LUMEN ET VIRTUS
ISSN: 2177-2789

ANÁLISE QUALITATIVA DA PERMEABILIDADE DE UM LEITO UTILIZANDO MODELOS IMPRESSOS 3D SIMILARES A GEOMETRIAS DE CARVÃO VEGETAL

QUALITATIVE ANALYSIS OF THE PERMEABILITY OF A RIVERBED USING 3D PRINTED MODELS SIMILAR TO CHARCOAL GEOMETRIES

ANÁLISIS CUALITATIVO DE LA PERMEABILIDAD DEL LECHO DE UN RÍO UTILIZANDO MODELOS IMPRESOS EN 3D SIMILARES A GEOMETRÍAS DE CARBÓN VEGETAL

https://doi.org/10.56238/levv16n54-068

Data de submissão: 14/10/2025 **Data de publicação:** 14/11/2025

Tiago Silva Bezerra
Estudante do Curso Técnico em Metalurgia Subsequente
Instituição: IFMA Campus Açailândia
E-mail: tsilvabezerra98@gmail.com

Alesandro Macio Sousa Alves
Professor EBTT Metalurgia
Instituição: IFMA Campus Açailândia
E-mail: alesandro@ifma.edu.br

Sacha Dupin Gade
Professor EBTT Metalurgia
Instituição: IFMA Campus Açailândia
E-mail: sacha.gade@ifma.edu.br

RESUMO

Este estudo avaliou a porosidade e a permeabilidade de leitos formados por modelos geométricos com alguma similaridade ao carvão vegetal de uso industrial objetivando compreender como dimensões e geometrias influenciam a permeabilidade. As peças foram impressas em PLA e preenchidas com argamassa para aumento de densidade, com dimensões correspondentes a cilindros de 9 mm de diâmetro e alturas de 11, 21 e 31 mm, além de modelos com seções reduzidas (½ e ¾ da área original da seção transversal para o modelo 9 x 21 mm predominante das misturas). Ensaios experimentais foram realizados para determinação da porosidade total, vazão de óleo sob ação da gravidade e perda de carga ao ar nas vazões 5, 7, 9, 11 e 13 L/min a 2 bares de pressão. Observou-se que a permeabilidade é influenciada não apenas pela porosidade global, mas também pela conectividade e pelo tamanho dos vazios formados pela combinação das partículas. Misturas contendo maior proporção de partículas longas (9 x 31 mm) apresentaram menores perdas de carga e maiores vazões, indicando maior permeabilidade. Em contraste, a adição de partículas menores reduziu a conectividade dos poros, aumentando a resistência ao fluxo. Os resultados confirmam que a permeabilidade do leito não depende unicamente da porosidade total e da homogeneidade dimensional, mas da distribuição e

interação geométrica das partículas, indicando que seria um importante parâmetro de controle e/ou avaliação de qualidade de recebimento de carvão vegetal nas usinas de fabricação de ferro gusa.

Palavras-chave: Porosidade. Permeabilidade. Impressão 3D.

ABSTRACT

This study evaluated the porosity and permeability of beds formed by geometric models with some similarity to industrial-use charcoal, aiming to understand how dimensions and geometries influence permeability. The pieces were printed in PLA and filled with mortar to increase density, with dimensions corresponding to cylinders of 9 mm in diameter and heights of 11, 21, and 31 mm, in addition to models with reduced sections (½ and ¾ of the original cross-sectional area for the predominant 9 x 21 mm model in the mixtures). Experimental tests were performed to determine total porosity, oil flow rate under gravity, and air pressure drop at flow rates of 5, 7, 9, 11, and 13 L/min at 2 bar pressure. It was observed that permeability is influenced not only by overall porosity but also by connectivity and the size of the voids formed by the combination of particles. Mixtures containing a higher proportion of long particles (9 x 31 mm) showed lower pressure losses and higher flow rates, indicating greater permeability. In contrast, the addition of smaller particles reduced pore connectivity, increasing resistance to flow. The results confirm that bed permeability does not depend solely on total porosity and dimensional homogeneity, but also on the distribution and geometric interaction of the particles, indicating that it would be an important parameter for controlling and/or evaluating the quality of charcoal received in pig iron production plants.

Keywords: Porosity. Permeability. 3D printing.

RESUMEN

Este estudio evaluó la porosidad y permeabilidad de lechos formados por modelos geométricos con cierta similitud al carbón vegetal de uso industrial, con el objetivo de comprender cómo las dimensiones y geometrías influyen en la permeabilidad. Las piezas se imprimieron en PLA y se rellenaron con mortero para aumentar la densidad, con dimensiones correspondientes a cilindros de 9 mm de diámetro y alturas de 11, 21 y 31 mm, además de modelos con secciones reducidas (½ y ¾ del área de la sección transversal original para el modelo predominante de 9 x 21 mm en las mezclas). Se realizaron pruebas experimentales para determinar la porosidad total, el caudal de aceite por gravedad y la caída de presión de aire a caudales de 5, 7, 9, 11 y 13 L/min a 2 bar de presión. Se observó que la permeabilidad está influenciada no solo por la porosidad total, sino también por la conectividad y el tamaño de los huecos formados por la combinación de partículas. Las mezclas con una mayor proporción de partículas largas (9 x 31 mm) mostraron menores pérdidas de presión y mayores caudales, lo que indica una mayor permeabilidad. En contraste, la adición de partículas más pequeñas redujo la conectividad de los poros, aumentando la resistencia al flujo. Los resultados confirman que la permeabilidad del lecho no depende únicamente de la porosidad total y la homogeneidad dimensional, sino también de la distribución e interacción geométrica de las partículas, lo que indica que sería un parámetro importante para controlar y/o evaluar la calidad del carbón vegetal recibido en las plantas de producción de arrabio.

Palabras clave: Porosidad. Permeabilidad. Impresión 3D.

1 INTRODUÇÃO

O alto-forno é o principal reator utilizado na produção de ferro-gusa nas siderúrgicas, sendo responsável por converter minérios de ferro e aglomerados em ferro gusa por meio de reações de redução e fusão. De acordo com Figueiró [1] o Brasil é o único país que produz carvão vegetal em escala industrial e de acordo com anuário estatístico [2] do Sindicato da Indústria do Ferro no Estado de Minas Gerais (SINDIFER), 23,5 % do ferro gusa produzido no Brasil em 2024 foi a partir de altos fornos a carvão vegetal.

O principal componente sólido da carga de altos fornos para produção de ferro gusa é o termo-redutor coque ou carvão vegetal. O carvão vegetal apresenta baixa densidade quando comparado aos outros componentes sólidos da carga, ocupando mais de 50% do volume interno do alto forno, mas com heterogeneidade dimensional [1,3]que afeta diretamente a permeabilidade do leito de fusão, tanto em relação aos gases ascendentes no interior do forno quanto na drenagem de líquidos em seu interior.

Fatores como a qualidade da madeira incluindo espécie, o processo de carbonização, grau de mecanização na produção em larga escala e atividades relacionadas a movimentação levam a alta variabilidade nas propriedades do carvão vegetal incluindo-se a granulometria média[1].

De acordo com Fausta Gandra [4] a fração de vazios no interior do alto forno influencia fortemente o fluxo de líquidos e o fluxo de gás nas vizinhanças do *raceway*. De maneira geral a estabilidade operacional do alto-forno e produtividade estão diretamente relacionados à permeabilidade do leito [4,5].

É fundamental diferenciar os conceitos de porosidade e permeabilidade. Enquanto a porosidade (ε) refere-se ao total de espaços vazios em relação ao volume total ocupado pelas partículas, a permeabilidade (k) indica a maior ou menor facilidade de escoamento de fluidos através do meio [6]. Assim, um material pode apresentar alta porosidade e ainda assim baixa permeabilidade, caso os vazios não estejam interconectados de forma eficiente.

Em termos de um leito de carga metálica para altos fornos (sínter e pelotas) a fração de vazios seria aproximadamente a mesma (0,3) seja ele formado por partículas maiores ou menores desses insumos. A porosidade ou fração de vazios é prejudicada à medida que ocorre a mistura entre partículas maiores e menores quando essas últimas são pequenas o suficiente para ocupar os vazios das partículas maiores [7].

A permeabilidade (k) depende de características como tipo de fluido, da existência de diferentes formas de poros no mesmo material, da interconectividade de poros (podem variar em tamanho, forma e localização) da distribuição de tamanho de poros [6]

A porosidade total ε, expressa em porcentagem, é calculada por meio da equação 1 em que Vv e Vt são respectivamente o volume de vazios e o volume total.

$$\varepsilon = \frac{Vv}{Vt} x100 \quad (1)$$

De acordo com Fausta Gandra [4]as equações de Ergun ou Kozeny-Carman são utilizadas para representar resistência interna do reator (altos fornos) à passagem do material líquido. Estas equações são utilizadas para descrever a queda de pressão de um fluido que atravessa um leito de material sólido, como em filtros ou reatores de leito fixo. Kozeny-Carman é utilizada para prever a queda de pressão em escoamentos laminares (de baixa velocidade) e Ergun (uma extensão da equação de Kozeny-Carman) contém dois termos: referente a atritos viscosos que predominam na região laminar (igual ao de Kozeny-Carman) e um termo inercial (turbulento), ou seja, combina regime laminar e turbulento [4,6,8].

Este trabalho teve como objetivo avaliar a porosidade e permeabilidade de leitos formados por modelos obtidos por impressão 3D que tem similaridade geométrica com o carvão vegetal. Foram utilizadas diferentes proporções desses modelos em simulação de uma mistura variando-se então tipos de geometrias e dimensões das partículas.

2 METODOLOGIA

A primeira parte dessa pesquisa foi a confecção peças com alguma similaridade ao que dá origem ao carvão vegetal (toras de madeira utilizadas para alimentar os fornos) e se conservam em parte após a sua carbonização. As peças foram impressas em uma máquina de impressão 3D com um filamento PLA (Ácido Polilático/bioplástico biodegradável feito a partir de fontes renováveis), nas dimensões: 9x11 mm, 9x21 mm, 9x31 mm, 3/4 de 9x21 mm e 1/2 de 9x21 mm.

Após a impressão, as peças foram preenchidas com uma pasta de cimento para ganho de densidade, evitando que elas pudessem sobrenadar em água ou óleo durante os ensaios de porosidade, fluxo de óleo ou arrastadas por um fluxo de ar em contracorrente no reator durante ensaio de perda de carga.

Para medir o índice de vazios foi utilizado um tubo transparente de 100 mm de diâmetro com uma régua colada em sua lateral. Este recipiente foi aferido construindo-se uma curva de tendência sobre 10 pontos da relação altura em mm em função do volume previamente medido em proveta com R^2 igual a 0,9992.

A partir da quantidade disponível de peças impressas e misturas entre elas para realização dos ensaios, foi definida uma altura padrão de 86 mm deste recipiente equivalente a 577,07 mL de água. Todas as medidas de porosidade total em triplicata para todos os conjuntos de peças foram realizadas para esta altura/volume de referência. A porosidade total foi obtida pelo volume de água necessário para que a mesma atingisse o mesmo nível da superfície superior das peças.

Para cada modelo foi associado um número de peças por volume ocupado para se calcular a quantidade relativa a ser utilizada nas misturas de peças (mix) nos ensaios de vazão de óleo e ar do leito de altura fixa.

Nos ensaios as peças foram previamente misturadas/homogeneizadas em sacolas e transferidas para os reservatórios/reatores dos ensaios. Após a transferência, elas foram acomodadas/alinhadas chacoalhando-se o reservatório e utilizando-se de uma grelha pela parte superior afim alinhar a superfície. Esta mesma grelha foi também utilizada como contrapeso sobre as peças durante os ensaios de vazão de ar para evitar um afastamento entre elas com o fluxo de ar que pudesse alterar a acomodação das peças e resistência à passagem de ar.

O reator para medir a perda de carga foi construído a partir de um cano pvc de 100 mm de diâmetro com uma grelha de pvc com furos radiais para que haja uma boa distribuição de ar por toda a coluna. Esse reator também possui duas tampas de pvc com engates para mangueira de ar (entrada de fluxo de ar e tomada para leitura de pressão diferencial), sendo uma fixa e uma removível para se ter acesso ao seu interior. A montagem possui em sua composição um regulador de pressão conectado na saída do compressor de ar em que a pressão foi mantida fixa para todos os ensaios em 2 bar e um fluxômetro para medida das vazões de ar utilizadas (5, 7, 9, 11 e 13 L/minuto) para todos os arranjos de peças. Para leitura dos dados de pressão do reator foi usado um manômetro digital do modelo AUTOOL, acoplado na entrada e saída do reator.

As medidas de vazão de óleo se basearam no fluxo de óleo que percola o leito das partículas/peças. O ensaio foi realizado colocando-se as peças em um tubo transparente de garrafa PET com uma grelha similar à do reator com um registro de água acoplado abaixo da grelha. Com o registro fechado foi adicionado o óleo esperado um tempo para saída de bolhas de ar; em seguida o registro é aberto e o óleo vazado dentro de uma proveta de 250 ml. Com o auxílio de uma câmera foram registrados os tempos em função dos volumes na proveta e construídas as curvas de correlação linear todas com R^2 maior que 0,99 em que o coeficiente angular da reta é o resultado da vazão (mL/s) posteriormente convertido para L/h. O óleo utilizado foi da marca Petrol, Hipóide EP 140 e todas as medidas foram realizadas no laboratório condicionado a 25 ºC.

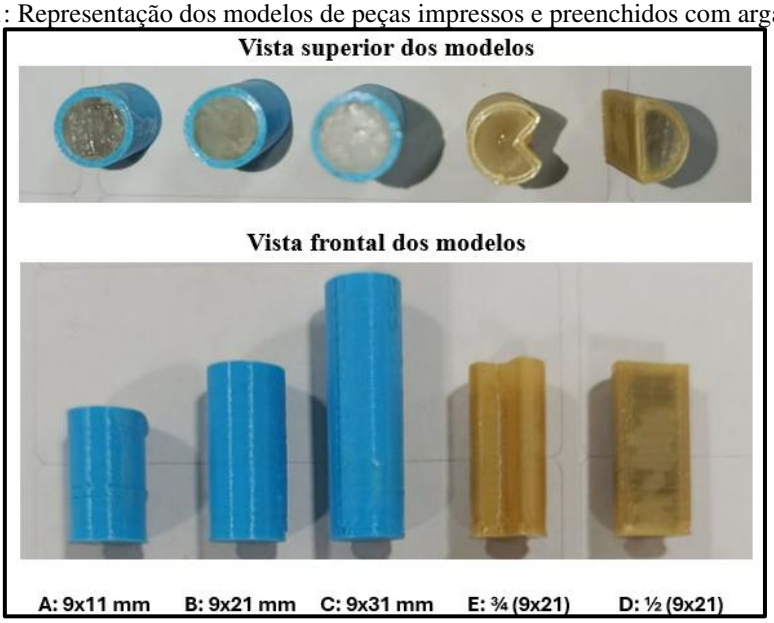
Com os dados obtidos buscou-se relacionar porosidade, vazão de óleo e comportamento da perda de carga em diferentes vazões de ar para diferentes combinações de modelos.

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Foram impressas e utilizadas 697 peças de modelo cilíndrico reto e 140 peças dos modelos com metade e três quartos da seção transversal do cilindro reto nos experimentos.

A Figura 1 exibe os diferentes modelos impressos utilizados para os ensaios de porosidade total, perda de carga ao ar e percolação de óleo.

Figura 1: Representação dos modelos de peças impressos e preenchidos com argamassa.



Fonte: De autoria própria (2025)

Os modelos escolhidos não são os únicos presentes no carvão vegetal, mas são encontrados no carvão pois a alimentação dos fornos de carbonização é feita com toras cilíndricas de diâmetro variável e comprimento variável em função do tipo/escala de forno de carbonização. A umidade, espécie da madeira, temperatura e tempo de carbonização e toda a movimentação do material desde a praça de carbonização até os silos das usinas vão gerar uma variedade e variabilidade de desenhos/modelos finais do carvão.

O diâmetro equivalente (D_{eq}) foi calculado pelo método do volume equivalente. A tabela 1 traz os resultados dos diâmetros das esferas de mesmo volume (D_{eq}) das peças projetadas (modelos A, B, C, D e E).

Tabela 1: Diâmetro Equivalente dos modelos impressos.

Modelo	A (9x11mm)	B (9x21mm)	C (9x31mm)	D (1/2-9x21mm)	E (3/4-9x21mm)
D_{eq}	5,5	6,8	7,8	5,4	6,2

Fonte: De autoria própria (2025)

Os resultados de D_{eq} entre 5,4 mm e 7,8 mm indicam uma faixa estreita em termos dimensionais para o material que está relacionado na literatura com melhor permeabilidade como podemos observar nos nossos resultados. Ainda que as dimensões sejam relativamente pequenas em termos de carvão vegetal, os diferentes modelos e combinações apresentaram alta porosidade e permeabilidade de maneira geral.

A tabela 2 apresenta a identificação das peças e proporções relativas utilizadas nos ensaios de porosidade, perda de carga ao ar e de vazão de óleo sob a ação da gravidade.

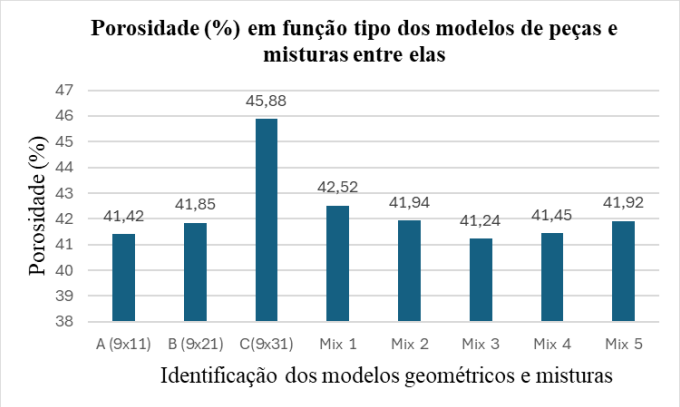
Tabela 2: Percentual do volume ocupado do reator utilizado para determinação da porosidade total em função dos modelos de peças e combinações dos mesmos.

Arranjo	A (9x11mm)	B (9x21mm)	C (9x31mm)	D (1/2-9x21mm)	E (3/4-9x21mm)
A (9x11)	100 %	-	-	-	-
B (9x21)	-	100 %	-	-	-
C (9x31)	-	-	100 %	-	-
Mix 1	10 %	70 %	10 %	5 %	5 %
Mix 2	15 %	60 %	10 %	10 %	5 %
Mix 3	15 %	55 %	15 %	10 %	5 %
Mix 4	20 %	50 %	15 %	10 %	5 %
Mix 5	20 %	45 %	20 %	10 %	5 %

Fonte: De autoria própria (2025)

Para cada dimensão/modelo foi verificada a relação unidades por volume ocupado para cálculo das quantidades a serem utilizadas em cada ensaio e elaboração das misturas/mix entre as mesmas. A Figura 2 apresenta os resultados na forma gráfica para a porosidade total mantendo-se um volume fixo de peças equivalente a 577 ml para todas as medidas.

Figura 2: Porosidade em função da distribuição de modelos



Fonte: De autoria própria (2025)

A tabela 3 reúne os dados de porosidade total e vazão de óleo sob ação da gravidade por meio do leito poroso.

Tabela 3: porosidade total e vazão de óleo sob ação da gravidade por meio do leito poroso/diferentes combinações de modelos.

Identificação	**Porosidade ε (%)**	**Vazão de óleo (L/h)**
Fluxo em Vazio	NA	42
A - (9x11)	41,42	28
B - (9x21)	41,45	27
C - (9x31)	45,88	35
Mix 1	42,52	29

Mix 2	41,94	28
Mix 3	41,24	32
Mix 4	41,45	30
Mix 5	41,92	31

Fonte: De autoria própria (2025)

Qualquer conjunto de peças oferece uma resistência ao fluxo quando comparado ao fluxo de óleo em vazio. A maior vazão de óleo (35 L/h) ocorre para o leito com maior porosidade total, composto por 100 % de C. Para os conjuntos A, B e C que têm a mesma geometria variando-se o comprimento nota-se correlação entre a porosidade e vazão.

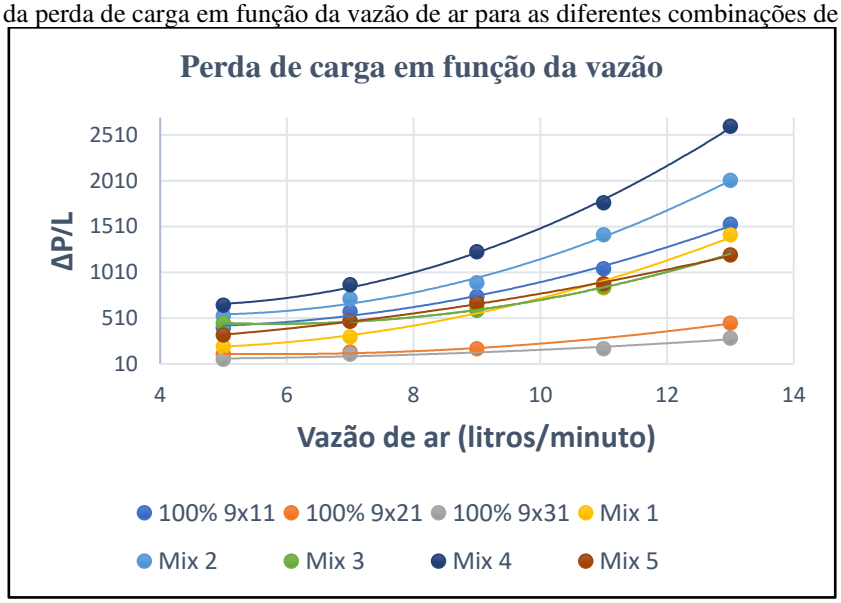
Para as demais porosidades e vazões de óleo (mixes) os resultados não estão diretamente relacionados e isto se deve possivelmente à conectividade, tamanho e/ou forma dos vazios gerados pelos diferentes arranjos. Conforme abordado na revisão bibliográfica, a porosidade total não indica o tamanho dos vazios ou a conectividade deles, mas sim o total de vazios em relação ao volume total.

Comparando-se o resultado de 100% B com os Mixes 1 a 5 que são obtidos a partir de um volume majoritário de B, há pequena variação da porosidade total. O mix 1 tem porosidade ligeiramente superior que 100% B ou para as demais combinações e apresenta maior permeabilidade ao óleo que 100% B.

Custódio [9], em estudo intitulado “Influência da qualidade das matérias-primas no escoamento gasoso da zona granular do alto-forno” aponta que o tamanho absoluto das matérias primas não é o mais importante do ponto de vista da fração de vazios e sim a distribuição destes tamanhos. Dentre suas conclusões para matéria prima fonte de carga metálica, a permeabilidade é melhor para faixas mais estreitas de distribuição granulométrica, ou seja, sem grandes variações de tamanhos.

O gráfico da Figura 3 apresenta os resultados de perda de carga ($\Delta P/L$) ´para diferentes valores de vazão de ar (5, 7, 9, 11, 13 L/min) aplicados a um volume fixo de altura L preenchido pelos modelos 100% de A, 100% de B, 100% de C e as misturas (mix 1 a mix 5). O perfil das curvas mostra a combinação dos dois regimes, laminar e turbulento previstos na equação de Ergun. À medida que as vazões aumentam a perda de carga aumenta para todas as composições de misturas. Nas curvas, um trecho mais linear em vazões menores corresponde ao regime de fluxo laminar e o trecho com curvatura mais acentuada ao regime turbulento onde a perda de carga é maior.

Figura 3: Gráfico da perda de carga em função da vazão de ar para as diferentes combinações de modelos de peças



Fonte: De autoria própria (2025)

Dentre as curvas da Figura 3 as menores perdas de carga, associadas à maior permeabilidade ao ar são dos ensaios com 100% de B (9 x 21 mm) e 100% C (9 x 31 mm). De maneira geral, as magnitudes de perda de carga são muito baixas, da ordem de algumas dezenas de Pascais em vazões de 5 e 7 L/min. Ainda assim, o comportamento geral e perda de carga para os mixes de 1 a 5 quando comparados a 100 %B (modelo majoritário dos mixes) mostra correlação com as vazões de óleo desses conjuntos.

As combinações dos diferentes modelos foram feitas a partir da predominância do modelo B constituído 100% de peças de dimensões 9x21 mm. O Mix 1, como primeiro conjunto de diferentes modelos resulta da mistura de 10% do volume total de peças do modelo A, 70% de B, 10 % de C, 5% de D e 5% de E.

O mix 1 apresenta maior permeabilidade que 100% B e este resultado se deve possivelmente a inserção de peças (C) maiores que B ainda que tenham sido inseridas também as peças dos modelos A D e E. De fato, a porosidade total medida para 100% B ($\varepsilon = 41{,}45\%$) é ligeiramente inferior ao mix 1 ($\varepsilon = 42{,}52\%$) e a vazão de óleo também, sendo 27 l/h e 29 L/h respectivamente para 100% B e mix 1.

O mix 2 foi elaborado substituindo B (10%) por A (5%) e D (5%) em relação ao mix 1. O aumento proporcional de peças de menor volume individualmente (A: 10% para 15% e D: 5% para 10%) resultou na diminuição da permeabilidade observada na perda de carga. Também neste caso os valores de porosidade e vazão de óleo estão de acordo com a redução da permeabilidade sendo $\varepsilon = 41{,}94\%$ e vazão de óleo igual a 28 L/h para o mix 2.

O mix 3 foi elaborado retirando B (5%) e adicionando C (5%) em comparação ao mix 2. O acréscimo de peças de maior volume individual (C: 10% para 15%) levou a um aumento da permeabilidade ao ar (menor perda de carga) em relação ao mix 2. Neste caso também os valores de

porosidade e vazão de óleo estão de acordo com ε = 41,24% e vazão de óleo igual a 32 L/h para o mix 3.

O mix 4 foi obtido substituindo B (5%) e incrementando A (5%) de menor dimensão. Essa adição de peças de menor volume individual (A: 15% para 20%) resultou em um decréscimo na porosidade e na conectividade dos poros levando a uma maior perda de carga. De modo semelhante as outras configurações, os valores de porosidade e vazão de óleo estão relacionados com ε = 41,45 % e vazão de óleo igual a 30 L/h para o mix 4.

Já o mix 5 teve um aumento de C (5%) em substituição a B (5%) em relação a configuração do mix 4. Novamente o aumento de peças de maior volume (C: 15% para 20%) levou a um aumento na porosidade da mistura reduzindo a perda de carga e aumentando a conectividade e/ou aumento do tamanho dos poros e novamente os dados de porosidade e vazão de óleo confirmam esse comportamento com ε = 41,42% e vazão igual a 31 L/h.

De forma geral a substituição de peças de tamanho B (9x21 mm) por tamanhos inferiores (9x11 mm) afeta negativamente a permeabilidade ainda que a porosidade total seja muito próxima entre eles. Entre o mix 1 e o mix 2 em que predomina a alteração de modelo geométrico (substituição do modelo cilíndrico reto por peças “meia cana” – ½ de 9 x 21 mm), a porosidade e vazão de óleo são reduzidos e a perda de carga ao ar é maior.

Seria relevante coletar dados de amostras reais de carvão utilizadas nas usinas já que a variabilidade dimensional é intrínseca ao processo de produção do carvão e com isso poder verificar se há correlação com fornecedor/praças de carbonização, transporte, controle de processo etc. como avaliação qualitativa dessa matéria prima já que o carvão é o principal componente garantidor da permeabilidade com ação direta sobre a estabilidade operacional, produtividade e custo final de produção.

4 CONCLUSÃO

Ainda que as dimensões equivalentes obtidas pela relação volumétrica com esfera sejam pequenas, a faixa de tamanhos é estreita resultando em alta porosidade e permeabilidade.

Dentro da estreita faixa dimensional analisada, a permeabilidade foi afetada pela combinação de faixas de tamanhos em que a predominância de partículas maiores ou aumento de sua participação no leito levam a um aumento da permeabilidade associado em princípio a um maior tamanho dos vazios.

FINANCIAMENTO

Projeto com financiamento concedido pela Fundação de Amparo à Pesquisa e ao Desenvolvimento Científico e Tecnológico do Maranhão – FAPEMA e Instituto Federal do Maranhão – Campus Açailândia_ IC-JR-05320/24.

REFERÊNCIAS

[1] C.G. Figueiró, A.D.C.O. Carneiro, G.R. Santos, A.P.S. Carneiro, L.D.F. Fialho, M.A. Magalhães, C.M.S. Da Silva, V.R. De Castro, Characterization of charcoal produced in industrial rectangular furnaces, Revista Brasileirade Ciencias Agrarias 14 (2019). https://doi.org/10.5039/agraria.v14i3a5659.

[2] SINDIFER, Anuário Estatístico - Ano base 2024, 2024. https://sindifer.com.br/sndfr/anuario-estatistico/ (accessed October 4, 2025).

[3] C. Isbaex, CRISMEIRE ISBAEX INFLUÊNCIA DA DENSIDADE DO CARVÃO VEGETAL NA PRODUÇÃO DE FERRO GUSA, n.d.

[4] B. Fausta Gandra, L. Fernando Andrade de Castro, UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS Curso de Pós-Graduação em Engenharia Metalúrgica e de Minas DESENVOLVIMENTO DE MODELO MATEMÁTICO DO FLUXO DE LÍQUIDOS NO CADINHO DO ALTO-FORNO, 2006.

[5] A.K. Menezes De Almeida, “INCORPORAÇÃO DE SILÍCIO NO FERRO-GUSA,” n.d.

[6] H.J.B. Couto, F.L.L. Barbosa, O.A. Lima, PERMEABILIDADE DE MEIOS POROSOS MINERAIS: EFEITO DA ESFERICIDADE, GRANULOMETRIA E TIPO DE MINERAL, 2017.

[7] M. Geerdes, H. Toxopeus, C. van der Vliet, Modern Blast Furnace Ironmaking_An introduction, 2009.

[8] B. Marise Oliveira Custódio Pereira, C. Musso Velloso, L. Fernando Andrade de Castro, R. Santos Sampaio, R. Mary Rezende Faleiro, INFLUÊNCIA DA QUALIDADE DAS MATÉRIAS-PRIMAS NO ESCOAMENTO GASOSO NA ZONA GRANULAR DO ALTO-FORNO*, n.d.

[9] B. Marise Oliveira Custódio Pereira, Influência da qualidade das matérias-primas no escoamento gasoso da zona granular do alto-forno, 2014.