

ESTUDO NUMÉRICO DE FORNOS CIRCULARES PARA PRODUÇÃO DE
CARVÃO VEGETAL: UMA ANÁLISE DO ÍNDICE DE CONVERGÊNCIA DE MALHA

Janki Reis Singh Choudhary^a, Joao Pedro Boas Pereira^b, Ian Gomes Miranda^b, Thiago Parente Lima^c, Hortência Luma Fernandes Magalhães^c

^aEstudante do Programa de Pós-Graduação em Biocombustíveis da UFVJM, nível mestrado. E-mail: janki.choudhary@ufvjm.edu.br

^bEstudantes do Curso de Ciências e Tecnologia da UFVJM, nível graduação. E-mail: janki.choudhary@ufvjm.edu.br

^cProfessores do Instituto de Ciências e Tecnologia da UFVJM. E-mail: thiago.parente@ufvjm.edu.br; hortencia.luma@ufvjm.edu.br

1

Resumo: Minas Gerais, maior produtor de carvão vegetal do Brasil, desempenha papel fundamental no suprimento energético da indústria siderúrgica, impulsionado pela abundância de florestas plantadas e um setor produtivo consolidado. No entanto, desafios como a eficiência dos processos de carbonização e a sustentabilidade ambiental motivam estudos para otimização dos fornos utilizados. Este trabalho investiga numericamente um forno circular para produção de carvão vegetal, adotando uma modelagem matemática simplificada baseada nas equações de conservação de massa e momento linear, adotando uma resistência adicional na região definida como porosa e desconsiderando a transferência de calor para isolar efeitos hidrodinâmicos. Os resultados indicaram baixas velocidades e distribuição uniforme de pressão, condizentes com meios porosos, enquanto a análise do índice de convergência de massa (GCI) revelou convergência oscilatória, sugerindo a necessidade de refinamento nas regiões de entrada e saída do fluido para aumentar a confiabilidade dos resultados numéricos.

Palavras-chave: *Índice de Convergência de Malha (GCI); Carvão vegetal; Simulação computacional.*

1 - Introdução

O carvão vegetal, biocombustível derivado de biomassa renovável, é fundamental para a transição energética sustentável, substituindo combustíveis fósseis e reduzindo emissões de gases de efeito estufa. O Brasil, um dos maiores produtores globais, tem em Minas Gerais seu principal polo, responsável por 87,7% da produção nacional, impulsionando a silvicultura e a economia (IBGE, 2022; EPE, 2021). Amplamente utilizado na indústria siderúrgica e em aplicações domésticas, o carvão vegetal é obtido pela carbonização da madeira, processo que ainda

enfrenta desafios de eficiência e sustentabilidade (IBÁ, 2017; MMA, 2019).

A produção de carvão vegetal no Brasil ainda se baseia em tecnologias primitivas, com pouca supervisão e controle de qualidade, especialmente nos fornos de carbonização (Dallastra, 2010). O processo de resfriamento, que pode levar de sete a quatorze dias, é um dos principais gargalos, impactando a produtividade e a eficiência (Santos, 2013). Embora o resfriamento natural seja comum, estudos sugerem que o uso de trocadores de calor pode acelerar significativamente esse processo (Oliveira et al., 2015). No entanto, há escassez de pesquisas sobre

métodos eficientes de resfriamento, com apenas 22% das patentes analisadas abordando essa questão (Rodrigues e Junior, 2019).

Recentemente, Lima (2024) investigou o resfriamento por convecção natural em um forno circular de pequena capacidade, utilizando simulações bidimensionais. No entanto, a literatura ainda apresenta lacunas significativas quanto à otimização de fornos circulares, amplamente empregados por pequenos produtores, principalmente sob uma abordagem tridimensional e com foco no resfriamento artificial. Diante desse cenário, este estudo preliminar visa construir uma malha representativa de um forno circular convencional utilizado na produção de carvão vegetal, além de investigar a fluidodinâmica no interior do equipamento. Os resultados servirão como base para uma análise posterior da etapa de resfriamento, com o objetivo de otimizar o processo por meio de simulações numéricas computacionais.

2 - Material e Métodos

A geometria do forno cilíndrico foi desenvolvida no software *Space Claim* da Ansys, com base nas dimensões disponíveis na literatura (MMA, 2019), apresentando uma altura total de 255 cm. Para a análise fluidodinâmica, foram modeladas uma entrada e uma saída de ar, ambas com raio interno de 6 cm (r_3) e raio externo de 7 cm (r_4). O volume total do domínio foi calculado em 16,29 m³, dividido em dois meios distintos: um fluido (gases provenientes da pirólise da madeira) e um poroso (leito de carvão). O leito de carvão possui altura de 111 cm, enquanto o meio fluido ocupa 121,22 cm na região acima do leito de carvão.

Para as simulações, foram geradas três malhas não estruturadas (M_1 , M_2 e M_3) com diferentes graus de refinamento no software Meshing da Ansys, conforme ilustrado na Figura

2. A malha M_1 representa a mais refinada, enquanto M_3 é a menos refinada, adotando-se uma razão de refinamento $r \geq 1,3$.

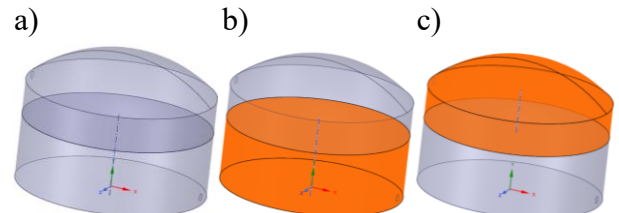


Figura 1. Representação do domínio volumétrico de um forno cilíndrico, a) domínio total b) meio poroso e c) meio fluido.

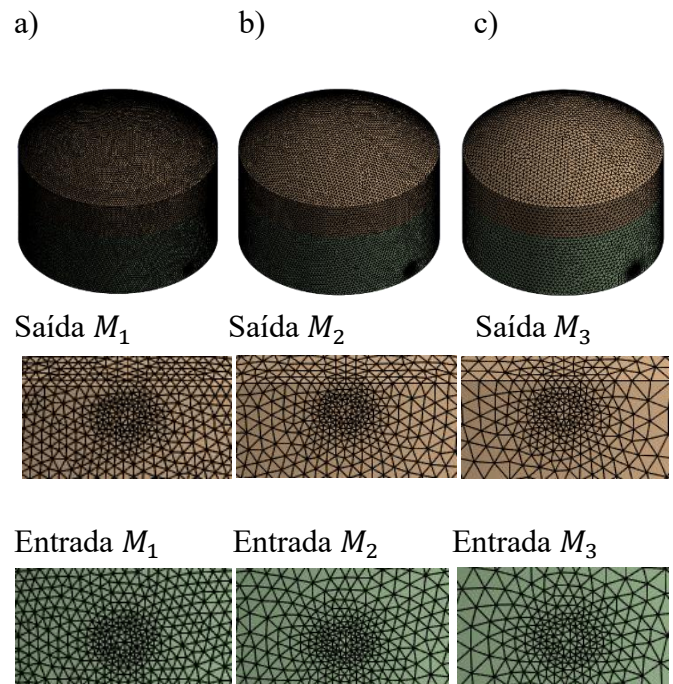


Figura 2. Representação das malhas numéricas. a) M_1 , b) M_2 e c) M_3 .

Para realização das simulações, as seguintes condições de contorno foram utilizadas:

- Entrada do fluido (*Inlet*): Admitiu-se uma condição de velocidade (2 m/s) na entrada do forno circular.

- Saída do fluido (*Outlet*): Admitiu-se uma condição de pressão ambiente (1 atm) na saída do domínio.
- Paredes e domínio (*Wall*): Admitiu-se uma condição de não deslizamento nas paredes do domínio, ou seja, velocidade nula na interface fluido/parede.

Para o estudo fluidodinâmico do forno circular, foram assumidas as seguintes condições:

- Fluido newtoniano com propriedades físico-químicas constantes;
- Meio poroso isotrópico;
- escoamento em regime laminar;
- Propriedades termo-físicas constantes;
- escoamento permanente;
- Meio poroso homogêneo;
- A transferências de calor foi desconsiderada.

Feitas as devidas considerações as equações de conservação de massa (Equação 1) e momento linear (Equação 2) podem ser escritas como:

$$\nabla \cdot \vec{v} = 0 \quad (1)$$

onde (\vec{v}) é a velocidade do fluido.

$$\rho(v \cdot \nabla)v = -\nabla P + \mu \nabla^2 v + F + Si \quad (2)$$

onde o termo $-\nabla P$ representa termo de pressão, $\mu \nabla^2 v$ é o termo de difusão viscosa, F representa as forças externas atuando por unidade de volume no fluido, como a gravidade, $\rho(v \cdot \nabla)v$ é o termo de advecção e Si o termo fonte, representando fontes externas do momento.

O meio poroso foi modelado incorporando uma resistência adicional ao fluxo na região dita como porosa, representada por um sumidouro de

quantidade de movimento, isso é feito adicionando um termo fonte a Equação 2.

$$Si = -\left(\frac{\mu}{\alpha} v_i + C_2 \frac{1}{2} |v| v_i\right) \quad (3)$$

onde:

- $|v|$ é a magnitude da velocidade do fluido;
- μ é a viscosidade do fluido;
- C_2 é o fator de resistência inercial;
- α é a permeabilidade.

A aplicação do modelo de meio poroso, baseia-se na consideração de que células porosas estarão completamente abertas e a única resistência ao escoamento, apresentam-se na forma de coeficientes de resistência viscosa ($\frac{1}{\alpha}$) e inercial (C_2).

Além disso, os parâmetros termo-físicos do Ar (fumaça) foram utilizados conforme a Tabela 1.

Tabela 1. Parâmetros termo-físicos utilizados nas simulações.

Parâmetro	Ar (Fumaça)	Carvão Vegetal
Densidade (ρ) [Kg/m ³]	1,2	-
Condutividade térmica (K) [W/mK]	0,075	-
Capacidade calorífica (Cp) [kJ/Kg.K]	1,1	-
Viscosidade cinemática (μ) [Pa.s]	2×10^{-5}	-
Resistência Viscosa ($\frac{1}{\alpha}$) [m ⁻²]	-	$2,7 \times 10^{-6}$
Porosidade [-]	-	0,375

Para avaliar a confiabilidade e a precisão dos resultados obtidos em simulações numéricas, foi utilizado o Índice de Convergência de Malha

(GCI), proposto por Roache (1994), baseado na extrapolação de Richardson (1927),

Nesse método de análise, o tamanho representativo da malha (h) é definido como:

$$h = \left[\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (\Delta V_i) \right]^{\frac{1}{3}} \quad (5)$$

onde N é o número total de elementos da malha e ΔV_i é o volume ocupado pelo elemento.

Sendo, $h_1 > h_2 > h_3$, onde h_1 a malha mais refinada e h_3 a malha menos refinada, e ϕ_1, ϕ_2, ϕ_3 os respectivos resultados obtidos com as malhas analisadas. As razões entre malhas são expressas como:

$$r_{21} = \frac{h_2}{h_1}, r_{32} = \frac{h_3}{h_2}$$

O método determina que a razão entre h e $h_{refinado}$ sejam maiores que 1,3 para cada malha gerada. Matematicamente, expressa por:

$$r = \frac{h}{h_{refinada}} > 1,3 \quad (6)$$

A ordem de convergência aparente é calculada como:

$$q(p) = \ln \left(\frac{r_{21}^p - s}{r_{32}^p - s} \right) \text{ para } \begin{cases} r_{21} = r_{32} = const \\ q(p) = 0 \end{cases} \quad (7)$$

$$e_{32} = \phi_3 - \phi_2; \quad e_{21} = \phi_2 - \phi_1 \quad (8)$$

sendo ϕ o valor da variável de interesse (velocidade) em cada malha.

O valor extrapolado e os erros relativos aproximados são dados por:

$$\phi_{ext}^{21} = \left(\frac{r_{21}^p \phi_1 - \phi_2}{r_{21}^p - 1} \right); \quad \phi_{ext}^{32} = \left(\frac{r_{32}^p \phi_2 - \phi_3}{r_{32}^p - 1} \right) \quad (9)$$

$$e_a^{32} = \left| \frac{\phi_2 - \phi_3}{\phi_2} \right|; \quad e_a^{21} = \left| \frac{\phi_1 - \phi_2}{\phi_1} \right| \quad (10)$$

Por fim, o índice GCI é calculado como:

$$GCI_{21} = \frac{1,25 e_a^{21}}{r_{21}^p - 1}; \quad GCI_{32} = \frac{1,25 e_a^{32}}{r_{32}^p - 1} \quad (11)$$

Pauldel e Saenger (2017), propõe também a razão de convergência como ferramenta de avaliação.

$$c = \left(\frac{\phi_1 - \phi_2}{\phi_2 - \phi_3} \right) \quad (12)$$

onde $c > 1$ indica divergência monótona da solução, o intervalo de $0 < c < 1$ representa convergência monotônica e $c < 0$ indica convergência oscilatória.

A metodologia GCI foi realizada usando com variável de interesse a velocidade, os dados foram coletados ao longo ao longo das linhas (amarelas) mostradas na Figura 3, usando o software *CFD-Post* da *Ansys*.

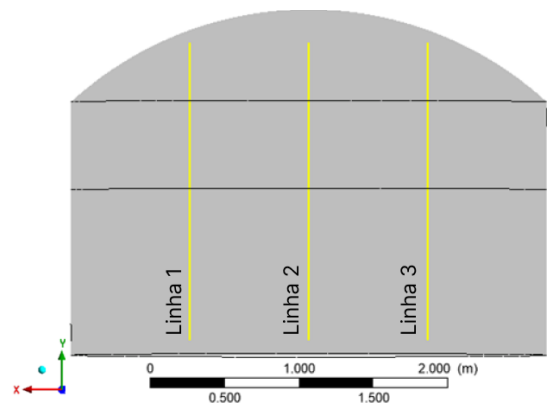


Figura 3. Linhas de coleta de dados para a análise GCI.

- Casos estudos

Tabela 2. Casos estudados para a análise GCI.

Caso	Número de elementos da malha [Nm]
1	1010004
2	453476
3	202810

Nas simulações realizadas, foram mantidas constantes a resistência viscosa ($\frac{1}{\alpha}$) e inercial do leito, a porosidade do leito, a velocidade de entrada e os parâmetros termo-físicos do fluido. Além disso, adotou-se o critério de convergência igual a de 1×10^{-5} .

As simulações foram conduzidas em computadores disponibilizados pelo Laboratório de Otimização, Simulação e Controle, vinculado ao Instituto de Ciência e Tecnologia da Universidade Federal dos Vales do Jequitinhonha e Mucuri (UFVJM). Para os Casos 1 e 2, utilizou-se o software ANSYS Fluent, na versão 2024/R1 (*Ansys for Students*). Já a simulação do Caso 3 foi realizada em colaboração com o Laboratório Computacional de Térmica e Fluidos, pertencente à Unidade Acadêmica de Engenharia Mecânica da Universidade Federal de Campina Grande (UFCG).

3 - Resultados e Discussão

- Campo de pressão

A Figura 4 apresenta o campo de pressão no plano XY (Caso 3), localizado no centro do equipamento. Observou-se uma distribuição de pressão relativamente uniforme no interior do sistema, com um pequeno gradiente de pressão próximo a região de entrada ($\Delta \cong 76$ Pa), como esperado. Esse comportamento está relacionado as interações do fluido com um meio poroso, e com as condições de contorno utilizadas.

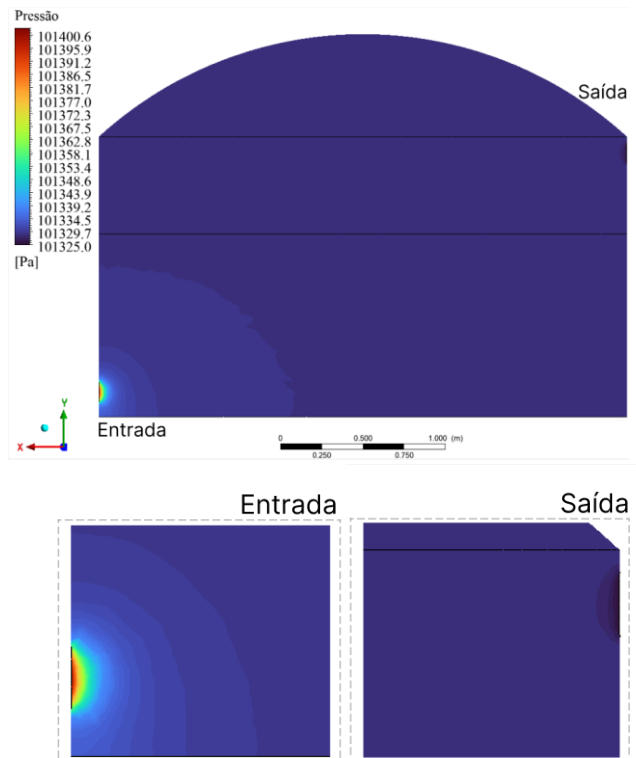


Figura 4. Campo de pressão no plano XY.

- Campo de velocidade

A Figura 5 mostra o campo de velocidade no plano XY (Caso 3), onde observa-se, de forma análoga ao campo de pressão, gradiente no interior do forno circular. As regiões em azul evidenciam as áreas de baixa velocidade, predominantes no domínio, e as regiões nas cores de verde ao vermelho, as áreas com velocidades mais altas, próximas a região de entrada e saída do fluido. Esse comportamento pode ser explicado pela geometria do equipamento, onde seções de entrada e saída menores do que a seção interna do forno, provocam um aumento de velocidade para manter a vazão volumétrica do sistema.

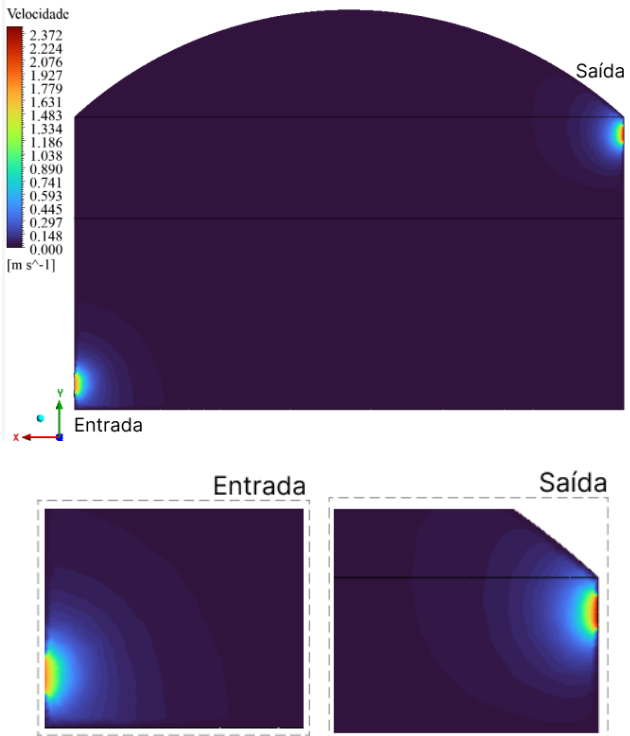


Figura 5. Campo de velocidade ao longo do plano XY.

A Figura 6 mostra as linhas de fluxo no plano XY, corroborando com o campo de velocidade (Figura 5). Observa-se zonas de estagnação na região oposta à alimentação, isso ocorre devido a resistência ao movimento imposta pelo meio poroso.

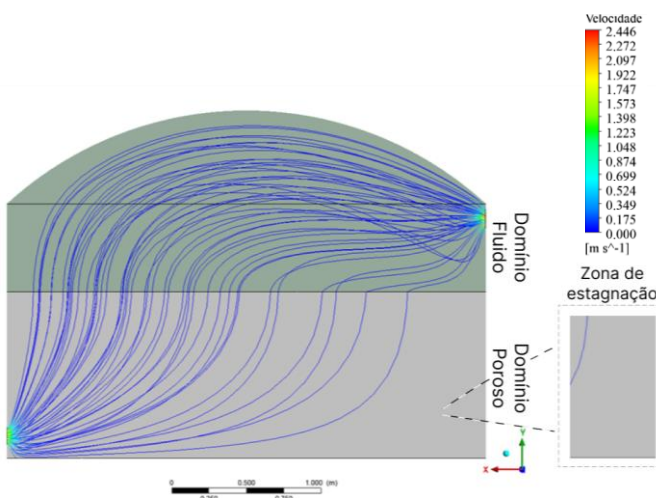


Figura 6. Linhas de fluxo de velocidade no campo XY.

- Aplicação do método GCI

O índice de convergência de malha (GCI), foi utilizado para avaliar as malhas desenvolvidas, usando como variáveis de interesse a velocidade (v), obtida em função da altura (h), ao longo das linhas L_1 , L_2 e L_3 (Figura 7).

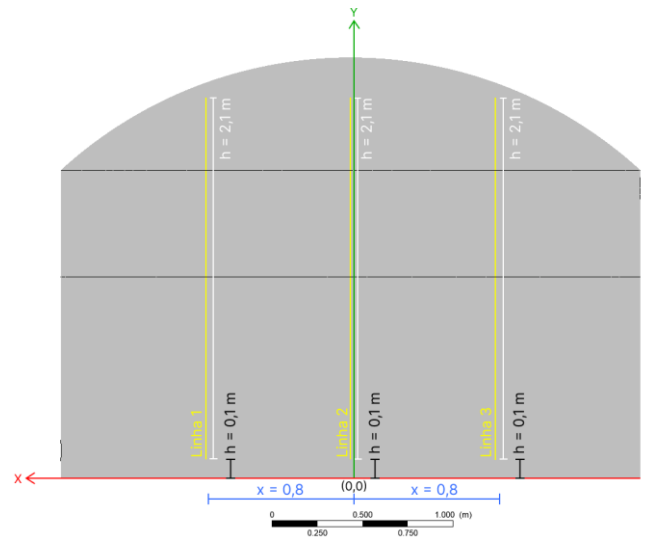


Figura 7. Posição axial das linhas de coleta de dados, L_1 , L_2 e L_3 no plano XY.

A Tabela 3 apresenta os resultados obtidos com a análise do GCI, para as malhas M_1 , M_2 e M_3 , em $y = 1,1$ m. Após a análise dos dados, observa-se, na linha de coleta L_1 , uma razão de convergência (c) no intervalo $-1 < c < 0$, caracterizando a convergência oscilatória, na linha de coleta L_2 , $c < -1$, indicando divergência oscilatória, e na linha L_3 , o coeficiente tende a divergência monotônica ($c > 1$). Além disso, o GCI_{21} é menor que o GCI_{32} apenas em L_1 , indicando que ainda existe dependência dos resultados com o tamanho dos elementos de malha.

Os perfis de velocidades gerados para as três malhas analisadas são apresentados nas Figuras 8, 9 e 10, referente as linhas L_1 , L_2 e L_3 , respectivamente. Observa-se um perfil relativamente ajustado na maioria dos pontos analisados, no entanto, próximo a região de saída de fluido, soluções distantes da malha extrapolada são constatadas, especialmente nas posições ($y = 0,243$ m) na L_1 , ($y = 1,529$ m) na L_2 , ($y = 1,671$ m)

na L_3 , evidenciando que a malha nesta região ainda não atingiu o nível de refinamento necessário.

Tabela 3. Parâmetros obtidos com o estudo de Índice de Convergência de Malha para a velocidade como variável analisada ($y = 1,1$ m).

Parâmetros		Linhas analisadas		
		L_1	L_2	L_3
v (m/s)	M ₁	$6,35 \times 10^{-3}$	$1,96 \times 10^{-3}$	$6,75 \times 10^{-4}$
	M ₂	$6,37 \times 10^{-3}$	$1,95 \times 10^{-3}$	$6,71 \times 10^{-4}$
	M ₃	$6,35 \times 10^{-3}$	$1,96 \times 10^{-3}$	$6,69 \times 10^{-4}$
p		0,85	0,88	4,13
ϕ_{ext}^{21} [m/s]		$6,28 \times 10^{-3}$	$2,0 \times 10^{-3}$	$6,78 \times 10^{-4}$
GCI_{21} [%]		1,45	1,20	0,43
GCI_{32} [%]		1,81	0,95	0,146
c		-0,80	-1,14	2,99
$r^p GCI_{21}$		1,83	2,88	1,31

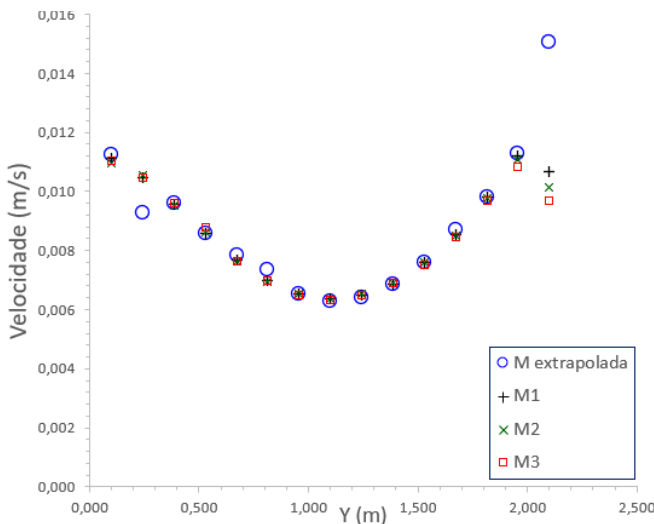


Figura 8. Perfil de velocidade para as diferentes malhas analisadas (L_1).

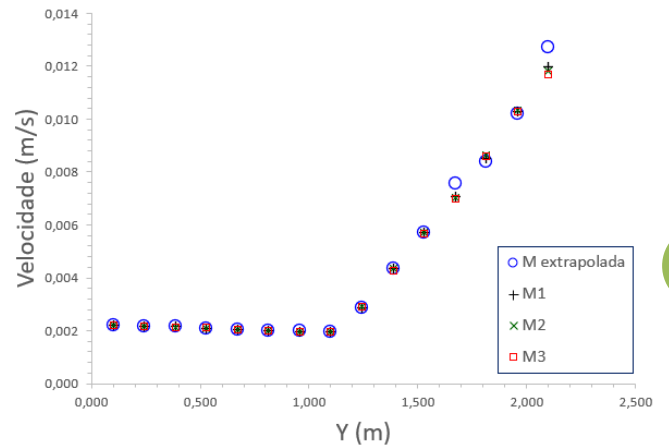


Figura 9. Perfil de velocidade para as diferentes malhas analisadas (L_2).

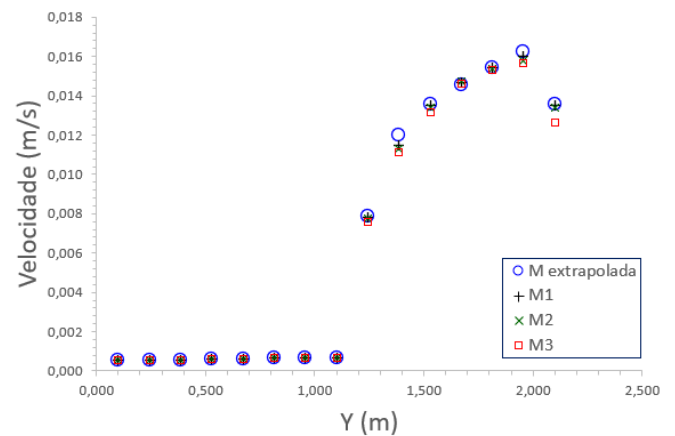


Figura 10. Perfil de velocidade para as diferentes malhas analisadas (L_3).

De modo geral, a análise GCI revelou uma convergência oscilatória na maioria dos pontos avaliados, indicando a necessidade de aprimoramento da malha. Esse refinamento é particularmente crucial nas regiões de entrada e saída de fluido, onde estratégias de refinamento local devem ser implementadas para assegurar a estabilidade e a independência dos resultados.

5 - Agradecimentos

Os autores gostariam de agradecer à Universidade Federal dos Vales do Jequitinhonha

e Mucuri (UFVJM) pela infraestrutura fornecida e à Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de Minas Gerais (FAPEMIG) pelo essencial apoio financeiro, fundamentais para a realização deste trabalho.

6 - Referências

ANSYS, Inc. *ANSYS User Manual*. Canonsburg: ANSYS Inc., 2021.

DALLASTRA, E. C. **Sistemas de produção de carvão vegetal existentes no Brasil: uma análise de viabilidade econômica**. Dissertação (Mestrado Profissional em Agronegócios). São Paulo: Fundação Getúlio Vargas – FGV, 2010.

EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA (EPE). **Relatório PDE 2034 e Anexo II: Proposição de diretrizes para elaboração do PDE 2035**. Rio de Janeiro: EPE, 2021.

FERZIGER, J. H.; PERIĆ, M. *Computational Methods for Fluid Dynamics*. 3. ed. Berlin: Springer, 2002.

FRANKE, J.; HLISTEN, A.; SCHLUNZEN, H.; CARISSIMO, B. *The best practice guideline for the CFD simulation of flows in the urban environment: an outcome of COST 732*. Paper presented at the Fifth International Symposium on Computational Wind Engineering (CWE2010), p. 1–8, 2010.

GHIDOSSI, R.; HENRÍQUEZ, E.; VILELA, D. Computational fluid dynamics applied to membranes: state of the art and opportunities. *Chemical Engineering and Processing*, v. 45, p. 227–241, 2006.

GOMES, A.; PEREIRA, E.; SANTOS, I.; CARNEIRO, A.; MARTINS, M. Qualidade do carvão vegetal submetido a diferentes taxas de resfriamento com trocador de calor. **Ciência**

Florestal, v. 30, p. 677-687, 2020. DOI: 10.5902/1980509829608.

IBÁ – INDÚSTRIA BRASILEIRA DE ÁRVORES. **Anuário estatístico 2017, ano base 2016**. Brasília, 2017. 80 p.

IBGE – INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. **Produção da extração vegetal e silvicultura (PEVS)**. 2022.

LIMA, S. C. **Modelagem e simulação do resfriamento natural de fornos circulares de produção de carvão vegetal**. 2024. Dissertação (Mestrado em Biocombustíveis) – Universidade Federal dos Vales do Jequitinhonha e Mucuri, Diamantina, 2024.

MMA – MINISTÉRIO DO MEIO AMBIENTE. **Produção sustentável de carvão vegetal: manual de construção sistemas fornos, fornalha**. Brasília, DF, 2019. 116 p.

OLIVEIRA, A. C.; CARNEIRO, A. D. C. O.; BARCELLOS, D. C.; RODRIGUEZ, A. V.; AMARAL, B. M. N.; PEREIRA, B. L. C. Resfriamento artificial em fornos retangulares para a produção de carvão vegetal. *Revista Árvore*, v. 39, p. 769-778, 2015.

RICHARDSON, L. F.; GAUNT, J. A. *The deferred approach to the limit. Part I. Single lattice. Part II. Interpenetrating lattices*. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London. Series A, Containing Papers of a Mathematical or Physical Character*, v. 226, p. 299-361, 1927.

ROACHE, P. J. *Perspective: A method for uniform reporting of grid refinement studies*. *Journal of Fluids Engineering*, v. 116, p. 405-411, 1994.

RODRIGUES, T.; BARCELLOS, D. C.; BRAGHINI JUNIOR, A. *State of the art on*

development and improvement of slow carbonization kilns for charcoal production. Journal of Analytical and Applied Pyrolysis, v. 176, p. 106257, 2023. DOI: 10.1016/j.jaap.2023.106257.

RODRIGUES, T.; BRAGHINI JUNIOR, A. *Technological prospecting in the production of charcoal: A patent study. Renewable and Sustainable Energy Reviews*, [S.l.], v. 127, p. 109-119, 2020.

SANTOS, I. S. **Resfriamento artificial de carvão vegetal em fornos de alvenaria**. Tese (Doutorado em Construções rurais e ambiência; Energia na agricultura; Mecanização agrícola; Processamento de produtos) - Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 2013.