

**UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO DE JANEIRO
CENTRO DE TECNOLOGIA
ESCOLA DE QUÍMICA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA QUÍMICA**



TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

**Escoamento em Meios Porosos - Caracterização
Geométrico-Hidrodinâmica de Recheios Randômicos:
Selas de Berl**

Aluno: Luca Salles Fonseca Nesic de Freitas

Orientador: Prof. Ricardo Pires Peçanha, Ph. D.

**Rio de Janeiro
Dezembro de 2023**

CIP - Catalogação na Publicação

N931e Nesic de Freitas, Luca Salles Fonseca
Escoamento em Meios Porosos - Caracterização
Geométrico-Hidrodinâmica de Recheios Randômicos:
Selas de Berl / Luca Salles Fonseca Nesic de
Freitas. -- Rio de Janeiro, 2023.
33 f.

Orientador: Ricardo Pires Peçanha.
Trabalho de conclusão de curso (graduação) -
Universidade Federal do Rio de Janeiro, Escola de
Química, Bacharel em Engenharia Química, 2023.

1. Escoamento em Meios Porosos. 2. Lei de Darcy.
3. Modelo de Kozeny-Carman. 4. Permeabilidade de
Meios Porosos. I. Peçanha, Ricardo Pires, orient.
II. Título.

Luca Salles Fonseca Nesic de Freitas

Escoamento em Meios Porosos - Caracterização Geométrico-Hidrodinâmica de
Recheios Randômicos: Selas de Berl

Trabalho de Conclusão de Curso
apresentado à Escola de Química da
Universidade Federal do Rio de Janeiro,
como parte dos requisitos necessários à
obtenção do grau de Engenheiro Químico.

Aprovado em ____ de _____ de ____.

Ricardo Pires Peçanha, Ph. D., DEQ - EQ/UFRJ

Amaro Gomes Barreto Jr., D. Sc., DEQ - EQ/UFRJ

Gisele de Freitas Westphalen, D. Sc., COPPE/UFRJ

Rio de Janeiro – RJ, Brasil
13 de Dezembro de 2023

Ao meu falecido avô, Luiz Nelson Freitas, que Deus o tenha.

AGRADECIMENTOS

Agradeço inicialmente ao professor Ricardo Pires Peçanha, pela oportunidade de participar deste projeto e seu imenso zelo durante o seu desenvolvimento.

Agradeço também à professora Karina Moita de Almeida, professora de operações unitárias, matéria que inclui escoamento em meios porosos e que contribuiu para que eu adquirisse os conhecimentos necessários para este trabalho.

Em seguida, agradeço imensamente ao fornecedor de recheios industriais Porcelanas Rex S.A. (São Caetano do Sul - SP), que generosamente cedeu o material necessário para o trabalho e sem o qual este não seria possível.

Agradeço também ao professor Ladimir José de Carvalho, que gentilmente me permitiu utilizar seu microscópio para avaliar a superfície das selas de Berl.

Sou grato também ao Antônio Carlos Pessoa Pereira, por seu auxílio na instalação do permeâmetro e conselhos a respeito de sua montagem.

Finalmente, agradeço à minha família, pelo apoio durante todo este processo.

RESUMO

Nesic de Freitas, L. S. F. **Escoamento em Meios Porosos - Caracterização Geométrico-Hidrodinâmica de Recheios Randômicos: Selas de Berl**. Rio de Janeiro, 2023. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Química) - Escola de Química, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2023.

O modelo de Kozeny-Carman prevê a permeabilidade de um meio poroso, porém depende de uma constante empírica chamada “fator estrutural” difícil de estimar no caso de partículas reentrantes. A fim de dar mais confiabilidade a este modelo, foram coletados dados de permeametria para um recheio randômico industrial comum: selas de Berl. A permeabilidade do meio no contexto do escoamento monofásico foi determinada como sendo igual a $5.52 \cdot 10^{-8} \text{ m}^2$ e o fator estrutural como sendo 95,407, longe da faixa de 3,5 a 5,5 esperada para partículas de geometria simples em meios de porosidade de 30 a 50% (Coulson & Richardson, 1978). Somando a estes dados os de trabalhos anteriores (Cukierman *et al.*, 2018), foi desenvolvida uma correlação para estimar o fator estrutural com parâmetros geométrico-estruturais da partícula.

Palavras-chave: Meios Porosos, Kozeny-Carman, Permeabilidade, Darcy, Selas de Berl

ABSTRACT

Nesic de Freitas, L. S. F. **Escoamento em Meios Porosos - Caracterização Geométrico-Hidrodinâmica de Recheios Randômicos: Selas de Berl**. Rio de Janeiro, 2023. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Química) - Escola de Química, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2023.

The Kozeny-Carman model predicts the permeability of a porous medium, but it relies on an empirical constant called the "structural factor," which is challenging to estimate in the case of re-entrant particles. In order to enhance the reliability of this model, permeametry data were collected for a common industrial random packing: Berl saddles. The permeability of the medium in the context of single-phase flow was determined to be $5,52 \cdot 10^{-8} \text{ m}^2$, and the structural factor was found to be 95,407, far from the range of 3,5 to 5,5 expected for particles of simple geometry in media of porosity from 30 to 50% (Coulson & Richardson, 1978). Combining these data with those from previous studies (Cukierman et al., 2018), a correlation was developed to estimate the structural factor using geometric-structural parameters of the particle.

Keywords: Porous Media, Kozeny-Carman, Permeability, Darcy, Berl saddles

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 - Sela de Berl cedida pelo fornecedor Porcelanas Rex _____	4
Figura 2 - Sela de Berl revestida com papel milimetrado _____	5
Figura 3 - Sela de Berl comercializada pelo fabricante Jiangxi Kelley Chemical Packing Co., Ltd, semelhante às selas utilizadas nos experimentos deste trabalho _	6
Figura 4 - Selas com suas reentrâncias preenchidas com massinha de modelar ____	6
Figura 5 - Esquema (A) e Foto da montagem do permeâmetro (B) _____	8
Figura 6 - Ilustração do manômetro de tubo inclinado _____	9
Figura 7 – Imagem ampliada 101x no microscópio ZEISS smartzoom 5, superfície de uma sela de Berl feita de porcelana (A) e análise de cavidades na superfície (B)____	13
Figura 8 - Designs de selas de Berl patenteados em 1929 _____	14
Figura 9 - Gráfico de $\Delta p/L$ Vs q_z com regressão linear e coeficiente de determinação _____	Erro! Indicador não definido.
Figura 10 - Partículas avaliadas em Cukierman et al., 2018 _____	16
Figura 11 - Gráfico do valor previsto para β pelo modelo linear versus seu valor determinado experimentalmente, com a reta $y = x$ como referência _____	19
Figura 12 - Gráfico do valor previsto para β pelo modelo produto versus seu valor determinado experimentalmente, com a reta $y = x$ como referência _____	19

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Condições do caso particular estudado e suas consequências. _____	2
Tabela 2 - Medidas a respeito do Permeâmetro _____	11
Tabela 3 - Parâmetros da sela de Berl (média $\pm$ desvio padrão) comparados aos dados fornecidos na ficha de produto do fabricante Jiangxi Kelley Chemical Packing Co., Ltd _____	11
Tabela 4 - Dados de permeametria _____	15
Tabela 5 - Permeabilidade e fator estrutural calculados para as selas de Berl _____	16
Tabela 6 - Comparação entre os principais modelos na literatura para estimação da permeabilidade e o resultado experimental _____	16
Tabela 7 - Parâmetros para selas de Berl e partículas reentrantes avaliadas no trabalho de Cukierman et al., 2018 _____	17
Tabela 8 - Correlação entre os parâmetros avaliados e o fator estrutural _____	17
Tabela 9 - Comparação entre valores previstos para o fator estrutural e o determinado experimentalmente _____	18

Lista de símbolos

Letras latinas

Símbolo	Descrição	Dimensão
A	Área de superfície	L^2
C	Comprimento da coluna inclinada de líquido	L
D	Diâmetro do permeâmetro	L
dp	Diâmetro da esfera de mesmo volume que a partícula	L
ds	Diâmetro da esfera de igual área de superfície à da partícula	L
g	Aceleração do campo gravitacional	LT^{-2}
h	Altura da coluna de líquido	L
k	Permeabilidade do meio	L^2
L	Distância entre duas tomadas de pressão no permeâmetro	L
<i>m</i>	Massa	M
Ma	Número de Mach	Adimensional
p	Pressão	$ML^{-1}T^{-2}$
q _z	Velocidade de escoamento do fluido	LT^{-1}
r	Correlação	Adimensional
R ²	Coeficiente de determinação	Adimensional
S _{esp}	Superfície específica	L^{-1}
t	Coordenada tempo	T
UPV	Unidades (de recheio) por volume de coluna	L^{-3}
V	Volume	L^3

Letras gregas

Símbolo	Descrição	Unidade
β	Fator estrutural	Adimensional
ε	Porosidade	Adimensional
η	Índice de convexidade	Adimensional
θ	Ângulo entre o tubo inclinado e a paralela	$M^0L^0T^0$
μ	Viscosidade	$ML^{-1}T^{-1}$
ν	Velocidade do som no nível do mar	LT^{-1}
π	Constante trigonométrica	Adimensional
ρ	Densidade	ML^{-3}
τ	Tensor tensão no fluido	$ML^{-1}T^{-2}$
Φ	Esfericidade	Adimensional

ÍNDICE

1. Introdução	1
2. Objetivo	1
3. Fundamentos	2
4. Materiais e Métodos	3
4.1. Selas de Berl	3
4.2. Diâmetro da esfera de mesmo volume que a partícula (d_p)	4
4.3. Diâmetro da esfera de igual área de superfície à da partícula (d_s)	4
4.4. Esfericidade	5
4.5. Índice de Convexidade	6
4.6. Porosidade do meio	7
4.7. Efeito de parede	7
4.8. Análise superficial	7
4.9. Ensaio de permeametria	7
4.10. O permeâmetro	8
4.11. O medidor de queda de pressão	9
4.12. A permeametria	9
4.13. Modelo para estimação do fator estrutural	10
5. Resultados e Discussão	11
5.1. Medidas a respeito do permeâmetro e das partículas	11
5.2. Permeametria	15
5.3. Modelo para o fator estrutural	16
6. Conclusões	20
7. Sugestões para Trabalhos Futuros	20
8. Referências	21

1. Introdução

Diversos equipamentos na indústria fazem uso de escoamento em meios porosos, para fins variados. O projeto e dimensionamento destes equipamentos requer uma previsão da queda de pressão que neles irá ocorrer. Para tal, é necessário o conhecimento ou estimativa de diversos fatores, entre eles, a permeabilidade do meio (k), que pode ser obtida pelo modelo de Kozeny-Carman que depende de parâmetros da partícula e do meio.

Este modelo semi-empírico depende da porosidade do meio, da esfericidade das partículas, do tamanho das partículas, representada pelo diâmetro da esfera de mesmo volume, e de um chamado “fator estrutural” (β), uma constante adimensional da qual pouco se sabe além do fato de depender da porosidade do meio e, possivelmente, de fatores de forma. As incógnitas ao redor do fator estrutural se tornam ainda mais numerosas em se tratando de partículas reentrantes, uma vez que seu valor pode ser estimado entre 3,5 e 5,5 para partículas de geometria simples formando meios de porosidades entre 30 e 50% (Coulson & Richardson, 1978), enquanto em outros casos este valor pode ser muito distante desta faixa.

Em grande parte das aplicações, os recheios randômicos estão entre os mais comumente utilizados. Dentre os recheios randômicos, um dos mais frequentes em seu emprego são as selas de Berl, justamente pela sua alta reentrância que por sua vez lhe confere elevada área superficial. Entretanto, devido a esta natureza, as estimativas do fator estrutural geralmente utilizadas são extremamente imprecisas.

Desse modo, as selas de Berl foram selecionadas para serem avaliadas neste trabalho de forma a determinar experimentalmente a permeabilidade do meio por elas constituído, no contexto de escoamento monofásico. Ademais, em conjunto com dados obtidos anteriormente (Cukierman *et al.*, 2018) para outras partículas reentrantes, buscou-se desenvolver uma correlação capaz de prever o fator estrutural a partir de parâmetros associados a estas partículas e o meio poroso.

2. Objetivo

Assim sendo, a motivação do trabalho é coletar dados a respeito das selas de Berl por permeametria a fim de dar maior confiabilidade às previsões da permeabilidade de meios porosos com o modelo de Kozeny-Carman. Nesta mesma

linha, o objetivo específico é correlacionar β , constante empírica do modelo de Kozeny-Carman, com parâmetros geométricos-estruturais do meio poroso.

3. Fundamentos

O estudo do escoamento de fluidos em meios porosos é abordado pela Teoria de Misturas de Truesdell (Truesdell, 1961), inserida no campo da Mecânica do Contínuo. Essa teoria baseia-se na conservação de massa e momento linear tanto para o fluido quanto para o sólido, que interagem mecanicamente sob a influência do campo gravitacional terrestre.

Neste trabalho, concentramo-nos no cenário específico em que um fluido newtoniano escoar através de um meio poroso que permanece estacionário em relação a um referencial suficientemente inercial para a análise do problema. Em outras palavras, o problema é examinado por um observador que apenas percebe as forças de interação atuando no fluido e no sólido. Neste caso, a Equação do Movimento para o fluido é da seguinte forma:

$$\rho[\varepsilon \frac{\partial}{\partial t}(\frac{q}{\varepsilon}) + grad(\frac{q}{\varepsilon})q] = -grad p + div \tau - F + \rho g \quad (1)$$

Onde " ρ " é a densidade do fluido, " ε " é a porosidade do meio, " q " é a velocidade superficial do fluido, " t " é a coordenada "tempo", " p " é a pressão, " τ " é o tensor tensão sobre o fluido, " F " é a força resistiva, e " g " é a aceleração do campo gravitacional.

O caso particular estudado neste trabalho tem as seguintes características e consequências:

Tabela 1 - Condições do caso particular estudado e suas consequências.

Fluido escoar com baixa velocidade e em regime permanente, ou seja, sem aceleração	$\rho[\varepsilon \frac{\partial}{\partial t}(\frac{q}{\varepsilon}) + grad(\frac{q}{\varepsilon})q] = 0$
Fluido Newtoniano	$div \tau \approx 0$
Meio poroso é orientado horizontalmente, as forças gravitacionais são consideradas nulas	$\rho g = 0$

Nestas circunstâncias, a equação do movimento é reduzida à Lei de Darcy (1856), a Eq. 2 a seguir:

$$\frac{p_1 - p_2}{L} = \frac{\mu}{k} q_z \quad (2)$$

$$Ma = \frac{q_z}{v} \quad (3)$$

Onde “ p_1 ” e “ p_2 ” são as pressões em dois pontos a uma distância “ L ” ao longo do meio poroso na direção do escoamento, respectivamente, “ μ ” é a viscosidade do fluido e “ k ” é a permeabilidade do meio.

A Lei de Darcy requer além das condições supracitadas que o meio poroso seja isotrópico e homogêneo, caso em que a permeabilidade seja constante em qualquer direção no meio poroso e a porosidade igual em qualquer região deste assim como que o escoamento seja incompressível.

No caso de gases, para um número de Mach, calculado pela Eq. 3, onde “ q ” é a velocidade superficial do gás e v é a velocidade do som no nível do mar (onde foi realizado o experimento), inferior a 0,3 o escoamento pode ser considerado incompressível enquanto as demais condições podem ser verificadas pela aplicação da Lei de Darcy sobre os dados coletados.

A dependência linear do gradiente de pressão com a velocidade superficial prevista pela lei de Darcy permite, a partir de dados experimentais dessas duas grandezas, calcular a permeabilidade (k) do meio poroso.

Tendo em vista que a permeabilidade de meios porosos pode ser prevista com o modelo de Kozeny-Carman, também conhecido como “modelo capilar”, foi possível correlacionar a constante empírica beta do referido modelo (também conhecida por fator estrutural), com parâmetros geométricos-estruturais das partículas e do poroso. Conforme delineado na Introdução, esse foi o objetivo do presente trabalho.

4. Materiais e Métodos

4.1. Selas de Berl

O fornecedor de recheio de colunas Porcelanas Rex S. A. (São Caetano do Sul - SP) generosamente cedeu 5kg de selas de Berl de tamanho nominal 15 mm para fim acadêmico (Figura 1).



Figura 1 - Sela de Berl cedida pelo fornecedor Porcelanas Rex

4.2. Diâmetro da esfera de mesmo volume que a partícula (d_p)

$$V = \frac{m}{\rho} \quad (4)$$

$$d_p = \sqrt[3]{\frac{6V}{\pi}} \quad (5)$$

Para calcular o diâmetro da esfera de igual volume, foi primeiro necessário obter o volume médio de uma partícula. Para tal, foi determinada a massa média de uma partícula pesando-se dez (10) selas de Berl selecionadas aleatoriamente e realizando uma média. Em seguida, foi medida a densidade média de uma partícula por picnometria. Este processo também foi realizado com dez (10) selas de Berl selecionadas aleatoriamente para ser realizada uma média. Com estes dois dados foi possível determinar o volume médio de uma partícula segundo a Eq. 4. Sabendo o volume médio de uma partícula, foi possível calcular o diâmetro da esfera de mesmo volume segundo a Eq. 5.

4.3. Diâmetro da esfera de igual área de superfície à da partícula (d_s)

$$d_s = \sqrt{\frac{A}{\pi}} \quad (6)$$

Para determinar o diâmetro da esfera de igual área de superfície, foi primeiro necessário determinar a área de superfície de uma partícula ($A \equiv \text{m}^2$). Para tal, a sela de Berl foi revestida com seções de papel milimetrado (Figura 2) e a área total contabilizada somando a área de papel milimetrado utilizada para cobri-la. Esta medida foi realizada três (3) vezes com partículas diferentes, selecionadas aleatoriamente, a fim de se realizar uma média. Com a área de superfície foi possível calcular o diâmetro da esfera de igual área de superfície segundo a Eq. 6.

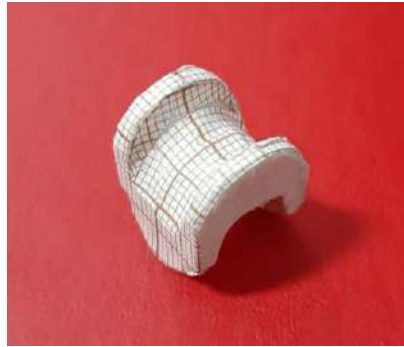


Figura 2 - Sela de Berl revestida com papel milimetrado

4.4. Esfericidade

$$\Phi = \left(\frac{dp}{ds}\right)^2 \quad (7)$$

A esfericidade (Φ) pode ser calculada pela Eq. 7 e é uma medida do quão próxima de uma esfera é uma partícula, sendo 1 (100%) para uma esfera, e, pela chamada desigualdade isoperimétrica, $0 < \Phi < 1$ para qualquer outro sólido.

$$V = \frac{\varepsilon}{UPV} \quad (8)$$

$$A = \frac{Sesp}{UPV} \quad (9)$$

A esfericidade também foi calculada utilizando os dados fornecidos pela ficha de produto do fabricante Jiangxi Kelley Chemical Packing Co., Ltd. que fabrica um produto essencialmente idêntico (Figura 3) e de mesmo tamanho nominal (15mm) utilizando os dados de porosidade (fração de vazio, $\varepsilon \equiv$ adimensional), unidades por volume de recheio ($UPV \equiv \text{unidades}/\text{m}^3$) e superfície específica, a área de superfície por volume de recheio ($Sesp \equiv \text{m}^2/\text{m}^3$) tal que o volume de uma partícula foi calculado

pela Eq. 8 e a área de superfície de cada partícula foi calculada pela Eq. 9. A partir destes valores, d_p , d_s e Φ foram calculados da mesma forma que anteriormente.



Figura 3 - Sela de Berl comercializada pelo fabricante Jiangxi Kelley Chemical Packing Co., Ltd, semelhante às selas utilizadas nos experimentos deste trabalho

4.5. Índice de Convexidade

O índice de convexidade ($\eta \equiv$ adimensional), também chamado de índice de reentrância, é definido como a razão entre o menor volume que é necessário se adicionar a uma partícula reentrante para que esta deixe de ser reentrante, e o volume desta partícula. Para determinar este volume que deve ser adicionado, 12 selas de Berl íntegras, ou seja, sem danos, foram selecionadas por catação, identificadas por número (de 1 a 12) e pesadas. Em seguida, cada sela teve suas reentrâncias preenchidas com massinha de modelar tal que a partícula deixasse de ser reentrante (Figura 4), e as selas com a massinha foram novamente pesadas. A diferença entre essas duas massas equivale à massa de massinha adicionada e o seu volume pode ser calculado dividindo este valor pela densidade da massinha, que foi determinada por picnometria com 3 bolinhas de massinhas distintas para se realizar uma média. A massa das selas individuais pode ser dividida pela densidade da porcelana, também determinada por picnometria.



Figura 4 - Selas com suas reentrâncias preenchidas com massinha de modelar

4.6. Porosidade do meio

A porosidade ($\varepsilon \equiv$ adimensional) corresponde à razão entre o volume não preenchido por sólido, ou seja, aquele pelo qual o fluido pode escoar, e o volume total do meio. A porosidade foi determinada pesando-se o permeâmetro vazio e cheio. A diferença entre essas duas medidas é a massa de recheio nele contido. Com o dado da densidade das selas, o volume de recheio pode então ser calculado. Sendo o permeâmetro aproximadamente um cilindro de diâmetro “D” e comprimento “L” medidos respectivamente com um paquímetro e uma trena, o seu volume interno foi calculado e a razão entre o volume de recheio e o volume total resulta na fração preenchida. A fração de vazio, portanto, será a unidade (1 ou 100%) subtraída deste valor.

4.7. Efeito de parede

O grupo adimensional dp/D , relacionado à existência de efeitos de parede na interação fluido-sólido, é calculado pela razão entre o diâmetro da esfera de mesmo volume que a partícula, e o diâmetro interno do permeâmetro.

4.8. Análise superficial

Foi realizada uma análise da superfície das selas de Berl com o auxílio de um microscópio ZEISS smartzoom 5. Este equipamento permite avaliar a porosidade superficial de um objeto assim como a suavidade desta superfície na escala de micrômetros.

4.9. Ensaio de permeametria

Ar atmosférico é forçado através do permeâmetro recheado com as partículas. A vazão é medida por um rotâmetro entre a fonte de ar comprimido e o permeâmetro, e a queda de pressão por um manômetro de tubo inclinado ligado por mangueiras de silicone a duas tomadas de pressão em dois pontos próximos a cada uma das extremidades do permeâmetro.

4.10. O permeâmetro

O permeâmetro consiste em um tubo de acrílico com uma entrada e uma saída alinhadas com o eixo do tubo em cada extremidade aonde são ligadas mangueira para que passe ar pelo meio. Há mais duas entradas dois pontos, próximo do início e próximo do final do permeâmetro para acoplar-se a mangueiras para medir a pressão no início e no final do trajeto que o fluido faz pelo meio. No equipamento estão ligadas, portanto, 4 mangueiras, duas saindo de cada extremidade do tubo alinhadas com ele e outras duas saindo próximo de cada extremidade, saindo perpendicular ao tubo.

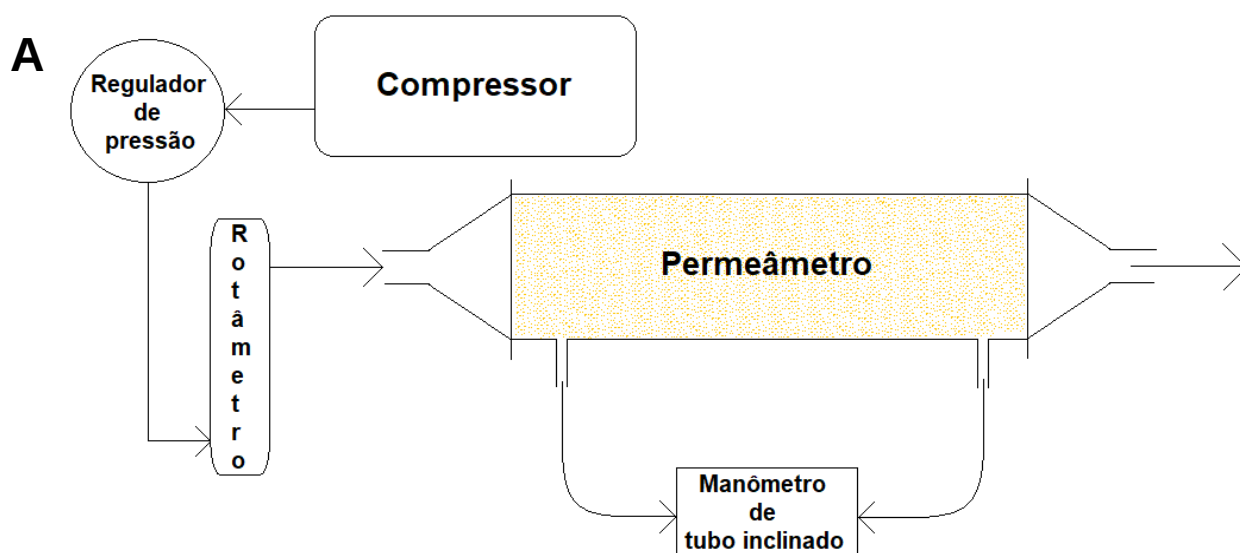


Figura 5 - Esquema (A) e Foto da montagem do permeâmetro (B)

4.11. O medidor de queda de pressão

Foi utilizado um manômetro de tubo inclinado (Figura 6) utilizando óleo mineral (densidade de 0,86 g/cm³) como fluido manométrico. Este instrumento permite medir diferenças de pressão com precisão de 1 Pa.

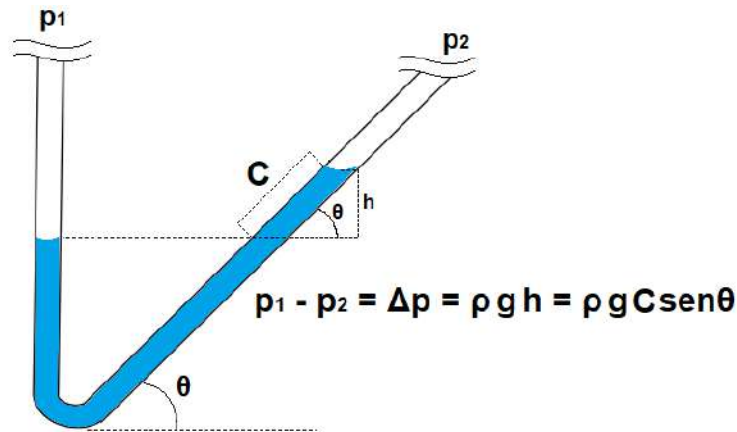


Figura 6 - Ilustração do manômetro de tubo inclinado

4.12. A permeametria

$$\frac{\Delta p}{L} = \frac{\mu}{k} q_z \quad (10)$$

$$k = \frac{(dp)^2}{1030} \quad (11)$$

$$k = \frac{(\Phi dp)^2 \varepsilon^3}{36\beta(1-\varepsilon)^2} \quad (12)$$

Para cada vazão na faixa avaliada, a queda de pressão correspondente foi medida. Com estes dados, assim como a distância entre os dois pontos onde se mediu a diferença de pressão, foi realizada uma regressão linear seguindo o modelo de Darcy (1856).

O modelo de Darcy segue a Eq. 10 onde Δp ($\equiv$ Pa) é a queda de pressão entre dois pontos no meio poroso, L ($\equiv$ m) é a distância entre estes dois pontos, μ é a viscosidade do fluido, k ($\equiv$ m²) é a permeabilidade do meio, e q_z ($\equiv$ m/s) é a velocidade de escoamento do fluido na direção do eixo do permeâmetro.

Foram utilizadas as correlações de Massarani (1971 apud Peçanha, 2014) para estimar permeabilidade do meio para selas de Berl (Eq. 11) e a de Kozeny-Carman (Eq. 12) (Massarani, 2002 apud Peçanha, 2014) para determinar o fator estrutural “ β ”.

4.13. Modelo para estimação do fator estrutural

$$r = \frac{\sum (xi - xm) * (yi - ym)}{\sqrt{\sum (xi - xm)^2 * \sum (yi - ym)^2}} \quad (13)$$

Inicialmente foi realizada uma análise de correlação para verificar a qualidade da dependência entre os parâmetros e o fator estrutural avaliando os conjuntos de dados com valores correspondentes.

Isto foi feito utilizando a Eq. 13 para a correlação (r) onde xi e yi são os valores correspondentes no conjunto de dados do parâmetro em questão e do fator estrutural, e xm e ym são as médias dos valores em cada conjunto respectivamente. Uma correlação de 100% corresponde a uma correlação crescente linear, enquanto uma correlação de -100% corresponde a uma correlação decrescente linear. Por outro lado, uma correlação de 0% corresponde a ausência de qualquer correlação.

Em seguida, foi realizada uma análise de modelos para o fator estrutural utilizando os dados determinados experimentalmente em conjunto com os dados de outras partículas reentrantes do trabalho de Cukierman *et al.*, 2018 aplicando funções variadas aos parâmetros calculados.

Isto foi realizado através de um código em Python utilizando *train test split* a partir da biblioteca Scikit, este mecanismo permite separar o conjunto de dados e “treinar” os modelos no conjunto de treinamento e testar sua precisão no conjunto teste utilizando *machine learning* na prospecção de modelos adequados.

5. Resultados e discussão

5.1. Medidas a respeito do permeâmetro e das partículas

Tabela 2 - Medidas a respeito do Permeâmetro

Comprimento do meio poroso (Medida $\pm$ incerteza do instrumento)	$(9,820 \pm 0,005) \times 10^{-1} \text{ m}$
Diâmetro do meio poroso (Média $\pm$ desvio padrão)	$(5,89 \pm 0,08) \times 10^{-2} \text{ m}$
Distância entre as tomadas de pressão (L) (Medida $\pm$ incerteza do instrumento)	$(9,000 \pm 0,005) \times 10^{-1} \text{ m}$
Massa do permeâmetro (vazio) (Medida $\pm$ incerteza do instrumento)	$2,1850 \pm 0,0001 \text{ kg}$
Massa do permeâmetro (recheado) (Medida $\pm$ incerteza do instrumento)	$4,3897 \pm 0,0001 \text{ kg}$
Volume interno permeâmetro	$2,673 \times 10^{-3} \text{ m}^3$

Tabela 3 - Parâmetros da sela de Berl (média $\pm$ desvio padrão) comparados aos dados fornecidos na ficha de produto do fabricante Jiangxi Kelley Chemical Packing Co., Ltd

Parâmetro	Experimental	Fabricante	Discrepância
Massa de uma sela	$5,36 \pm 0,20 \text{ g}$	Dado não fornecido	Não calculado
Densidade porcelana	$2230 \pm 16 \text{ kg/m}^3$	2300 a 2400 kg/m^3	$<7,1\%$
Densidade massinha	$1245 \pm 8 \text{ kg/m}^3$	Dado não fornecido	Não calculado
Massinha adicionada	$2,38 \pm 0,17 \text{ g}$	Dado não fornecido	Não calculado
Área superficial de uma sela	$1403 \pm 11 \text{ mm}^2$	Dado não fornecido	Não calculado
Índice de convexidade “ η ”	$0,80 \pm 0,07$	Dado não fornecido	Não calculado
Esfericidade “ ϕ ”	0,618	0,654	5,1%
Porosidade “ ϵ ”	0,628	0,58	8,3%
dp/D	0,2828	Dado não fornecido	Não calculado

Nota-se que os dados determinados foram próximos daqueles do fabricante. Em especial, no caso da porosidade, isso sugere que o empacotamento das partículas no permeâmetro seja equivalente ao de uma coluna.

Na literatura, em especial no livro de referência “Perry’s Chemical Engineer’s Handbook”, o valor para a esfericidade de selas de Berl é dado como sendo 0,3 enquanto o valor determinado experimentalmente foi de 0,618. Este livro cita como fonte deste dado Carman, 1937 enquanto este, por sua vez, cita um catálogo alemão como fonte original, “Berl, catalogue of Messrs. Ditt & Fries, Wiesbaden” que aparenta ter sido perdido pelo tempo.

Dada a falta de fontes originais para o dado que até hoje é citado na literatura e com o fim de investigar a causa desta discrepância de 106% foram levantadas duas hipóteses:

Hipótese 1:

A primeira hipótese é pertinente à técnica utilizada para medir a área de superfície da partícula. A técnica utilizada neste trabalho para medir a área superficial faz uso de papel milimetrado. Esta técnica é uma medida direta e por esta perspectiva pode ser considerada mais confiável. Contudo, uma técnica comum na época e ainda hoje utilizada e que possivelmente foi a utilizada originalmente na determinação da área superficial das partículas é a técnica BET (Brunauer-Emmett-Teller).

Esta técnica utiliza isotermas de adsorção para medir indiretamente a área de uma superfície. Como essa técnica mede a área de superfície real, que não necessariamente é lisa, caso a superfície possua uma quantidade significativa de micro cavidades a área dessas cavidades pode ser significativa e resultar numa área de superfície medida muito maior do que a área calculada supondo que a superfície seja lisa, como é o caso da técnica com o papel milimetrado. Para averiguar esta hipótese, a superfície da porcelana que constitui as selas de Berl em questão foi avaliada sob um microscópio ZEISS smartzoom 5.

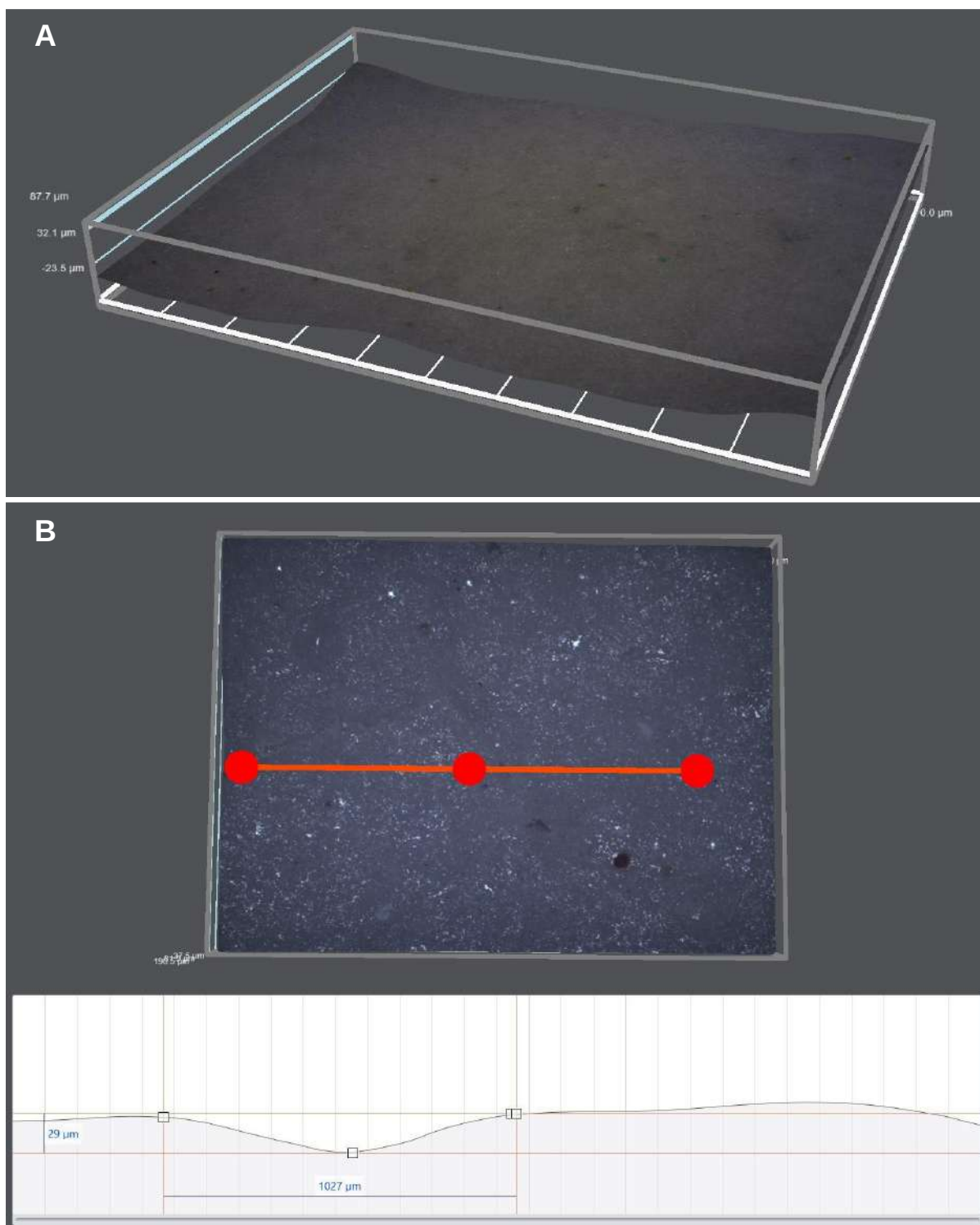


Figura 7 – Imagem ampliada 101x no microscópio ZEISS smartzoom 5, superfície de uma sela de Berl feita de porcelana (A) e análise de cavidades na superfície (B)

Como pode-se observar pela Figura 7A, mesmo a uma magnificação de 101 vezes, na escala de micrômetros, a superfície da porcelana é extremamente lisa.

De fato, foram observadas cavidades na superfície (Figura 7B) porém estas cavidades eram esparsas e rasas. Considerando que para que uma esfericidade

fosse 106% maior entre duas partículas com o mesmo volume, a área de superfície da partícula com menor esfericidade deveria ser quase o dobro da outra, é improvável que isto possa ser justificado somente pela contribuição para área superficial de cavidades na superfície do material.

Hipótese 2:

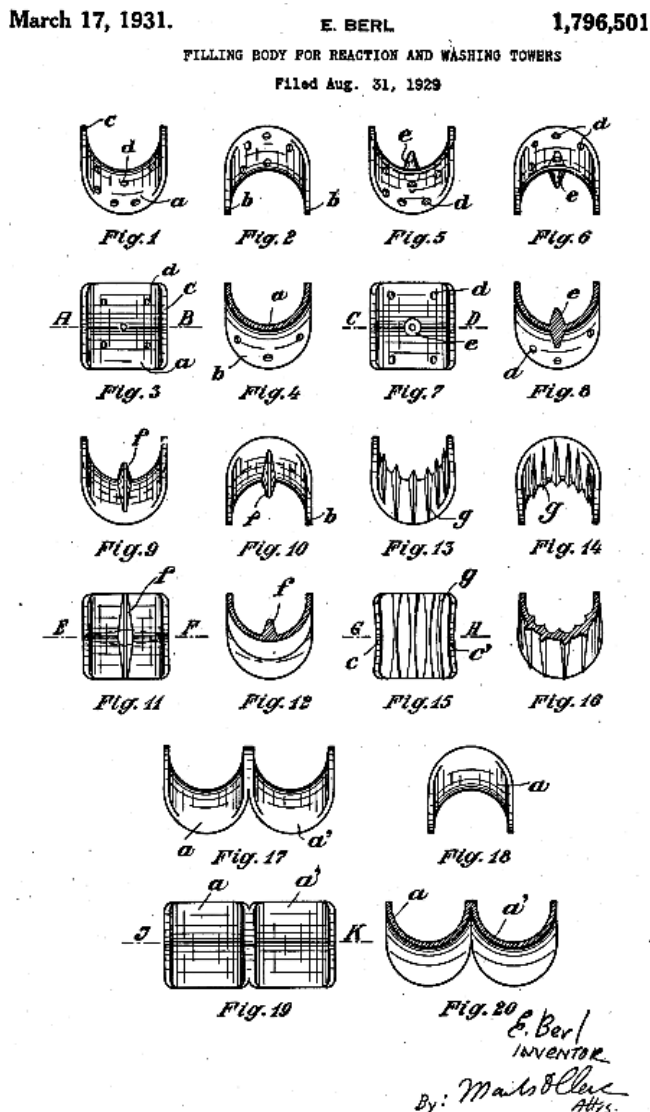


Figura 8 - Designs de selas de Berl patenteados em 1929

Atualmente, a geometria de recheios do tipo sela de Berl difere pouco de um fabricante para outro. O maior diferencial é no tipo e qualidade do material da qual são feitas. Originalmente, no entanto, Berl patenteou diversos *designs* diferentes para os seus recheios e os patenteou em 1929 (Figura 8).

As imagens dos recheios na patente de Ernst Berl ilustram diversos *designs* de selas. Com e sem furos; com nenhuma, uma, ou mais cristas na sua concavidade; selas individuais e acopladas em par. Naturalmente, a esfericidade de cada um destes modelos será diferente entre si, porém, nota-se também que a espessura das selas ilustradas é bem menor do que a daquelas utilizadas neste trabalho. Isto justificaria a esfericidade menor nos livros de referência uma vez que o volume seria menor para uma área superficial semelhante, resultando num d_p menor para um d_s próximo e, conseqüentemente numa esfericidade inferior.

5.2. Permeametria

Tabela 4 - Dados de permeametria

q (m/s)	Δp (Pa)	Viscosidade do ar a 22,5°C (Pa*s)
0,245	77,9	$1,837 \times 10^{-5}$
0,306	97,3	
0,367	105,7	
0,428	125,1	

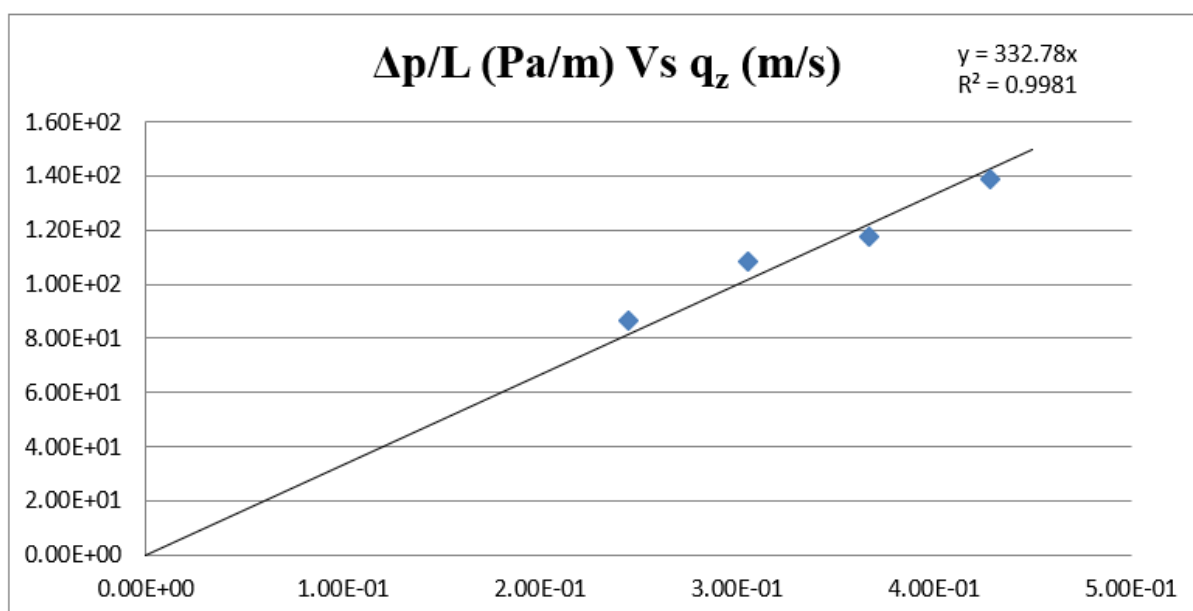


Figura 9 - Gráfico de $\Delta p/L$ Vs q_z com regressão linear e coeficiente de determinação

Pelo modelo de Darcy, no gráfico de $\Delta p/L$ Vs q_z (Figura 9) a permeabilidade “k” será igual à razão entre a viscosidade do fluido, ar atmosférico a 22,5 °C, e o coeficiente angular da reta.

O número de Mach máximo, isto é, considerando a maior velocidade superficial utilizada no experimento, foi de 0,00126, bem menor do que o 0,3 necessário para ser considerado escoamento incompressível e, portanto, satisfazendo esta condição para a aplicação da lei de Darcy.

O coeficiente de determinação (R^2) desta regressão sendo 99,81% evidencia fortemente que o regime de Darcy representa bem a relação entre a queda de pressão e a vazão para a faixa de vazões avaliada.

Tabela 5 - Permeabilidade e fator estrutural calculados para as selas de Berl

Permeabilidade do meio “k” (pelo gráfico de $\Delta p/L$ Vs q_z)	$5,52 \times 10^{-8} \text{ m}^2$
Fator estrutural “ β ” pelo modelo de Kozeny-Carman	95,407

Tabela 6 - Comparação entre os principais modelos na literatura para estimação da permeabilidade e o resultado experimental

Modelo para a permeabilidade do meio	Equação	Estimativa do modelo	Erro em relação à determinação experimental
Correlação de Massarani (1971) para selas de Berl	$\frac{dp^2}{1030}$	$2,67 \times 10^{-7} \text{ m}^2$	383,7%
Correlação de Kozeny-Carman (Massarani 2002) usando $\beta = 5$	$\frac{(\Phi dp)^2 \varepsilon^3}{36\beta(1 - \varepsilon)^2}$	$1,05 \times 10^{-6} \text{ m}^2$	1808,1%

O modelo de Massarani (1971) erra por uma ordem de grandeza o valor da permeabilidade.

Similarmente, a aproximação $\beta = 5$ usada para partículas de geometria simples a baixas porosidades e às vezes estendida para outros casos também apresentou erro elevado.

5.3. Modelo para o fator estrutural



Figura 10 - Partículas avaliadas em Cukierman et al., 2018

Tabela 7 - Parâmetros para selas de Berl e partículas reentrantes avaliadas no trabalho de Cukierman et al., 2018

Partícula	Parâmetro				
	η	Φ	ε	dp/D	β
Amostra "A"	0,8	0,41	0,66	0,1138	5,831
Amostra 1	0,29	0,62	0,59	0,0628	6,021
Amostra 2	0,33	0,5	0,59	0,0917	6,310
Amostra 3	0,9	0,5	0,72	0,1036	7,994
Amostra 4	0,82	0,46	0,74	0,1443	7,627
Selas de Berl 15 mm	0,8	0,618	0,628	0,2828	95,407

Tabela 8 - Correlação entre os parâmetros avaliados e o fator estrutural

Parâmetro	Correlação com β (%)
ε	-18,37
Φ	57,40
η	27,35
dp/D	94,36

A literatura faz a colocação de que o fator estrutural é uma função da porosidade e, possivelmente, de outros parâmetros (Peçanha 2014). Contudo, conforme apresentado na tabela 8, a análise de correlação sugere uma correlação fraca entre a porosidade e o fator estrutural (-18,37%). A correlação entre o índice de reentrância também aparenta ser fraca (27,35%). A correlação para a esfericidade é razoável (57,40%) enquanto há forte correlação com dp/D (94,36%). Como os trabalhos originais que fizeram a colocação a respeito da dependência do fator estrutural da porosidade trabalhavam com meios de porosidades mais baixas, é possível que a influência da porosidade diminua com seu próprio aumento.

$$\beta(\Phi, \varepsilon, \eta, dp/D) = 23,48 + 113,33 \times \Phi - 203,71 \times \varepsilon + 41,86 \times \eta + 340,10 \times dp/D \quad (14)$$

$$\beta(\Phi, \varepsilon, \eta, dp/D) = 461.1507 \times \Phi^{3.1620} \times \varepsilon^{-4.0495} \times \eta^{0.8929} \times (dp/D)^{1.3803} \quad (15)$$

Feita esta análise, foi realizada a prospecção de modelos utilizando o algoritmo supracitado. Foram encontrados dois modelos com coeficientes de determinação

elevados: Um modelo linear (Eq. 14) e um modelo de produto das variáveis elevadas a potências (Eq. 15).

Tabela 9 - Comparação entre valores previstos para o fator estrutural e o determinado experimentalmente

Partícula	β experimental	Modelo linear ($R^2 = 99,61\%$)		Modelo produto ($R^2 = 99,9959\%$)	
		β previsto	Erro percentual	β previsto	Erro percentual
Amostra "A"	5,831	7,665	31,45%	6,034	3,4829%
Amostra 1	6,021	7,055	17,17%	6,256	3,9006%
Amostra 2	6,310	4,945	21,62%	5,993	5,0303%
Amostra 3	7,994	6,363	20,41%	7,755	2,9912%
Amostra 4	7,627	8,265	8,36%	7,756	1,6925%
Sela de Berl 15 mm	95,407	95,234	0,18%	95,408	0,0006%

Enquanto o modelo linear (Eq. 14) apresentou um coeficiente de determinação $R^2 = 99,61\%$, o modelo de produto (Eq. 15) apresentou $R^2 = 99,9959\%$.

Os coeficientes de determinação são ambos satisfatórios, todavia, o modelo linear apresenta erros de até 31% enquanto o maior erro do modelo produto foi de 5%. Em ambos os modelos a estimação de β para as selas de Berl foi satisfatória com um erro menor que 6 milionésimos em relação ao real pelo modelo produto.

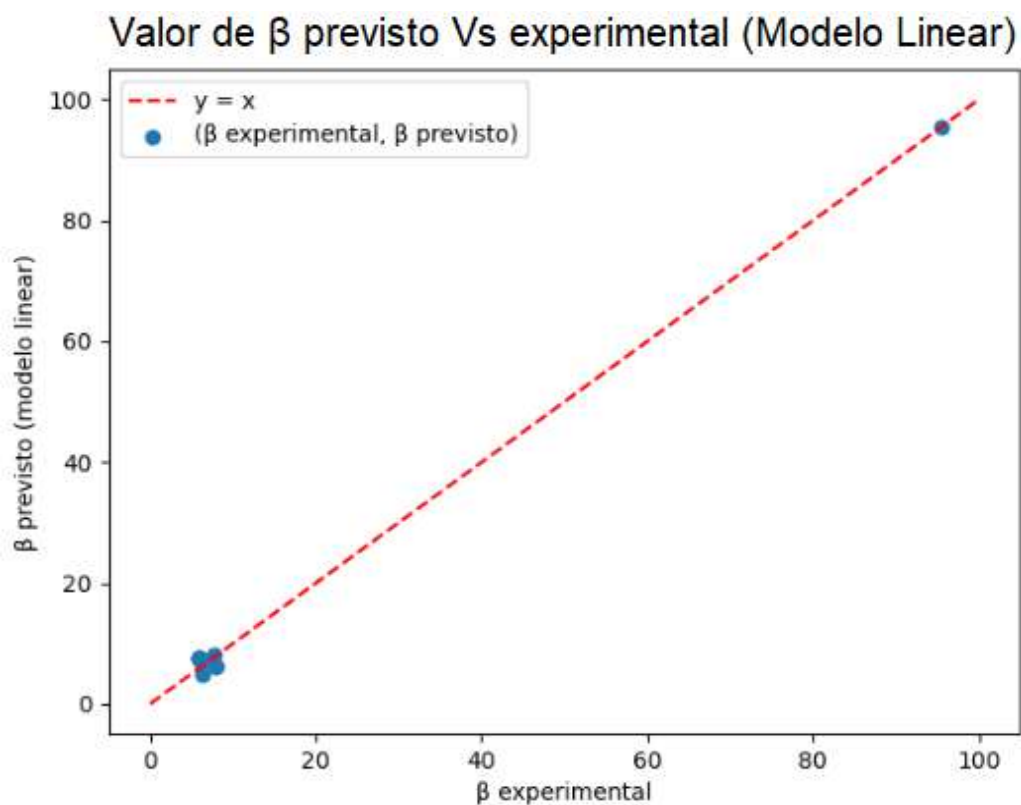


Figura 11 - Gráfico do valor previsto para β pelo modelo linear versus seu valor determinado experimentalmente, com a reta $y = x$ como referência

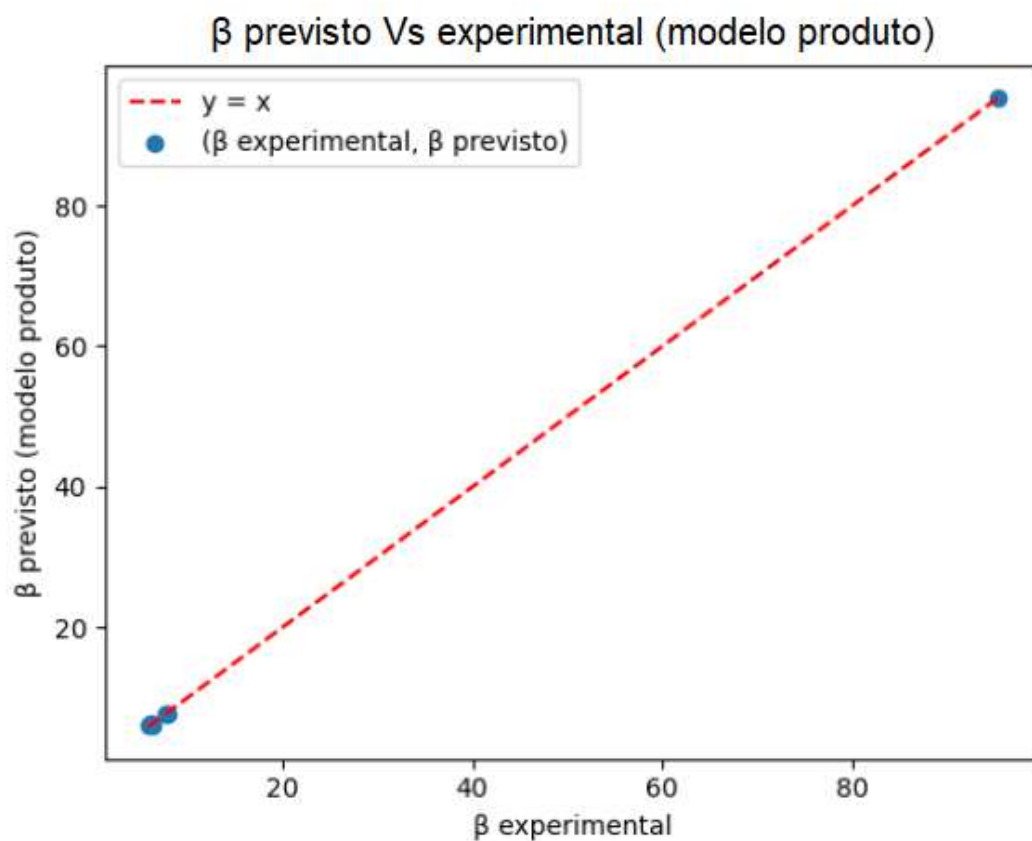


Figura 12 - Gráfico do valor previsto para β pelo modelo produto versus seu valor determinado experimentalmente, com a reta $y = x$ como referência

6. Conclusões

A técnica de recobrimento com papel milimetrado foi validada como uma medida adequada e precisa da área de superfície das selas de Berl. Similarmente, a técnica de preenchimento com massinha de modelar permitiu determinar o índice de convexidade. Ambas as técnicas são novas e tiveram sua aplicação validada.

O modelo de Darcy para escoamento em meios porosos foi empregado com sucesso para determinar a permeabilidade do meio composto por selas de Berl 15mm assim como o fator estrutural associado. A validade desta aplicação é corroborada pelo coeficiente de determinação do modelo de 99,81% e assim a permeabilidade do meio foi determinada como sendo igual a $5,52 \cdot 10^{-8} \text{ m}^2$ e o fator estrutural como sendo igual a 95,407, longe da faixa de 3,5 a 5,5 esperada para partículas de geometria simples em meios de porosidade de 30 a 50% (Coulson & Richardson, 1978).

Com estes dados, acrescidos daqueles para outras partículas reentrantes em Cukierman *et al.*, 2018, foi possível desenvolver um modelo de correlação para o fator estrutural utilizando os parâmetros calculados para a partícula. Este modelo (Eq. 15) apresentou um coeficiente de determinação de 99,996% e foi capaz de estimar o fator estrutural com um erro absoluto máximo de 5%.

7. Sugestões para trabalhos futuros

O modelo proposto para o fator estrutural neste trabalho só foi possível devido ao volume de dados acumulado por trabalhos anteriores, de Medeiros *et al.*, 2018 e Cukierman *et al.*, 2018.

Entretanto, estes trabalhos utilizaram exclusivamente partículas reentrantes do tipo “anel” e por este motivo são limitados em sua capacidade de desenvolver um modelo para prever o fator estrutural de uma partícula reentrante genérica. A adição a este conjunto de dados dos dados obtidos para as selas de Berl contribuiu para aumentar a abrangência do modelo.

Portanto, é sugerido a trabalhos futuros que não só sejam incorporados dados de outras partículas a este conjunto para aumentar sua qualidade, mas também de partículas com outras geometrias variadas a fim de aumentar a sua abrangência.

8. Referências

Carman, P. C. (1997). Fluid flow through granular beds. Chemical Engineering Research and Design, 75, S32–S48. doi:10.1016/s0263-8762(97)80003-2

Coulson, J. M.; Richardson, J. F.: “Chemical Engineering, Volume two - Unit Operations”. 3. ed. Oxford: Pergamon Press, 1978.

Cukierman, Y. S. ; Vega, D. C. L. ; Peçanha, R. P ; Westphalen, G. . Estudo Da Permeabilidade De Meios Porosos Formados Com Partículas Reentrantes. In: 9ª Semana de Integração Acadêmica da UFRJ e 40ª Jornada Giulio Massarani de Iniciação Científica, Tecnológica, Artística e Cultural, 2018, Rio de Janeiro. 9ª Semana de Integração Acadêmica da UFRJ, 2018.

Darcy, H. (1856). Les fontaines publiques de la ville de Dijon: exposition et application des principes à suivre et des formules à employer dans les questions de distribution d'eau (Vol. 1). Victor dalmont.

Ernst Berl, Of Darmstadt, Germany, Filling Body For Reaction And Washing Towers. Application filed August 31, 1939, Serial No. 388,770, and in Germany September 18, 1938, UNITED STATES PATENT office

Handbook of Chemistry and Physics 53rd Edition ; Editor, R. C. Weast ; Publisher, Chemical Rubber Pub., 1972

MEDEIROS, L. Z; PEÇANHA, R. P; "PREVISÃO DA PERMEABILIDADE DE MEIOS POROSOS FORMADOS COM PARTÍCULAS REENTRANTES: VALIDAÇÃO DO MODELO DE KOZENY-CARMAN", p. 838-841 . In: . São Paulo: Blucher, 2018. ISSN 2359-1757, DOI 10.5151/cobeq2018-PT.0230

Peçanha, R. (2014). Sistemas particulados: operações unitárias envolvendo partículas e fluidos. Rio de Janeiro: Elsevier.

Perry, R. H. (Late Editor) e Green, D. W. (Editor), “Perry’s Chemical Engineers’ Handbook”, 6 th ed., McGraw-Hill (1984).

Truesdell CA. Principles of continuum mechanics, Colloquium lectures in pure and applied science No. 5. Socony Mobil Oil Co.; 1961.