresentados na Fig. 19. Estes se aproximaram mais dos dados experimentais. Neste caso o leito simulado é menos permeável que o leito experimental, isto reflete exatamente o que se esperava de um leito de comprimento maior que o experimental. O leito da simulação representa um leito empacotado de comprimento infinito. Se o leito experimental fosse maior talvez a concordância pudesse ser ainda melhor entre o experimental e o simulado. Assim, o domínio de um oitavo representa bem melhor o escoamento através de um leito empacotado de esferas.

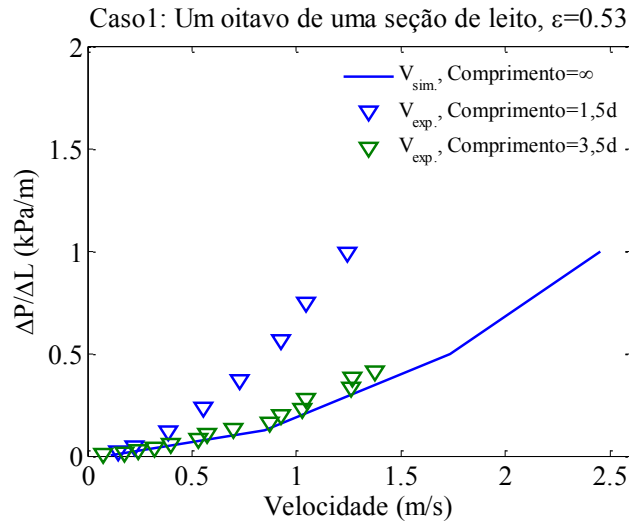


Figura 13. Velocidade versus gradiente de pressão.

Pode-se observar o comportamento do escoamento através dos campos de velocidade e de pressão, ao longo de toda célula unitária nas Fig. 14, 15, 16, 17 e 18. Para geração destas figuras foi criado um plano xy cortando o volume ao meio. Nota-se o comportamento do escoamento à montante e à jusante da variação de área existente no centro da célula. Quando o fluido percorre a região central da célula, o aumento da área induz zonas de recirculações que se acentuam com o aumento do gradiente de pressão, tais recirculações estão diretamente associadas à perda de energia do escoamento dentro da célula. Observa-se que as velocidades no interior da célula unitária nas Fig. 14 e Fig. 15 apresentam comportamentos semelhantes, porém com o aumento da pressão na Fig.16 a recirculação de ar se intensifica e ocasiona um aumento considerável da velocidade nos contornos de velocidade mostrados.

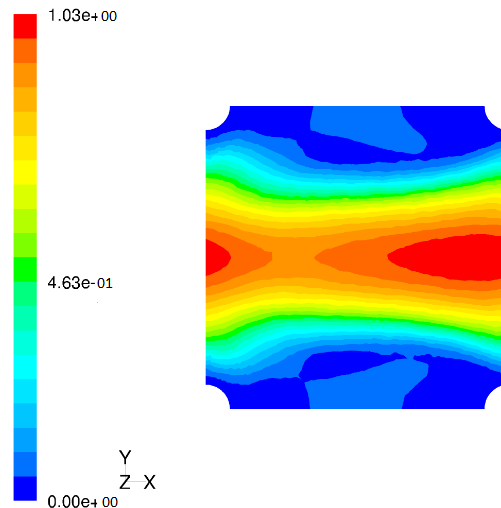


Figura 14. Contornos de velocidade m/s para um gradiente de pressão de 22 Pa/m.

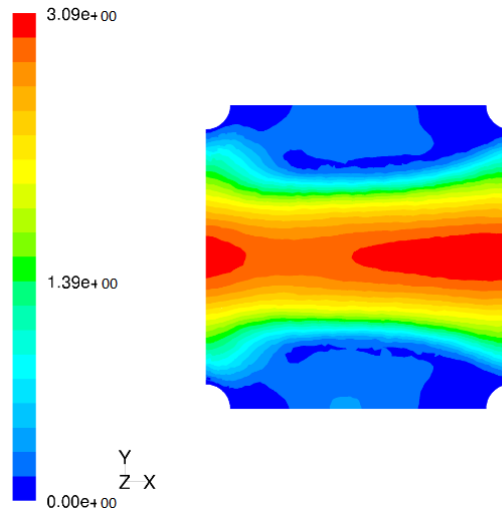


Figura 15. Contornos de velocidade m/s para um gradiente de pressão de 100 Pa/m.

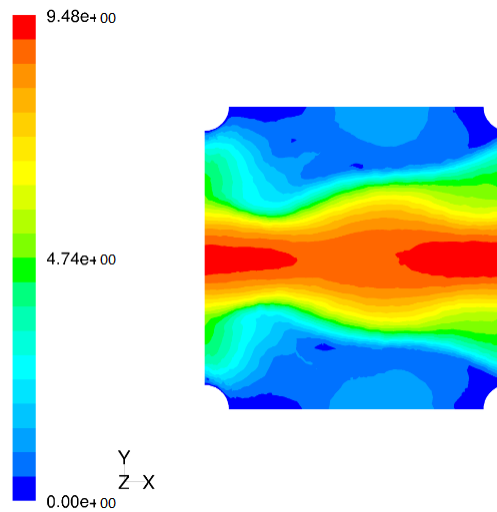


Figura 16. Contornos de velocidade m/s para um gradiente de pressão de 125 Pa/m.

Na Fig. 17 é apresentada uma aproximação da zona de recirculação. À medida que a velocidade do escoamento aumenta percebe-se o aumento dessas zonas.

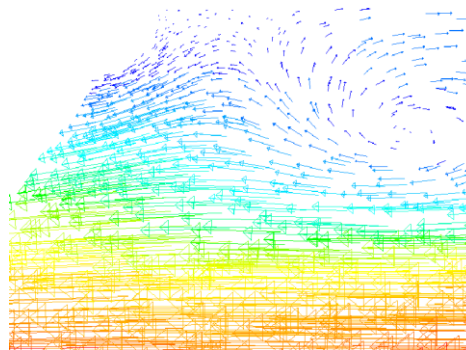


Figura 17. Zoom na zona de recirculação indicada pelos vetores de azul.

Na Fig. 18 percebem-se os intensos gradientes de pressão nas regiões de contato entre as esferas.

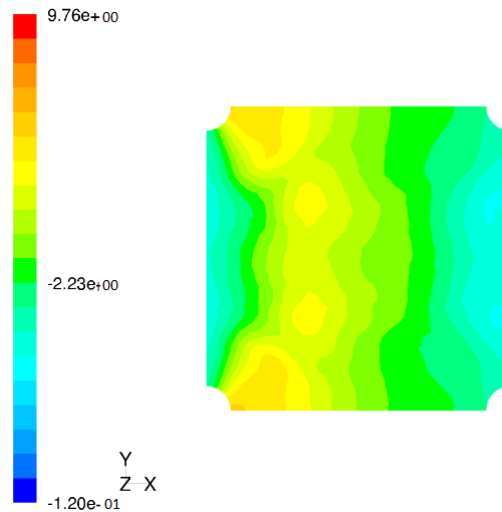


Figura 18. Contorno de pressão em Pa para a célula CS.

Para o caso do setor de um oitavo foram observadas algumas diferenças. Observou-se um aumento de velocidade na região próxima da parede devido à existência de vazios em tal região, como se pode perceber nas Fig. 19 e 20. Não foi possível preencher todos os espaços nesta configuração. O escoamento longe da parede apresenta um padrão similar ao já discutido para a célula única. Os resultados de simulação indicaram que esta configuração deve ser a que melhor representa o escoamento através do leito empacotado.

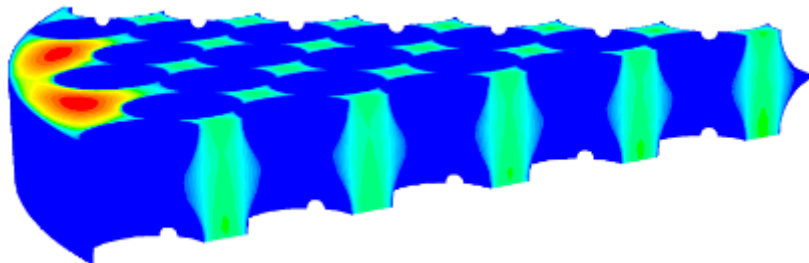


Figura 19. Vista lateral do contorno de velocidade para o setor de um oitavo.

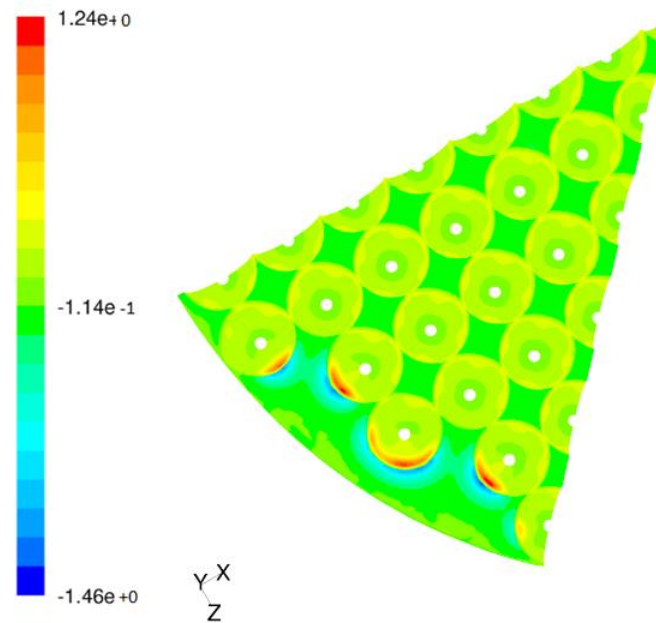


Figura 20. Contorno de pressão em Pa para o setor de um oitavo.

5 CONCLUSÃO.

Neste trabalho foi apresentada uma modelagem do escoamento através de um leito empacotado de esferas. Foi apresentada uma revisão sobre o assunto e o leito empacotado foi devidamente descrito. Na parte de modelagem foram apresentadas as equações que descrevem o escoamento de um fluido, as técnicas utilizadas para a resolução do escoamento e uma breve explicação acerca da geometria e das malhas geradas pelo *Gambit*.

Foi apresentado o caso de estudo, definindo qual o problema que deveria ser solucionado. A resolução do caso se baseou na escolha do tipo de célula, bem como da metodologia utilizada para a geração das malhas e a obtenção dos resultados de queda de pressão, para as duas situações propostas, célula única CS e o um oitavo de setor considerado.

O leito representado com uma única célula CS não aproximou bem as velocidades medidas experimentalmente. Foi verificado que leito empacotado era mais permeável que o leito real, o que não deveria ter ocorrido, pois a porosidade deste caso foi de 0,48, o que é um valor menor do que o medido experimentalmente, que ficou em torno de 0,5. O que se conclui é que representar o leito empacotado do trabalho de Cruz (2014) por uma única célula que se repete periodicamente não é uma representação muito precisa.

Os resultados obtidos com um oitavo de leito se aproximaram mais dos dados experimentais. O leito simulado foi menos permeável que o leito experimental, que era exatamente o que se esperava, pois, o leito simulado representava um leito de comprimento infinito. Se o leito experimental fosse maior talvez a concordância fosse ainda melhor entre o experimental e o simulado. De tal modo, o domínio de um oitavo representou bem melhor o que ocorreu realmente através do leito empacotado de Cruz (2014).

REFERÊNCIAS

- Ansys. 2009. Ansys Fluent 13.0 theory guide. ansys, Inc. Canonsburg.
- Asl, Haghghi, A. Khajenoori, M., 2004. Subcritical Water extraction. School of Chemical Gas and Petroleum Engineering, Semnan University, Semnan, I.R., Iran.
- Bezerra, A., M. B., 2014. *Rotina Computacional na Linguagem do Software Gambit para a Geração da Geometria e da Malha de um Leito de Carvão de Açai*. Trabalho de Conclusão de Curso- Universidade de Brasília ,Faculdade do Gama, Brasília.
- Carcangiu, C. E., 2008. *CFD-RANS Study of Horizontal Axis Wind Turbines*. PhD Thesis, Università degli Studi di Cagliari, Itália.
- Comiti, J., Renaud, M., 1989. A new model for determining mean structure parameters of fixed beds from pressure drop measurements: application to beds packed with parallelepipedal particles. Chemical Engineering Science, Amsterdam.
- Cruz, B. M., 2014. *Determinação de formulação semi-empírica para perda de carga em escoamento em leito fixo poroso composto por biomassa amazônica*. Trabalho de Conclusão de Curso- Instituto de Tecnologia, Universidade Federal do Pará, Belém.
- Dixon, A.G., Nijemeisland, M., Stitt, E.H., 2013. Systematic mesh development for 3D CFD simulation of fixed beds: contact points study.
- Eppinger, T., Seidler, K. & Kraume, M., 2010. DEM-CFD simulations of fixed bed reactors with small tube to particle diameter ratios. *Chemical Engineering Journal*.
- Fox, Robert W. , Pritchard, Philip J. , McDonald Alan T.C., 2014. *Introdução à Mecânica Dos Fluidos*, 8ª Ed.
- Ingham, Derek B., Pop, Ioan., 2002. Transport Phenomena in porous media II. Oxford, Elsevier.
- Keyser M. J., Conradie M. , Coertzen M. , Van Dyk J. C., 2006. Effect of coal particle size distribution on packed bed pressure drop and gas flow distribution. Sasol technology South Africa.
- Louw A. D.R., Nel R. G., Gauche P., 2013. A dem-cfd approach to predict the pressure drop through an air-rock bed thermal energy storage system. Solar Thermal Energy Research Group- Centre for Renewable and Sustainable Energy Studies.
- Patankar, S., 1980. *Numerical Heat Transfer and Fluid Flow*. McGraw-Hill, New York.
- S.S.Bu; J.Yang; M.Zhou; S.Y.Li; Q.W.Wang; Z.X.Guo., 2014. On contact point modifications for forced convective heat transfer analysis in a structured packed bed of spheres- Department of Mechanical and Aerospace Engineering Rutgers, The State University of New Jersey.