



Caracterização Fluidodinâmica de Meios Porosos Formados com Recheios Industriais

Juliana Barbosa Echenique

Projeto de Final de Curso

Orientadores

**Ricardo Pires Peçanha, Ph.D
Gisele de Freitas Westphalen, M.Sc**

Julho de 2021

CARACTERIZAÇÃO FLUIDODINÂMICA DE MEIOS POROSOS FORMADOS COM RECHEIOS INDUSTRIAIS

Juliana Barbosa Echenique

Projeto de Final de Curso submetido ao Corpo Docente da Escola de Química, como parte dos requisitos necessários à obtenção do grau de Bacharel em Engenharia Química.

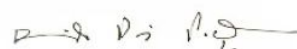
Aprovado por:

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




Yuri Carvalho, D.Sc., MANE S.A.

Orientado por:



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



Gisele de Freitas Westphalen, M.Sc., EPQB-EQ/UFRJ

Rio de Janeiro, RJ - Brasil

Julho de 2021

CIP - Catalogação na Publicação

E18c Echenique, Juliana Barbosa
Caracterização Fluidodinâmica de Meios Porosos Formados com Recheios Industriais / Juliana Barbosa Echenique. -- Rio de Janeiro, 2021.
xii, 64 f.

Orientador: Ricardo Pires Peçanha.
Coorientadora: Gisele de Freitas Westphalen.
Trabalho de conclusão de curso (graduação) - Universidade Federal do Rio de Janeiro, Escola de Química, Bacharel em Engenharia Química, 2021.

1. Permeabilidade. 2. Meios porosos. 3. Queda de pressão. 4. Colunas recheadas. 5. Recheios industriais. I. Peçanha, Ricardo Pires, orient. II. Westphalen, Gisele de Freitas, coorient. III. Título.

Elaborado pelo Sistema de Geração Automática da UFRJ com os dados fornecidos pelo(a) autor(a), sob a responsabilidade de Miguel Romeu Amorim Neto - CRB-7/6283.

AGRADECIMENTOS

A Deus por todas as oportunidades que me foram proporcionadas por Ele ao longo da minha vida e que me permitiram, entre tantas outras coisas, a conclusão desse estudo.

À minha família, em especial aos meus pais, José Flávio e Lígia Iolanda, e ao meu irmão, Lucas, por serem a minha base e a certeza de que nunca estarei sozinha.

Ao meu namorado, Julien, pela dedicação e apoio incondicionais e por nunca permitir que eu deixasse de acreditar em mim mesma.

Aos meus amigos, em especial Larissa, Thais, Bruno, Laura, Gabriel, Gabriel, Iago e Isabela. Pelo apoio, pela companhia, pelas caronas, pelas risadas e pela compreensão, sem os quais a graduação teria sido um desafio ainda maior e muito menos prazeroso.

Aos meus orientadores, Ricardo Peçanha e Gisele Westphalen, por terem aceitado compartilhar comigo suas experiências e conhecimento, por terem acreditado em mim e no meu trabalho, pela dedicação, apoio e confiança deles. Agradeço, igualmente, aos demais mestres que participaram da minha formação acadêmica.

Por fim, agradeço à educação pública de qualidade e às instituições que permitiram a minha formação profissional e pessoal, em especial: IFSul-Rio-Grandense, IFRJ, UFRJ, Escola de Química, École Nationale Supérieure de Chimie de Paris, Instituto de Macromoléculas Professora Eloísa Mano, FIRJAN, Responde Aí, Planave, Raffinerie du Midi, Imerys e AbInbev.

Je suis de ceux qui pensent que la science est d'une grande beauté.

Marie Curie

Resumo do Projeto de Final de Curso apresentado à Escola de Química como parte dos requisitos necessários para obtenção do grau de Bacharel em Engenharia Química.

CARACTERIZAÇÃO FLUIDODINÂMICA DE MEIOS POROSOS INDUSTRIAIS

Juliana Barbosa Echenique

Julho, 2021

Orientadores: Ricardo Pires Peçanha, Ph.D.

Gisele de Freitas Westphalen, M.Sc.

Diversos processos da indústria química baseiam-se no escoamento de fluídos através de meios porosos. Esse é o caso, por exemplo, de unidades de esgotamento e absorção, onde o meio poroso é do tipo leito empacotado (ou recheado). O projeto de unidades desses processos depende da estimativa da queda de pressão através do leito. Quando o escoamento do fluido ocorre em altas velocidades, a relação entre queda de pressão e velocidade superficial do fluido se dá conforme o modelo de Forchheimer. Esse modelo inclui grandezas ligadas ao fluido (viscosidade e massa específica) e grandezas fluidodinâmicas ligadas ao meio poroso que é percolado (permeabilidade e constante C). Permeabilidade e constante C podem ser determinadas experimentalmente a partir de dados de queda de pressão *versus* velocidade do fluido ou estimadas a partir de correlações baseadas nas características do meio, como sua porosidade e o tamanho e forma das partículas que o constituem.

No presente trabalho, determinou-se a permeabilidade e a constante C de meios porosos formados por anéis de Raschig, anéis de Pall e selas de Berl (recheios industriais comuns) a partir de dados experimentais de fabricantes desses recheios e comparou-se os resultados obtidos com as estimativas dadas por diferentes correlações da literatura.

Palavras-chave: Permeabilidade. Meios porosos. Queda de pressão. Colunas recheadas. Recheios industriais.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 2.1 – Unidade de absorção de gás (a) utilizando solvente líquido regenerado em unidade de esgotamento (b) (adaptado de Perry <i>et al.</i> , 1997).....	5
Figura 2.2 – Recheios industriais aleatórios comumente utilizados em colunas recheadas (adaptados de Richardson e Harker (2002) e Boegger Industech Limited).	7
Figura 2.3 – Representação de partícula do tipo anel de Raschig com, em vermelho, reta secante à partícula que atravessa sua superfície em mais de dois pontos.	10
Figura 3.1 – Representação de anéis de Raschig onde D_e é o diâmetro externo, D_i é o diâmetro interno e H é a altura que, para anéis de Raschig, é igual ao diâmetro externo.	20
Figura 3.2 – Anéis de Pall metálicos (a-b), cerâmicos (c-d) e plásticos (e-f) (adaptado dos sites dos fabricantes: (a; e) The Pall Ring Company, (b) Munters, (c; f) Boegger, (d) Nanxiang). .	21
Figura 3.3 – Selas de Berl em cerâmica (adaptada de Celene, 2021).....	22
Figura 4.1 – Permeabilidade de leitos recheados industriais <i>versus</i> tamanho nominal das partículas.....	24
Figura 4.2 – Constante C de leitos recheados industriais <i>versus</i> tamanho nominal das partículas.	24
Figura 4.3 – Comparação entre a caracterização de anéis de Raschig metálicos, anéis de Pall metálicos e selas de Berl cerâmicas.....	26
Figura 4.4 – Comparação de valores experimentais e teóricos para a permeabilidade de leitos recheados com anéis de Raschig.	27
Figura 4.5 – Comparação de valores experimentais e teóricos para a permeabilidade de leitos recheados com anéis de Pall.	28
Figura 4.6 – Comparação entre valor experimental e teóricos para a permeabilidade de leito recheado com selas de Berl.	29
Figura 4.7 – Influência dos parâmetros no valor de β que leva à otimização da estimativa da permeabilidade pelo modelo de Kozeny-Carman em relação aos valores experimentais.....	31
Figura 4.8 – Influência dos parâmetros no valor experimental da permeabilidade dos leitos de anéis de Raschig, anéis de Pall e selas de Berl.	33
Figura 4.9 – Comparação de valores experimentais e teóricos para a constante C de leitos recheados com anéis de Raschig.	34
Figura 4.10 – Comparação de valores experimentais e teóricos para a constante C de leitos recheados com anéis de Pall.	35

Figura 4.11 – Comparação de valores experimentais e teóricos para a constante C de leito recheado com selas de Berl.	36
Figura 4.12 – Influência de parâmetros característicos das partículas e dos meios na constante C de leitos formados por anéis de Raschig, anéis de Pall e selas de Berl.....	37
Figura A. 1 – Queda de pressão em leitos formados por partículas metálicas do tipo anéis de Raschig de 1 in e anéis de Pall de 1 in.....	58
Figura A. 2 – Queda de pressão em leitos formados por partículas metálicas do tipo anéis de Raschig de 2 in e anéis de Pall de 2 in e espessura de 0,036 in.....	58
Figura A. 3 – Queda de pressão em leitos formados por partículas cerâmicas do tipo selas de Berl de 1 in.	59
Figura A. 4 – Queda de pressão em leitos formados por partículas metálicas do tipo anéis de Pall de 16 mm da empresa The Pall Ring Company.	59
Figura A. 5 – Queda de pressão em leitos formados por partículas metálicas do tipo anéis de Pall de 25 mm da empresa The Pall Ring Company.	60
Figura A. 6 – Queda de pressão em leitos formados por partículas metálicas do tipo anéis de Pall de 50 mm da empresa The Pall Ring Company.	60
Figura A. 7 – Queda de pressão em leitos formados por partículas metálicas do tipo anéis de Pall de 90 mm da empresa The Pall Ring Company.	61
Figura A. 8 – Queda de pressão em leitos formados por partículas metálicas do tipo anéis de Pall de 5/8 in da empresa Koch-Glitsch.	61
Figura A. 9 – Queda de pressão em leitos formados por partículas metálicas do tipo anéis de Pall de 2 in da empresa Koch-Glitsch.	62
Figura A. 10 – Queda de pressão em leitos formados por partículas metálicas do tipo anéis de Pall de 16 mm da empresa MTE.	62
Figura A. 11 – Queda de pressão em leitos formados por partículas metálicas do tipo anéis de Pall de 25 mm da empresa MTE.	63
Figura A. 12 – Queda de pressão em leitos formados por partículas metálicas do tipo anéis de Pall de 50 mm da empresa MTE.	63
Figura A. 13 – Queda de pressão em leitos formados por partículas metálicas do tipo anéis de Pall de 90 mm da empresa MTE.	64

LISTA DE TABELAS

Tabela 4.1: Comparação das estimativas teóricas de permeabilidade com o valor experimental dos leitos de anéis de Raschig.	27
Tabela 4.2: Comparação das estimativas teóricas de permeabilidade com o valor experimental dos leitos de anéis de Pall.....	28
Tabela 4.3: Comparação das estimativas teóricas de permeabilidade com o valor experimental para o leito de selas de Berl.....	29
Tabela 4.4: Comparação das estimativas teóricas e valor experimental da constante C de leitos porosos de anéis de Raschig.	34
Tabela 4.5: Comparação das estimativas teóricas e valor experimental da constante C de leitos porosos de anéis de Pall.....	35
Tabela 4.6: Comparação das estimativas teóricas e valor experimental da constante C para o leito de selas de Berl.....	36
Tabela A. 1: Características de leitos formados por anéis de Raschig metálicos.....	47
Tabela A. 2: Características de leitos formados por anéis de Pall metálicos.	49
Tabela A. 3: Características de leitos formados por selas de Berl cerâmicas.	51
Tabela B. 1: Caracterização fluidodinâmica dos leitos formados por recheios industriais.....	53
Tabela B. 2: Caracterização de anéis de Raschig.	53
Tabela B. 3: Caracterização de anéis de Pall.....	54
Tabela B. 4: Caracterização de selas de Berl.....	54
Tabela B. 5: Permeabilidade de leitos porosos formados por anéis de Raschig metálicos, estimada por diferentes correlações da literatura.	54
Tabela B. 6: Permeabilidade de leitos porosos formados por anéis de Pall metálicos, estimada por diferentes correlações da literatura.....	54
Tabela B. 7: Permeabilidade de leito poroso formado por selas de Berl cerâmicas, estimada por diferentes correlações da literatura.	55
Tabela B. 8: Estimativa da constante C de leitos porosos formados por anéis de Raschig metálicos, calculada a partir de k estimado por diferentes correlações da literatura.	55
Tabela B. 9: Estimativa da constante C de leitos porosos formados por anéis de Pall metálicos, calculada a partir de k estimado por diferentes correlações da literatura.....	55
Tabela B. 10: Estimativa da constante C de leito poroso formado por selas de Berl cerâmicas, calculada a partir de k estimado por diferentes correlações da literatura.....	56

NOMENCLATURA

LETRAS LATINAS

Símbolo	Descrição	Dimensão
C	Constante C	Adimensional
D_e	Diâmetro externo	L
D_i	Diâmetro interno	L
d_p	Diâmetro volumétrico	L
d_s	Diâmetro de área superficial	L
f	Fator de fricção	Adimensional
F_e	Fator de empacotamento	L^{-1}
g	Aceleração da gravidade	LT^{-2}
H	Altura	L
k	Permeabilidade	L^2
k_0	Permeabilidade de referência	L^2
L	Comprimento	L
m	Força resistiva do fluido	$ML^{-2}T^{-2}$
p	Pressão	$ML^{-1}T^{-2}$
Q	Vazão volumétrica	L^3T^{-1}
q	Velocidade superficial	LT^{-1}
Re_{MP}	Reynolds de meio poroso	Adimensional
Re_m	Reynolds modificado	Adimensional
S_p	Área superficial da partícula	L^2
V_p	Volume da partícula	L^3
V_η	Volume para tornar a partícula convexa	L^3
V_λ	Volume da esfera circunscrita	L^3

LETRAS GREGAS

Símbolo	Descrição	Dimensão
β	Fator estrutural	Adimensional
Δ	Diferença	Adimensional
ε	Porosidade	Adimensional

η	Índice de convexidade	Adimensional
λ	Índice da esfera circunscrita	Adimensional
μ	Viscosidade	$ML^{-1}T^{-1}$
ρ	Massa específica	ML^{-3}
ϕ	Esfericidade	Adimensional
Ω	Constante empírica	Adimensional

OUTRAS LETRAS

Símbolo	Descrição	Dimensão
III	Fator de forma “Shah”	Adimensional

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	1
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	4
2.1	MEIOS POROSOS NA INDÚSTRIA QUÍMICA	4
2.1.1	Unidades de Absorção e Esgotamento	5
2.2	CARACTERIZAÇÃO DE PARTÍCULAS	8
2.3	QUEDA DE PRESSÃO EM MEIOS POROSOS	11
2.3.1	Queda de pressão em leitos empacotados	18
3	METODOLOGIA	19
3.1	CARACTERIZAÇÃO FLUIDODINÂMICA DOS LEITOS	19
3.2	ESTIMATIVA TEÓRICA DA PERMEABILIDADE E DA CONSTANTE C	19
3.2.1	Caracterização das Partículas	19
3.2.2	Estimativa da Permeabilidade	22
3.2.3	Estimativa da Constante C	23
4	RESULTADOS E DISCUSSÃO	24
4.1	CARACTERIZAÇÃO FLUIDODINÂMICA DOS LEITOS	24
4.2	CARACTERIZAÇÃO DAS PARTÍCULAS	25
4.3	COMPARAÇÃO E PROPOSIÇÃO DE MODELOS	27
4.3.1	Permeabilidade	27
4.3.2	Constante C	33
5	CONCLUSÕES E SUGESTÕES	39
5.1	CONCLUSÕES	39
5.2	SUGESTÕES PARA TRABALHOS POSTERIORES	40
	REFERÊNCIAS	41
	APÊNDICE A – CARACTERÍSTICAS DE LEITOS POROSOS FORMADOS POR RECHEIOS INDUSTRIAIS	46

APÊNDICE B – RESULTADOS EXPERIMENTAIS E ESTIMATIVAS DE PARÂMETROS.....	53
ANEXO A – DIAGRAMAS DE QUEDA DE PRESSÃO EM LEITOS RECHEADOS .	58

1 INTRODUÇÃO

Definir poro como um espaço “vazio” em uma matriz sólida faz com que toda a matéria sólida conhecida possa, em alguma escala, ser considerada porosa. Isso porque espaços intersticiais entre moléculas (ou até mesmo nos níveis atômico e subatômico) são inerentes aos sólidos. Assim, Scheidegger (1974) considera três tipos de “vazios” que podem estar presentes em uma matéria sólida: os extremamente pequenos, que podem ser chamados de interstícios moleculares; os maiores, que podem ser chamados de cavernas; e os intermediários, que seriam, então, os poros. Enquanto Scheidegger (1974) aponta que a fronteira entre as três categorias é intuitiva e, conseqüentemente, indefinida, Lofrano (2018) enfatiza que a definição de meio poroso se deve mais ao hábito do que à precisão, quando utilizado consistentemente dentro de um determinado campo de conhecimento.

Partindo-se do princípio de que meios porosos são sistemas constituídos da alternância entre um meio sólido e “vazios” (preenchidos por um fluido), pode-se usar a classificação sugerida por Levenspiel (2014) para dividi-los em sólidos porosos (como xisto betuminoso, pedra pomes ou esponjas de poliuretano) e leitos recheados – ou empacotados –, que incluiriam filtros de areia, solos, cigarros e colunas de absorção/esgotamento, e que constituem o objeto desse trabalho. Faz-se possível, então, descrever-se um leito recheado como um meio poroso composto por partículas sólidas mais ou menos compactadas, tal que o sistema apresente poros conectados entre si, permitindo, dessa maneira, o escoamento de fluidos através desse leito.

Richardson e Harker (2002) destacam que o escoamento de fluidos através de leitos constituídos por partículas sólidas estacionárias é recorrente na indústria química. Exemplos importantes são a filtração e processos baseados no escoamento de uma fase líquida em contracorrente com uma fase gasosa em colunas recheadas (McCABE; SMITH; HARRIOT, 1993). Nessa última categoria, Foust *et al.* (1982) apontam que as colunas recheadas são utilizadas para promover o contato contínuo entre duas fases fluidas, em processos como absorção e esgotamento. Nesses casos, o recheio é um material inerte especialmente concebido para fornecer grande área superficial por unidade de volume de recheio (PEÇANHA, 2014).

Quando um fluido escoar por um meio poroso do tipo leito recheado, a velocidade relativa entre eles gera uma força resistiva do fluido sobre o sólido. Conseqüentemente, pelo princípio da ação e reação, o meio exerce sobre o fluido uma força de mesma intensidade e direção, mas de sentido contrário. Essa força se opõe ao movimento do fluido, ocasionando queda de pressão ao longo do leito.

Assim faz-se necessário prever a queda de pressão nos leitos devido à resistência causada pela presença das partículas (RICHARDSON; HARKER, 2002). De fato, o conhecimento da queda de pressão é de suma importância para o projeto de unidades de processamento baseadas no escoamento através de leitos porosos, em especial no dimensionamento de bombas, ventiladores e compressores necessários à operação de tais sistemas.

No entanto, ainda hoje, a previsão teórica da perda de carga associada ao escoamento de fluidos em meios porosos constitui um desafio, devido aos numerosos fatores envolvidos.

Ergun (1952) afirma que os principais fatores a serem considerados são: vazão do fluido; viscosidade e densidade do fluido; compactação e orientação do recheio; e tamanho, forma e área superficial das partículas que o constituem. Enquanto os dois primeiros itens dependem do fluido, os dois últimos dependem do recheio, de onde a importância da caracterização fluidodinâmica de meios porosos formados com recheios industriais.

Quanto à caracterização de leitos recheados para o estudo da queda de pressão durante o escoamento de fluidos, alguns parâmetros geométricos são recorrentes na literatura podendo-se citar o diâmetro da esfera de mesmo volume que a partícula, esfericidade da partícula, área superficial específica da partícula, área superficial específica do leito e porosidade do leito (ERGUN, 1952; COSTA; MASSARANI, 1982; McCABE; SMITH; HARRIOT, 1993; MASSARANI, 2001; RICHARDSON; HARKER, 2002; MOREIRA; AROUCA; DAMASCENO, 2012; ALLEN; VON BACKSTRÖME; KROGER, 2013; LEVENSPIEL, 2014; CHAGAR *et al.*, 2017). Tais parâmetros são utilizados para estimar a permeabilidade do leito que, coloquialmente, pode-se dizer, é uma medida da facilidade à passagem de um fluido através do mesmo.

Para a estimativa da permeabilidade do leito, podem-se usar relações puramente teóricas, teóricas com correções empíricas ou puramente empíricas. Em geral, essas relações se adequam (validadas por dados experimentais) a leitos com porosidades dentro de determinada faixa, obtidos a partir de partículas sólidas em certa faixa de esfericidades.

Segundo McCabe, Smith e Harriot (1993), leitos formados por anéis de Raschig e selas de Berl (exemplos de recheios industriais comuns), assim como outros leitos com altos valores de área superficial e porosidade, geralmente têm suas quedas de pressão estimadas a partir do “fator de empacotamento” do leito ou outras informações de cunho empírico fornecidas pelo fabricante.

Uma possível explicação para os leitos formados com recheios industriais não terem suas perdas de pressão bem estimadas por relações teóricas é que grande parte dos processos

industriais baseados no escoamento em meios porosos utiliza partículas reentrantes como formadoras de leite (FARIAS, 2018). Essas partículas, conforme descrito por Almeida *et al.* (2014), possuem interações com fluidos mal descritas quando seu formato é representado através de fatores como a esfericidade. Fator esse que, conforme já mencionado, está entre os mais recorrentes na literatura quando se trata da caracterização de leitos porosos.

Diante do exposto, o objetivo geral deste trabalho é determinar as características fluidodinâmicas (permeabilidade e constante C) de meios porosos formados com recheios industriais secos a partir de dados experimentais dos fabricantes. Com diferentes correlações da literatura, visa-se estimar o valor dessas grandezas a partir da caracterização das partículas que formam o recheio bem como da porosidade dos leitos. Dessa forma será possível comparar os resultados das diferentes correlações com aqueles observados experimentalmente e, frente a altos desvios entre as previsões e os valores experimentais, propor novas correlações para a estimativa da permeabilidade e de constante C dos meios aqui caracterizados.

O presente trabalho se organiza em cinco capítulos. No Capítulo 1, é apresentada uma introdução enfatizando a relevância do tema no âmbito da engenharia, além da definição dos objetivos do trabalho. No Capítulo 2, serão discutidos os processos industriais baseados no escoamento de fluidos em meios porosos. Em seguida, trabalhos desenvolvidos sobre a caracterização de partículas e a queda de pressão em meios porosos – em especial em leitos empacotados – são avaliados de modo a estabelecer a originalidade do presente trabalho. Já no Capítulo 3, apresentam-se as metodologias para a determinação experimental e estimativa teórica da permeabilidade e da constante C dos meios porosos formados com recheios industriais. O Capítulo 4 apresenta os resultados obtidos, de modo a avaliar e discutir o ajuste das diferentes estimativas em relação aos dados experimentais e propor novas correlações. Por fim, no Capítulo 5, serão apresentadas as conclusões do trabalho.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 MEIOS POROSOS NA INDÚSTRIA QUÍMICA

Meios porosos podem ser definidos como agregados sólidos através dos quais um fluido é capaz de escoar devido à presença de interstícios. Segundo a classificação de Levenspiel (2014), os meios porosos podem ser divididos em sólidos porosos – onde a matriz sólida é contínua, apresentando poros interligados que a permeiam – e leitos recheados (ou empacotados), compostos por partículas sólidas agregadas, em diferentes graus de compactação, de modo a permitir o escoamento de fluidos através do seu volume.

O escoamento de fluidos através de leitos compostos por partículas estacionárias é frequente na indústria química (RICHARDSON; HARKER, 2002). McCabe, Smith e Harriot (1993) destacam o processo de filtração, as colunas de troca iônica, os reatores catalíticos de leito fixo e processos de escoamento de fase líquida em contracorrente com fase gasosa através de colunas empacotadas.

Na filtração, sólidos são separados de um líquido pela passagem da solução através de um meio poroso filtrante (SINNOTT, 2005). Quanto aos processos de troca iônica, Perry (1997) destaca que em sua maioria são realizados em leitos fixos, onde o escoamento de uma fase fluida ocorre através de um sólido poroso ou do tipo gel, capaz de capturar um ou mais solutos de natureza iônica presentes no solvente. Em reatores catalíticos de leito fixo, de acordo com Iordanidis (2002), o leito é formado por partículas sólidas de catalisadores, geralmente arranjadas de forma aleatória. Através desse leito escoam fluidos contendo os reagentes, de modo que as transformações químicas ocorrem na superfície dos catalisadores (e em seus poros), onde os reagentes são adsorvidos e, posteriormente, os produtos são desorvidos de modo a serem recuperados. Dentre os processos em que colunas empacotadas são utilizadas para o escoamento em contracorrente de duas fases distintas, Foust *et al.* (1982) destacam as unidades de absorção e de esgotamento. Nessas unidades, as partículas sólidas que formam o leito ficam contidas numa coluna, entre uma bandeja de suporte (por onde a fase gasosa é injetada) e uma bandeja de retenção, que tem por finalidade evitar o movimento das partículas (SEADER; HENLEY; ROPER, 2011), sendo o meio poroso utilizado para promover o contato contínuo entre as fases que o atravessam (FOUST *et al.*, 1982).

As partículas investigadas no presente trabalho são utilizadas notadamente no empacotamento de colunas de absorção e esgotamento, motivo pelo qual o estudo de tais unidades será aprofundado na subseção seguinte.

2.1.1 Unidades de Absorção e Esgotamento

Estima-se que cerca de 40 % a 70 % dos custos de instalação e operação na indústria de processos devam-se a processos de separação de sistemas vapor-líquido (KOLEV, 2006), categoria na qual se enquadram os processos de absorção e esgotamento.

Na absorção (também chamada de absorção gasosa), um ou mais componentes são extraídos de uma corrente gasosa por um líquido não-volátil capaz de dissolvê-los (SEADER; HENLEY; ROPER, 2011; McCABE; SMITH; HARRIOT, 1993). Já no esgotamento, componentes voláteis de uma corrente líquida são extraídos por um gás, tal que o processo pode ser entendido como a operação inversa à absorção (SEADER; HENLEY; ROPER, 2011; PERRY *et al.*, 1997). Unidades de absorção e esgotamento costumam ser utilizadas em conjunto, conforme representado na Figura 2.1. O solvente (líquido) rico em soluto que deixa o absorvedor é normalmente destilado ou separado por esgotamento de modo a ser regenerado e recirculado para o absorvedor (PERRY *et al.*, 1997).

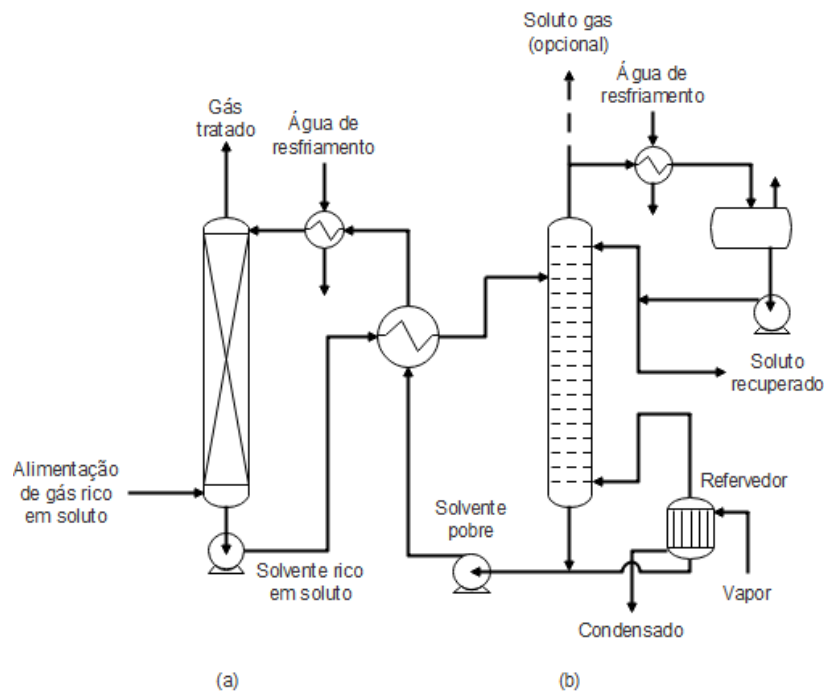


Figura 2.1 – Unidade de absorção de gás (a) utilizando solvente líquido regenerado em unidade de esgotamento (b) (adaptado de Perry *et al.*, 1997).

Absorção e esgotamento são geralmente realizados em colunas verticais cilíndricas onde gás e líquido escoam em contracorrente (PERRY *et al.*, 1997). Para proporcionar o desenvolvimento de uma vasta superfície interfásica e turbulência nos fluidos, dispositivos internos (como pratos ou recheios) são utilizados (RICHARDSON; HARKER, 2002). A escolha entre dispositivos do tipo prato e do tipo recheio baseia-se em diferentes fatores. As colunas recheadas operam com menores quedas de pressão, menores retenções de líquido e são

usualmente mais econômicas quando o processo se dá em colunas de diâmetros pequenos ou quando líquidos corrosivos são empregados (FOUST *et al.*, 1982). No entanto, conforme Perry *et al.* (1997), colunas de prato são superiores quanto à facilidade de limpeza e à economia quando grandes vazões de líquido são processadas.

McCabe, Smith e Harriot (1993) e Perry *et al.* (1997) apontam que os recheios geralmente utilizados em colunas empacotadas são os recheios ditos aleatórios (constituídos de partículas cuja maior dimensão varia entre 6 e 75 mm, aleatoriamente distribuídas dentro da torre) e os recheios estruturados (cujos elementos são projetados especificamente para ajustar-se às dimensões da coluna, sendo cuidadosamente instalados no interior desta). Embora os recheios estruturados apresentem maiores eficiências e menores quedas de pressão (SEADER; HENLEY; ROPER, 2011), os recheios aleatórios são largamente implementados na indústria, representando um investimento consideravelmente menor que os estruturados (SEADER; HENLEY; ROPER, 2011; RICHARDSON; HARKER, 2002).

Em relação aos recheios aleatórios, Richardson e Harker (2002) indicam a possibilidade de utilização de sólidos quebrados (rochas, cacos de garrafa etc.). No entanto, destacam igualmente que o controle da forma e do tamanho das partículas permite a obtenção de um leito de características uniformes e com porosidade desejada. Foust *et al.* (1982) enumeram algumas características desejáveis do material utilizado como recheio industrial, entre elas: alta área superficial por unidade de volume, alta porosidade (de modo a minimizar a perda de pressão), boa molhabilidade, resistência à corrosão e baixo custo. Perry *et al.* (1997) resumem as características desejáveis do recheio a “promover contato efetivo das fases sem causar queda excessiva de pressão”. Visando-se melhor compromisso entre as diferentes características desejadas, diversos recheios industriais aleatórios foram desenvolvidos ao longo do tempo. Alguns deles podem ser vistos na Figura 2.2.

Os recheios industriais são feitos de material inerte, dentre os quais Richardson e Harker (2002) destacam: cerâmica, metal, materiais plásticos, vidro e carbono. Os recheios metálicos estão entre os mais utilizados devido sua resistência mecânica e boa molhabilidade (SEADER; HENLEY; ROPER, 2011). Recheios de cerâmica apresentam alta resistência à temperatura e corrosão, sendo relativamente baratos, mas a densidade desse material requer um suporte de recheio resistente (RICHARDSON; HARKER, 2002). Recheios de plástico aliam baixo custo, boa resistência e baixa densidade, mas podem apresentar baixa molhabilidade (SEADER; HENLEY; ROPER, 2011). Os anéis de Raschig cerâmicos e as selas cerâmicas de Berl estão entre os recheios mais antigos, substituintes das esferas cerâmicas e das rochas fragmentadas anteriormente utilizadas (McCABE; SMITH; HARRIOT, 1993). Segundo Richardson e Harker

(2002), os recheios mais utilizados são anéis de Raschig, anéis de Pall, anéis de Lessing e selas de Berl, cujos materiais podem variar. Recheios mais modernos incluem anéis de Nutter, selas Instalox e Hy-Pak, entre outros.

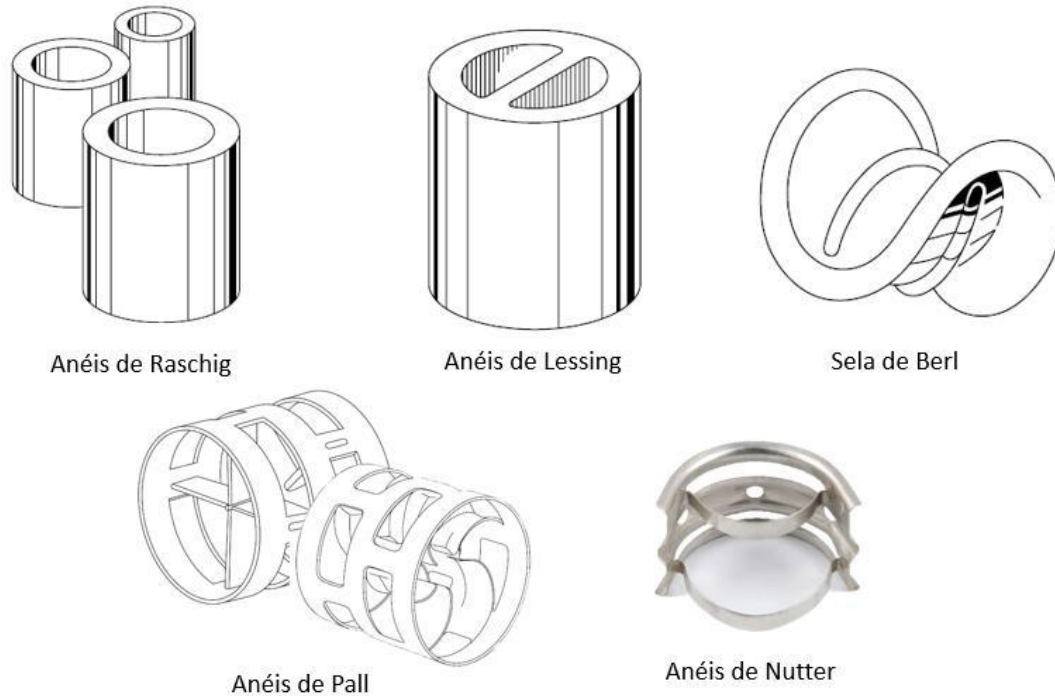


Figura 2.2 – Recheios industriais aleatórios comumente utilizados em colunas recheadas (adaptados de Richardson e Harker (2002) e Boegger Industech Limited).

As características dos leitos recheados são fortemente dependentes das partículas que os constituem. A porosidade de leitos formados com anéis de Raschig cerâmicos, por exemplo, varia entre 64 e 74 % para partículas de tamanho nominal entre $\frac{1}{2}$ e 2 in. Para partículas de mesmo tamanho nominal, leitos formados com anéis de Pall metálicos apresentam porosidade acima de 94 % (McCABE; SMITH; HARRIOT, 1993). O fator de empacotamento (F_e), grandeza empírica relacionada com a queda de pressão do leito, varia entre 57 e 410 ft^2/ft^3 para anéis de Raschig metálicos de $\frac{1}{16}$ in de espessura de parede com tamanho nominal entre $\frac{1}{2}$ e 2 in. Já para selas de Berl de mesmo tamanho nominal, o fator de empacotamento varia de 45 a 240 ft^2/ft^3 (FOUST *et al.*, 1982). Características como a porosidade do leito e o fator de empacotamento para diferentes recheios industriais de diversas fontes da literatura podem ser vistas no apêndice A.

A forte dependência entre as partículas constituintes do leito e as características resultantes desse leito aponta a necessidade de caracterização consistente das partículas.

2.2 CARACTERIZAÇÃO DE PARTÍCULAS

A dificuldade em caracterizar-se uma partícula depende do quão complexo ou irregular é seu formato. Richardson e Harker (2002) apontam que o formato mais simples que uma partícula pode apresentar é o esférico, dado sua simetria, que faz com que se comporte sempre da mesma maneira em um fluido, independentemente de sua orientação. Possivelmente por essa razão, muitos parâmetros utilizados na caracterização de partículas são em termos de esferas equivalentes. Nessa categoria, pode-se citar o diâmetro volumétrico (d_p) e o diâmetro de área superficial (d_s).

$$d_p = \sqrt[3]{\frac{6V_p}{\pi}} \quad (2.1)$$

$$d_s = \sqrt{\frac{S_p}{\pi}} \quad (2.2)$$

onde: o diâmetro volumétrico (Eq. 2.1) é definido como o diâmetro da esfera de mesmo volume que a partícula (V_p). Já o diâmetro de área superficial (Eq. 2.2) é definido como o diâmetro da esfera de mesma área superficial que a partícula (S_p).

Embora os diâmetros equivalentes permitam a caracterização de partículas com base em uma única dimensão linear, eles não informam sobre a morfologia das partículas. Esta, por sua vez, influencia na força de arraste sofrida pelas partículas (ALMEIDA *et al.*, 2014), na microestrutura do leito por elas formado e, conseqüentemente, em sua porosidade (KERIMOV *et al.*, 2018). Para caracterizar partículas no que diz respeito ao seu formato, utilizam-se fatores de forma.

O fator de forma mais utilizado na caracterização de partículas é a esfericidade (ϕ), originalmente chamado de grau de esfericidade verdadeira (WADELL, 1932 apud ALMEIDA *et al.*, 2014). A esfericidade pode ser entendida como uma medida do quanto o formato de uma partícula se aproxima de uma esfera (KERIMOV *et al.*, 2018) e assume valores entre 0 e 1, o valor unitário correspondendo a uma esfera perfeita.

$$\phi \equiv \frac{\text{área da superfície da esfera de mesmo volume que a partícula}}{\text{área da superfície da partícula}} \quad (2.3)$$

Embora amplamente utilizada na literatura, incluindo em publicações que envolvem o estudo da queda de pressão em leitos porosos (COSTA; MASSARANI, 1982; HAIDER;

LEVENSPIEL, 1989; PINTO; LIMA; LEAL FILHO, 2009; MOREIRA; AROUCA; DAMASCENO, 2012; LEVENSPIEL, 2014; PEÇANHA, 2014; COUTO; BARBOSA; LIMA, 2017; KERIMOV *et al.*, 2018; SECKENDORFF *et al.*, 2020, CUI *et al.*, 2021, RUSHD *et al.*, 2021), as limitações da esfericidade na caracterização de partículas também são frequentemente apontadas.

Yin, Beddow e Vetter (1986) e Almeida *et al.* (2014) demonstraram que partículas de mesma esfericidade e diâmetro de volume podem apresentar comportamentos diferentes. Já Buffham (2000) descreve algumas características desejáveis de fatores de forma que não são atendidas pela esfericidade. Seckendorf *et al.* (2021) indicam que nenhum fator de forma, nem mesmo a esfericidade, pode descrever universalmente características de um leito formado por partículas. Buchwald *et al.* (2020) destacam a dificuldade da determinação acurada da área superficial de partículas irregulares, especialmente em partículas de superfícies côncavas. Os autores também avaliam o papel da “topologia” da partícula (que pode ser entendido como rugosidade) na determinação da área superficial. Nesse contexto, Bouwman *et al.* (2004) chamam a atenção para a necessidade de levar a rugosidade das partículas em consideração em suas caracterizações e afirmam que o comportamento das mesmas é mais bem descrito quando pelo menos dois fatores de forma são utilizados: um ligado à forma de fato e outro à rugosidade.

Outros fatores de forma podem ser encontrados na literatura. Pode-se citar a razão de aspectos (SCHNEIDERHÖHN, 1954 apud BOUWMAN *et al.*, 2004), definida como a razão entre o menor e o maior eixo da partícula, sendo o eixo maior a linha reta que conecta os dois pontos mais distantes da área de projeção da partícula e o eixo menor a linha reta perpendicular ao eixo maior que conecta os dois pontos com a maior distância entre eles; a circularidade (COX, 1927 apud BOUWMAN *et al.*, 2004), baseada na área projetada pela partícula sobre uma superfície plana e o perímetro dessa projeção; e fator de forma de superfície e fator de forma de volume, definidos como, respectivamente, a razão entre a superfície da partícula e o quadrado do diâmetro de volume e a razão entre o volume da partícula e o cubo do seu diâmetro de volume (ENDO; CHEN; PUI, 2002).

Esses fatores de forma, no entanto, parecem pouco apropriados para a caracterização de partículas reentrantes (STANIFORTH; REES, 1981), categoria na qual os recheios industriais aqui estudados se enquadram. Uma partícula é dita reentrante quando existe a possibilidade de atravessá-la com retas imaginárias e de orientações arbitrárias, que interceptam sua superfície em $2n$ pontos, onde n é um número inteiro maior que 1. Por vezes, essas partículas são referidas como partículas de superfície côncava (BUCHWALD *et al.*, 2020; LANDAUER *et al.*, 2020; ZHAO *et al.*, 2020). A Figura 2.3 mostra uma reta que ao atravessar um anel de Raschig

intercepta sua superfície em 4 pontos, caracterizando-o como partícula reentrante. Procedimento análogo poderia ser feito para anéis de Pall, selas de Berl etc.

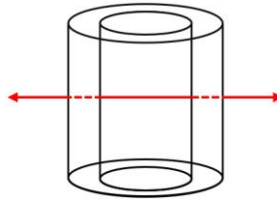


Figura 2.3 – Representação de partícula do tipo anel de Raschig com, em vermelho, reta secante à partícula que atravessa sua superfície em mais de dois pontos.

Especificamente para a caracterização de partículas reentrantes, Staniforth e Rees (1981) introduzem um fator de forma representado pela letra cirílica III, e que relaciona o número de projeções apontando para baixo em uma amostra de partículas ao número total de partículas nessa amostra. Esse fator de forma apresenta como limitação o fato de ser “estatístico”, sendo necessária a medição de seu valor para uma população de partículas a partir da qual uma média será determinada. Tal medição requer o uso de computadores capacitados. Os autores apontam a dificuldade da técnica em diferenciar reentrâncias de rugosidades, sugerindo a possibilidade de adaptar o uso de III para a descrição de texturas de superfícies.

Landauer *et al.* (2020) medem a convexidade (ou reentrância) de partículas utilizando a razão de convexidade. Esse fator de forma introduzido por Krumbein (1941 apud MORA; KWAN, 2000), é dado pela razão entre a área projetada da partícula e a menor área convexa que circunscribe a partícula, permitindo uma medida de convexidade de partículas das quais se tem imagens 2D.

Mendes e Melo (2011 apud ALMEIDA; ROMANO; CARVALHO, 2013), no seu trabalho avaliativo sobre os efeitos da forma de partículas sobre suas velocidades terminais, introduziram um novo fator de forma, o índice de convexidade (η), que foi utilizado na caracterização de partículas reentrantes em trabalhos posteriores (ALMEIDA; ROMANO; CARVALHO, 2013; ALMEIDA *et al.*, 2014; LA VEGA; CUKIERMAN, 2019).

$$\eta \equiv \frac{\text{menor volume de material que deve ser adicionado à partícula para torná-la convexa}}{\text{volume da partícula}} \quad (2.4)$$

Esse fator de forma é igual a zero para partículas não-reentrantes e aumenta com a reentrância da partícula. Em comparação à razão de convexidade, esse fator de forma é mais adequado para situações em que se possui informações sobre o formato 3D da partícula, e não apenas imagens em 2D.

O fator de forma conhecido como índice da esfera circunscrita (λ), introduzido por Wadell (1934 apud ALMEIDA *et al.*, 2014) se relaciona com o volume da partícula e o volume necessário para obter uma forma não reentrante. No entanto, nesse caso, a forma não-reentrante é uma esfera que circunscribe a partícula. O índice da esfera circunscrita é limitado por valores entre 0 e 1, sendo igual a 1 para uma esfera.

$$\lambda \equiv \frac{\text{volume da partícula}}{\text{volume da esfera que circunscribe a partícula}} \quad (2.5)$$

Face ao exposto, fatores de forma podem ser utilizados sozinhos ou em combinações para caracterizar partículas e, conseqüentemente, leitos porosos por elas formados. Na próxima seção, exploram-se relações presentes na literatura que visam estimar a queda de pressão em meios porosos a partir da caracterização das partículas que os formam.

2.3 QUEDA DE PRESSÃO EM MEIOS POROSOS

Para baixas velocidades, a queda de pressão no leito depende linearmente da velocidade superficial do fluido, conforme equação de Darcy (MAYERHOFER *et al.*, 2011), referida também como Lei de Darcy (KAVIANY, 1995; RICHARDSON; HARKER, 2002; MARLE, 2006; MOREIRA; AROUCA; DAMASCENO, 2012; PEÇANHA, 2014):

$$-\frac{\Delta p}{L} = \frac{\mu}{k} q \quad (2.6)$$

onde: $-\Delta p$ é a queda de pressão, L é o comprimento do leito, μ é a viscosidade do fluido, k é a permeabilidade do meio e q é a velocidade superficial do fluido. Vale ressaltar que essa última é definida como a velocidade média do fluido imediatamente antes e imediatamente depois do meio poroso, determinada pela razão entre a vazão do fluido e a área transversal ao escoamento.

Darcy (1856) estudou o escoamento de água através de leitos porosos formados por partículas de areia (filtros de areia), sendo considerado pioneiro na área (MARTINS *et al.*, 2009). Conforme a Eq. 2.6, Darcy (1856) observou que a proporcionalidade entre a queda de pressão em dado comprimento de meio poroso e a velocidade superficial do fluido depende da viscosidade do fluido (μ) e da permeabilidade (k), condicionada apenas às características do meio e com dimensão de área. Coloquialmente a permeabilidade pode ser vista como uma medida da facilidade com a qual um fluido escoar através de um leito formado por partículas (RICHARDSON; HARKER, 2002). Dados experimentais indicam que a validade do modelo

de Darcy requer a isotropia do meio poroso (PEÇANHA, 2014), ou seja, a Eq. 2.6 só deve ser aplicada para meios porosos onde a permeabilidade não depende da direção espacial considerada.

Forchheimer (1930 apud RICHARDSON; HARKER, 2002) propôs outro modelo para queda de pressão em leitos porosos que, contrariamente ao de Darcy (1856), pode ser usado para escoamentos com altas velocidades de fluido (MAYERHOFER *et al.*, 2011). O modelo de Forchheimer sugere que a resistência ao escoamento deve ser considerada em dois termos aditivos: um primeiro devido ao arraste viscoso na superfície das partículas e um segundo ligado ao regime turbulento e às mudanças repentinas na seção transversal dos canais (RICHARDSON; HARKER, 2002). Peçanha (2014) destaca que o segundo termo está ligado às variações de energia cinética do fluido no meio poroso, que são proporcionais à sua densidade e ao quadrado de sua velocidade.

$$-\frac{\Delta p}{L} = \frac{\mu}{k} \left(1 + \frac{C\sqrt{k}\rho q}{\mu} \right) q \quad (2.7)$$

onde: ρ é a massa específica do fluido e C , uma constante empírica e adimensional, relacionada à conformação geométrica do meio poroso.

Quando o termo $C\sqrt{k}\rho q/\mu$, chamado de número de Reynolds para escoamento em meios porosos (Re_{MP}), é muito menor que 1, a Eq. 2.7 recai na Eq. 2.6, indicando a validade do modelo de Darcy para $Re_{MP} \ll 1$, onde:

$$Re_{MP} \equiv \frac{C\sqrt{k}\rho q}{\mu} \quad (2.8)$$

Ainda, vale destacar que as Eqs. 2.6 e 2.7 consideram exclusivamente a perda de pressão no fluido devido ao escoamento no meio poroso. Portanto, representa-se os modelos de Darcy e de Forchheimer conforme segue, respectivamente, por meio da força resistiva do fluido sobre o sólido (\mathbf{m})

$$\mathbf{m} = \frac{\mu}{k} \mathbf{q} \quad (2.9)$$

$$\mathbf{m} = \frac{\mu}{k} \left(1 + \frac{C\sqrt{k}\rho |\mathbf{q}|}{\mu} \right) \mathbf{q} \quad (2.10)$$

Destaca-se que as Eqs. 2.9 e 2.10 se igualam, respectivamente, às equações 2.6 e 2.7 quando, segundo a mecânica do contínuo (PEÇANHA, 2014): o fluido é considerado newtoniano; a porosidade do meio não varia com o tempo e é uniforme; o meio poroso é

estacionário e isotrópico; as interações viscosas fluido-fluido são desprezíveis; o regime é permanente; e o escoamento é isotérmico, incompressível e unidirecional na horizontal. Tais hipóteses são realistas para colunas empacotadas com recheios industriais percoladas por gases como o ar, com exceção da última. As colunas de absorção e esgotamento são, em geral, verticais, por onde um gás escoar de maneira ascendente (PERRY *et al.*, 1997) tal que a queda de pressão observada ao longo do meio poroso depende não somente da força resistiva do fluido sobre o sólido como também da ação da gravidade.

$$\frac{\Delta p}{L} = -\mathbf{m} - \rho \mathbf{g} \quad (2.11)$$

onde \mathbf{g} é a aceleração da gravidade.

Como, no entanto, a massa específica dos gases em geral é pequena, a contribuição do último termo da Eq. 2.11 tende a ser desprezível e as Eqs. 2.9 e 2.10 equivalem às Eqs. 2.6 e 2.7, respectivamente.

Ensaio de permeamtria (onde um fluido conhecido escoar por um meio poroso sob condições de temperatura e vazão controladas) são utilizados para, através da aplicação dos modelos de Darcy ou de Forchheimer, a determinação experimental dos valores da permeabilidade de meios porosos assim como da constante C (FOUMENY *et al.*, 1996; PINTO; LIMA; LEAL FILHO, 2009; MAYERHOFER *et al.*, 2011; ALLEN; VON BACKSTRÖM; KRÖGER, 2013; PEÇANHA, 2014; COUTO; BARBOSA; LIMA, 2017).

Para estimativa da permeabilidade a partir de características do meio, sem a necessidade de determinação experimental, Kaviani (1995) indica que os modelos mais utilizados são os capilares e os de arraste. Os modelos capilares baseiam-se no movimento do fluido através dos canais formados pelas partículas que constituem o meio. Já os modelos de arraste, derivados da teoria de arraste, baseiam-se na descrição do movimento do fluido sobre objetos. Ainda, Kaviani (1995) destaca que não existe uma relação geral capaz de expressar a permeabilidade de um meio. As correlações que existem, sejam elas empíricas, semiempíricas ou baseadas em equações fundamentais, devem ser usadas dentro das restrições para as quais foram desenvolvidas e/ou validadas.

Um modelo capilar amplamente presente na literatura para estimativa da permeabilidade de meios porosos é o Kozeny-Carman (KAVIANY, 1995; RICHARDSON; HARKER, 2002; MARTINS *et al.*, 2009; PINTO; LIMA; LEAL FILHO, 2009; MOREIRA; AROUCA; DAMASCENO, 2012; PEÇANHA, 2014), apresentado por Massarani (2001) conforme segue:

$$k = \frac{(d_p \phi)^2 \varepsilon^3}{36 \beta (1 - \varepsilon)^2} \quad (2.12)$$

onde: ε é a porosidade do meio, definida como a razão entre o volume de fluido (ou de “vazio”) e o volume total do meio poroso, compreendendo os volumes de sólido e de fluido. β , por sua vez, pode ser chamado de fator estrutural e está ligado à tortuosidade dos canais considerados na modelagem do escoamento.

Dados experimentais mostram que o fator β depende tanto da forma quanto da distribuição de tamanhos das partículas, bem como da porosidade do meio (MARTINS *et al.*, 2009; PEÇANHA, 2014). Segundo Endo, Chen e Pui (2002), a permeabilidade apresenta forte dependência com a porosidade do meio, o formato das partículas e o desvio padrão dos seus tamanhos. Ao avaliar a Eq. 2.12, admite-se que estes parâmetros estejam parciais ou totalmente contidos no valor de β .

Para meios formados por placas, cilindros, cubos e prismas, com porosidades entre 0,30 e 0,50, o valor de β fica compreendido entre 3,5 e 5,5 (RICHARDSON; HARKER, 2002). Para porosidades acima de 0,75, Massarani e Santana (1994) indicam que o valor de β aumenta significativamente com a porosidade. Kaviany (1995) considera que para meios porosos fibrosos, β aumenta exponencialmente com o aumento da porosidade, quando $\varepsilon > 0,95$. Para esferas idênticas, Massarani (1971) mostrou que o valor de β é de aproximadamente 4,167. Sabe-se que β é aproximadamente igual a 5,0 para meios porosos formados a partir de grãos com esfericidade entre 0,6 e 0,8 (PEÇANHA, 2014). Para grãos de quartzo, hematita e apatita, Couto, Barbosa e Lima (2017) encontraram valores de β variando entre 2 e 8. Conforme os autores, foram utilizados grãos com esfericidade (aproximada pela circularidade das imagens 2D dos grãos) entre 0,35 e 0,65 formando leitos de porosidade entre 0,395 e 0,530. Segundo Medeiros (2017), para meios porosos formados por partículas reentrantes do tipo anel, abrangendo esfericidades entre 0,45 e 0,60 e porosidades de leito entre 0,60 e 0,75, β assume valores entre 5,9 e 8,1. Ainda, β apresenta relação linear com ϕ/ε , conforme segue, com ressalvas quanto à quantidade reduzida de leitos testados.

$$\beta = 11,298 - 5,2332 \frac{\phi}{\varepsilon} \quad (2.13)$$

Assim, a utilização da Eq. 2.12 na estimativa da permeabilidade de meios depende da determinação experimental de β e deve se usada dentro das faixas validadas experimentalmente. Destaca-se, ainda, que na Eq. 2.12 a forma da partícula está inclusa não só no fator estrutural

como também na esfericidade, cujas limitações na descrição do formato de partículas, em especial das reentrantes, já foram discutidas.

Para recheios industriais dos tipos selas de Berl e anéis de Raschig, Massarani (1971) obteve:

$$k = \frac{d_p^2}{1030} \quad (2.14)$$

La Vega e Cukierman (2019) avaliaram a permeabilidade de meios porosos formados por partículas do tipo anel, comparando resultados experimentais com estimados através do modelo de Kozeny-Carman (Eq. 2.12) e do modelo de Massarani (1971) (Eq. 2.14). O modelo de Kozeny-Carman apresentou, em média, um erro de 180% na estimativa da permeabilidade, indicando que não se adequa a partículas reentrantes do tipo anel. Vale destacar que, para aplicação do modelo de Kozeny-Carman, os autores consideraram valores de β entre 2 e 4. Caso utilizassem $\beta = 5$, o erro médio seria reduzido para 37 %. Já o modelo de Massarani (1971) apresentou um erro de, em média, 58 %. Com base nos dados experimentais próprios e de Medeiros (2017), La Vega e Cukierman (2019) propuseram dois modelos para a estimativa da permeabilidade de meios porosos.

$$k = 0,069 d_p^2 \varepsilon^{4,06} \phi^{1,3} (\eta \lambda)^{0,35} \quad (2.15)$$

$$k = \frac{0,003 d_p^2 \varepsilon^{0,95} \phi^{1,23} (\eta \lambda)^{0,3}}{(1 - \varepsilon)^{1,52}} \quad (2.16)$$

Nota-se que os modelos de La Vega e Cukierman (2019) englobam d_p e ϕ das partículas, assim como ε , tal qual o modelo de Kozeny-Carman. No entanto, o formato das partículas também é representado pelos fatores de forma índice de convexidade (η) e índice da esfera circunscrita (λ). Ainda que o número de dados experimentais tenha sido reduzido, destaca-se que os modelos expressos nas Eq. 2.15 e 2.16 mostraram-se promissores, em especial a Eq. 2.16, permitindo a estimativa de k com erro médio em relação ao experimental de, respectivamente, 3,3 e 0,5 % para leitos com $0,60 < \varepsilon < 0,75$ de partículas com $0,40 < \phi < 0,60$.

Para elevadas vazões ($Re_{MP} > 1$), o valor da constante C torna-se igualmente relevante para a descrição do escoamento de fluidos em meio poroso, tal que, ao longo do tempo, diferentes formas de estimar seu valor também foram desenvolvidas. Massarani (2001) afirma que o valor de C pode ser calculado, a partir do modelo capilar.

$$C = \frac{\Omega}{3\varepsilon^2} \quad (2.17)$$

onde: Ω é um parâmetro adimensional a ser determinado experimentalmente.

Segundo Ergun (1952 apud PEÇANHA, 2014), Ω é igual a 0,143, válido para porosidades entre 0,35 e 0,50 e permeabilidades entre 10^{-6} e 10^{-4} cm². Costa e Massarani (1982), após um amplo trabalho de pesquisa de valores presentes na literatura e experimentais próprios, chegaram à seguinte expressão de Ω :

$$\Omega = \left[0,13 \left(\frac{k_0}{k} \right)^{0,37} + 0,10 \left(\frac{k_0}{k} \right)^{0,01} \right]^{0,98} \quad (2.18)$$

onde: k_0 é uma permeabilidade de referência, com valor de 10^{-6} cm². A Eq. 2.18 foi validada por Costa e Massarani (1982) para valores de permeabilidade entre 10^{-9} e 10^{-3} cm² e valores de porosidades compreendidos entre 0,10 e 0,75.

A equação mais popular para prever a queda de pressão em leitos porosos, no entanto, é a de Ergun (1952) (ERDIM; AKGIRAT; DEMIR, 2015). Assim como o modelo de Forchheimer, ela é estruturada em um primeiro termo dependente linearmente da velocidade superficial do fluido e em um segundo termo, que depende do quadrado dessa grandeza.

$$-\frac{\Delta p}{L} = A \mu \frac{(1 - \varepsilon)^2}{\varepsilon^3} \frac{q}{d_p^2} + B \rho \frac{(1 - \varepsilon)}{\varepsilon^3} \frac{q^2}{d_p} \quad (2.19)$$

onde A e B são constantes de natureza empírica.

Note-se que a queda de pressão presente na Eq. 2.19 deve-se unicamente à interação viscosa entre o fluido e o leito poroso, associada à força resistiva (m). Assim, para obter a queda de pressão total da coluna, deve-se, no caso de escoamento para cima, somar ρg àquela queda de pressão, o que equivale a levar em conta o peso do gás na coluna.

Na equação original de Ergun (1952), as constantes A e B assumiam os valores de, respectivamente, 150 e 1,75, frutos da análise de grande quantidade de dados experimentais.

O trabalho de Buchwald *et al.* (2020), aponta que os valores de A e B são recorrentemente discutidos na literatura e adaptados a diversos dados. Esses valores podem ser modificados para outras constantes ou para variáveis dependentes da rugosidade das partículas, da razão entre o diâmetro da coluna e o diâmetro das partículas, entre outros. Através de uma análise crítica dos trabalhos envolvendo a determinação dos valores de A e B, Buchwald *et al.* (2020) indicam que a equação original de Ergun ajusta-se a partículas lisas e de geometria simples e que o mau ajuste da equação a partículas irregulares de formato não esférico e

superfícies rugosas deve-se à dificuldade de determinação da área superficial. Por outro lado, os autores apontam que a tortuosidade (inclusa em β na Eq. 2.12) não aparece explicitamente da equação de Ergun e que variações nessa grandeza poderiam causar variações nos valores de A e B.

Seckendorf *et al.* (2020) apontam que a queda de pressão em leitos porosos é muitas vezes referida através do fator de fricção f , uma grandeza adimensional.

$$f = \frac{\Delta p}{L} \frac{d_p}{\rho q^2} \frac{\varepsilon^3}{(1 - \varepsilon)} \quad (2.20)$$

$$Re_m \equiv \frac{\rho d_p q}{\mu(1 - \varepsilon)} \quad (2.21)$$

onde Re_m é definido como número de Reynolds modificado (ERDIM; AKGIRAT; DEMIR, 2015).

Assim, a equação original de Ergun (1952) expressa em termos de fator de fricção torna-se:

$$f = \frac{150}{Re_m} + 1,75 \quad (2.22)$$

Já por Carman (1937 apud SECKENDORF *et al.*, 2020):

$$f = \frac{180}{Re_m} + \frac{2,871}{Re_m^{0,1}} \quad (2.23)$$

O trabalho de Erdim, Akgirat e Demir (2015) avaliou 38 equações para a previsão da queda de pressão no escoamento em meios porosos e propôs o seguinte modelo:

$$f = \frac{160}{Re_m} + \frac{2,81}{Re_m^{0,096}} \quad (2.24)$$

Há semelhança com o trabalho de Carman (1937) e outros modelos da literatura. Os autores destacam que os modelos de f onde a primeira constante apresenta valor entre 150 e 160 oferecem ajuste superior aos dados experimentais do que aqueles que utilizam 180. Em outros termos, na Eq. 2.12 os valores de β entre 4,16 e 4,44 fornecem melhor ajuste do que β igual a 5, para partículas esféricas, $0,37 < \varepsilon < 0,47$, razão de diâmetros coluna/partícula entre 4 e 34 e $2 < Re_m < 3600$.

A previsão da queda de pressão em colunas recheadas com recheios industriais é, de certa forma, similar às exploradas até agora. Algumas questões específicas a esses leitos serão discutidas no item 2.3.1.

2.3.1 Queda de pressão em leitos empacotados

Os leitos empacotados são meios porosos formados a partir de partícula confinadas em uma coluna. Com isso, o escoamento de fluidos através deles deve obedecer às mesmas considerações gerais feitas nas seções anteriores.

Richardson e Harker (2002) pontuam, no entanto, algumas especificidades dos leitos empacotados. Entre elas, pode-se citar as partículas serem relativamente grandes, quando comparadas a filtros de areia, por exemplo. Além disso, as partículas são, geralmente, “ocas”, ou reentrantes, como já discutido, projetadas para maximizar transferência de massa causando pequenas quedas de pressão. À vista disso, aqueles autores indicam que a estimativa da queda de pressão de leitos empacotados deve, necessariamente, basear-se em material fornecido pelo fabricante do recheio, de origem empírica.

McCabe, Smith e Harriot (1993) indicam que a influência das partículas na queda de pressão observada em colunas empacotadas é estudada através do fator de empacotamento (F_e), fator empírico fornecido pelo fabricante das partículas e que diminui ao aumentar-se o tamanho das partículas ou a porosidade do meio. Valores de F_e para recheios industriais diversos são apresentados no apêndice A. Conforme os autores, não existe uma relação universal para estimativa de queda de pressão, que possa ser usada para todos os recheios industriais. Ainda, valores de F_e possuem aplicação limitada a faixas específicas de queda de pressão.

McCabe, Smith e Harriot (1993) e Richardson e Harker (2002) concordam quanto à relação quase quadrática entre a velocidade superficial do gás e a queda de pressão em leitos empacotados secos (sem o escoamento de líquido em contracorrente). Os autores indicam que a relação entre as grandezas se dá por meio de um diagrama do tipo log-log permitindo a obtenção de uma reta cujo coeficiente angular é aproximadamente 1,8.

Diante do exposto, parece que a inviabilidade de prever a queda de pressão em colunas empacotadas com recheios industriais associa-se à dificuldade relacionada à caracterização das partículas.

3 METODOLOGIA

3.1 CARACTERIZAÇÃO FLUIDODINÂMICA DOS LEITOS

Para o estudo do escoamento de fluidos através de meios porosos formados com recheios industriais, utilizou-se o modelo de Forchheimer a fim de relacionar a força resistiva do meio à velocidade superficial do fluido, conforme Eq. 2.7.

Os dados experimentais utilizados foram diagramas que relacionam Δp versus q (ou grandezas que possam ser relacionadas a essas) para diversos tipos de recheio. Esses diagramas, encontrados na literatura, podem ser vistos no anexo A. Para maior exatidão na tomada de dados, o software *WebPlotDigitizer* foi utilizado. O software permite a leitura automática de diagramas e subsequente transformação dos dados gráficos em valores. Logo, estabeleceu-se a relação entre $\Delta p/qL$ e q . A validação do modelo de Forchheimer foi feita a partir do coeficiente de determinação das retas assim obtidas. Os valores da permeabilidade e da constante C dos leitos estudados foram calculados a partir dos coeficientes (linear e angular), conforme previsto pelo modelo de Forchheimer.

3.2 ESTIMATIVA TEÓRICA DA PERMEABILIDADE E DA CONSTANTE C

3.2.1 Caracterização das Partículas

A caracterização das partículas foi realizada de modo a obter os parâmetros necessários para a estimativa da permeabilidade e da constante C a partir dos modelos selecionados.

Para as partículas estudadas (anéis de Raschig, anéis de Pall e selas de Berl, de dimensões diversas), foram determinados: diâmetro volumétrico (d_p), diâmetro de superfície (d_s), esfericidade (ϕ), índice de convexidade (η) e índice da esfera circunscrita (λ) através das Eqs. 2.1-5.

– Anéis de Raschig:

Os anéis de Raschig são estruturas cilíndricas ocas (anéis) cujo diâmetro externo é igual à altura, conforme Figura 3.1. Podem ser feitos de cerâmica, plásticos e metais ou ligas metálicas diversas, dependendo de sua aplicação.

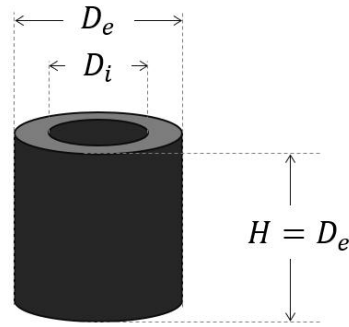


Figura 3.1 – Representação de anéis de Raschig onde D_e é o diâmetro externo, D_i é o diâmetro interno e H é a altura que, para anéis de Raschig, é igual ao diâmetro externo.

As dimensões de um anel de Raschig fornecidas pelos fabricantes são diâmetro externo (igual à sua altura e geralmente referido como “tamanho nominal”) e espessura que, naturalmente, define seu diâmetro interno. Dados da literatura (apêndice A) foram utilizados para estabelecer essas grandezas e determinar os parâmetros conforme segue.

$$V_p = \frac{\pi H}{4} (D_e^2 - D_i^2) \quad (3.1)$$

$$S_p = \frac{\pi}{2} (D_e^2 - D_i^2) + \pi H (D_e + D_i) \quad (3.2)$$

$$V_\eta = \frac{\pi D_i^2}{4} H \quad (3.3)$$

$$V_\lambda = \frac{\sqrt{2}}{3} \pi D_e^3 \quad (3.4)$$

onde: V_η é o menor volume que, se adicionado à partícula, permite torná-la convexa (não reentrante) e V_λ é o volume da esfera circunscrita à partícula.

– Anéis de Pall:

Anéis de Pall metálicos e cerâmicos são anéis (cilindros ocos) com porções da parede dobradas para dentro, conforme Figura 3.2 (a-d). Anéis de Pall plásticos possuem fendas em suas paredes e estruturas de reforço interno (Figura 3.2, e-f). A espessura de parede dos anéis de Pall metálicos e plásticos são consideravelmente menores que as dos anéis de Raschig.

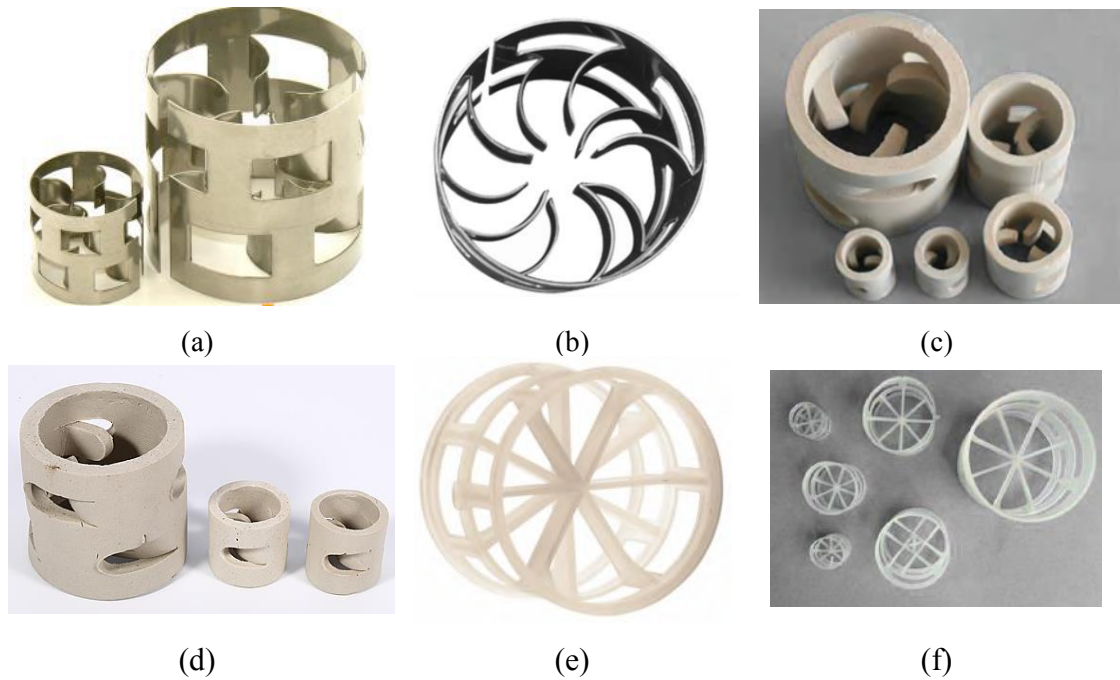


Figura 3.2 – Anéis de Pall metálicos (a-b), cerâmicos (c-d) e plásticos (e-f) (adaptado dos sites dos fabricantes: (a; e) The Pall Ring Company, (b) Munters, (c; f) Boegger, (d) Nanxiang).

As dimensões dos anéis de Pall fornecidas por seus fabricantes são o tamanho nominal (equivalente ao diâmetro externo e à altura da partícula) e a espessura, relacionada ao diâmetro interno. Dados da literatura (apêndice A) foram utilizados para estabelecer essas grandezas e determinar os parâmetros conforme segue.

$$V_p = \frac{\pi H}{4} (D_e^2 - D_i^2) \quad (3.5)$$

$$S_p = \frac{\pi}{2} (D_e^2 - D_i^2) + \pi H (D_e + D_i) + 11,3 D_e (D_e - D_i) \quad (3.6)$$

$$V_\eta = \frac{\pi D_i^2}{4} H \quad (3.7)$$

$$V_\lambda = \frac{\sqrt{2}}{3} \pi D_e^3 \quad (3.8)$$

Cabe destacar que V_p e S_p calculados pelas Eq. 3.5 e 3.6 são valores aproximados. Na Eq. 3.6 o termo $11,3 D_e (D_e - D_i)$ leva em conta as superfícies criadas pelos recortes, a saber: 10 recortes aproximadamente retangulares na superfície, com comprimento de $0,40 D_e$ e altura de $0,23 D_e$, e um recorte longitudinal que corta a parede do anel (deixando o anel “aberto”).

– Selas de Berl:

As selas de Berl são partículas cujo formato lembra uma sela para animais de montaria, conforme Figura 3.3, caracterizadas por uma única dimensão, o tamanho nominal. Em comparação ao anel de Raschig, a sela de Berl é mais eficiente, no entanto, possui maior custo. (LUDWIG, 2001). Segundo a empresa *Celene*, fornecedora brasileira de recheios, a forma das selas de Berl não permite o encaixe ou encobrimento dessas partículas, garantindo melhor distribuição do líquido e menor canalização.



Figura 3.3 – Selas de Berl em cerâmica (adaptada de Celene, 2021).

Devido à forma complexa das selas de Berl e à falta de informação sobre sua espessura, a caracterização das partículas foi realizada a partir dos seguintes dados: porosidade do leito (ϵ), quantidade de partículas por volume de torre e área superficial média por volume de torre, conforme segue. É importante destacar que sem o conhecimento da espessura das peças, o volume para torná-las não reentrantes e o volume da esfera circunscrita não puderam ser calculados.

$$V_p = \frac{1 - \epsilon}{\text{n}^\circ \text{ de peças por volume}} \quad (3.9)$$

$$S_p = \frac{\text{área superficial por volume}}{\text{n}^\circ \text{ de peças por volume}} \quad (3.10)$$

3.2.2 Estimativa da Permeabilidade

A estimativa da permeabilidade dos meios foi realizada a partir das características das partículas e dos leitos por elas formados através das correlações de Kozeny-Carman (Eq. 2.12), Massarani (1971) (Eq. 2.14) e La Vega e Cukierman (2019) (Eqs. 2.15 e 2.16). Para o modelo de Kozeny-Carman, os valores de β utilizados foram os estimados pela correlação de Medeiros

(2017) para anéis em função da porosidade do meio e da esfericidade das partículas (Eq. 2.13). Para informações relativas ao meio (porosidade, quantidade de peças por volume etc.), foram utilizados dados da literatura, disponíveis no apêndice A.

3.2.3 Estimativa da Constante C

A constante C dos leitos estudados foi estimada a partir da Eq. 2.17 com Ω calculado pela relação de Costa e Massarani (1982), dada pela Eq. 2.18.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 CARACTERIZAÇÃO FLUIDODINÂMICA DOS LEITOS

O tratamento dos dados experimentais mostrou que a relação entre $\Delta p/qL$ e q é linear para todos os leitos caracterizados, vide valores de R^2 na Tabela B. 1 (Apêndice B), validando o modelo de Forchheimer e permitindo a determinação dos valores de k e C . Ainda, para todos os leitos estudados, Re_{MP} atinge valores menores que 1 (região onde a Lei de Darcy passa a ser válida) quando a velocidade superficial é inferior a 0,1 m/s, faixa não utilizada.

Nas Figuras 4.1 e 4.2 são apresentadas as tendências da permeabilidade e da constante C dos leitos estudados. Os dados brutos podem ser vistos na Tabela B. 1 (Apêndice B).

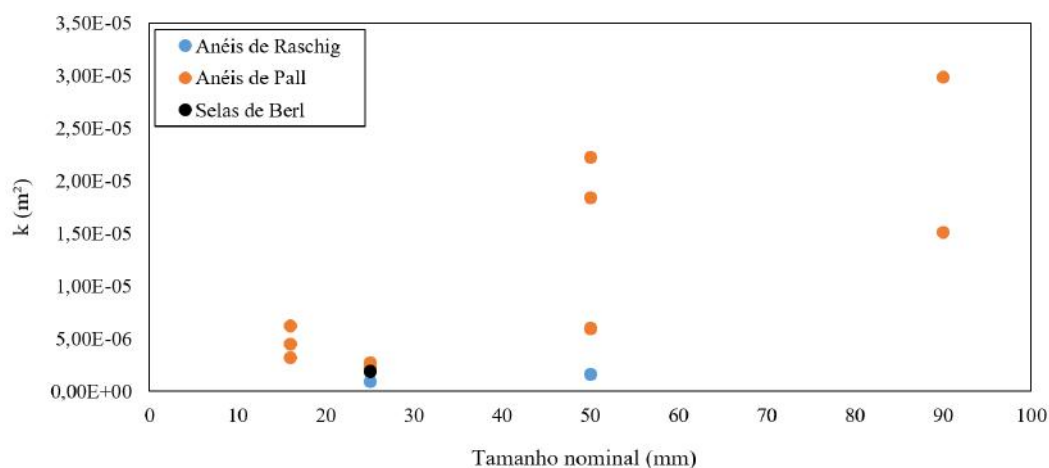


Figura 4.1 – Permeabilidade de leitos recheados industriais *versus* tamanho nominal das partículas.

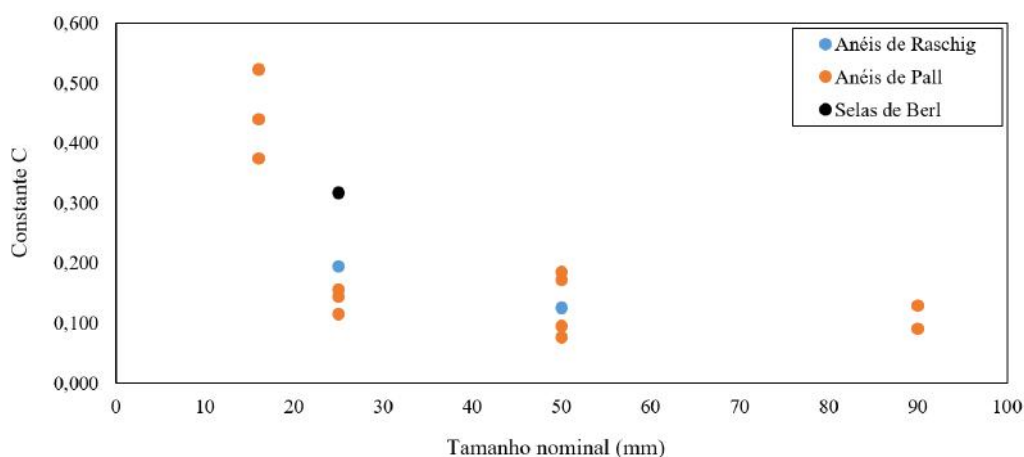


Figura 4.2 – Constante C de leitos recheados industriais *versus* tamanho nominal das partículas.

Destaca-se que as espessuras de parede dos recheios industriais variam conforme fabricante, bem como a porosidade dos leitos por eles formados. Esses fatores afetam a

permeabilidade e a constante C, possibilitando que esses parâmetros assumam valores distintos, ainda que para leitos formados por partículas de mesmo tipo e tamanho nominal.

De modo geral, pode-se observar que conforme o tamanho das partículas dos recheios aumenta, a permeabilidade do meio aumenta, enquanto os valores da constante C tendem a diminuir. Tais observações corroboram, em linhas gerais, com o previsto pela literatura segundo a qual o aumento do tamanho das partículas (e consequente aumento de d_p e da porosidade do meio) levam a maiores permeabilidades. A redução da constante C com o aumento da permeabilidade e da porosidade conforme o tamanho das partículas aumenta também é esperado, de acordo com a correlação de Costa e Massarani (1982). Ainda, os anéis de Raschig apresentam permeabilidade inferior aos demais recheios. Tal diferença é esperada uma vez que as demais partículas foram desenvolvidas posteriormente aos anéis de Raschig, na busca por recheios mais eficientes e que favorecessem menores quedas de pressão.

4.2 CARACTERIZAÇÃO DAS PARTÍCULAS

A comparação das características (d_p , d_s , ϕ , η e λ) dos anéis de Raschig, anéis de Pall e selas de Berl estudados é apresentada na Figura 4.3 e pode ser visualizada também nas Tabelas B. 2-4 (Apêndice B). Vale lembrar que para anéis de Raschig e anéis de Pall o tamanho nominal corresponde ao diâmetro externo das partículas, que é igual à sua altura.

Os anéis de Raschig metálicos (Tabela B. 2) apresentaram diâmetro volumétrico na faixa de 17,9 a 28,8 mm, diâmetro de área superficial de 35,9 a 71,8 mm, esfericidade consideravelmente baixa, entre 0,16 e 0,25, índice de convexidade entre 3,27 e 7,26 e índice da esfera circunscrita entre 0,06 e 0,12. Já os anéis de Pall metálicos caracterizados (Tabela B. 3) apresentaram diâmetro volumétrico na faixa de 7,68 a 33,8 mm, diâmetro de área superficial de 23,4 a 129 mm, esfericidade entre 0,07 e 0,12, índice de convexidade entre 9,67 e 27,4 e índice da esfera circunscrita entre 0,02 e 0,05. Para as selas de Berl de cerâmica (Tabela B. 4), por sua vez, as peças do leito caracterizado apresentaram diâmetro volumétrico de 19,6 mm, diâmetro de área superficial igual a 32,0 mm e esfericidade consideravelmente maior do que as demais partículas caracterizadas, de 0,38.

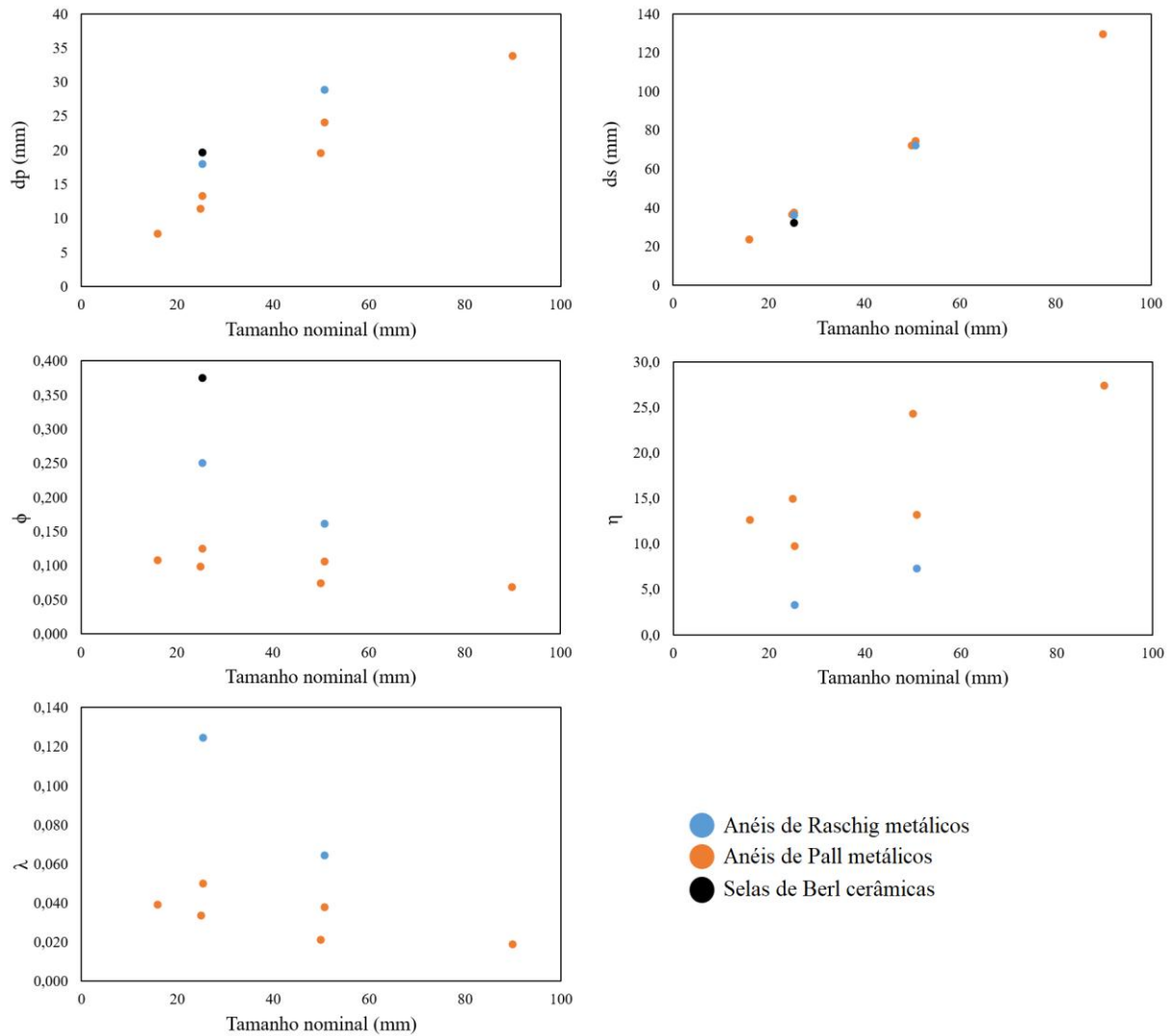


Figura 4.3 – Comparação entre a caracterização de anéis de Raschig metálicos, anéis de Pall metálicos e selas de Berl cerâmicas.

Conforme Figura 4.3, para um dado tamanho nominal de recheio industrial, os valores de d_p de anéis de Pall < anéis de Raschig < selas de Berl, devido, principalmente, à diferença na espessura dessas partículas. Embora não se tenha o dado da espessura das selas de Berl, partículas de recheio feitas em cerâmica são, geralmente, mais espessas que as feitas de outros materiais, conferindo-lhes maior resistência mecânica. Essa diferença em d_p reflete na esfericidade, no índice de convexidade e no índice da esfera circunscrita das partículas. A baixa esfericidade das partículas estudadas, especialmente dos anéis de Raschig e de Pall, faz com que as correlações disponíveis na literatura não sejam válidas para essas partículas. Ainda, observa-se que as partículas possuem alto índice de convexidade, consequência da alta reentrância de seus formatos, o que também acarreta o baixo ajuste de algumas correlações disponíveis. Os baixos valores de índice da esfera circunscrita podem ser compreendidos devido aos baixos valores de esfericidade e altos valores de índice de convexidade.

4.3 COMPARAÇÃO E PROPOSIÇÃO DE MODELOS

4.3.1 Permeabilidade

Na Figura 4.4 e na Tabela 4.1 os resultados experimentais e teóricos para a permeabilidade de leitos formados por anéis de Raschig são comparados. O valor estimado da permeabilidade dos meios porosos aqui estudados em função de suas porosidades e das características das partículas que os constituem a partir de diferentes correlações é apresentado de forma mais detalhada nas Tabelas B. 5-7 (Apêndice B).

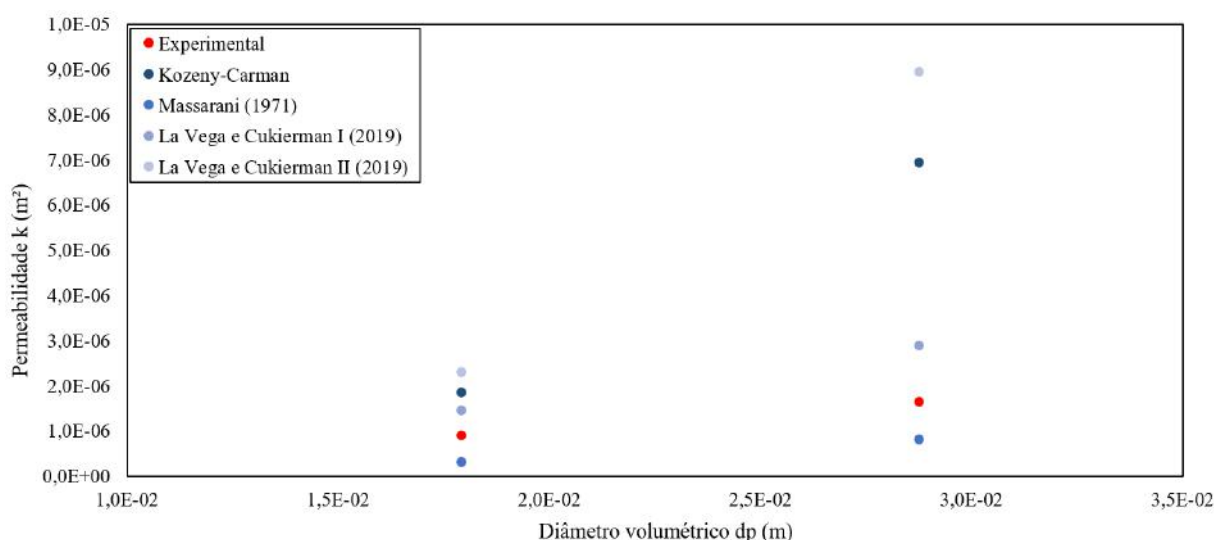


Figura 4.4 – Comparação de valores experimentais e teóricos para a permeabilidade de leitos recheados com anéis de Raschig.

Tabela 4.1: Comparação das estimativas teóricas de permeabilidade com o valor experimental dos leitos de anéis de Raschig.

Exp.	Kozeny-Carman			Massarani		La Vega e Cukierman I		La Vega e Cukierman II	
	k (m ²)	k (m ²)	Desvio (%)	k (m ²)	Desvio (%)	k (m ²)	Desvio (%)	k (m ²)	Desvio (%)
A	$8,96 \times 10^{-7}$	$1,85 \times 10^{-6}$	106,8	$3,12 \times 10^{-7}$	65,2	$1,45 \times 10^{-6}$	61,5	$2,30 \times 10^{-6}$	156,9
B	$1,63 \times 10^{-6}$	$6,94 \times 10^{-6}$	324,9	$8,04 \times 10^{-7}$	50,8	$2,89 \times 10^{-6}$	76,9	$8,94 \times 10^{-6}$	447,1
Desvio médio (%)			215,8	58,0		69,2		302,0	

Nota: d_p igual a $1,8 \times 10^{-2}$ m (A) e $2,9 \times 10^{-2}$ m (B).

Na Figura 4.5 e na Tabela 4.2 são apresentadas as comparações entre os resultados experimentais e teóricos para a permeabilidade de leitos formados por anéis de Pall.

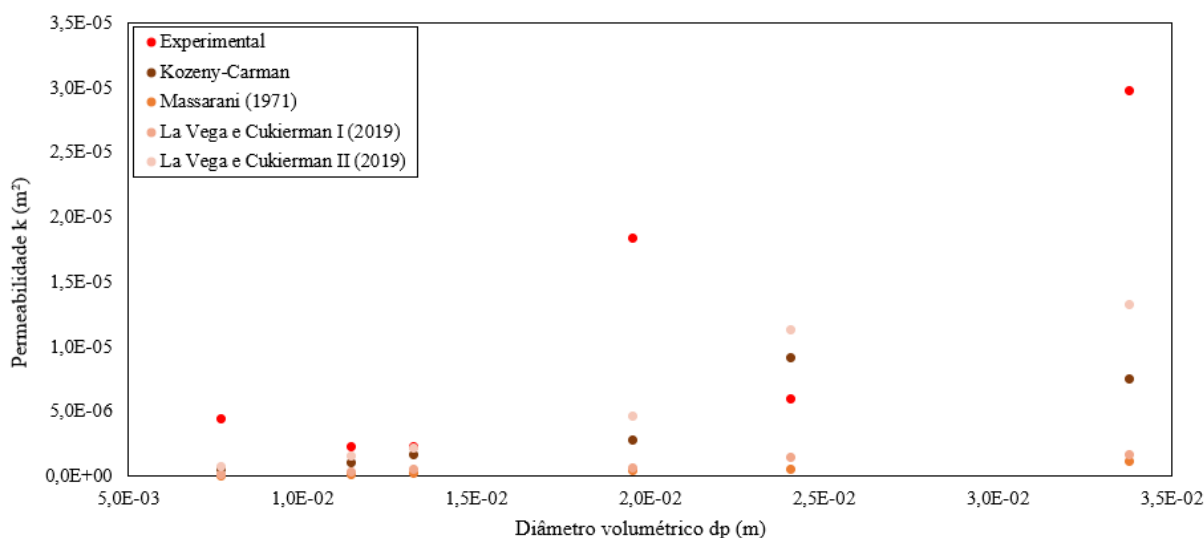


Figura 4.5 – Comparação de valores experimentais e teóricos para a permeabilidade de leitos recheados com anéis de Pall.

Tabela 4.2: Comparação das estimativas teóricas de permeabilidade com o valor experimental dos leitos de anéis de Pall

Exp.	Kozeny-Carman			Massarani		La Vega e Cukierman I		La Vega e Cukierman II	
	k (m ²)	k (m ²)	Desvio (%)	k (m ²)	Desvio (%)	k (m ²)	Desvio (%)	k (m ²)	Desvio (%)
C	4,45 x10 ⁻⁶	5,37 x10 ⁻⁷	87,9	3,72 x10 ⁻⁸	98,7	1,40 x10 ⁻⁷	96,8	7,61 x10 ⁻⁷	82,9
D	2,27 x10 ⁻⁶	1,01 x10 ⁻⁶	55,2	1,26 x10 ⁻⁷	94,4	2,76 x10 ⁻⁷	87,8	1,54 x10 ⁻⁶	31,9
E	2,29 x10 ⁻⁶	1,63 x10 ⁻⁶	28,7	1,69 x10 ⁻⁷	92,6	4,83 x10 ⁻⁷	78,9	2,20 x10 ⁻⁶	4,11
F	1,84 x10 ⁻⁶	2,75 x10 ⁻⁶	85,1	3,70 x10 ⁻⁷	98,0	5,87 x10 ⁻⁷	96,8	4,64 x10 ⁻⁶	74,8
G	5,99 x10 ⁻⁶	9,17 x10 ⁻⁶	53,0	5,61 x10 ⁻⁷	90,6	1,41 x10 ⁻⁶	76,4	1,13 x10 ⁻⁵	88,2
H	2,98 x10 ⁻⁶	7,47 x10 ⁻⁶	74,9	1,11 x10 ⁻⁶	96,3	1,61 x10 ⁻⁶	94,6	1,32 x10 ⁻⁵	55,7
Desvio médio (%)			64,1	95,1		88,6		56,3	

Nota: d_p igual a $7,7 \times 10^{-3}$ m (C), $1,1 \times 10^{-2}$ m (D), $1,3 \times 10^{-2}$ m (E), $2,0 \times 10^{-2}$ m (F), $2,4 \times 10^{-2}$ m (G) e $3,4 \times 10^{-2}$ m (H).

Na Figura 4.6 e na Tabela 4.3 o resultado experimental referente à permeabilidade do leito formado por selas de Berl de d_p aproximadamente igual a $2,0 \times 10^{-2}$ m é comparado às estimativas de k *via* modelo de Kozeny-Carman e correlação de Massarani (1971). Destaca-se

que, devido à falta de informação sobre a espessura das partículas, as correlações de La Vega e Cukierman (2019) não foram avaliadas para o leito de selas de Berl.

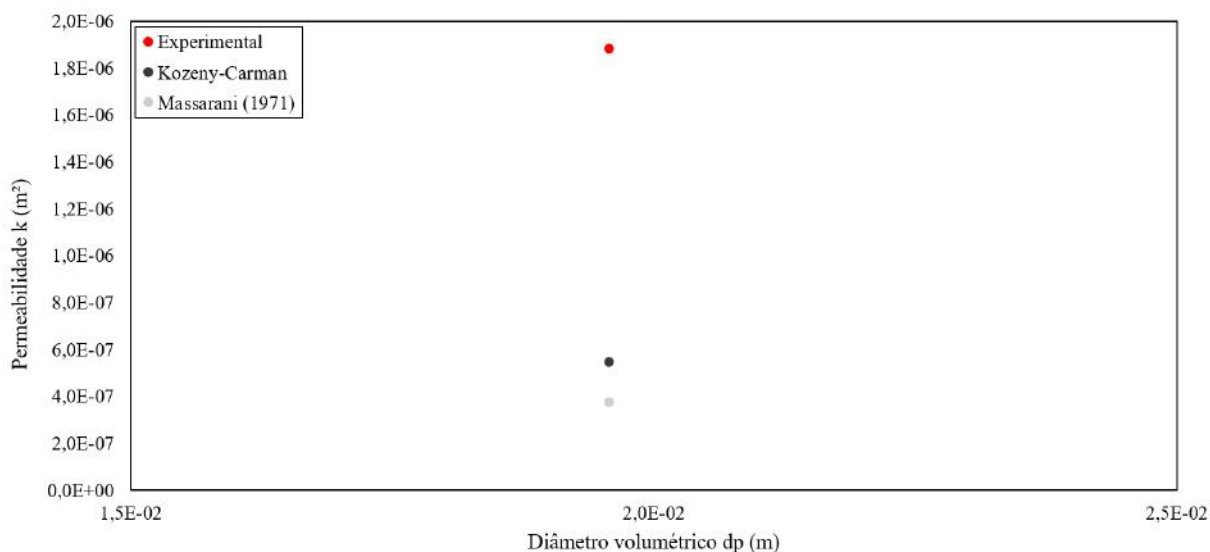


Figura 4.6 – Comparação entre valor experimental e teóricos para a permeabilidade de leito recheado com selas de Berl.

Tabela 4.3: Comparação das estimativas teóricas de permeabilidade com o valor experimental para o leito de selas de Berl.

	Exp.	Kozeny-Carman		Massarani	
	k (m ²)	k (m ²)	Desvio (%)	k (m ²)	Desvio (%)
I	1,88 x10 ⁻⁶	5,46 x10 ⁻⁷	70,9	3,72 x10 ⁻⁷	80,2

Nota: d_p igual a $2,0 \times 10^{-2}$ m (I).

Primeiramente, nota-se que a estimativa da permeabilidade difere de forma considerável em função da correlação utilizada e que os desvios em relação aos valores experimentais são, muitas vezes, bastante elevados. Os dados experimentais indicam a inadequação das correlações utilizadas para a previsão da permeabilidade dos meios porosos estudados. Tal inadequação é majoritariamente atribuída ao fato de as correlações utilizadas, com exceção da de Massarani, serem restritas a leitos com características distintas das observadas naqueles aqui caracterizados.

As correlações de La Vega e Cukierman foram propostas para leitos com porosidade entre 0,60 e 0,75 formados por partículas do tipo anel com esfericidade entre 0,40 e 0,60. Já no modelo de Kozeny-Carman, o valor de β utilizado (9,8 e 10,4 para os anéis de Raschig, entre

10,6 e 10,9 para os anéis de Pall e 8,4 para as selas de Berl) foi estimado pela correlação de Medeiros (2017) (Eq. 2.13), restrita às mesmas faixas de porosidade e esfericidade.

Dos leitos estudados, o único que se encaixa na restrição da porosidade dessas correlações é o de selas de Berl (com ε igual a 0,68), cuja esfericidade é próxima da faixa de restrição (ϕ de 0,38). Os leitos de anéis de Raschig possuem porosidade de 0,86 e 0,92, enquanto os de anéis de Pall variam de 0,94 a 0,96. A grande importância da porosidade na previsão da permeabilidade fica clara através do modelo de Kozeny-Carman, onde ela aparece com expoente 3 (Eq. 2.12).

Embora menos relevante que a porosidade do meio, a esfericidade das partículas também se mostra influente em relação à permeabilidade. As baixas esfericidades dos anéis de Raschig (0,16 a 0,25) e ainda mais baixas dos anéis de Pall (0,07 a 0,12) apenas confirmam a inadequação dos leitos em relação às correlações exploradas.

Isto posto, a correlação de Massarani (1971) foi a que melhor previu os dados experimentais dos leitos de anéis de Raschig, apresentando desvio médio de 58,0 %. Aqui, destaca-se que La Vega e Cukierman (2019) encontraram o mesmo desvio médio para a correlação de Massarani (1971). Para os leitos formados por anéis de Pall, a correlação com menor desvio médio foi a de La Vega e Cukierman II (com 56,3 %) e para o leito de selas de Berl o menor desvio foi possibilitado pelo modelo de Kozeny-Carman (70,9 %).

Dados os altos desvios das correlações avaliadas, buscou-se: estabelecer uma relação capaz de estimar valores de β de modo a “estender” o modelo de Kozeny-Carman a recheios industriais (com altas porosidades e baixas esfericidades); e propor uma nova correlação para a estimativa da permeabilidade, baseada em características mensuráveis do leito e de suas partículas, adaptada a tais recheios

Em relação ao β , calculou-se os valores que permitiriam a máxima aproximação entre a permeabilidade estimada pelo modelo de Kozeny-Carman e a permeabilidade determinada experimentalmente. A relação entre os valores de β (“ β ideal”) e alguns parâmetros dos recheios pode ser vista na Figura 4.7.

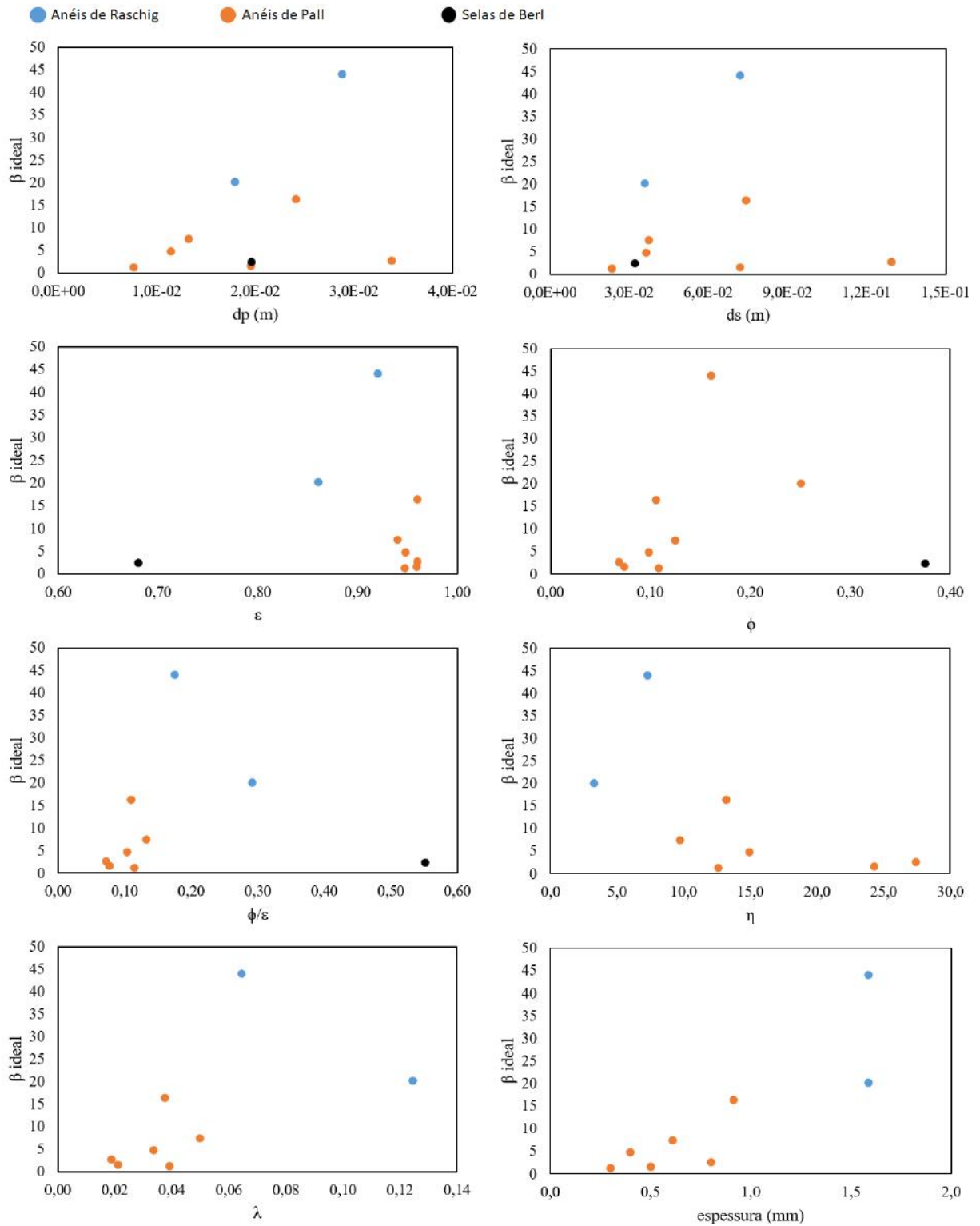


Figura 4.7 – Influência dos parâmetros no valor de β que leva à otimização da estimativa da permeabilidade pelo modelo de Kozeny-Carman em relação aos valores experimentais.

Para os leitos de selas de Berl e anéis de Raschig, a relação entre β ideal e porosidade mostrou-se exponencial (com R^2 igual a 0,999) dada por:

$$\beta = 0,0007 \exp(11,98 \varepsilon) \quad (4.1)$$

No entanto, a relação exponencial entre essas grandezas é indicada por Kaviany (1995) para leitos com porosidade superior a 0,95. Os leitos aqui estudados nessa faixa de porosidade são os de anéis de Pall, para os quais a relação entre β e ε não é clara. Considerando que essas são as partículas estudadas com as menores esfericidades, buscaram-se relações para β envolvendo não somente a porosidade dos leitos, como também a esfericidade das partículas. Foram avaliadas correlações minimizando o valor da função objetivo de mínimos quadrados com a ferramenta *Solver* do Microsoft Excel, mostradas conforme segue:

$$\beta = 655,41 \varepsilon^{11,14} \phi^{1,32} \quad (4.2)$$

$$\beta = 0,016 \phi^{2,63} \exp(12,72\varepsilon) \quad (4.3)$$

Empregando a Eq. 4.2, o modelo de Kozeny-Carman promove um desvio médio de 47 % para os leitos de anéis de Raschig, 69 % para os recheios de anéis de Pall e 0,03 % para as selas de Berl. Já com a Eq. 4.3, os desvios médios são de 98, 46 e 65 %, respectivamente. Embora mais ajustáveis do que as correlações anteriormente avaliadas, os desvios médios frutos dessas correlações ainda são consideráveis.

Quanto à proposição de uma nova correlação para a estimativa da permeabilidade adaptada aos recheios industriais aqui investigados, inicialmente traçaram-se diagramas de k versus parâmetros característicos do recheio, que podem ser vistos na Figura 4.8, de modo a investigar a influência desses parâmetros. A permeabilidade dos leitos estudados mostrou-se particularmente dependente dos fatores de forma: η , λ e ϕ , nessa ordem. Destaca-se a relação exponencial entre k e η , para a qual o índice de correlação foi de 0,98.

Foram avaliadas correlações que minimizassem o valor da função objetivo de mínimos quadrados com o auxílio da ferramenta *Solver* do Microsoft Excel, obtendo-se:

$$k = 1,78 \times 10^{-4} d_p^2 \varepsilon^3 \eta^{1,6} \quad (4.4)$$

$$k = 7,70 \times 10^{-4} d_s^2 \varepsilon^{4,5} \phi^{0,8} \eta^{1,4} \lambda^{0,4} \quad (4.5)$$

$$k = 2,71 \times 10^{-3} d_p^2 \varepsilon^{1,65} \exp(0,085 \eta) \quad (4.6)$$

A Eq. 4.4 permitiu a estimativa da permeabilidade dos leitos estudados com desvio médio de 49,3 %, enquanto, para as Eqs. 4.5 e 4.6, os desvios médios foram de 52,1 e 50,5 %. Cabe destacar que tais relações se aplicam aos leitos de anéis de Raschig e de Pall, apenas, uma vez que os valores de η e λ das selas de Berl não foram determinados.

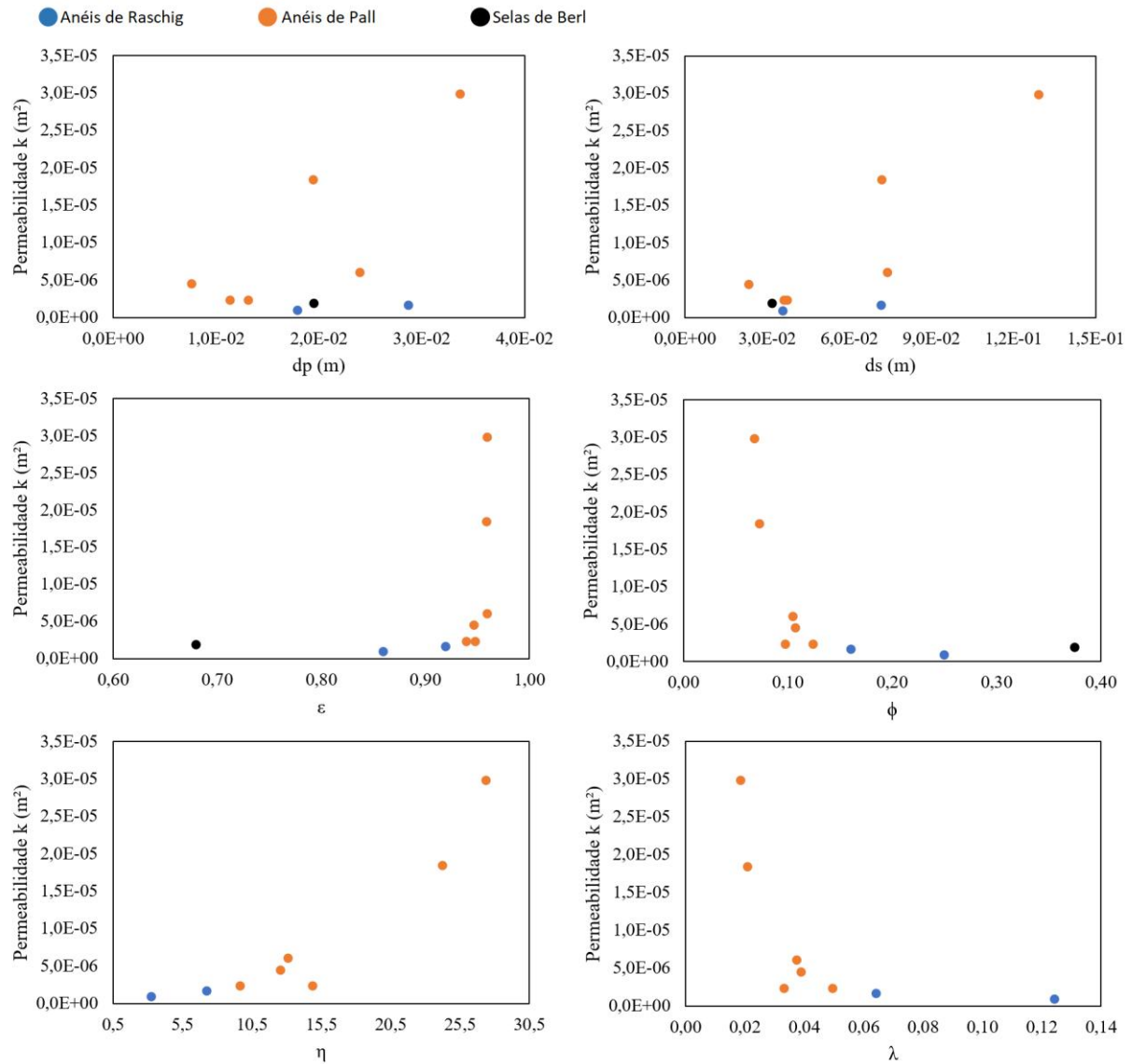


Figura 4.8 – Influência dos parâmetros no valor experimental da permeabilidade dos leitos de anéis de Raschig, anéis de Pall e selas de Berl.

4.3.2 Constante C

Os valores teóricos da constante C dos meios porosos aqui estudados, estimados em função de suas permeabilidades calculadas a partir de diferentes correlações e de suas porosidades, são comparados aos resultados experimentais nas Figuras 4.9-11 e nas Tabelas 4.4-6. Ressalta-se que, os valores em vermelho são os valores experimentalmente determinados para a constante C, já os valores legendados como “*com k experimental*” foram os valores estimados a partir da correlação de Costa e Massarani (1982) utilizando a permeabilidade

experimental como k. Ainda, dados brutos podem ser visualizados nas Tabelas B. 8-10 (Apêndice B).

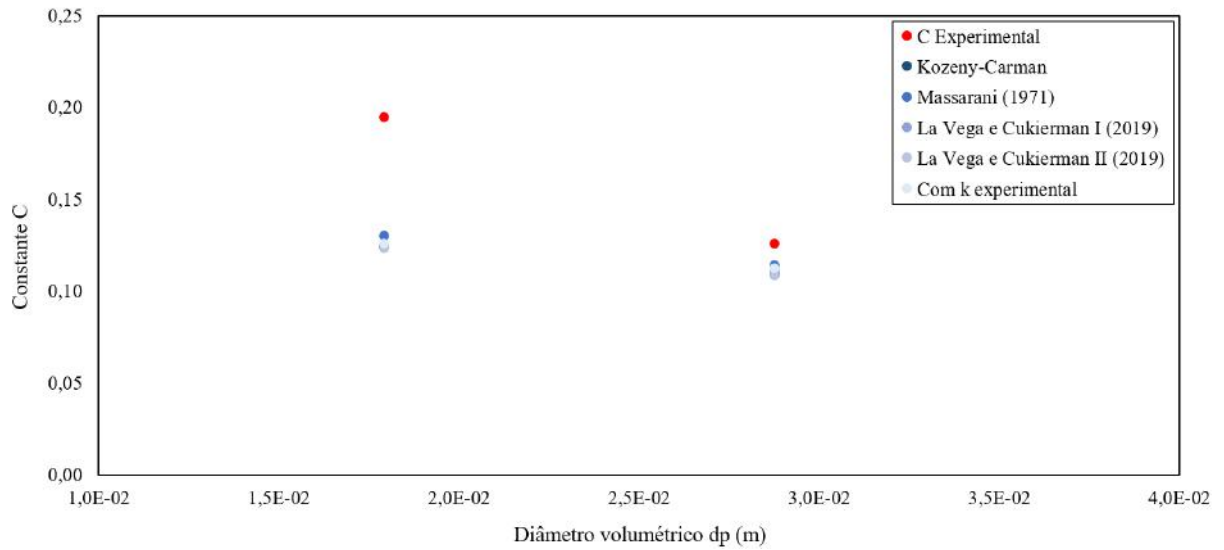


Figura 4.9 – Comparação de valores experimentais e teóricos para a constante C de leitos recheados com anéis de Raschig.

Tabela 4.4: Comparação das estimativas teóricas e valor experimental da constante C de leitos porosos de anéis de Raschig.

Exp.	C calculado a partir de k estimado por:								
	Kozeny-Carman			Massarani		La Vega e Cukierman I		La Vega e Cukierman II	
C	C	Desvio (%)	C	Desvio (%)	C	Desvio (%)	C	Desvio (%)	
A	0,1944	0,1237	36,4	0,1299	33,2	0,1244	36,0	0,1231	36,7
B	0,1259	0,1088	13,6	0,1141	9,40	0,1107	12,1	0,1084	14,0
Desvio médio (%)		25,0	21,3		24,1		25,3		

Nota: d_p igual a $1,8 \times 10^{-2}$ m (A) e $2,9 \times 10^{-2}$ m (B).

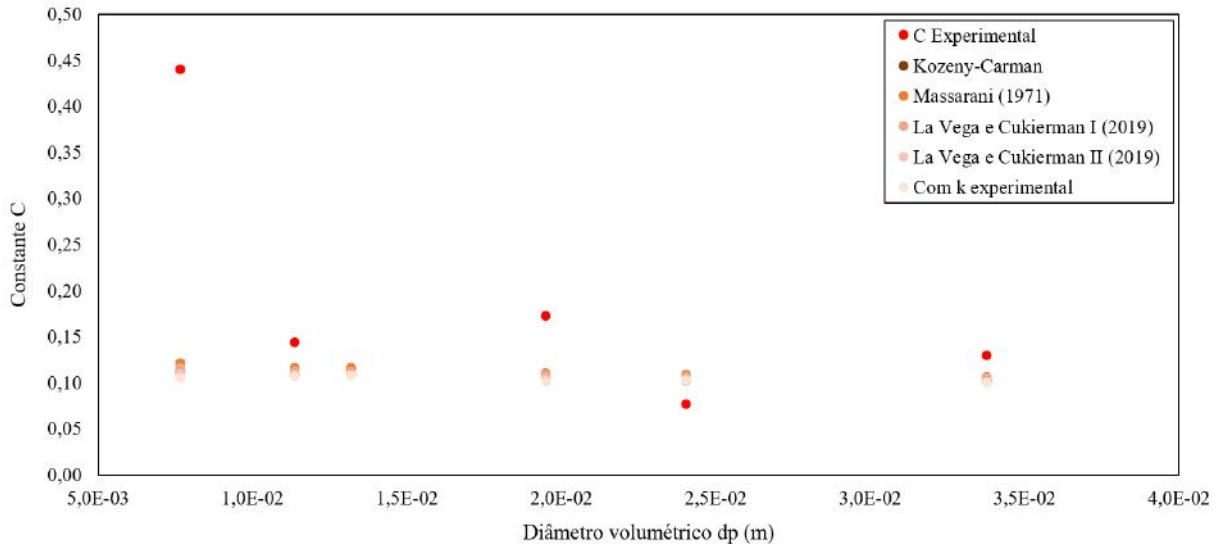


Figura 4.10 – Comparação de valores experimentais e teóricos para a constante C de leitos recheados com anéis de Pall.

Tabela 4.5: Comparação das estimativas teóricas e valor experimental da constante C de leitos porosos de anéis de Pall.

Exp.	C calculado a partir de k estimado por:							
	Kozeny-Carman		Massarani		La Vega e Cukierman I		La Vega e Cukierman II	
	C	Desvio (%)	C	Desvio (%)	C	Desvio (%)	C	Desvio (%)
C	0,4399	74,9	0,1206	72,6	0,1157	73,7	0,1094	75,1
D	0,1440	24,7	0,1161	19,4	0,1127	21,7	0,1073	25,5
E	0,1153	5,89	0,1162	0,75	0,1121	2,80	0,1078	6,52
F	0,1718	39,4	0,1097	36,2	0,1081	37,1	0,1030	40,0
G	0,0763	33,2	0,1081	41,7	0,1055	38,3	0,1012	32,7
H	0,1289	20,9	0,1061	17,7	0,1052	18,4	0,1010	21,7
Desvio médio (%)		33,2	31,4		32,0		33,6	

Nota: d_p igual a $7,7 \times 10^{-3}$ m (C), $1,1 \times 10^{-2}$ m (D), $1,3 \times 10^{-2}$ m (E), $2,0 \times 10^{-2}$ m (F), $2,4 \times 10^{-2}$ m (G) e $3,4 \times 10^{-2}$ m (H).

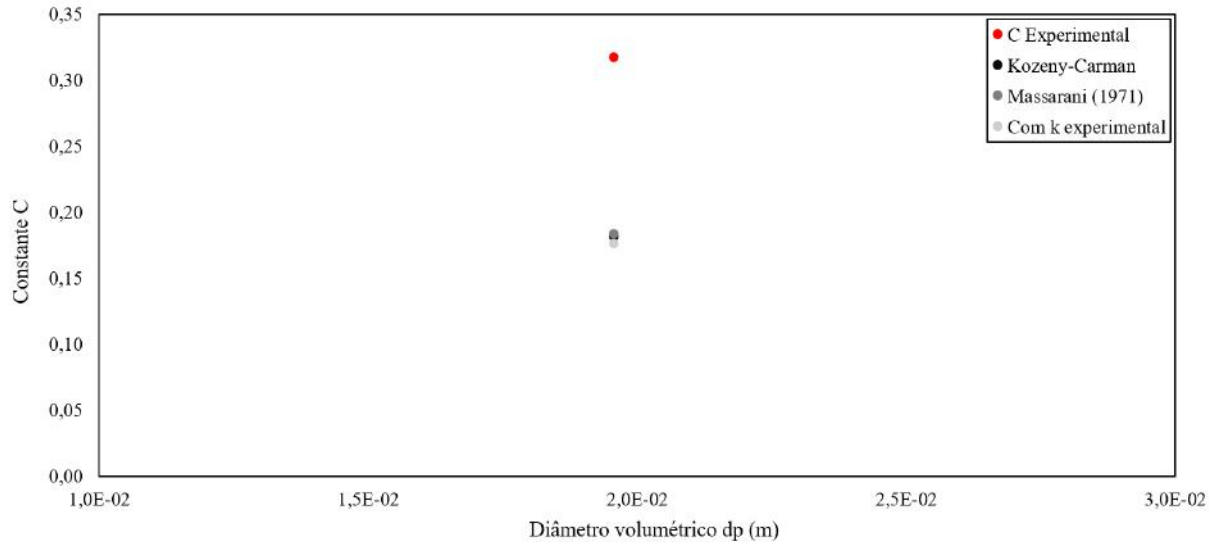


Figura 4.11 – Comparação de valores experimentais e teóricos para a constante C de leito recheado com selas de Berl.

Tabela 4.6: Comparação das estimativas teóricas e valor experimental da constante C para o leito de selas de Berl.

Exp.	C calculado a partir de k estimado por:				
	Kozeny-Carman		Massarani		
C	C	Desvio (%)	C	Desvio (%)	
I	0,3173	0,1815	42,8	0,1837	42,1

Nota: d_p igual a $2,0 \times 10^{-2}$ m (I).

Conforme Tabelas 4.4-6, os desvios das estimativas da constante C em relação aos valores experimentais, utilizando a permeabilidade prevista pelas diferentes correlações estudadas, são em média de 31,1 %. Pode-se dizer que o desvio não está ligado apenas ao erro da estimativa da permeabilidade visto que utilizando-se a permeabilidade experimental, os desvios na estimativa de C são similares (Figuras 4.9-11).

Os dados sugerem que os leitos recheados caracterizados não têm sua constante C bem estimada pelas correlações avaliadas, o que já era esperado, considerando que a correlação de Costa e Massarani (1982) foi proposta para leitos com $0,10 \leq \varepsilon \leq 0,75$ e $10^{-13} \leq k \leq 10^{-7}$ m². Apenas o leito de selas de Berl se enquadra nessa faixa de porosidade e as permeabilidades determinadas a partir dos dados experimentais (para os três tipos de recheio) ficam entre 9×10^{-7} e 2×10^{-5} m².

A Figura 4.9 indica que a constante C de leitos formados por anéis de Raschig é mais sensível ao aumento do tamanho das partículas (ou a outras grandezas que variam junto desse

parâmetro, como a porosidade ou a própria permeabilidade) do que a correlação sugere. O mesmo acontece para os leitos de anéis de Pall (Figura 4.10). Em geral, observa-se que a correlação propicia estimativas de C na faixa aproximada de 0,10 a 0,15 para leitos de anéis de Raschig e de Pall e por volta de 0,18 para o leito de selas de Berl. Os valores experimentais, no entanto, estão muito mais esparsos, com valores que vão desde cerca de 0,08 até 0,44.

A exemplo do que foi feito com a permeabilidade na Figura 4.8, traçou-se os diagramas da constante C experimentalmente determinada *versus* diversos parâmetros ligados à caracterização das partículas e dos leitos, a fim de avaliar a influência desses parâmetros. Esses diagramas podem ser vistos na Figura 4.12.

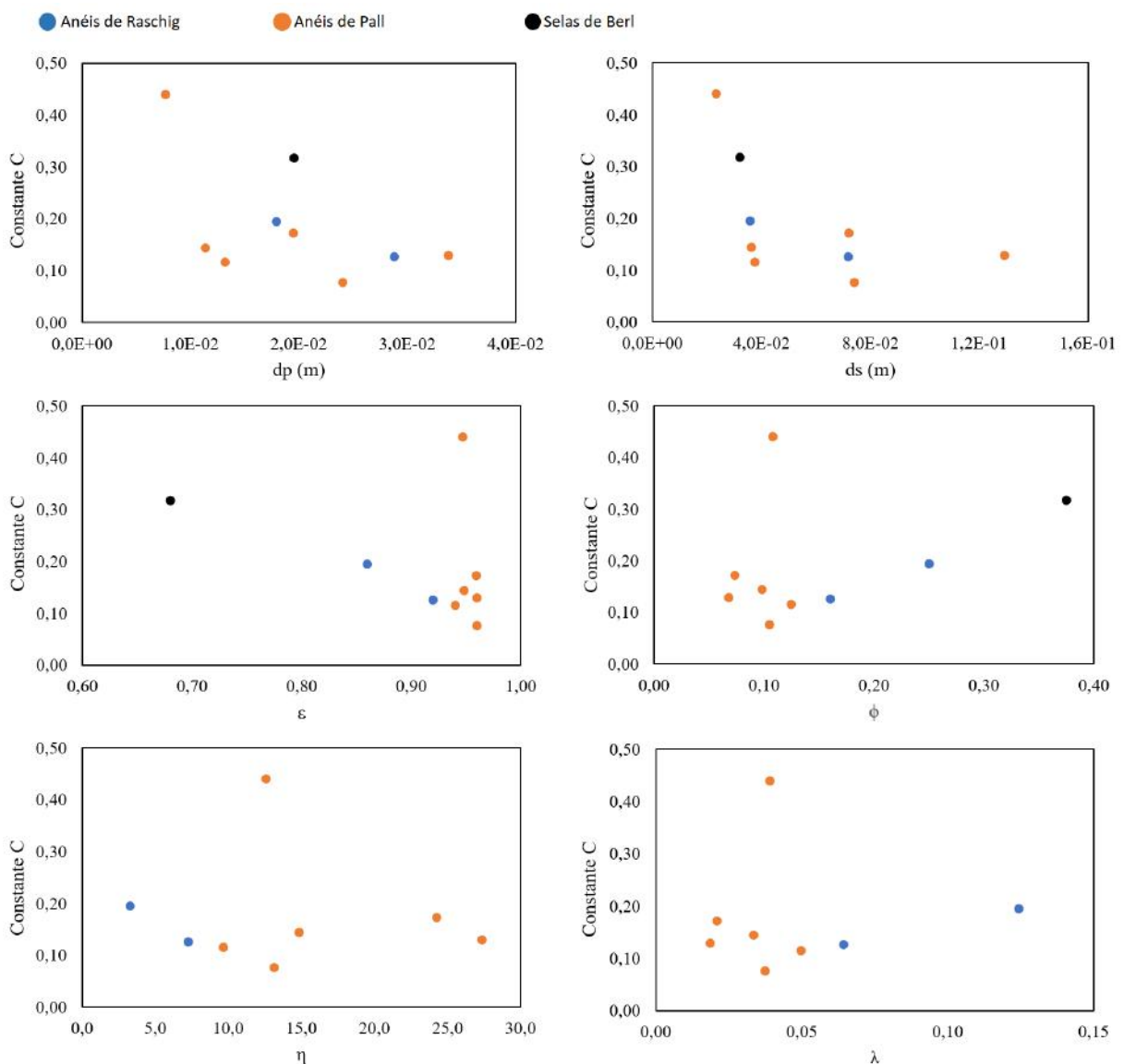


Figura 4.12 – Influência de parâmetros característicos das partículas e dos meios na constante C de leitos formados por anéis de Raschig, anéis de Pall e selas de Berl.

Conforme Figura 4.12, o leito formado pelas menores partículas (leito de anéis de Pall de 16 mm) representa uma descontinuidade no comportamento da constante C, principalmente quando estudada a partir da influência da porosidade, da esfericidade e do índice da esfera circunscrita. No entanto, os dados de C *versus* diâmetro volumétrico, por exemplo, são mais bem descritos por uma curva com esse dado do que na ausência dele. Considerando os oito leitos caracterizados formados com recheios cujas peças individuais possuem tamanho nominal superior a 16 mm, a constante C mostra-se fortemente dependente da porosidade do meio, conforme:

$$C = \frac{0,1077}{\varepsilon^{2,899}} \quad (4.7)$$

A Eq. 4.7 apresenta uma correlação de 0,84 em relação aos dados experimentais considerados, levando a um desvio médio de 18,5 %. Nota-se a semelhança da estrutura da Eq. 4.7 com a correlação de Ergun (1952): Eq. 2.17 onde $\Omega = 0,143$.

5 CONCLUSÕES E SUGESTÕES

5.1 CONCLUSÕES

As conclusões que se seguem baseiam-se apenas nos resultados deste trabalho e suas validades restringem-se às faixas de valores das variáveis e parâmetros nele estudadas.

Os dados experimentais obtidos a partir da literatura seguem o modelo de Forchheimer, tal que, nas velocidades superficiais de escoamento de fluidos através de meios porosos com recheios industriais aqui estudadas, a relação entre a queda de pressão através do leito e a velocidade superficial do fluido é quadrática, permitindo a determinação experimental da permeabilidade e da constante C desses leitos.

As permeabilidades dos leitos estimadas pelo modelo de Kozeny-Carman, pela correlação de Massarani (1971) e pelas correlações de La Vega e Cukierman (2019) foram comparadas aos valores determinados experimentalmente. Os altos valores de desvio médio indicam que as correlações não são adequadas para a previsão da permeabilidade dos leitos de recheios industriais estudados, possivelmente devido às suas altas porosidades e à baixa esfericidade das unidades que os constituem.

Com base nos dados experimentais, três novas correlações para a estimativa da permeabilidade de meios porosos formados com recheios industriais foram propostas:

$$k = 1,78 \times 10^{-4} d_p^2 \varepsilon^3 \eta^{1,6}$$

$$k = 7,70 \times 10^{-4} d_s^2 \varepsilon^{4,5} \phi^{0,8} \eta^{1,4} \lambda^{0,4}$$

$$k = 2,71 \times 10^{-3} d_p^2 \varepsilon^{1,65} \exp(0,085 \eta)$$

As correlações apresentaram desvio médio de 49,3, 52,1 e 50,5 %, respectivamente, e se aplicam a leitos recheados por anéis de Raschig e anéis de Pall com $7,68 \text{ mm} < d_p < 33,8 \text{ mm}$, $0,07 < \phi < 0,25$ e $0,86 < \varepsilon < 0,96$.

Quanto à constante C, a estimativa do seu valor pela correlação proposta por Costa e Massarani (1982) apresentou desvio médio de 31,1 %, dependente, é claro, da permeabilidade utilizada no seu cálculo. A correlação abaixo, entre a constante C e a porosidade do meio, foi proposta para leitos de anéis de Raschig, anéis de Pall e selas de Berl com $7,68 \text{ mm} < d_p < 33,8 \text{ mm}$, $0,07 < \phi < 0,38$ e $0,68 < \varepsilon < 0,96$:

$$C = 0,1077\varepsilon^{-2,899}$$

A correlação apresentou desvio médio de 18,5 % em relação aos dados experimentais.

5.2 SUGESTÕES PARA TRABALHOS POSTERIORES

A fim de consolidar as conclusões do presente trabalho, sugere-se avaliar a validade das correlações obtidas para um maior número de dados experimentais relacionados aos mesmos tipos de recheios aqui estudados.

Ainda, o estudo de queda de pressão em meios porosos recheados com outros tipos de partículas (selas Istalox, anéis de Lessing, anéis de Nutters etc.) seria capaz de mostrar se a permeabilidade pode, também nesses casos, ser relacionada aos fatores de forma aqui utilizados ou se a introdução de outros fatores de forma se faz necessária.

Por último, sugere-se a busca de dados experimentais de meios porosos formados com recheios industriais diversos, mas de igual porosidade, a fim de se verificar exclusivamente a correlação da permeabilidade com outras variáveis e se, de fato, nesses casos a constante C não se altera, mostrando-se exclusivamente dependente da porosidade do meio.

REFERÊNCIAS

- ALLEN, K. G.; von BACKSTRÖM, T. W.; KRÖGER, D. G. “Packed Bed Pressure Drop Dependence on Particle Shape, Size Distribution, Packing Arrangement and Roughness”. *Powder Technology*, v. 246, p. 590, 2013.
- ALMEIDA, J. M.; CARVALHO, Y.; ROMANO, P. N.; PEÇANHA, R. P. “Shape of re-entrant particles – characterization regarding particle-fluid interaction.” *Powder Technology*, v. 267, p. 346, 2014.
- ALMEIDA, J. M.; CARVALHO, Y.; ROMANO, P. N. “Caracterização da Forma de Partículas com Vistas à Interação Partícula-Fluido”. *Projeto de Final de Curso em Engenharia Química, Escola de Química da Universidade Federal do Rio de Janeiro*, 2013.
- BOEGGER INDUSTECH LIMITED. *CPR-01: Ceramic Pall ring has high separating efficiency*. Disponível em: www.demisterpads.com/demister-pad/ceramic-pall-ring.html. Acesso em: 10 abr. 2021.
- BOEGGER INDUSTECH LIMITED. *MNR-02: The reverse side of metal nutter ring*. Disponível em: www.randompacking.org/randompacking/metal-nutter-ring.html. Acesso em: 11 mai. 2021.
- BOEGGER INDUSTECH LIMITED. *PPR-02: Plastic Pall rings made of quality polypropylene, polyethylene, etc.* Disponível em: www.towerpacking.org/products/towerpacking/randompacking/plastic-pall-ring.html. Acesso em: 10 abr. 2021.
- BOUWMAN, A. M.; BOSMA, J. C.; VONK, P.; WESSWILINGH, J.; FRIJLINK, H. “Which shape factor(s) best describe granules?”. *Powder Technology*, v. 146, p. 66, 2004.
- BUCHWALD, T.; SCHMANDRA, G.; SCHÜTZENMEISTER, L.; FRASZCZAK, T.; MÜTZE T.; PEUKER, U. “Gaseous flow through coarse granular beds: The role of specific surface area”. *Powder Technology*, v. 366, p. 821, 2020.
- BUFFHAM, B. A. “The size and compactness of particles of arbitrary shape: application to catalyst effectiveness factors”. *Chemical Engineering Science*, v. 55, p. 5803, 2000.
- CELENE. *Berl Saddles*. Disponível em: <http://celene.com.br/en/selas/>. Acesso em: 08 jun. 2021.
- CHAGAS, M.; MACHADO, M. L. P.; SOUZA, J. B. C.; FRIGINI, E. F. de J. “Use of an Artificial Neural Network in determination of iron ore pellet bed permeability”. *REM, International Engineering Journal*, v. 70, 2, p. 187, 2017.
- COSTA, L. P.; MASSARANI, G. “Análise da Força Resistiva no Escoamento de Fluidos em Meios Porosos III”. *Anais do X ENEMP*, São Carlos/SP, v. I, p. 86, 1982.
- COUTO, H. B.; BARBOSA, F. L.; LIMA, O. A. “Permeabilidade de meios porosos minerais: efeito da esfericidade, granulometria e tipo de mineral”. *XXVII Encontro Nacional de Tratamento de Minérios e Metalurgia Extrativa*. Belém – PA, Brasil, 23-27 outubro (2017).
- CUI, Z.; HUANG, D.; DANG, C.; JIA, L. “Pressure drop in sintered wicks with spherical or irregular particles”. *Powder Technology*, v. 384, p. 494, 2021.
- DARCY, H. *Les fontaines publiques de la ville de Dijon : Détermination des lois d'écoulement de l'eau à travers le sable*. Paris: Victor Dalmont Editor, 1856.
- ENDO, Y.; CHEN, D-R.; PUI, D. “Theoretical consideration of permeation resistance of fluid

- through a particle packed layer”. *Powder Technology*, v. 124, p. 119, 2002.
- ERDIM, E.; AKGIRAY, O.; DEMIR, I. “A revisit of pressure drop-flow rate correlations for packed beds of spheres”. *Powder Technology*, v. 283, p. 488, 2015.
- ERGUN, S. “Fluid Flow Through Packed Columns”. *Chemical Engineering Progress*, v. 48, 2, p. 89, 1952.
- FARIAS, V. H. G. “Escoamento de Fluidos em Meios Porosos – Dependência da constante C do modelo de Forchheimer com a porosidade e a esfericidade para partículas reentrantes”. *Monografia em Engenharia Química, Escola de Química da Universidade Federal do Rio de Janeiro*, 2018.
- FOUMENY, E.; KULKARNI, A.; ROSHANI, S.; VATANI, A. “Elucidation on Pressure Drop in Packed-Bed Systems”. *Applied Thermal Engineering*, v. 16 (3), p. 195, 1996.
- FOUST, A. S.; WENZEL; CLUMP; MAUS; ANDERSEN. *Princípios das Operações Unitárias*. 2. ed. Rio de Janeiro: LTC, 1982.
- FOX, R. W.; McDONALD, A. T.; PRITCHARD, P. J. *Introdução à Mecânica dos Fluidos*. 8. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2014.
- HAIDER, A.; LEVENSPIEL, O. “Drag Coefficient and Terminal Velocity of Spherical and Nonspherical Particles”. *Powder Technology*, v. 58, p. 63, 1989.
- IORDANIDIS, A. A. “Mathematical Modeling of Catalytic Fixed Bed Reactors”. *Tese de Pós-Doutorado, University of Twente, Netherlands*, 2002.
- KAVIANY, M. *Principles of Heat Transfert in Porous Media*. 2. ed. Nova Iorque: Springer, 1995.
- KERIMOV, A.; MAVKO, G.; MUKERJI, T.; DVORKIN, J.; IBRAHIM, M. “The Influence of Convex Particles’ Irregular Shape and Varying Size on Porosity, Permeability, and Elastic Bulk Modulus of Granular Porous Media: Insights From Numerical Simulations”. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, v. 123, p. 10563, 2018.
- KOCH-GLITSCH. *Metal Random Packing Virtual Brochure*. Disponível em: <https://www.koch-glitsch.com/technical-documents/brochures/metal-random-packing>. Acesso em: 30 mai. 2021.
- KOLEV, N. *Packed Bed Columns – For absorption, desorption, rectification and direct heat transfer*. 1. ed. Amsterdam: Elsevier, 2006.
- LA VEGA, D. C.; CUKIERMAN, Y. S. “Estudo da permeabilidade de meios porosos formados com partículas reentrantes”. *Projeto de Final de Curso em Engenharia Química, Escola de Química da Universidade Federal do Rio de Janeiro*, 2019.
- LANDAUER, J.; KUHHN, M.; NASATO, D. S.; FOERST, P.; BRIESEN, H. “Particle shape matters – Using 3D printed particles to investigate fundamental particle and packing properties”. *Powder Technology*, v. 361, p. 711, 2020.
- LEVENSPIEL, O. *Engineering Flow and Heat Exchange*. 3. ed. Boston: Springer, 2014.
- LOFRANO, F. C. “Escoamento em Meios Porosos: um Modelo Analítico Não-Darciano Baseado no Princípio da Entropia Máxima”. *Tese de Doutorado, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, Departamento de Engenharia Hidráulica e Ambiental*, 2018.
- LUDWIG E. E. *Applied Process Design for Chemical & Petrochemical Plants*. 3. ed. Houston: Gulf Professional Publishing, 2001.

- MARLE, C. M. “Henry Darcy et les écoulements de fluides en milieu poreux”. *Oil & Gas Science and Technology – Revue d’IFP Energies nouvelles*, v. 61 (5), p. 599, 2006.
- MARTINS, A.; LARANJEIRA, P.; BRAGA, C.; MATA, T. “Modeling of Transport Phenomena in Porous Media Using Network Models”. *Progress in Porous Media Research*. Nova Science Publishers, 2009.
- MASSARANI, G. “Escoamento de Fluidos Não-Newtonianos Através de Meios Porosos: Modelo Capilar”. *Revista Latinoamericana de Ingenieria Química y Química Aplicada*, vol. 1, p 83. 1971.
- MASSARANI, G. *Fluidodinâmica em Sistemas Particulados – Apostila para o Programa de Engenharia Química - COPPE/UFRJ*. 2. ed. Rio de Janeiro: 2001.
- MASSARANI, G.; SANTANA, C. “Fluidização Homogênea: Caracterização Fluidodinâmica de Sistemas Particulados com Porosidade Elevada”. *Congresso Europeu de Fluidização*. Las Palmas de Gran Canária, p. 83 (1994).
- MAYERHOFER, M.; GOVAERTS, J.; PARMENTIER, N.; JEANMART, H.; HELSEN, L. “Experimental investigation of pressure drop in packed beds of irregular shaped wood particles”. *Powder Technology*, v. 205, p. 30, 2011.
- McCABE, W. L.; SMITH, J. C.; HARRIOT, P. *Unit Operations of Chemical Engineering*. 5. ed. Singapore: McGraw-Hill, 1993.
- MEDEIROS, L. Z. “Previsão da permeabilidade de meios porosos formados com partículas reentrantes: validação do modelo de Kozeny-Carman”. *Projeto de Final de Curso em Engenharia Química, Escola de Química da Universidade Federal do Rio de Janeiro*, 2017.
- MORA, C. F.; KWAN, A. K. H. “Sphericity, shape factor, and convexity measurement of coarse aggregate for concrete using digital imagem processing”. *Cement and Concrete Research*, v. 30, p. 351, 2000.
- MOREIRA, B. A.; AROUCA, F. de O.; DAMASCENO, J. J. R. “Avaliação da permeabilidade de meios porosos constituídos por carbonato de cálcio utilizado como agente obturante em processos de perfuração de poços de petróleo”. *Exacta*. v. 10, 3, p. 341, 2012.
- MTE CATALYST SUPORT B.V. *Metal Pall Ring Brochure*. Rev. 02. Netherlands, 2020.
- MUNTERS. *Pall Rings Technical Specification*. Disponível em: www.munters.com/en/munters/products/mass-transfer/pall-ring/. Acesso em: 10 abr. 2021.
- PEÇANHA, R. P. *Sistemas Particulados - Operações Unitárias Envolvendo Partículas e Fluidos*. Rio de Janeiro: Elsevier, 2014.
- PERRY, R. H. (Late Editor); GREEN, D. W. (Editor); MALONEY, J. O. (Associate Editor). *Perry's Chemical Engineers' Handbook*. 7. ed. Nova Iorque: McGraw-Hill, 1997.
- PINTO, T. S.; LIMA, O. A.; LEAL FILHO, L. S. “Sphericity of apatite particles determined by gas permeability through packed beds”. *Minerals & Metallurgical Processing*. v. 26, 2, p. 105, 2009.
- PINGXIANG NANXIANG CHEMICAL PACKING CO. LTD. *Ceramic Pall Ring*. Disponível em: www.nxpacking.com/ceramic-random-packing/ceramic-pall-ring.html. Acesso em: 10 abr. 2021.
- RICHARDSON, J. F.; HARKER, J. H. *Coulson & Richardson's Chemical Engineering Series – Volume 2: Particle Technology and Separation Processes*. 5. ed. Oxford: Elsevier Butterworth Heinemann, 2002.

RUSHD, S.; PARVEZ, M.; AL-FAIAD, M.; ISLAM, M. “Towards optimal machine learning model for terminal settling velocity”. *Powder Technology*, v. 387, p. 95, 2021.

SCHEIDEGGER A. E. *The Physics of Flow Through Porous Media*. 3. ed. Toronto: University of Toronto Press, 1974.

SEADER, J. D.; HENLEY, E. J.; ROPER, D. K. *Separation Process Principles - Chemical and Biochemical Operations*. 3. ed. Danvers: John Wiley & Sons, 2011.

SECKENDORFF, J.; SZESNI, N.; FISCHER, R.; HINRICHSEN, O. “Experimental characterization of random packed spheres, cylinder and rings, and their influence on pressure drop”. *Chemical Engineering Science*. v. 222, 2020.

SECKENDORFF, J.; SCHECK, P.; TONIGOLD, M.; FISCHER, R. “Numerical shape development study in view of random packed beds – The Yo-Yo shape”. *Chemical Engineering Journal*, v. 404, 2021.

SINNOTT, R. K. *Coulson & Richardson’s Chemical Engineering Series – Volume 6: Chemical Engineering Design*. 4. ed. Oxford: Elsevier Butterworth-Heinemann, 2005.

STANIFORTH, J. N.; REES, J. E. “Shape Classification of Re-entrant Particles I: The shape Factor, III”. *Powder Technology*, v. 28, p. 3, 1981.

THE PALL RING COMPANY. *The Pall Ring Company Virtual Brochure*. Disponível em: www.pallrings.co.uk/wp-content/uploads/2013/05/The-Pall-Ring-Company-Virtual-Brochure.pdf. Acesso em: 10 abr. 2021.

YIN, M-J; BEDDOW, J.K.; VETTER, A.F. “Effects of Particle Shape on Two-Phase in Pipes”. *Powder Technology*, v. 46, p. 53, 1986.

ZHAO, C.; CHENG, X.; PENG, Y.; LI, C. “Discrete element simulations of heart-shaped particle systems”. *Powder Technology*, v. 375, p. 369, 2020.

APÊNDICES

APÊNDICE A – CARACTERÍSTICAS DE LEITOS POROSOS FORMADOS POR RECHEIOS INDUSTRIAIS

As seguintes afirmações são válidas quanto aos dados expostos no apêndice A:

- quando os dados da fonte consultada estavam apresentados nas mesmas unidades aqui utilizadas, os valores foram mantidos ou arredondados para respeitar o número de casas decimais aqui utilizados;
- quando os dados da fonte consultada estavam em unidades distintas das aqui utilizadas, os fatores de conversão utilizados foram $1 \text{ in} = 25,4 \text{ mm}$, $1 \text{ ft} = 0,3048 \text{ m}$ e $1 \text{ lbm} \cong 0,4536 \text{ kg}$ e os resultados foram arredondados para respeitar o número de casas decimais aqui utilizados;
- as densidades dos leitos formados a partir de recheios metálicos consideram aço carbono como material;
- células em branco representam informações não fornecidas pela fonte consultada.

Tabela A. 1: Características de leitos formados por anéis de Raschig metálicos.

Tamanho nominal (mm)	Espessura de parede (mm)	Quantidade aproximada (m ⁻³)	Densidade do leito (kg m ⁻³)	Superfície de contato (m ² m ⁻³)	Porosidade (ε) %	Fator de empacotamento (F _e) (m ² m ⁻³)	Fonte
6	0,8	3.100.000	2130		72	2300	RICHARDSON e HARKER (2002)
6	0,8	3.107.700	2130	774	72		LUDWIG (2001)
9	0,8	953.000	1500		81	1280	RICHARDSON e HARKER (2002)
10	0,8	953.500	1506		81		LUDWIG (2001)
12	0,8	402.000	1200	417	85	980	RICHARDSON e HARKER (2002)
13	0,8	402.600	1201	404	85		LUDWIG (2001)
13	1,6		2114	387	73	1345	FOUST <i>et al.</i> (1982)
13	1,6	395.500	2114	387	73		LUDWIG (2001)
13			1201	417		980	SINNOTT (2005)
15				378	92	558	SEADER <i>et al.</i> (2011)
16		204.800			86		LUDWIG (2001)
19	0,8	117.000	830	276	89	605	RICHARDSON e HARKER (2002)
19	0,8	118.000	833	268	89		LUDWIG (2001)
19	1,6	110.000	1500		80	750	RICHARDSON e HARKER (2002)
19	1,6		1500	245	80	984	PERRY <i>et al.</i> (1997)
19	1,6	110.900	1506	232	90		LUDWIG (2001)
25	0,8	50.000	620	207	92	375	RICHARDSON e HARKER (2002)

25	0,8	50.500	625	204	92		LUDWIG (2001)
25	1,6	46.200	1130		86	450	RICHARDSON e HARKER (2002)
25	1,6		1137	187	85	449	FOUST <i>et al.</i> (1982)
25	1,6		1140	185	86	472	PERRY <i>et al.</i> (1997)
25	1,6	46.300	1137	181	86		LUDWIG (2001)
25			625	207		375	SINNOTT (2005)
31	1,6	25.600	990		87	360	RICHARDSON e HARKER (2002)
32	1,6	25.800	993	162	87		LUDWIG (2001)
38	1,6	14.100	780		90	270	RICHARDSON e HARKER (2002)
38			785	141		270	SINNOTT (2005)
38	1,6	13.200	785	129	90		LUDWIG (2001)
50	1,6	5.930	590	102	92	190	RICHARDSON e HARKER (2002)
50	1,6		590	95	92	187	PERRY <i>et al.</i> (1997)
51	1,6		593	103	92	187	FOUST <i>et al.</i> (1982)
51			593	102		190	SINNOTT (2005)
51	1,6	5.830	593	96	92		LUDWIG (2001)
75	1,6		400	66	95	105	PERRY <i>et al.</i> (1997)
76	1,6	1.800	400	72	95	105	RICHARDSON e HARKER (2002)
76			400	72		105	SINNOTT (2005)
76	1,6	1.940	400	65	95		LUDWIG (2001)

Tabela A. 2: Características de leitos formados por anéis de Pall metálicos.

Tamanho nominal (mm)	Espessura de parede (mm)	Quantidade aproximada (m ⁻³)	Densidade do leito (kg m ⁻³)	Superfície de contato (m ² m ⁻³)	Porosidade (ε) %	Fator de empacotamento (F _e) (m ² m ⁻³)	Fonte
15	0,5	210.000	590	341	93	230	RICHARDSON e HARKER (2002)
15				368	93		SEADER <i>et al.</i> (2011)
16	0,3	214.000	385	344	95		MTE (2020)
16	0,4				92	256	PERRY <i>et al.</i> (1997)
16	0,5	204.800	593	341	93		LUDWIG (2001)
16			593	341		230	SINNOTT (2005)
16			535		93		Koch-Glitsch (2020)
16		210.000		316	93	315	The Pall Ring Company (2006)
25	0,4	51.000	322	207	95		MTE (2020)
25	0,5		480	205	94	183	PERRY <i>et al.</i> (1997)
25	0,6	49.000	480	210	94	160	RICHARDSON e HARKER (2002)
25	0,6	49.400	481	207	94		LUDWIG (2001)
25			481	207	94	184	McCABE <i>et al.</i> (1993)
25			529	218	93	157	FOUST <i>et al.</i> (1982)
25			481	210		160	SINNOTT (2005)
25				224	95		SEADER <i>et al.</i> (2011)
25			325		96		Koch-Glitsch (2020)

25		49.500		209	94	176	The Pall Ring Company (2006)
31	0,8	13.000	380	128	95	92	RICHARDSON e HARKER (2002)
32			385	128		92	SINNOTT (2005)
35				139	96		SEADER <i>et al.</i> (2011)
38	0,4	14.300	200	130	96		MTE (2020)
38	0,6		415	130	95	131	PERRY <i>et al.</i> (1997)
38	0,8	13.200	384	128	95		LUDWIG (2001)
38			384	128	95	131	McCABE <i>et al.</i> (1993)
38			208		97		Koch-Glitsch (2020)
38		13.450		122	95	107	The Pall Ring Company (2006)
50	0,5	6.500	196	99	96		MTE (2020)
50	0,8		385	115	96	89	PERRY <i>et al.</i> (1997)
50	0,9	6.000	350	102	96	66	RICHARDSON e HARKER (2002)
50				113	95		SEADER <i>et al.</i> (2011)
50			198		98		Koch-Glitsch (2020)
50		6.000		100	96	107	The Pall Ring Company (2006)
51	0,9	5.830	352	102	96		LUDWIG (2001)
51			352	102	96	89	McCABE <i>et al.</i> (1993)
51			440	120	94	60	FOUST <i>et al.</i> (1982)
51			353	102		66	SINNOTT (2005)
76	1,2	1.160	270	65	97	52	RICHARDSON e HARKER (2002)

76			273	66		52	SINNOTT (2005)
89	1,2	1.160	272	66	97		LUDWIG (2001)
90	0,8	1.100	165	59	96		MTE (2020)
90			270	92	97	59	PERRY <i>et al.</i> (1997)
90			135		98		Koch-Glitsch (2020)
90		1.000		54	97	50	The Pall Ring Company (2006)

Tabela A. 3: Características de leitos formados por selas de Berl cerâmicas.

Tamanho nominal (mm)	Espessura de parede (mm)	Quantidade aproximada (m ⁻³)	Densidade do leito (kg m ⁻³)	Superfície de contato (m ² m ⁻³)	Porosidade (ϵ) %	Fator de empacotamento (F_e) (m ² m ⁻³)	Fonte
6			900	900	60		PERRY <i>et al.</i> (1997)
6		3.990.560	897	899	60-67		LUDWIG (2001)
6			897	899	60	2953	FOUST <i>et al.</i> (1982)
13					65	787	SEADER <i>et al.</i> (2011)
13			865	465	62	790	PERRY <i>et al.</i> (1997)
13		572.100	865	466	63		LUDWIG (2001)
13			865	466	62	787	McCABE <i>et al.</i> (1993)
13			865	466	63	787	FOUST <i>et al.</i> (1982)
19		176.570	769	269	66		LUDWIG (2001)
25					68	361	SEADER <i>et al.</i> (2011)

25		720	250	68	360	PERRY <i>et al.</i> (1997)
25	77.690	721	249	69-70		LUDWIG (2001)
25		721	249	68	361	McCABE <i>et al.</i> (1993)
25		721	249	69	361	FOUST <i>et al.</i> (1982)
38		640	150	71	215	PERRY <i>et al.</i> (1997)
38	20.480	641	144	73-75		LUDWIG (2001)
38		641	151	71	213	McCABE <i>et al.</i> (1993)
50		625	105	72	150	PERRY <i>et al.</i> (1997)
51	8.830	609	105	72-75		LUDWIG (2001)
51		641	105	72	148	FOUST <i>et al.</i> (1982)

APÊNDICE B – RESULTADOS EXPERIMENTAIS E ESTIMATIVAS DE PARÂMETROS

Tabela B. 1: Caracterização fluidodinâmica dos leitos formados por recheios industriais.

Recheio	Referência	Tamanho nominal (mm)	Permeabilidade k (m ²)	Constante C	R ²
Anéis de Raschig	PERRY <i>et al.</i> (1997)	25	8,96 x10 ⁻⁷	0,1994	0,998
	PERRY <i>et al.</i> (1997)	50	1,63 x10 ⁻⁶	0,1259	0,999
	The Pall Ring Company	16	6,18 x10 ⁻⁶	0,5232	1,000
	MTE	16	4,45 x10 ⁻⁶	0,4339	1,000
	Koch-Glitsch	16	3,15 x10 ⁻⁶	0,3740	1,000
	PERRY <i>et al.</i> (1997)	25	2,29 x10 ⁻⁶	0,1153	0,999
	The Pall Ring Company	25	2,68 x10 ⁻⁶	0,1555	1,000
Anéis de Pall	MTE	25	2,27 x10 ⁻⁶	0,1440	1,000
	PERRY <i>et al.</i> (1997)	50	5,99 x10 ⁻⁶	0,0763	0,999
	The Pall Ring Company	50	5,91 x10 ⁻⁶	0,0945	1,000
	Koch-Glitsch	50	2,22 x10 ⁻⁵	0,1851	1,000
	MTE	50	1,84 x10 ⁻⁵	0,1718	1,000
	The Pall Ring Company	90	1,51 x10 ⁻⁵	0,0899	1,000
	MTE	90	2,98 x10 ⁻⁵	0,1289	1,000
Selas de Berl	PERRY <i>et al.</i> (1997)	25	1,88.x10 ⁻⁶	0,3173	1,000

Tabela B. 2: Caracterização de anéis de Raschig.

Tamanho nominal (mm)	Espessura de parede (mm)	d _p (mm)	d _s (mm)	φ	η	λ
25,4	1,59	17,9	35,9	0,250	3,27	0,124
50,8	1,59	28,8	71,8	0,161	7,26	0,064

Tabela B. 3: Caracterização de anéis de Pall.

Tamanho nominal (mm)	Espessura de parede (mm)	d_p (mm)	d_s (mm)	ϕ	η	λ
16,00	0,30	7,68	23,4	0,108	12,6	0,04
25,00	0,40	11,4	36,4	0,098	14,9	0,03
25,40	0,61	13,2	37,4	0,124	9,67	0,05
50,00	0,50	19,5	72,0	0,073	24,3	0,02
50,80	0,91	24,0	74,1	0,105	13,1	0,04
90,00	0,80	33,8	129,3	0,068	27,4	0,02

Tabela B. 4: Caracterização de selas de Berl.

Tamanho nominal (mm)	d_p (mm)	d_s (mm)	ϕ
25,40	19,6	32,0	0,375

Tabela B. 5: Permeabilidade de leitos porosos formados por anéis de Raschig metálicos, estimada por diferentes correlações da literatura.

Tamanho nominal (mm)	Espessura (mm)	ϵ (%)	Kozeny-Carman (m^2)	Massarani (m^2)	La Vega e Cukierman I (m^2)	La Vega e Cukierman II (m^2)
25,40	1,59	86,0	$1,85 \times 10^{-6}$	$3,12 \times 10^{-7}$	$1,45 \times 10^{-6}$	$2,30 \times 10^{-6}$
50,80	1,59	92,0	$6,94 \times 10^{-6}$	$8,04 \times 10^{-7}$	$2,89 \times 10^{-6}$	$8,94 \times 10^{-6}$

Tabela B. 6: Permeabilidade de leitos porosos formados por anéis de Pall metálicos, estimada por diferentes correlações da literatura.

Tamanho nominal (mm)	Espessura (mm)	ϵ (%)	Kozeny-Carman (m^2)	Massarani (m^2)	La Vega e Cukierman I (m^2)	La Vega e Cukierman II (m^2)
16,00	0,30	94,7	$5,37 \times 10^{-7}$	$5,72 \times 10^{-8}$	$1,40 \times 10^{-7}$	$7,61 \times 10^{-7}$

25,00	0,40	94,8	$1,01 \times 10^{-6}$	$1,26 \times 10^{-7}$	$2,76 \times 10^{-7}$	$1,54 \times 10^{-6}$
25,40	0,61	94,0	$1,63 \times 10^{-6}$	$1,69 \times 10^{-7}$	$4,83 \times 10^{-7}$	$2,20 \times 10^{-6}$
50,00	0,50	95,9	$2,75 \times 10^{-6}$	$3,70 \times 10^{-7}$	$5,87 \times 10^{-7}$	$4,64 \times 10^{-6}$
50,80	0,91	96,0	$9,17 \times 10^{-6}$	$5,61 \times 10^{-7}$	$1,41 \times 10^{-6}$	$1,13 \times 10^{-5}$
90,00	0,80	96,0	$7,47 \times 10^{-6}$	$1,11 \times 10^{-6}$	$1,61 \times 10^{-6}$	$1,32 \times 10^{-5}$

Tabela B. 7: Permeabilidade de leito poroso formado por selas de Berl cerâmicas, estimada por diferentes correlações da literatura.

Tamanho nominal (mm)	ϵ (%)	Kozeny-Carman (m^2)	Massarani (m^2)
25,40	68,0	$5,46 \times 10^{-7}$	$3,72 \times 10^{-7}$

Tabela B. 8: Estimativa da constante C de leitos porosos formados por anéis de Raschig metálicos, calculada a partir de k estimado por diferentes correlações da literatura.

Tamanho nominal (mm)	Espessura (mm)	ϵ (%)	C calculado a partir de k estimado por:			
			Kozeny-Carman (m^2)	Massarani (m^2)	La Vega e Cukierman I (m^2)	La Vega e Cukierman II (m^2)
25,40	1,59	86,0	0,1237	0,1299	0,1244	0,1231
50,80	1,59	92,0	0,1088	0,1141	0,1107	0,1084

Tabela B. 9: Estimativa da constante C de leitos porosos formados por anéis de Pall metálicos, calculada a partir de k estimado por diferentes correlações da literatura.

Tamanho nominal (mm)	Espessura (mm)	ϵ (%)	C calculado a partir de k estimado por:			
			Kozeny-Carman (m^2)	Massarani (m^2)	La Vega e Cukierman I (m^2)	La Vega e Cukierman II (m^2)
16,00	0,30	94,7	0,1105	0,1206	0,1157	0,1094
25,00	0,40	96,0	0,1084	0,1161	0,1127	0,1073
25,40	0,61	94,7	0,1085	0,1162	0,1121	0,1078
50,00	0,50	94,7	0,1041	0,1097	0,1081	0,1030

50,80	0,91	95,9	0,1016	0,1081	0,1055	0,1012
90,00	0,80	96,0	0,1020	0,1061	0,1052	0,1010

Tabela B. 10: Estimativa da constante C de leito poroso formado por selas de Berl cerâmicas, calculada a partir de k estimado por diferentes correlações da literatura.

Tamanho nominal (mm)	ε (%)	C calculado a partir de k estimado por:	
		Kozeny-Carman (m ²)	Massarani (m ²)
25,40	0,68	0,1815	0,1837

ANEXOS

ANEXO A – DIAGRAMAS DE QUEDA DE PRESSÃO EM LEITOS RECHEADOS

Os diagramas do anexo A foram encontrados na literatura e nos websites das empresas fabricantes de recheios ou fornecidos diretamente pelos fabricantes dos recheios, via e-mail.

A.1 DIAGRAMAS DO LIVRO PERRY'S CHEMICAL ENGINEERS' HANDBOOK, 1997

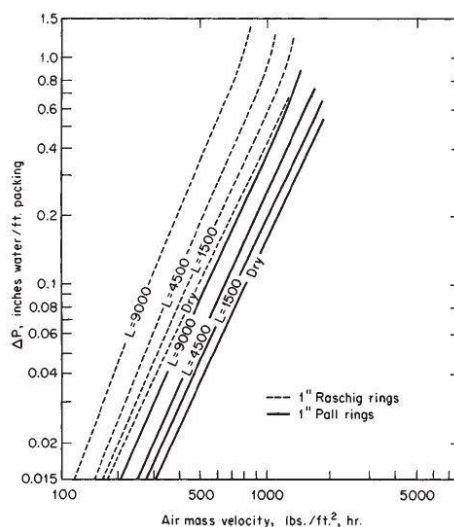


Figura A. 1 – Queda de pressão em leitos formados por partículas metálicas do tipo anéis de Raschig de 1 in e anéis de Pall de 1 in.

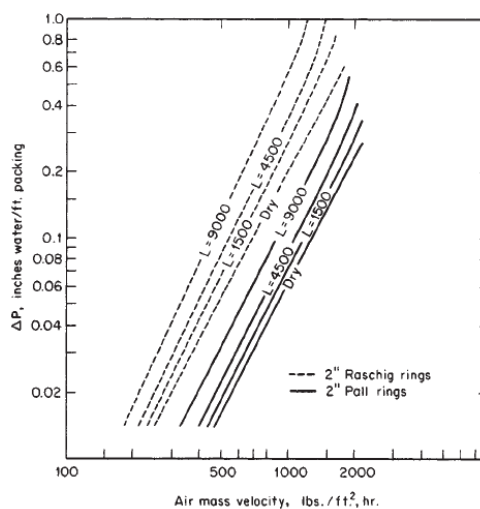


Figura A. 2 – Queda de pressão em leitos formados por partículas metálicas do tipo anéis de Raschig de 2 in e anéis de Pall de 2 in e espessura de 0,036 in.

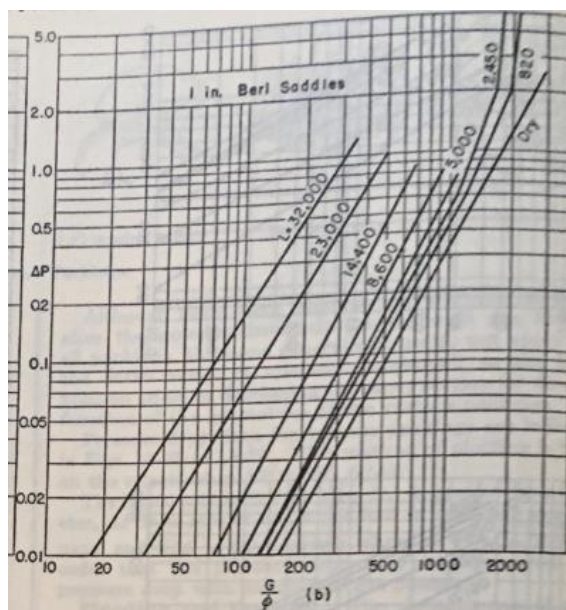


Figura A. 3 – Queda de pressão em leitos formados por partículas cerâmicas do tipo selas de Berl de 1 in.

A.2 DIAGRAMAS FORNECIDOS PELA *THE PALL RING COMPANY*

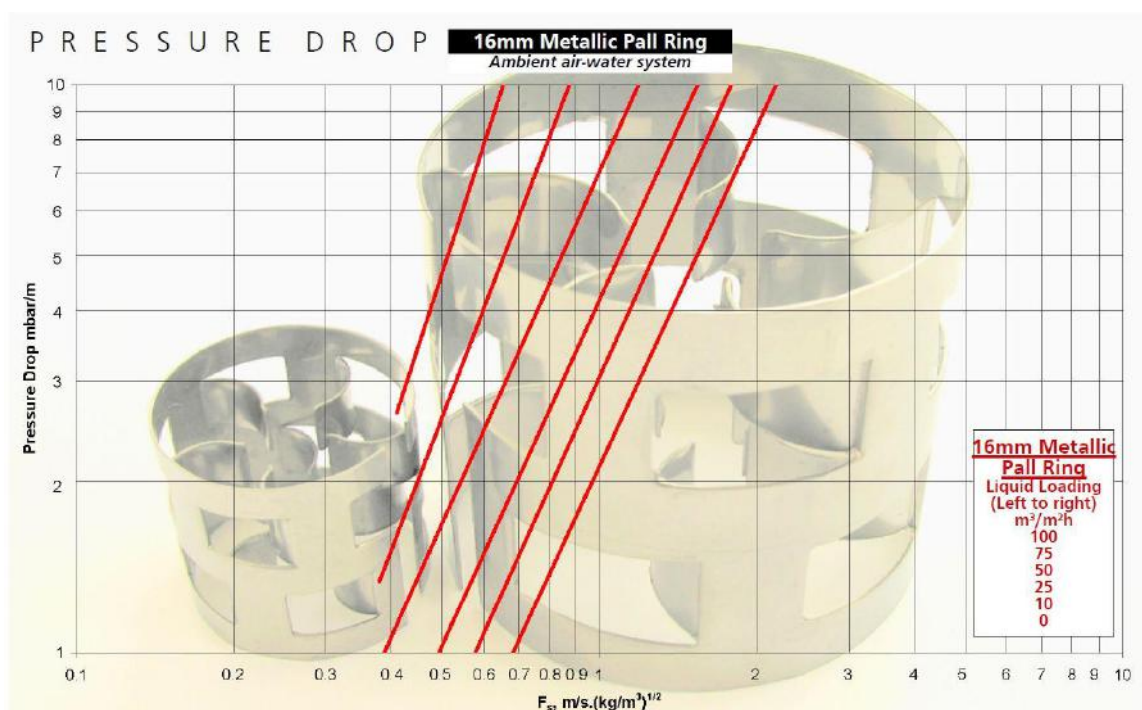


Figura A. 4 – Queda de pressão em leitos formados por partículas metálicas do tipo anéis de Pall de 16 mm da empresa The Pall Ring Company.

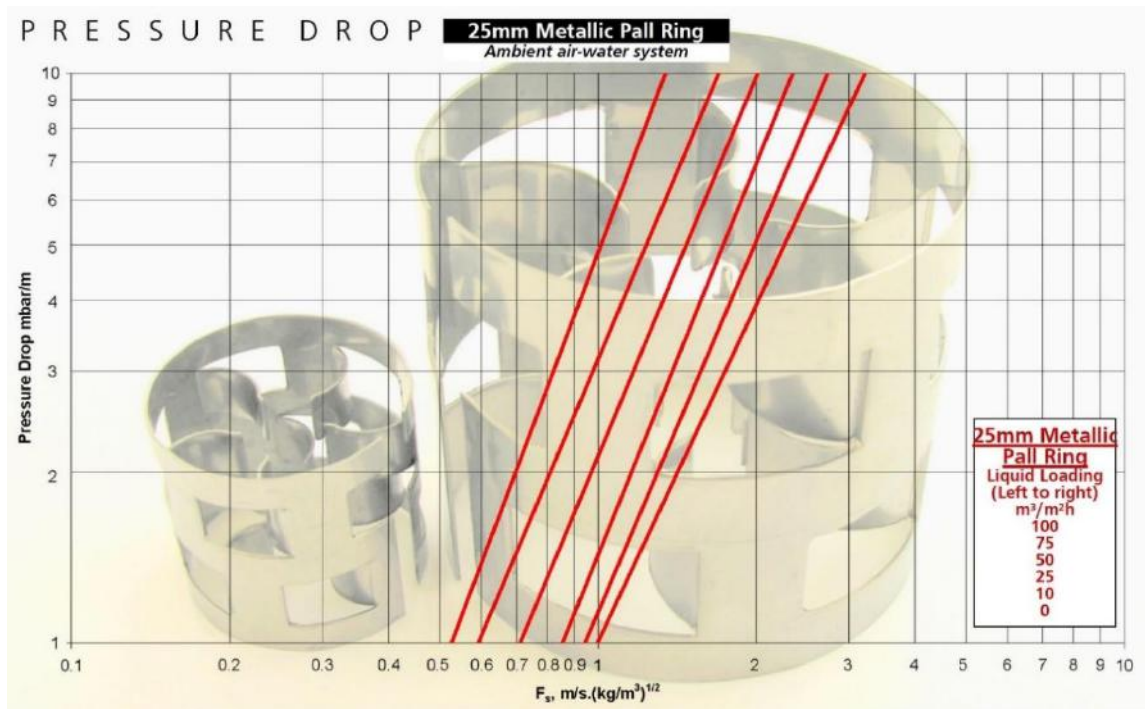


Figura A. 5 – Queda de pressão em leitos formados por partículas metálicas do tipo anéis de Pall de 25 mm da empresa The Pall Ring Company.

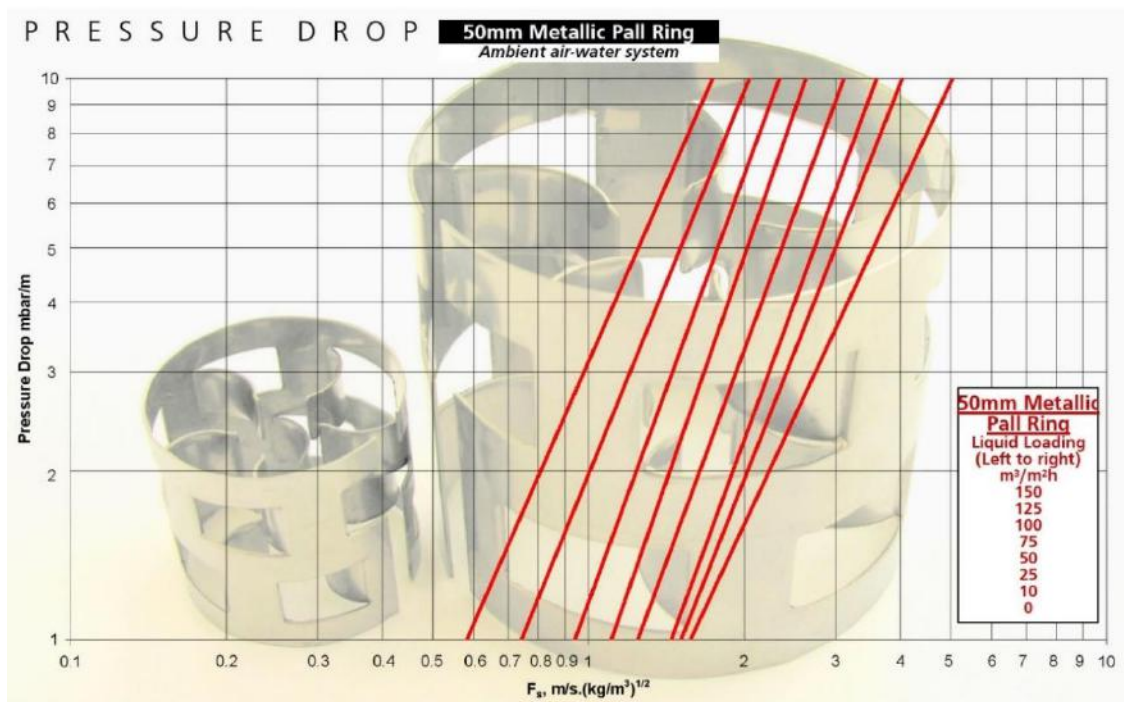


Figura A. 6 – Queda de pressão em leitos formados por partículas metálicas do tipo anéis de Pall de 50 mm da empresa The Pall Ring Company.

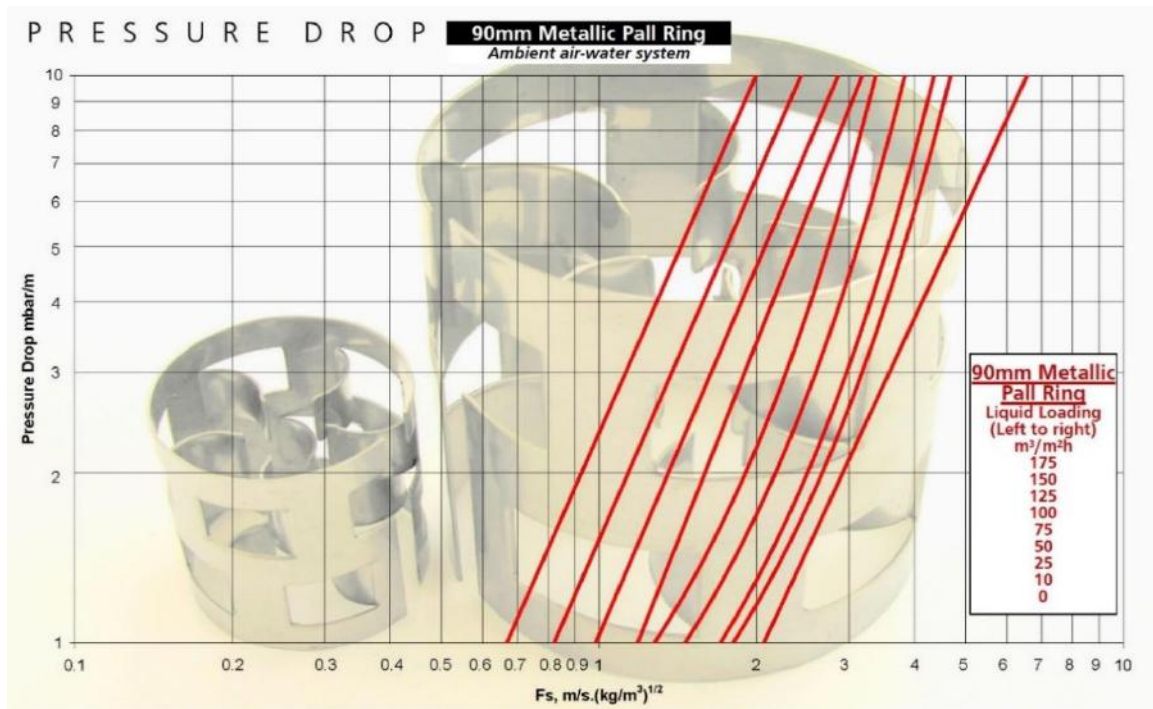


Figura A. 7 – Queda de pressão em leitos formados por partículas metálicas do tipo anéis de Pall de 90 mm da empresa The Pall Ring Company.

A.3 DIAGRAMAS FORNECIDOS PELA EMPRESA KOCH-GLITSCH

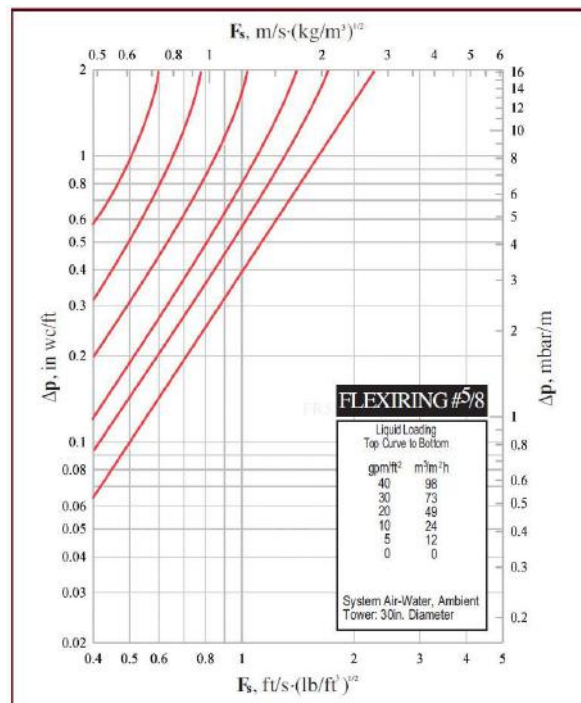


Figura A. 8 – Queda de pressão em leitos formados por partículas metálicas do tipo anéis de Pall de 5/8 in da empresa Koch-Glitsch.

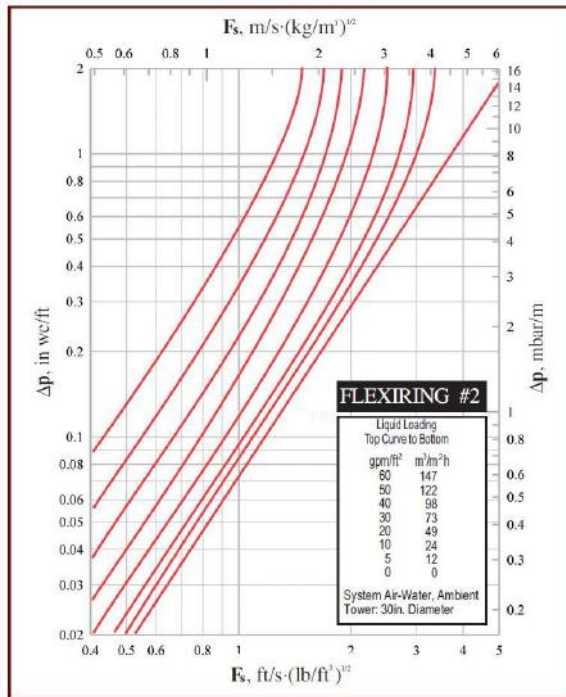


Figura A. 9 – Queda de pressão em leitos formados por partículas metálicas do tipo anéis de Pall de 2 in da empresa Koch-Glitsch.

A.4 DIAGRAMAS FORNECIDOS PELA EMPRESA MTE

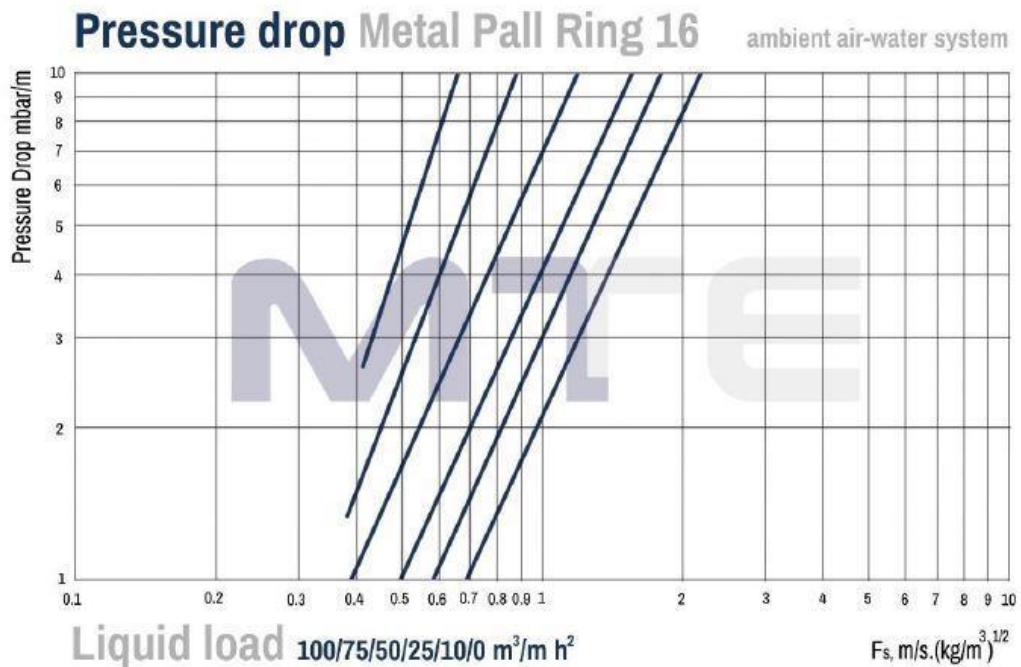


Figura A. 10 – Queda de pressão em leitos formados por partículas metálicas do tipo anéis de Pall de 16 mm da empresa MTE.



Figura A. 11 – Queda de pressão em leitos formados por partículas metálicas do tipo anéis de Pall de 25 mm da empresa MTE.

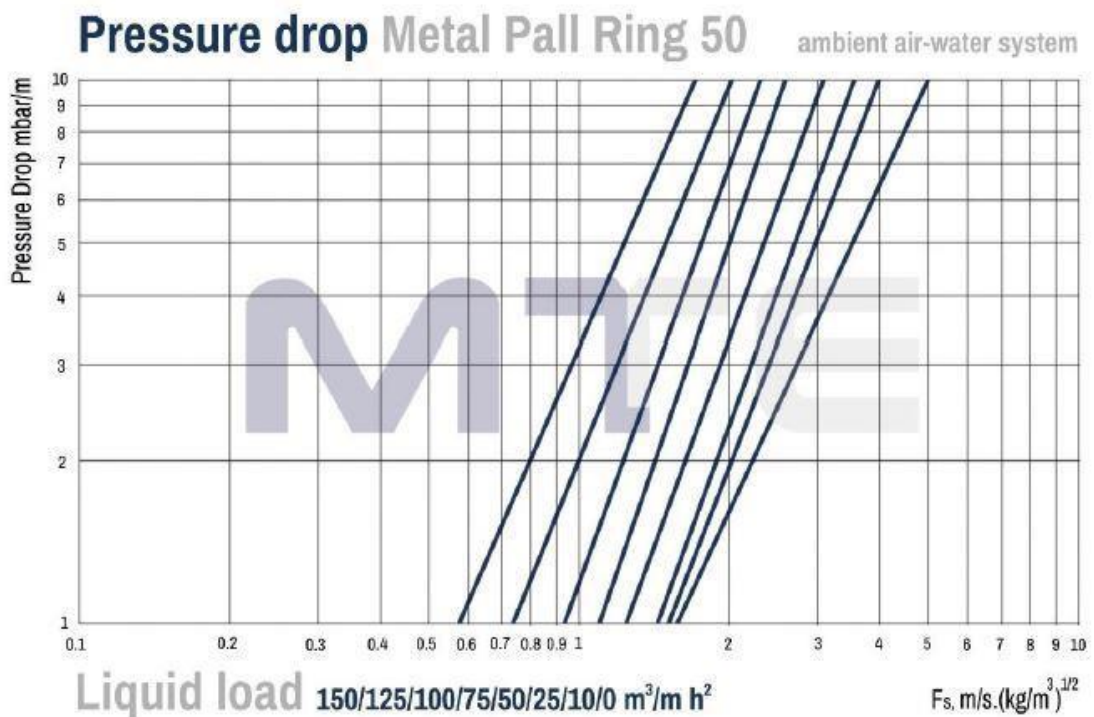


Figura A. 12 – Queda de pressão em leitos formados por partículas metálicas do tipo anéis de Pall de 50 mm da empresa MTE.

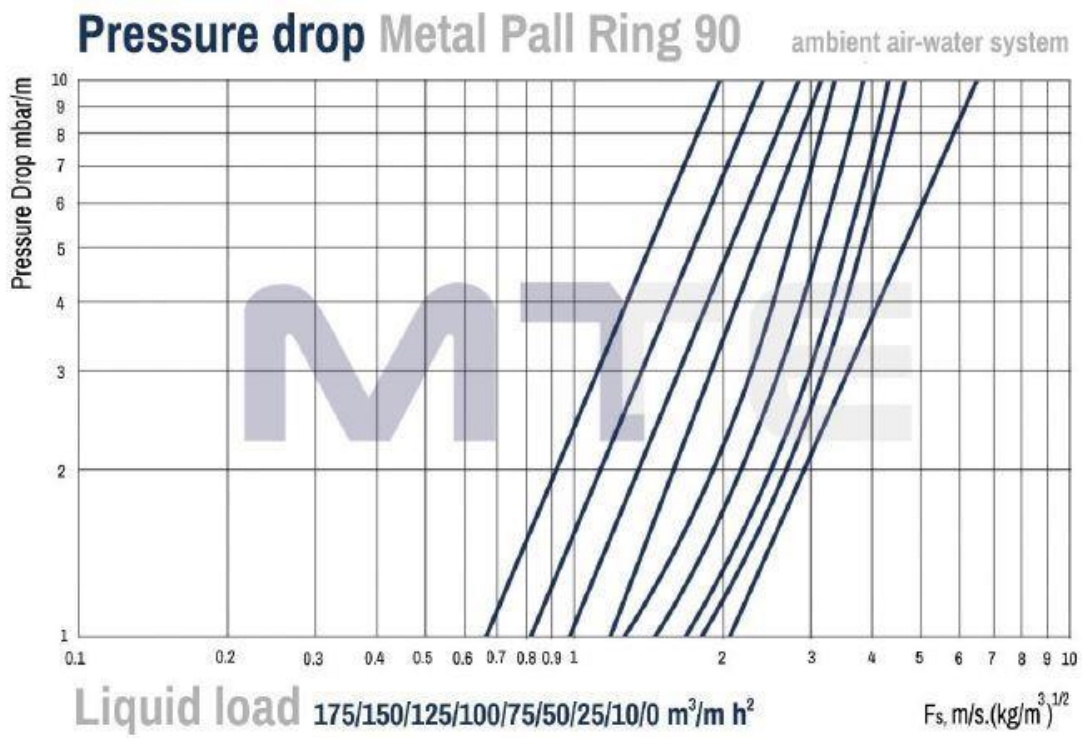


Figura A. 13 – Queda de pressão em leitos formados por partículas metálicas do tipo anéis de Pall de 90 mm da empresa MTE.