

Evento: XXV Jornada de Pesquisa
ODS: 2 - Fome zero e agricultura sustentável

ANÁLISE COMPARATIVA DOS MODELOS KHATCHATOURIAN E DARCY-FORCHHEIMER DO FLUXO DE AR EM ARMAZÉNS GRANELEIROS ¹

COMPARATIVE ANALYSIS OF THE KHATCHATOURIAN AND DARCY-FORCHHEIMER MODELS OF AIR FLOW IN BULK WAREHOUSES

Kael Barreto e Souza², Manuel Osorio Binelo³

¹ Dissertação em andamento sendo realizada no curso de Modelagem Matemática da UNIJUI

² Aluno do curso de Mestrado em Modelagem Matemática da UNIJUI

³ Professor do programa de pós graduação em Modelagem Matemática da UNIJUI

Resumo

A produção de grãos representa uma parte significativa da economia do Brasil, logo estudos na área tornam-se relevantes. O estudo tem por objetivo a realização de uma análise comparativa entre o modelo Khatchatourian, criado com o objetivo de compreender o fluxo de ar em massas de grãos e o modelo Darcy-Forchheimer, utilizado para compreensão do fluxo de ar em meios porosos, utilizado por padrão pelo software OpenFOAM. Essa análise busca verificar se as simulações o modelo Darcy-Forchheimer se aproximam de dados experimentais assim como resultados obtidos por simulações realizadas com Khatchatourian.

Abstract

Grain production represents an important part of Brazil's economy, so studies in the area become relevant. The study aims to perform a comparative analysis between the Khatchatourian model, created with the objective of understanding the air flow in grain masses and the Darcy-Forchheimer model, used to perform the air flow in porous media, used by default by OpenFOAM software. This analysis seeks to verify how simulations or the Darcy-Forchheimer model approach experimental data as results obtained by simulations performed with Khatchatourian.

Palavras-chave: Armazenagem de grãos, Aeração, CFD, OpenFOAM

Keywords: Grain storage, Aeration, CFD, OpenFOAM

INTRODUÇÃO

Os objetivos de desenvolvimento sustentável (ODS) são uma série de objetivos globais estabelecidos pela assembleia geral das nações unidas e são parte da Resolução 70/1: "Transformando o nosso mundo: a Agenda 2030 para o Desenvolvimento Sustentável". Como citado por Giannetti et al. (2020), o objetivo dos ODS é superar as deficiências da integração entre políticas,

Evento: XXV Jornada de Pesquisa

ODS: 2 - Fome zero e agricultura sustentável

estratégias e aplicações que foram percebidas como desvantagens-chave dos esforços anteriores em direção ao desenvolvimento sustentável. O segundo dos ODS, “Fome zero e agricultura sustentável” engloba o fim da fome, a busca da segurança alimentar, melhoria da nutrição e estabelecimento de agricultura sustentável. Segurança Alimentar, segundo Meijl et al (2020) consiste de quatro dimensões principais: disponibilidade (ou seja, quantidades suficientes de alimentos), acesso (ou seja, recursos adequados para obter alimentos), utilização (ou seja, dietas nutritivas e seguras e água limpa) e estabilidade (ou seja, o aspecto temporal das outras três dimensões). Estudos de otimização de armazenamento se enquadram no campo de disponibilidade, tornando estudos na área relevantes, uma vez que, segundo Giannetti et al. (2020), uma das responsabilidades da comunidade científica é a utilização da pesquisa como um caminho construtivo para promover a sustentabilidade.

A produção de grãos representa uma grande parte da economia do Brasil, segundo Mentges (2019) a produção de grãos conseguiu em 2017 quebrar um ciclo de 8 trimestres consecutivos de registros negativos no produto interno bruto (PIB) graças ao fato de que o PIB da agropecuária teve um crescimento de 13,4%, provocando uma alta de 1% na economia brasileira. Segundo a Companhia Nacional de Abastecimento (CONAB) a estimativa da produção de grãos para a safra de 2018/2019 com uma produção de 233,3 milhões de toneladas com um crescimento entre 2,5% e 5,6% comparado a safra anterior. Observando esses dados pode-se notar que a produção agrícola possui um papel importante na economia do país, logo estudos com objetivo de trazer melhorias para a área tornam-se relevantes.

No Brasil a produção de soja acontece em duas épocas do ano, este processo de produção é dividido em diversas etapas começando com o planejamento agrícola que inclui fatores como o estudo detalhado do mercado de commodities e custos, gerenciamento de equipamentos e compra dos insumos necessários para cada cultura. Uma vez realizado o planejamento realiza-se o preparo, semeadura, manejo, plantio e colheita do produto. Como apontado por Portela e Eichelberger (2001) após a realização da colheita, devido a fatores como variações no mercado e a imprevisibilidade da produção da próxima safra torna-se necessário o armazenamento de grãos por um grande período de tempo, porém grande parte dos grãos não apresenta características próprias para a armazenagem, logo torna-se necessário a utilização de processos pós-colheita para então tornar possível a armazenagem dos grãos por um longo período. Como apontado por Faoro (2014) os grãos são seres vivos logo respiram, liberam gás carbônico (CO₂), água (H₂O) e calor, e de acordo com a umidade dos locais que são armazenados, seus processos biológicos podem ocorrer de formas mais ou menos intensa. Esses fatores acabam tornando a maneira em que os grãos são armazenados e mantidos extremamente importantes durante o período de pós-colheita e de armazenamento.

Uma vez realizados os processos de pós-colheita o grão é então enviado para o armazenamento. Segundo Paturca (2014) o armazenamento, tanto no período de safra quanto no período entressafra, é uma parte vital e indispensável do setor agrícola, uma vez que sua função é receber a produção, conservá-la em condições físicas, químicas e biológicas ideais para então ser redistribuída para os consumidores. O armazenamento ocorre de duas formas diferentes, em armazéns graneleiros ou em diferentes tipos de silos. Os dois tipos de silos mais utilizados são os silos de concreto e os silos metálicos, os silos de concreto são depósitos para médias e grandes capacidades, estes silos possuem paredes espessas para evitar a transmissão de calor para a massa de grãos, proporcionando uma melhor conservação possibilitando um tempo maior de armazenagem, porém possuem um alto custo de instalação, manutenção e tempo de instalação, também possui uma alta incidência de quebra de grão devido a altura do silo. O segundo tipo de silo, mais utilizado, é o silo metálico, os silos

Evento: XXV Jornada de Pesquisa

ODS: 2 - Fome zero e agricultura sustentável

metálicos são depósitos de pequena e média capacidades compostos por chapas lisas ou corrugadas montados sobre um piso de concreto com paredes de ferro galvanizado ou alumínio, comparado aos silos de concreto os silos metálicos possuem fundações mais simples, também possuem menor custo de construção e manutenção, porém silos metálicos possuem algumas desvantagens como estarem sujeitos à infiltração de umidade e vazamento de gases durante o processo de expurgo, também pode ocorrer transferência de calor para dentro da célula que acaba causando condensação. Por fim existem os armazéns graneleiros, os quais são o foco deste estudo, os armazéns são compostos por uma estrutura bastante simplificada quando comparados aos silos, suas vantagens são a grande capacidade de armazenamento e o baixo custo, porém os armazéns são muito propensos à infiltração de água e possuem dificuldade no processo de aeração quando comparados aos silos.

O processo de aeração é utilizado durante o armazenamento para garantir que os grãos permaneçam em um estado ideal, isso pode envolver o resfriamento de pontos aquecidos na massa de grãos, uniformizar sua temperatura, prevenir o aquecimento, regular a umidade da massa de grãos, inibir a atividade de insetos, entre outros, todos com objetivo final de preservar a qualidade do grão. Devido a importância do processo de aeração para o armazenamento de grãos tornam-se importantes estudo a seu respeito.

Uma vez que a massa de grãos é um meio poroso torna-se necessária a utilização de modelos matemáticos especializados para conseguir-se compreender a comportamento do fluxo de ar em armazéns graneleiros. Dentro dos modelos disponíveis este trabalho é focado nos modelos Khatchatourian, utilizado por padrão em trabalhos do grupo de pesquisa de matemática aplicada computacional da Universidade Regional do Noroeste do Estado do Rio Grande do Sul (UNIJUI) e o modelo Darcy-Forchheimer, modelo utilizado pelo software livre OpenFOAM para a simulação do fluxo de ar em meios porosos.

MATERIAIS E MÉTODOS

Modelo Khatchatourian

O modelo de Khatchatourian foi criado com o objetivo específico de simular o fluxo de ar na massa de grãos tais como soja, milho, trigo, arroz, entre outros. O modelo criado por Khatchatourian e Savicky (2004) foi criado inicialmente para representar o fluxo de ar na massa de grãos apenas em casos bidimensionais, mais tarde foi expandido por Khatchatourian e Binelo (2008) para ser aplicado em casos tridimensionais. O modelo foi proposto devido ao fato do fluxo de ar apresentar domínios de fluxo laminar, turbulento e transitório de acordo com a disposição dos grãos, o formato do armazém e o posicionamento dos secadores. O modelo foi utilizado em diversas pesquisas a respeito do fluxo de ar em massas de grãos.

Binelo et al. (2019) simularam a distribuição do fluxo de ar 3D em armazéns durante o processo de aeração sob condições não homogêneas e anisotrópicas, Khatchatourian e Binelo (2008) pesquisaram sobre a compactação do grão e o padrão do fluxo de ar em condições não homogêneas, foram estudados a variação da compactação dos grãos de acordo com a sua profundidade assim

Evento: XXV Jornada de Pesquisa

ODS: 2 - Fome zero e agricultura sustentável

como a relação da compactação dos grãos com a velocidade do ar e o gradiente de compactação, Khatchatourian et al. (2016) realizaram um estudo sobre a simulação tridimensional do fluxo de ar de sistemas de aeração em armazéns graneleiros, Inicialmente foi medido a distribuição da pressão estática em diferentes pontos de um armazém graneleiro, após as medições foram realizadas simulações do processo de aeração nos armazéns, então os dados das simulações foram comparados com dados reais com objetivo de validar o modelo, por fim realizou-se uma análise numérica com objetivo de definir a distribuição ótima do fluxo de ar no armazém, variando o perfil de suprimento de ar inicial.

O problema do fluxo viscoso incompressível isotermal pode ser descrito pelo sistema de equações de Navier-Stokes (1) e equações de continuidade (2) onde: w é o vetor de velocidade em metros por segundo(m/s); P é a pressão em Pascal(Pa); μ é a viscosidade dinâmica em Pascal(Pa) e ρ é a densidade em quilograma por metro cúbico(kg/m³).

$$\rho \frac{dw}{dt} = - \text{grad}P + \mu \nabla^2 w \quad (1)$$

$$\text{div}w = 0 \quad (2)$$

A solução deste sistema é dependente do número efetivo de Reynolds e define a distribuição de velocidade e pressão em cada ponto do domínio de integração para cada momento na forma da função $w=f(\text{grad}P)$, onde os componentes u , v e w da velocidade w e P são variáveis primitivas do sistema inicial. Porém como apontado por Binelo (2007), mesmo que as equações de continuidade de Navier-stokes na forma das equações (1) e (2) contribuam para o estudo teórico, elas apresentam problemas na aplicação prática ao serem aplicadas no fluxo de ar em massas de grãos em armazéns graneleiros, uma vez que de acordo com a disposição dos grãos, o formato do armazém e o posicionamento dos secadores a massa de grãos armazenada pode ter domínios de fluxo laminar, turbulento e transitório o que torna muito difícil a criação de um modelo matemático baseando-se nas equações de Navier-Stokes. Quando se possui velocidades menores de ar o escoamento é laminar, a formula de Hagen-Poiseuille define a relação entre a queda de pressão do ar e a velocidade do ar:

$$dP/dy \sim |W| \implies |W| = kdP/dy \quad (3)$$

onde k é o coeficiente de proporcionalidade. Ao derivar e aplicar logaritmos obtém-se a equação (4):

Evento: XXV Jornada de Pesquisa
ODS: 2 - Fome zero e agricultura sustentável

$$\frac{dP(\ln|W|)}{d(\ln|\text{grad}P|)} = 1 \quad (4)$$

para o regime turbulento, que corresponde a velocidades maiores existe a equação de Burker-Plumer:

$$dP/dy \sim |W|^2 \implies |W| = k(|dP/dy|)^{1/2} \quad (5)$$

similarmente para o regime turbulento:

$$\frac{dP(\ln|W|)}{d(\ln|dP/dy|)} = 0.5 \quad (6)$$

para o fluxo transitório a relação entre a velocidade do ar e a queda de pressão do ar é intermediária entre a lei da dependência linear e quadrática. Devido a dificuldade de descrever precisamente o fluxo de ar através dessas formulas para todos os regimes (turbulento ,laminar e transitório) Khatchatourian e Savicky (2004) propuseram uma fórmula para descrever a variação da derivada $d(\ln(|dpP/dy|))$ para todas as três condições de fluxo:

$$\frac{dP(\ln|W|)}{d(\ln|\text{grad}P|)} = \frac{3}{4} - \frac{\arctan(U)}{2\pi} \quad (7)$$

onde $U(P)=a \ln(|\text{grad}P|)+b$ é um argumento intermediário; $a>0$ e b são constantes. Os coeficientes a e b são empíricos e determinados experimentalmente, variando como tipo de grão que está sendo estudado. Quando $|\text{grad}P| \rightarrow 0, U \rightarrow -\infty, (3/4 - \arctan(U)/2\pi) = 1$; e quando $|\text{grad}P| \rightarrow \infty, U \rightarrow \infty, (3/4 - \arctan(U)/2\pi) = 0.5$, que corresponde ao fluxo turbulento. Ao integrar a equação 7 obtém-se:

Evento: XXV Jornada de Pesquisa
ODS: 2 - Fome zero e agricultura sustentável

$$\ln|W| = \left\{ \left[\ln(1 + U^2) - 2U \arctan(U) \right] / \pi + 3U \right\} / 4a + C \quad (8)$$

Onde C é uma constante de integração. Então o modelo de Katchatourian e Savicky (2004) consiste do seguinte sistema de equações:

$$W = \frac{\text{grad}P}{|\text{grad}P|} \exp \left(\left\{ \left[\ln(1 + U^2) - 2U \arctan(U) \right] / \pi + 3U \right\} / 4a + C \right) \quad (9)$$

$$\text{div} w = 0 \quad (10)$$

A equação vetorial (9) substitui a equação de Navier-Stokes e expressa que o vetor de velocidade e o gradiente de pressão são colineares em todos os pontos do domínio do fluxo de ar e a razão de seus módulos é função do gradiente de pressão. A equação escalar 10 representa a equação de continuidade para fluidos não compressíveis. Utilizando o coeficiente de proporcionalidade k como:

$$k = \exp \left(\left\{ \left[\ln(1 + U^2) - 2U \arctan(U) \right] / \pi + 3U \right\} / 4a + C \right) / |\text{grad}P| \quad (11)$$

utilizando a equação (9), os componentes de velocidade u, v e w para o caso tridimensional são expressos da seguinte forma:

$$u = -k \frac{\partial P}{\partial x}; v = -k \frac{\partial P}{\partial y}; w = -k \frac{\partial P}{\partial z} \quad (12)$$

onde: y é a direção vertical em metros (m) e as coordenadas x e z estão localizadas no plano correspondente ao fundo do local. Ao substituir-se a equação (12) na equação (10) obtêm-se a

Evento: XXV Jornada de Pesquisa

ODS: 2 - Fome zero e agricultura sustentável

equação diferencial parcial não linear tridimensional (13):

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(-k \frac{\partial P}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(-k \frac{\partial P}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(-k \frac{\partial P}{\partial z} \right) = 0 \quad (13)$$

as condições de contorno do problema são dadas pela condição de Neumann nas paredes (14) e pela condição de Dirichlet para a entrada e saída de ar (15):

$$n \cdot \text{grad}P = 0 \quad (14)$$

$$P = P_e \quad (15)$$

As equações (11), (12), (13) com as condições de contorno (14) e (15) descrevem a distribuição da pressão e da velocidade do fluxo de ar no estado permanente em um domínio tridimensional de grãos.

Modelo Darcy-Forchheimer

O modelo Darcy-Forchheimer é o modelo padrão utilizado pelo software livre OpenFOAM para a compreensão do fluxo de ar em meios porosos. Segundo Wang et al. (2019) OpenFOAM (Open Source Field Operation and Manipulation) é um framework orientado a objeto criado em C++, utilizado nos campos de pesquisa e aplicação industrial, utilizado para resolver problemas de mecânica de meios contínuos incluindo problemas de dinâmica dos fluidos computacional (CFD), disponibilizando diversos solvers, utilitários tutoriais e seus códigos-fonte correspondentes. Pesquisadores que utilizam o software podem tanto utilizar os solvers já presentes no software quanto desenvolver seus próprios. Além de permitir o desenvolvimento de solvers numéricos personalizados o software possui utilitários de pré-processamento e pós-processamento para solucionar problemas de mecânica de meios contínuos.

Computational fluid dynamics (CFD) é uma parte da área de dinâmica de fluidos que utiliza análise numérica e estruturas de dados para analisar e resolver problemas que envolvem a movimentação de fluidos. Computadores são utilizados para a realização dos cálculos que definem a simulação do movimento dos fluidos e a sua interação com as condições de contorno. Segundo Moukalled (2016) CFD é uma ferramenta que começou a ser utilizada inicialmente na indústria aeronáutica e aeroespacial, porém conforme se mostrou eficiente começou a expandir-se para novas áreas, como a automotiva, de geração de energia, química, marinha, nuclear, de eletrônicos entre outras.

Evento: XXV Jornada de Pesquisa

ODS: 2 - Fome zero e agricultura sustentável

O modelo Darcy-Forchheimer descreve o fluxo de ar em meios porosos baseando-se na lei de Darcy, a qual define o fluxo de fluidos homogêneos através de meios porosos e da equação de Forchheimer a qual inclui um termo inercial na equação, com o objetivo de considerar o comportamento não linear da pressão quando comparada ao fluxo. O modelo Darcy-Forchheimer, é o modelo padrão do software OpenFOAM assim como o modelo mais utilizado para a simulação do fluxo de ar em meios porosos. O modelo já foi utilizado para a simulação de diversos problemas de fluxo de ar em meios porosos, como análises do fluxo de ar em trigo armazenado silos por Gao et al. (2018), secagem de comidas desidratadas por Malekjani e Jafari (2018) e análise do fluxo de ar através de produtos hortícolas empacotados em caixas ventiladas por Sman (2002).

O modelo de Darcy-Forchheimer utilizado no OpenFOAM é dado pela equação:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\gamma \rho u_i) + u_j \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho u_i) = \frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial \tau_{ij}}{\partial x_j} + S_i \quad (16)$$

onde γ é a porosidade. O termo de fonte (sorvedouro) S_i , dado pela equação de Darcy-Forchheimer é composto por dois termos, o primeiro é perda viscosa e o segundo é a perda inercial, e para o caso homogêneo é:

$$S_i = -\left(\mu D + \frac{1}{2}\rho |u_{jj}| F\right) u_i \quad (17)$$

A relação entre a queda de pressão e a velocidade é parabólica, conforme a equação de Forchheimer:

$$\frac{\Delta P}{L} = \frac{\mu}{k_1} u + \frac{\rho}{k_2} u^2 \quad (18)$$

Conforme método de Bachmann, se existem dados experimentais da queda de pressão $\hat{\Delta}p$ em relação a velocidade u em um meio poroso de comprimento L , pode ser feito o ajuste de curva na forma:

$$\Delta p = au^2 + bu \quad (19)$$

A equação de Darcy-Forchheimer pode ser reescrita na forma:

$$\frac{dp}{dx} = \mu Du + \frac{1}{2}F \rho u^2 \quad (20)$$

e os parâmetros D e F podem ser obtidos por:

$$D = \frac{b}{\mu L} \quad (21)$$

$$L = \frac{2a}{\rho L} \quad (22)$$

Aplicando este procedimento para o dados experimentais de Khatachatourian (2004), são obtidos os parâmetros D e F para o fluxo de ar nas diferentes as profundidades da massa de grãos $H = 1\text{m}$, 10m , 20m , 30m e 50m conforme as Figuras 1 e 3, sendo que D e F podem ser obtidos em função da altura da produto H conforme:

$$D(H) = -16545,1435 H^2 + 1312342,0665 H + 310900058,229 \quad (23)$$

$$F(H) = -0,1471 H^3 + 11,3545 H^2 + 318,5381 H + 9183,5064 \quad (24)$$



Evento: XXV Jornada de Pesquisa
ODS: 2 - Fome zero e agricultura sustentável

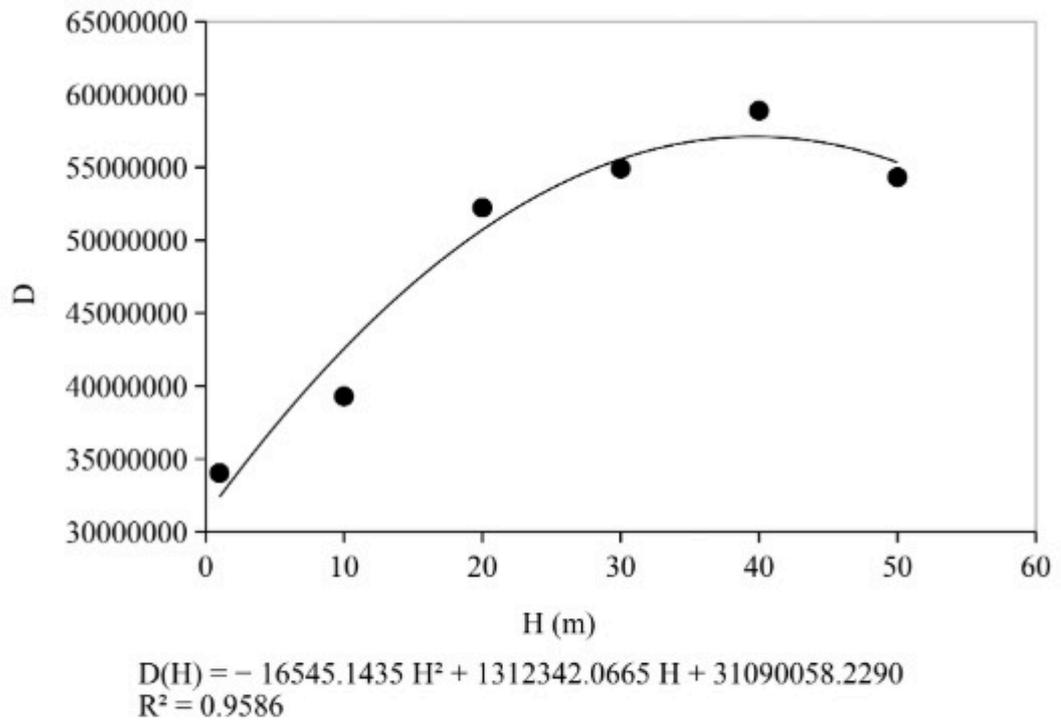
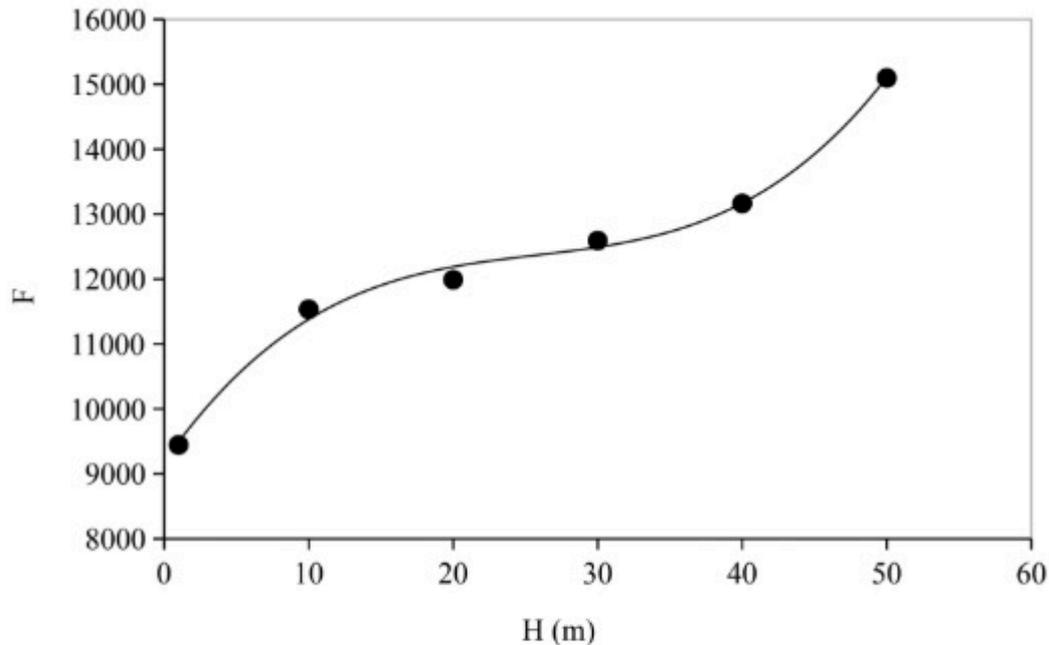


Figure 1: Estimação de D

Evento: XXV Jornada de Pesquisa
ODS: 2 - Fome zero e agricultura sustentável



$$F(H) = 0.1471 H^3 - 11.3545 H^2 + 318.5381 H + 9183.5064$$

$$R^2 = 0.9957$$

Figure 2: Estimação de F

Considerando os parâmetros D e F obtidos conforme as equações (23) e (24), a Figura 3 mostra a relação entre velocidade e queda de pressão predita pelo OpenFOAM comparada aos dados experimentais de Khatchatourian (2004). O modelo do OpenFOAM é para meio poroso homogêneo, mas existem duas formas de resolver isso. Quando é criada a malha é possível definir “porosity zones” com os valores de D e F para zona, então basta criar diferentes zonas de porosidade, uma para cada metro de altura, ou até menos. O segundo método seria definir um campo para os valores de D e F no código do openFOAM, como foi feito em: <https://cimec.org.ar/~mstorti/MECOM2018/paper-5734.pdf>.

Evento: XXV Jornada de Pesquisa
ODS: 2 - Fome zero e agricultura sustentável

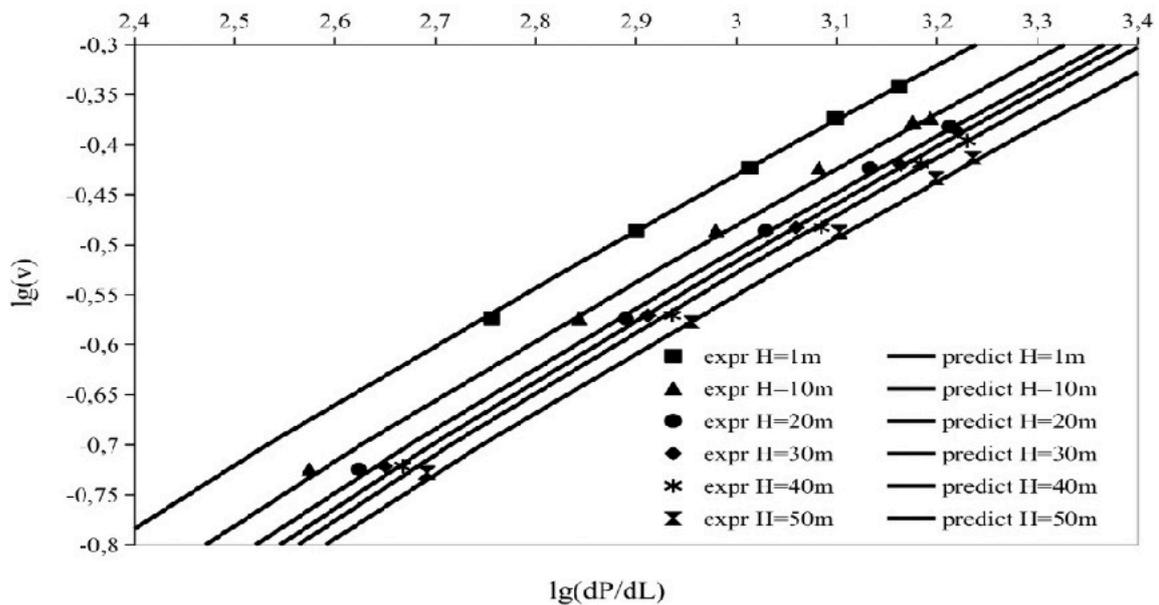


Figure 3: Relação entre velocidade e queda de pressão, predito no OpenFOAM e dados experimentais de Katchatourian (2004)

CONSIDERAÇÕES FINAIS

O resultados demonstram que o modelo Darcy-Forchheimer, quando aplicado em simulações do fluxo de ar em massas de grãos, pode aproximar-se dos dados obtidos experimentalmente, assim como dos dados obtidos por simulações realizadas com o modelo Khatchatourian, quando levado em consideração a altura de camada e compactação do grãos.

REFERÊNCIAS

- BINELO, M.O. Simulação Tridimensional do Fluxo de Ar em Armazéns Graneleiros. Dissertação (Mestrado) — Universidade Regional do Noroeste do Estado do Rio Grande do Sul, Ijuí. 2007.
- BINELO, M.O.; FAORO, V.; KHATCHATOURIAN, O. A.; Ziganshin B. Airflow simulation and inlet pressure profile optimization of a grain storage bin aeration system. Computers and Electronics in Agriculture, p. 164, 2019.
- FAORO, V. Modelagem e Simulação #D de Armazéns Graneleiros com Aeração. Dissertação (Mestrado) - Universidade Regional do Noroeste do Estado do Rio Grande do Sul, Ijuí. 2014.
- GAO, M.; CHENG, X; DU, X. Simulation of bulk density distribution of wheat in silos by finite element analysis. Journal of Stored Products Research, p.1 - 8, 2018.

Evento: XXV Jornada de Pesquisa
ODS: 2 - Fome zero e agricultura sustentável

GIANNETTI B.F; et al. Cleaner production for achieving the sustainable development goals. Journal of Cleaner Production, 2020.

KHATCHATOURIAN, O. A; SAVICKI, D. L. Mathematical Modelling of Airflow in an Aerated Soya Bean Store under Non-uniform Conditions. Biosystems Engineering,(2004) 88(2), p. 201-211.

KHATCHATOURIAN, O. A; BINELO, M.O. Simulation of three-dimensional airflow in grain storage bins. Biosystems Engineering, p. 225-238, 2008.

KHATCHATOURIAN, O. A; BINELO, M.O; FAORO, V; TONIAZZO, N.A. Three-dimensional simulation and performance evaluation of air distribution in horizontal storage bins. Biosystems Engineering, p. 42-52, 2016.

MALEKJANI, N; JAFARI, S.M. Simulation of food drying processes by Computational Fluid Dynamics (CFD); recent advances and approaches. Trends in Food Science Technology, p.206 - 223, 2018.

MEIJL, H.V.; *et al.* Modelling alternative futures of global food security: Insights from FOODSECURE. Global Food Security, p.25, 2020.

MENTGES, M. Modelagem Matemática e Simulação Computacional do Fluxo de Grãos com Presença de Impurezas em Secadores. Dissertação (Mestrado) -Universidade Regional do Noroeste do Estado do Rio Grande do Sul, Ijuí. 2019.

MOUKALLED, F; MANGANI, L; DRAWISH, M. The Finite Volume Method in Computational Fluid Dynamics. [S.l.]: Springer, 2016.

PATURCA, Y. Caracterização das Estruturas de Armazenagem de Grãos: Um Estudo de Caso no Mato Grosso. Universidade de São Paulo, Ijuí. 2014.

PORTELA, J. A. P; EICHELBERGER, L. Secagem de Grãos. [S.l.]: Embrapa Trigo,2001.

SMAN, R.G.M. Prediction of airflow through a vented box by the Darcy–Forchheimer equation. Journal of Food Engineering, p.49 - 57, 2002.

WANG, C.A; SHEN, T.R; GAO, J.P; TAN, J.Y. Development of RTE solver for radiative transfer in absorbing-emitting medium using finite volume based CFD library OpenFOAM. International Journal of Thermal Sciences, p.36–42, 2019.

Parecer CEUA: 2.260.474