

UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA
FACULDADE DE TECNOLOGIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL E
AMBIENTAL

FLUXO EM MEIO POROSO NA ESCALA DE GRÃOS
COM MORFOLOGIA REAL UTILIZANDO MÉTODOS
NUMÉRICOS HÍBRIDOS

FELIPE MARÇAL BARBOSA DE MELO GÓIS

ORIENTADOR: MÁRCIO MUNIZ DE FARIAS
CO-ORIENTADOR: MANOEL P. CORDÃO NETO

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO EM GEOTECNIA
BRASÍLIA/DF: DEZEMBRO/2023

**UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA
FACULDADE DE TECNOLOGIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL E AMBIENTAL**

**FLUXO EM MEIO POROSO NA ESCALA DE GRÃOS COM
MORFOLOGIA REAL UTILIZANDO MÉTODOS
NUMÉRICOS HÍBRIDOS**

FELIPE MARÇAL BARBOSA DE MELO GÓIS

**DISSERTAÇÃO DE MESTRADO SUBMETIDA AO DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL E
AMBIENTAL DA UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA COMO PARTE DOS REQUISITOS NECESSÁRIOS
PARA A OBTENÇÃO DO GRAU DE MESTRE.**

APROVADA POR:

**MÁRCIO MUNIZ DE FARIAS, PhD (UnB)
(ORIENTADOR)**

**MANOEL PORFÍRIO CORDÃO NETO, DSc (UnB)
(CO-ORIENTADOR)**

**ANDRÉ PACHECO DE ASSIS, PhD (UnB)
(EXAMINADOR INTERNO)**

**MAURÍCIO MARTINES SALES, DSc (UFG)
(EXAMINADOR EXTERNO)**

DATA: BRASÍLIA/DF, 15 de DEZEMBRO de 2023.

FICHA CATALOGRÁFICA

GÓIS, FELIPE MARÇAL BARBOSA DE MELO

Fluxo em Meio Poroso na Escala de Grãos com Morfologia Real Utilizando Métodos Numéricos híbridos

[Distrito Federal] 2023.

xvii, 112 p., 210x297 mm (ENC/FT/UnB, Mestre, Geotecnia, 2023)

Dissertação de Mestrado - Universidade de Brasília. Faculdade de Tecnologia.

Departamento de Engenharia Civil e Ambiental.

1. Fluxo em meios porosos
2. Métodos numéricos
3. *Computational Fluid Dynamics*
4. Empacotamentos virtuais
5. Partículas reais

I. ENC/FT/UnB

II. Título (série)

REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA

GÓIS, F. M. B. M. (2023). Fluxo em Meio Poroso na Escala de Grãos com Morfologia Real Utilizando Métodos Numéricos Híbridos. Publicação G.DM-400/2023, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 112 p.

CESSÃO DE DIREITOS

NOME DO AUTOR: Felipe Marçal Barbosa de Melo Góis

TÍTULO DA DISSERTAÇÃO DE MESTRADO: Fluxo em Meio Poroso na Escala de Grãos com Morfologia Real Utilizando Métodos Numéricos Híbridos

GRAU / ANO: Mestre / 2023

É concedida à Universidade de Brasília a permissão para reproduzir cópias desta dissertação de mestrado e para emprestar ou vender tais cópias somente para propósitos acadêmicos e científicos. O autor reserva outros direitos de publicação e nenhuma parte desta dissertação de mestrado pode ser reproduzida sem a autorização por escrito do autor.

Felipe Marçal Barbosa de Melo Góis

SQNW 311, bloco B, apto 118

70687-310 - Brasília/DF - Brasil

AGRADECIMENTOS

Primeiramente, agradeço aos orientadores Márcio e Manoel, que foram fundamentais para a elaboração desse trabalho. Sempre com muita disponibilidade e conhecimento. Espero que possamos dividir novos projetos no futuro.

Agradeço também aos colegas cubanos da Universidade Central Marta Abreu de Las Villas, coordenados pelo prof. Carlos Recarey. Eles foram responsáveis por todas as bases iniciais para as análises desenvolvidas no trabalho. Agradeço em especial ao caro Manuel Alejandro, que me aguentou por meses e meses com demandas diversas. Sempre muito prestativo, mesmo do outro lado do oceano.

Agradeço ao programa P&D de FURNAS, que fomentaram e viabilizaram as ferramentas necessárias para os desafios técnicos presentes aqui. Também cito aqui os colegas do INFRALAB, que auxiliaram em diversos momentos da pesquisa.

Agradeço a todos da Prime Projetos, onde estou há doze anos, aprendendo a cada dia um pouco mais sobre a engenharia e sobre a vida.

Agradeço aos meus grandes amigos espalhados pelo mundo, que são numerosos e não cabem nessa pequena citação. Vale um destaque especial para Monica e Mário, que acompanharam de perto toda a jornada dos últimos oito anos e são minha outra casa nessa cidade. É para eles que vão as primeiras mensagens buscando encontros que tão bem fazem à alma.

Agradeço à minha segunda família, Luciana, Flávio e Lucca, que sempre trazem com eles acolhimento e leveza. Obrigado por todos os momentos compartilhados.

Meus irmãos queridos, Júlia e Mateus, devem também estar nessa lista. Eles me dão todos os dias a oportunidade de observar de perto a construção de personalidades maravilhosas, com muito amor compartilhado. Queria eu nessa idade ser tão legal quanto eles.

A viabilidade desse projeto nunca seria possível sem a minha companheira de vida, Izabella. Sempre com grande capacidade de compreensão e incentivo a tudo que almejo. Tudo é com ela. Tudo. Agradeço imensamente pelos anos passados e pelos que virão.

Finalmente, agradeço aos meus pais, Nuno e Roberta, que são a base de tudo que sou. Eles são meu apoio incondicional, batalhando de todas as formas possíveis (e impossíveis) para que eu estivesse aqui. Obrigado, obrigado, obrigado.

Este projeto é financiado pela empresa FURNAS SA, na carteira de projetos de P&D-
SEDIMENTOS TC 8000011107 ANEEL PD-0394-1705/2017, no contexto da Lei Nº 9.991.
A execução do projeto é liderada pela Universidade Federal de Goiás em parceria com a
Universidade de Brasília, com início em julho de 2020

FLUXO EM MEIO POROSO NA ESCALA DE GRÃOS COM MORFOLOGIA REAL UTILIZANDO MÉTODOS NUMÉRICOS HÍBRIDOS

No presente trabalho são apresentadas modelagens de fluxo na escala de grãos em meios porosos granulares utilizando métodos numéricos híbridos. São desenvolvidos meios porosos com partículas virtuais e morfologia realista, definidas a partir da caracterização de materiais granulares reais por meio do processamento digital de imagens. Após a caracterização de grande número de partículas, é criado um repositório virtual com sólidos tridimensionais que representam estatisticamente a forma das partículas reais. O primeiro dos métodos numéricos utilizados é o algoritmo para empacotamento das partículas do repositório virtual de forma aleatória e composição dos meios porosos virtuais. O algoritmo é baseado no método dos elementos discretos (DEM). São então realizadas análises de fluxo utilizando a dinâmica de fluidos computacional (CFD) para modelar o escoamento do fluido dentro da matriz de vazios obtida dos pacotes de partículas virtuais. Dessa forma, desprende-se da necessidade da utilização da abordagem contínua para o meio poroso. A metodologia utilizada viabiliza a obtenção das distribuições das variáveis características do escoamento em toda a matriz porosa, e não mais valores médios obtidos para um volume elementar representativo (REV). Foram utilizados para as análises seis pacotes de partículas virtuais com diferentes granulometrias, com dimensões variando entre 4,8 e 32 mm. Os resultados obtidos foram então comparados com os valores obtidos de modelos de resistência ao fluxo difundidos na literatura, desenvolvidos utilizando a premissa do meio poroso como contínuo. Adicionalmente, os resultados numéricos foram validados por dados experimentais obtidos de ensaio de laboratório utilizando canal hidráulico e material granular real utilizado como base para construção dos pacotes virtuais. A união dos métodos numéricos utilizados aqui se mostrou bastante efetiva, com grandes vantagens analíticas, qualitativas e quantitativas. Os artifícios gráficos disponíveis em análises CFD podem ser utilizados de maneira inovadora como ferramentas poderosas para visualização de um fenômeno complexo que ocorre na rede de poros de materiais granulares geotécnicos, representados virtualmente de forma realista.

FLOW THROUGH POROUS MEDIA AT GRAIN SCALE WITH REAL MORPHOLOGY USING HYBRID NUMERICAL METHODS

In the present work, grain-scale flow analyses through granular porous media are presented using hybrid numerical methods. Porous media made from virtual particles with realistic morphology are developed based on the characterization of real granular materials by digital image processing. After morphologically describing a large number of particles, a virtual repository is created with three-dimensional solids that statistically represent the shape of the real particles. The first of the numerical methods used is the algorithm for packing random particles from the repository that generates the virtual porous media. The algorithm is based on the discrete element method (DEM). The modeling of flow within the void matrix obtained from the virtual particle packings is then performed by a computational fluid dynamics (CFD) software. This eliminates the need to use a continuum approach for the porous medium. The methodology presented makes it possible to obtain the distributions of the characteristic flow variables throughout the porous matrix, rather than averaged values obtained for a representative elementary volume (REV). Six packings of virtual particles with different grain sizes were used, with dimensions varying between 4.8 and 32 mm. The results obtained here were then compared with the calculations from flow resistance models widespread in the literature, that were developed with the assumption of the porous medium as a continuous material. Furthermore, the numerical results were validated by experimental data obtained from laboratory tests using a hydraulic channel and real granular material used as a basis for assembling the virtual packings. The merge of numerical methods presented in this work proved to be quite effective, with great analytical value, with qualitative and quantitative advantages. The graphical features available in CFD modeling can be used as powerful tools for visualizing a complex phenomenon that occurs inside the pore network of geotechnical granular materials, represented virtually in an innovative realistic way.

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	1
1.1	PERGUNTA DE PESQUISA	2
1.2	HIPÓTESE	3
1.3	OBJETIVOS	3
1.4	ESTRUTURAÇÃO DO TRABALHO	3
2	REFERENCIAL TEÓRICO	5
2.1	EQUAÇÕES DE CONSERVAÇÃO	5
2.1.1	CONSERVAÇÃO DA MASSA (EQUAÇÃO DA CONTINUIDADE)	5
2.1.2	CONSERVAÇÃO DO MOMENTO LINEAR	6
2.1.3	CONSERVAÇÃO DA ENERGIA	6
2.2	MODELOS CONSTITUTIVOS	6
2.3	EQUAÇÃO DE NAVIER-STOKES	7
2.4	FLUXO EM MEIOS POROSOS	8
2.5	REYNOLDS E FLUXO LAMINAR VS. TURBULENTO	9
2.6	MODELOS LAMINARES	10
2.6.1	DARCY	11
2.6.2	HAZEN (1892, 1911) E CHAPUIS (2004)	12
2.6.3	KOZENY-CARMAN (CARMAN, 1937 E 1956)	12
2.7	MODELOS DE RESISTÊNCIA AO FLUXO EM REGIMES NÃO LAMINARES	14
2.7.1	FORCHHEIMER (1901)	14
2.7.2	ERGUN (1952) E OZAHİ (2008)	15
2.7.3	CARMAN (1937) ADAPTADO POR BEAR (1972)	16
2.7.4	LEPS (1973)	16
2.8	CONTÍNUO VS. DISCRETO	17
2.9	MÉTODOS NUMÉRICOS PARA MEIOS POROSOS DISCRETOS	19
2.10	DINÂMICA DE FLUIDOS COMPUTACIONAL	20
3	METODOLOGIA	22
3.1	ELABORAÇÃO DOS PACOTES DE PARTÍCULAS	23
3.1.1	CARACTERIZAÇÃO MORFOLÓGICA DE AGREGADOS	24
3.1.2	EMPACOTAMENTOS	26

3.1.3	CURVAS GRANULOMÉTRICAS	30
3.2	PRÉ-PROCESSAMENTO - EXTRAÇÃO DE CORPOS DE PROVA	31
3.3	MODELAGEM NUMÉRICA DO FLUXO	34
3.3.1	SPACE CLAIM	34
3.3.2	DISCRETIZAÇÃO	35
3.3.3	CÁLCULOS	37
3.3.4	PÓS-PROCESSAMENTO	40
3.4	ENSAIOS EXPERIMENTAIS	40
3.4.1	OBTENÇÃO DO MATERIAL FÍSICO	41
3.4.2	ENSAIOS DE FLUXO	43
4	RESULTADOS	46
4.1	CONSIDERAÇÕES INICIAIS	47
4.1.1	DIMENSÕES CARACTERÍSTICAS DOS EMPACOTAMENTOS	47
4.1.2	CORPOS DE PROVA EM UM MESMO EMPACOTAMENTO	48
4.2	LINHAS DE CORRENTE (STREAMLINES)	50
4.3	DISTRIBUIÇÃO DE VELOCIDADES E PRESSÃO	52
4.3.1	PRESSÕES	53
4.3.2	VELOCIDADES	58
4.3.3	VAZÃO	65
4.4	TORTUOSIDADE	66
4.5	TRANSIÇÃO REGIME LAMINAR PARA TURBULENTO	68
4.6	MODELOS DE RESISTÊNCIA AO FLUXO	72
4.6.1	MODELOS PARA REGIME LAMINAR	72
4.6.2	MODELOS PARA REGIME TURBULENTO	75
4.7	INFLUÊNCIA DA FORMA – PARTÍCULAS REAIS VS. ESFERAS	79
4.8	RESULTADOS EXPERIMENTAIS	86
5	CONCLUSÕES	89
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	93
	APÊNDICE A - PRESSÃO	100
	APÊNDICE B - VELOCIDADE	106

LISTA DE FIGURAS

FIGURA 2.1: REGIMES DE ESCOAMENTO EM MEIOS POROSOS (MODIFICADA DE LOPÉZ <i>ET AL.</i> , 2021).....	10
FIGURA 2.2: TORTUOSIDADE (BIDIMENSIONAL) – ADAPTADA DE SILVA (2022) - ADAPTAR.....	13
FIGURA 2.3: POROSIDADE DO MEIO EM DIFERENTES ABORDAGENS (BEAR E BACHMAT, 1984).....	18
FIGURA 2.4: CÉLULAS ADJACENTES NO MÉTODO DOS VOLUMES FINITOS.....	21
FIGURA 3.1: FLUXOGRAMA DA METODOLOGIA UTILIZADA.....	23
FIGURA 3.2: <i>AGGREGATE IMAGE MEASUREMENT SYSTEM</i> (AIMS) (MODIFICADA DE DIÓGENES, 2021).....	24
FIGURA 3.3 (A): ESPECTRO ILUSTRATIVO DOS DESCRITORES DE FOURIER; (B): AMOSTRAGEM ALEATÓRIA DOS ÂNGULOS DE FASE; (C): SINAL DISCRETO CORRESPONDENTE $R(\theta)$; (D): CONTORNO DA PARTÍCULA NO PLANO CARTESIANO (MOLLON E ZHAO, 2012).....	25
FIGURA 3.4: PARTÍCULA COMPLETA A PARTIR DE TRÊS SEÇÕES TRANSVERSAIS (DIÓGENES, 2021).....	25
FIGURA 3.5: PARTÍCULA VIRTUAL – MALHA DE SUPERFÍCIE.....	26
FIGURA 3.6: EMPACOTAMENTO DE PARTÍCULAS COM MORFOLOGIA REAL – AVANÇO DO CENTRO PARA AS BORDAS.....	27
FIGURA 3.7. DIMENSÕES CARACTERÍSTICAS DAS PARTÍCULAS (ADAPTADO DE DIÓGENES, 2021).....	28
FIGURA 3.8: EMPACOTAMENTO #1 FINALIZADO – BLOCO CÚBICO 22CM X 22CM X 22CM.....	29
FIGURA 3.9: DISTRIBUIÇÕES GRANULOMÉTRICAS DOS EMPACOTAMENTOS COM BASE NO NÚMERO DE PARTÍCULAS.....	30
FIGURA 3.10: DISTRIBUIÇÕES GRANULOMÉTRICAS DOS EMPACOTAMENTOS COM BASE NO PESO DAS PARTÍCULAS.....	31
FIGURA 3.11: CORPO DE PROVA EXTRAÍDO DO EMPACOTAMENTO #6 – MATRIX DE SÓLIDOS (ESQUERDA) E MATRIX DE VAZIOS (DIREITA).....	32
FIGURA 3.12: CORPO DE PROVA – DEFINIÇÃO DE ALTURA.....	33

FIGURA 3.13: MALHA DO CP1 DO EMPACOTAMENTO 3: VISTA GERAL DA REGIÃO DE ENTRADA (ESQUERDA) E ZOOM EM UM CORTE QUE PASSA PELO CENTRO (DIREITA).	36
FIGURA 3.14: COMPARAÇÃO ENTRE OS MODELOS DE TURBULÊNCIA (EMP1-CP1) – MODELO $K-\epsilon$ SST E MODELO LAMINAR	40
FIGURA 3.15: CURVA GRANULOMÉTRICA – EMPACOTAMENTO 4 – MATERIAL VIRTUAL E FÍSICO.	41
FIGURA 3.16: MATERIAL COM CURVA GRANULOMÉTRICA EQUIVALENTE AO EMPACOTAMENTO 4.....	42
FIGURA 3.17: PERMEÂMETRO COM MATERIAL ENSAIADO	43
FIGURA 3.18– CANAL DE TRANSPORTE DE SEDIMENTOS (LABTRIX, 2022)	44
FIGURA 3.19: ENSAIO DE FLUXO EM MEIO POROSO GRANULAR	45
FIGURA 4.1: RESULTADOS DE VAZÃO ESPECÍFICA PARA OS TRÊS CORPOS DE PROVA DO EMPACOTAMENTO 1	49
FIGURA 4.2: RESULTADOS DE VAZÃO ESPECÍFICA PARA OS TRÊS CORPOS DE PROVA DO EMPACOTAMENTO 2	49
FIGURA 4.3: <i>STREAMLINES</i> – EMPACOTAMENTO 6 (PARTÍCULAS COM TRANSPARÊNCIA PARA FACILITAR A VISUALIZAÇÃO DAS LINHAS.....	50
FIGURA 4.4: <i>STREAMLINES</i> (N=350) – CASO 100 PA.....	51
FIGURA 4.5: DISTRIBUIÇÃO DE PRESSÃO NOS CORPOS DE PROVA – CASO 100 PA	53
FIGURA 4.6: DISTRIBUIÇÃO DE PRESSÃO EM PLANO CENTRAL DOS CORPOS DE PROVA – CASO 100 PA.....	54
FIGURA 4.7: DISPERSÃO DAS PRESSÕES OBTIDAS NAS <i>STREAMLINES</i> EM TORNO DA MÉDIA – EMPACOTAMENTO 6.....	56
FIGURA 4.8: VALORES DE R^2 PARA AS PRESSÕES OBTIDAS NAS <i>STREAMLINES</i> . 58	
FIGURA 4.9: DISTRIBUIÇÃO DE VELOCIDADE NOS CORPOS DE PROVA – CASO 100 PA – PLANO CENTRAL	59
FIGURA 4.10: FREQUÊNCIA ACUMULADA DAS VELOCIDADES – CASO 100 PA... 60	
FIGURA 4.11: MÉDIA DO MÓDULO DA VELOCIDADE EM FUNÇÃO DO GRADIENTE	61
FIGURA 4.12: DISTRIBUIÇÃO DAS VELOCIDADES AO LONGO DAS <i>STREAMLINES</i> – EMPACOTAMENTO 6.....	63

FIGURA 4.13: RELAÇÃO ENTRE A MÉDIA DO MÓDULO DA VELOCIDADE E VAZÃO ESPECÍFICA	64
FIGURA 4.14: RELAÇÃO ENTRE VAZÃO TOTAL E GRADIENTE HIDRÁULICO.....	65
FIGURA 4.15: RELAÇÃO ENTRE O COMPRIMENTO REAL PERCORRIDO PELO FLUIDO E LINEAR DO CORPO DE PROVA	67
FIGURA 4.16: TRANSIÇÃO ENTRE REGIME LAMINAR E TURBULENTO.....	70
FIGURA 4.17: FATOR DE FRICÇÃO VS. NÚMERO DE REYNOLDS (MODIFICADA DE STEPHENSON, 1979).....	72
FIGURA 4.18: MODELOS DE RESISTÊNCIA AO FLUXO – REGIME LAMINAR.....	73
FIGURA 4.19: MODELOS DE RESISTÊNCIA AO FLUXO – EMPACOTAMENTO 1	76
FIGURA 4.20: MODELOS DE RESISTÊNCIA AO FLUXO – EMPACOTAMENTO 2	76
FIGURA 4.21: MODELOS DE RESISTÊNCIA AO FLUXO – EMPACOTAMENTO 3	77
FIGURA 4.22: MODELOS DE RESISTÊNCIA AO FLUXO – EMPACOTAMENTO 4	77
FIGURA 4.23: MODELOS DE RESISTÊNCIA AO FLUXO – EMPACOTAMENTO 5	78
FIGURA 4.24: MODELOS DE RESISTÊNCIA AO FLUXO – EMPACOTAMENTO 6	78
FIGURA 4.25: EMPACOTAMENTO 3: PARTÍCULAS (ESQUERDA) E ESFERAS (DIREITA)	80
FIGURA 4.26: DISTRIBUIÇÃO DAS PRESSÕES NO EMPACOTAMENTO 3 – CORPOS DE PROVA (SUPERIOR) E PLANO CENTRAL (INFERIOR) – PARTÍCULAS (ESQUERDA) E ESFERAS (DIREITA) – CASO 100 PA.....	81
FIGURA 4.27: DISTRIBUIÇÃO DAS VELOCIDADES (SUPERIOR) E <i>STREAMLINES</i> (INFERIOR) NO EMPACOTAMENTO 3 – PARTÍCULAS (ESQUERDA) E ESFERAS (DIREITA) – CASO 100 PA	83
FIGURA 4.28: TORTUOSIDADE – EMPACOTAMENTO 3 – PARTÍCULAS VS. ESFERAS.....	84
FIGURA 4.29: VAZÕES – EMPACOTAMENTO 3 – PARTÍCULAS VS. ESFERAS.....	85
FIGURA 4.30: ENSAIO DE FLUXO EM CANAL ABERTO.....	86
FIGURA 4.31: RESULTADO ENSAIO DE FLUXO.....	87
FIGURA A.1: PRESSÕES EM DIFERENTES ALTURAS DO CORPO DE PROVA – EMP6 – CASO 100 PA	100
FIGURA A.2: DISPERSÃO DAS PRESSÕES OBTIDAS NAS <i>STREAMLINES</i> EM TORNO DA MÉDIA – EMPACOTAMENTO 1.....	101

FIGURA A.3: DISPERSÃO DAS PRESSÕES OBTIDAS NAS STREAMLINES EM TORNO DA MÉDIA – EMPACOTAMENTO 2	102
FIGURA A.4: DISPERSÃO DAS PRESSÕES OBTIDAS NAS STREAMLINES EM TORNO DA MÉDIA – EMPACOTAMENTO 3.....	103
FIGURA A.5: DISPERSÃO DAS PRESSÕES OBTIDAS NAS STREAMLINES EM TORNO DA MÉDIA – EMPACOTAMENTO 4.....	104
FIGURA A.6: DISPERSÃO DAS PRESSÕES OBTIDAS NAS STREAMLINES EM TORNO DA MÉDIA – EMPACOTAMENTO 5.....	104
FIGURA B. 1: VELOCIDADES EM DIFERENTES ALTURAS DO CORPO DE PROVA – EMP6 – CASO 100 PA.....	106
FIGURA B. 2: DISTRIBUIÇÃO DAS VELOCIDADES AO LONGO DAS <i>STREAMLINES</i> – EMPACOTAMENTO 1.....	107
FIGURA B. 3: DISTRIBUIÇÃO DAS VELOCIDADES AO LONGO DAS <i>STREAMLINES</i> – EMPACOTAMENTO 2.....	108
FIGURA B. 4: DISTRIBUIÇÃO DAS VELOCIDADES AO LONGO DAS <i>STREAMLINES</i> – EMPACOTAMENTO 3.....	109
FIGURA B. 5: DISTRIBUIÇÃO DAS VELOCIDADES AO LONGO DAS <i>STREAMLINES</i> – EMPACOTAMENTO 4.....	110
FIGURA B. 6: DISTRIBUIÇÃO DAS VELOCIDADES AO LONGO DAS <i>STREAMLINES</i> – EMPACOTAMENTO 5.....	111

LISTA DE TABELAS

TABELA 3.1: DADOS DE CONTROLE PARA OS EMPACOTAMENTOS REALIZADOS	28
TABELA 3.2: CARACTERÍSTICAS DOS CORPOS DE PROVA EXTRAÍDOS	34
TABELA 3.3: QUANTIDADE DE NÓS E ELEMENTOS DAS MALHAS OBTIDAS.....	37
TABELA 3.4: CASOS DE ANÁLISE.....	38
TABELA 3.5: VALORES DOS PARÂMETROS UTILIZADOS.....	38
TABELA 4.1: DIMENSÕES CARACTERÍSTICAS DOS EMPACOTAMENTOS	47
TABELA 4.2: VALORES DE ΔP E GRADIENTES HIDRÁULICOS RESULTANTES.....	55
TABELA 4.3: VALORES DE R^2 PARA AS PRESSÕES OBTIDAS NAS <i>STREAMLINES</i>	57
TABELA 4.4: VALORES MÉDIOS DE TORTUOSIDADE E DESVIO PADRÃO	68
TABELA 4.5: DIÂMETROS MÉDIOS DOS POROS OBTIDOS	69
TABELA 4.6: VALORES ESTIMADOS DE NÚMEROS DE REYNOLDS E GRADIENTES CRÍTICOS.....	71
TABELA 4.7: VALORES DE PERMEABILIDADE OBTIDOS PARA O REGIME LAMINAR	74
TABELA 4.8: VALORES DE R^2 PARA O EMPACOTAMENTO 3 – PARTÍCULAS COM MORFOLOGIA REAL E ESFERAS	82
TABELA 4.9: VALORES DE GRADIENTE HIDRÁULICO E VAZÕES OBTIDOS DO ENSAIO NO CANAL HIDRÁULICO.....	87
TABELA B.1: VALORES DE VELOCIDADES MÉDIAS E MÁXIMAS.....	112

LISTA DE ABREVIACOES, NOMENCLATURA E SÍMBOLOS

CFD	<i>Computational Fluid Dynamics</i> (Dinâmica de Fluidos Computacional)
CP	Corpo de prova
EMP	Empacotamento
DEM	<i>Discrete Element Method</i> (Método dos Elementos Discretos)
FEM	<i>Finite Element Method</i> (Método dos Elementos Finitos)
FVM	<i>Finite Volume Method</i> (Método dos Volumes Finitos)
LBM	<i>Lattice-Boltzmann Method</i> (Método Lattice-Boltzmann)
SPH	<i>Smoothed-particle Hydrodynamics</i>
a	Parâmetro dependente das características do meio poroso e do fluido
a_i	Aceleração
A_p	área superficial da partícula
b	ndice dependente das condições de escoamento
b_i	Forças de corpo
C_u	Coefficiente de uniformidade
C_h	Coefficiente de Hazen
D_c	Diâmetro característico do escoamento
D_e	Diâmetro equivalente da esfera com mesmo volume da partícula característica
D_p	Dimensão média das partículas
D_{10}	Dimensão correspondente a 10% em peso do material
d_m	Diâmetro médio
D_{min}	Dimensão mínima
$D_{máx}$	Dimensão máxima
D_{50}	Dimensão correspondente a 50% em peso do material
D_{60}	Dimensão correspondente a 50% em peso do material
D_{poros}	Dimensão média dos poros
e	ndice de vazios

E	Energia
F_i	Força
\vec{F}	Taxa da quantidade U por unidade de área e tempo
f_p	Fator de fricção
g_i	Aceleração da gravidade
i	Gradiente hidráulico
k	Coefficiente de condutividade hidráulica
K	Permeabilidade intrínseca
k_o	Coefficiente de Kozeny-Carman
m	Massa
n	Porosidade
P	Pressão
Q	Vazão
Q_c	Transferência de calor
q	Vazão específica (Velocidade de Darcy)
r	Parâmetro dependente das características do meio poroso e do fluido
Re	Número de Reynolds
R_h	Raio hidráulico
S	Superfície específica
s	Parâmetro dependente das características do meio poroso
\vec{S}	Vetor que representa a superfície
T	Tortuosidade
U	Quantidade genérica por unidade de volume
V_i	Velocidade
V_m	Velocidade na seção de pressão média
V_p	Volume da partícula
W	Trabalho
β	Fator Beta de Forchheimer

γ	Peso específico
ε_{ij}	Tensor de taxas de deformação
κ	Energia cinética de turbulência
μ	Viscosidade dinâmica
ν	Viscosidade cinemática
ρ	Densidade
σ_{ij}	Tensor de tensões
δ_{ij}	Delta de Kronecker
τ_{ij}	Tensor de tensões cisalhantes
Φ	Esfericidade
\varnothing	Potencial hidráulico
Ω_V	Volume de controle
ω	Taxa de dissipação específica da energia cinética de turbulência
∇_i	Operador Nabla

1 INTRODUÇÃO

O controle do fluxo em meios porosos é um problema de grande relevância nos projetos diversos da engenharia geotécnica e o seu comportamento é realizado predominantemente por formulações simples (ex. Lei de Darcy). Nesses modelos clássicos da engenharia geotécnica, o meio poroso é considerado contínuo, as variáveis obtidas representam o comportamento macroscópico médio do fluxo atuante em um volume elementar representativo (REV, em inglês). Os modelos macroscópicos podem ser suficientes para determinação e dimensionamentos de alguns problemas práticos em projetos convencionais de engenharia. Contudo, estas variáveis médias podem ser muito diferentes dos valores reais que acontecem no interior dos canais formados na matriz de vazios. Um exemplo clássico da insuficiência da análise por meio de escala macroscópica utilizando os modelos constitutivos usuais é a previsão da erosão e carreamento de partículas. A distribuição do fluxo dentro do meio pode gerar elevadas forças de percolação locais e provocar carreamento das partículas submetidas a estes esforços, quando superam as forças resistentes ao movimento. As forças agem em cada grão individualmente, não sendo possível representar o fenômeno de maneira realista utilizando a hipótese do contínuo.

Muitos modelos de resistência ao fluxo propõem formulações para relacionar as velocidades de fluxo com o gradiente hidráulico. No regime laminar, a relação se dá de forma linear como explicitado na Lei de Darcy (1856). Outros inúmeros modelos buscavam ampliar o estudo do fluxo e são utilizados para estimativa da condutividade hidráulica, utilizando parâmetros e variáveis do meio poroso e do fluido como dados de entrada, como por exemplo Hazen (1911), Kozeny-Carman (Carman, 1937 e 1956) e Chapuis (2004). Entre as grandezas utilizadas estão a porosidade do solo, tortuosidade dos canais de fluxo, esfericidade dos grãos sólidos e distribuição granulométrica.

Outros modelos como Forchheimer (1901), Ergun (1952), e Leps (1973) estendem a abrangência dos seus modelos para regimes não laminares, onde não só as forças viscosas impactam na perda de carga ao longo escoamento, mas também as forças inerciais, fazendo com que a relação deixe de ser linear.

Contudo, esses avanços ainda podem ser considerados insuficientes para caracterização do fluxo real devido às simplificações geométricas nos meios porosos utilizadas para possibilitar a análise matemática e teórica do problema de fluxo, bem como a premissa básica do contínuo. Observa-se que, mesmo após mais de um século depois das primeiras formulações, a influência

do fluxo na escala dos grãos sólidos ainda é muito pouco conhecida. Critérios puramente empíricos continuam sendo utilizados na grande maioria dos projetos geotécnicos que envolvem previsão de permeabilidades, erosão potencial, dimensionamento de filtros, sistemas de drenagem etc.

Hoje, o desenvolvimento de técnicas de modelagens numéricas avançadas, alinhadas com um aumento exponencial do desenvolvimento tecnológico de processamento, eliminam a dependência da hipótese do contínuo para sistematização de fenômenos físicos nos meios porosos. Adotando o meio como discreto de fato, as modelagens podem ser estruturadas inicialmente a partir das equações fundamentais do movimento em fluidos sem a necessidade de utilização dos modelos macroscópicos baseados na ideia de volume elementar representativo que engloba sólidos e vazios em um meio idealizado.

O trabalho em questão apresenta análises de fluxo em materiais granulares grossos por meio da utilização de dois métodos numéricos complementares: o método dos elementos discretos (DEM, em inglês) e a dinâmica de fluidos computacional (CFD, em inglês). O primeiro deles é utilizado para a geração de meios porosos virtuais, com partículas digitais caracterizadas morfologicamente a partir de partículas reais, utilizando equipamentos de processamento digital de imagens. A dinâmica de fluidos computacional (CFD), baseada predominantemente no método dos volumes finitos (FVM, em inglês), é utilizada aqui como segundo método numérico para modelar o movimento do fluido através do meio poroso.

A metodologia proposta utiliza os métodos numéricos híbridos para construir meios porosos muito detalhados geometricamente e com malhas extensas, a fim de representar de forma acurada a interface entre sólidos e fluido, avaliando as principais variáveis que caracterizam o escoamento e suas distribuições.

1.1 PERGUNTA DE PESQUISA

A principal pergunta a ser respondida aqui é se a utilização de modelos numéricos híbridos (DEM e CFD) é uma alternativa viável para a análise do comportamento do fluxo em meios porosos e de suas variáveis em toda a matriz porosa, dispensando a necessidade de utilização da abordagem contínua para o meio particulado.

1.2 HIPÓTESE

A hipótese central do trabalho é que a criação de meios porosos virtuais por meio de modelos numéricos discretos avançados, juntamente com a dinâmica de fluidos computacional (CFD), é uma ferramenta analítica inovadora que permite a expansão do campo de análise da percolação em meios porosos, com a caracterização do fluxo e sua distribuição nos vazios do meio.

1.3 OBJETIVOS

O objetivo do trabalho é apresentar uma metodologia inovadora com a combinação de diferentes artifícios numéricos, a fim de potencializar o conhecimento do fluxo na escala de grãos e poros. Entre os objetivos específicos do trabalho estão:

- Avaliar a variabilidade das principais grandezas de fluxo (velocidade, pressão) ao longo de corpos de prova com diferentes granulometrias e verificar a influência das características morfológicas dos materiais nessas variáveis;
- Analisar os resultados obtidos dos principais modelos de resistência ao fluxo existentes na literatura e compará-los com os resultados obtidos utilizando a metodologia do trabalho;

1.4 ESTRUTURAÇÃO DO TRABALHO

O trabalho é dividido em cinco capítulos e dois apêndices, aqui descritos resumidamente.

O Capítulo 1 apresenta a introdução do trabalho, com apresentação conceitual geral e dos aspectos que motivaram o estudo. A pergunta de pesquisa, hipótese e objetivos também estão apresentados aqui.

O referencial teórico necessário para as discussões dos resultados está apresentado no Capítulo 2. Nele foram destacadas as equações de movimento dos fluidos e os principais modelos de resistência ao fluxo em meios porosos, tanto para o regime de escoamento laminar quanto turbulento. Há também uma breve discussão sobre a abordagem contínua e discreta nos métodos utilizados para análises de percolação.

A metodologia está detalhada no Capítulo 3. Todas as diferentes etapas para modelagens de fluxo nos meios porosos virtuais estão descritas detalhadamente. As curvas granulométricas dos meios virtuais estão apresentadas nesta seção, juntamente com as principais características

geométricas dos corpos de prova virtuais extraídos dos blocos. A escolha do modelo de turbulência para as análises de dinâmica de fluidos computacional (CFD) está também descrita, bem como estão destacados as premissas e equipamentos utilizados para o ensaio experimental executado.

No Capítulo 4 apresentam-se os resultados obtidos das modelagens numéricas, divididos em tópicos de análise. Inicialmente, discute-se a distribuição das principais variáveis de fluxo no interior da matriz de vazios dos corpos de prova. É apresentada discussão sobre a transição entre os regimes de escoamento laminar e turbulento, detalhando também os resultados obtidos utilizando modelos clássicos de resistência ao fluxo em meios porosos. Por último, são mostrados os resultados da análise experimental em canal hidráulico, realizada utilizando material granular real compatível com o virtual.

No Capítulo 5 destacam-se as principais conclusões do trabalho, apontando os resultados mais relevantes da pesquisa. São também sugeridos tópicos complementares para futuras pesquisas vinculadas ao assunto.

Finalmente, no Apêndice A e Apêndice B estão dispostas figuras complementares relacionadas às distribuições das grandezas de fluxo obtidas nos meios porosos granulares, bem como uma tabela que apresenta os valores máximos e médios das velocidades.

2 REFERENCIAL TEÓRICO

Nesta seção apresentam-se os principais pontos teóricos necessários para subsidiar os resultados das análises a serem apresentadas na Seção 4.

2.1 EQUAÇÕES DE CONSERVAÇÃO

As equações que regem o movimento dos fluidos são leis muito conhecidas da física clássica e ditam sobre a conservação de três grandezas: massa, momento linear e energia. Essas equações combinadas são as conhecidas equações de Navier-Stokes e podem ser deduzidas por diferentes técnicas. Para tal, ver Çengel e Cimbala (2006), Wilkes (2006), Kundu e Cohen (1990) ou basicamente qualquer bibliografia de mecânica dos fluidos.

2.1.1 CONSERVAÇÃO DA MASSA (EQUAÇÃO DA CONTINUIDADE)

A equação da conservação da massa também é chamada de equação da continuidade e dita que a massa que entra em um determinado volume de controle deve ser igual a que sai, somada ao armazenamento interno. A equação é de natureza cinemática e, portanto, não depende da natureza do fluido ou das forças agindo nele. Considerando a inexistência de armazenamento volumétrico no modelo, a equação da continuidade é definida como:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla_i \cdot (\rho \cdot V_i) = 0 \quad (2.1)$$

onde ρ é a densidade, ∇_i é o operador Nabla sendo $\nabla_i = \frac{\partial}{\partial x_i}$. Aqui se usa a convenção de Einstein, ou seja, índices repetidos indicam um somatório.

Nessa forma, a equação da continuidade vale para qualquer fluido. Quando o fluido pode ser considerado incompressível, como é o caso nas análises a serem apresentadas neste trabalho, a densidade é constante ao longo do tempo e com isso a Equação 2.1 assume forma mais simples:

$$\nabla_i \cdot V_i = 0 \quad (2.2)$$

2.1.2 CONSERVAÇÃO DO MOMENTO LINEAR

O momento linear é uma grandeza vetorial, obtida por meio do produto entre o vetor de velocidade e a massa. A lei de Newton estabelece que as variações do momento linear são ocasionadas pelas forças resultantes agindo sobre o corpo. Essas forças podem ser externas por unidade de volume ou internas, também chamadas de forças de corpo. A conservação do momento linear, quando a massa é constante, equivale à segunda Lei de Newton e é definida por:

$$\rho \cdot \frac{DV_i}{Dt} = \frac{\partial \sigma_{ij}}{\partial x_j} + b_i \quad (2.3)$$

onde σ_{ij} é o tensor de segunda ordem de tensões, $b_i = \rho \cdot g_i$ é o vetor de forças de corpo e $\frac{DV_i}{Dt}$ é a derivada material da velocidade. Nesta forma, a equação da conservação do momento linear é conhecida como Equação de Cauchy.

2.1.3 CONSERVAÇÃO DA ENERGIA

A equação da conservação da energia é proveniente da primeira Lei da Termodinâmica e o conteúdo de energia em um sistema é dado pela energia interna por unidade de massa. A energia interna é uma variável de estado e sua variação é dependente somente do estado inicial e final do sistema. A primeira Lei da Termodinâmica estabelece então que, para um sistema fechado, o conteúdo de energia pode ser alterado por meio de transferência de calor (Q_c) ou transferência de Trabalho (W).

$$\frac{dE}{dt} = \dot{Q}_c - \dot{W} \quad (2.4)$$

Para o fluxo isotérmico e incompressível, onde se enquadram todas as análises apresentadas no presente trabalho, a sua utilização não é necessária no sistema de equações, como será apresentado nas Seção 2.2.

2.2 MODELOS CONSTITUTIVOS

Visto que as equações apresentadas na Seção 2.1 apresentam onze incógnitas para somente cinco equações, é necessária a introdução de modelos constitutivos que relacionam as

componentes do tensor de tensões com outras variáveis. Inicialmente, divide-se o tensor de tensões dos fluidos em duas partes: parte estática isotrópica e parte viscosa:

$$\sigma_{ij} = -P \cdot \delta_{ij} + \tau_{ij} \quad (2.5)$$

onde P é a pressão termodinâmica, δ_{ij} é o delta de Kronecker e τ_{ij} o tensor de tensões cisalhantes. O sinal é negativo na pressão pois quando o fluido está em repouso a pressão é a única tensão que age em todas as superfícies de um elemento qualquer de fluido, para dentro e normal à superfície.

Em seguida, são utilizadas equações constitutivas que relacionam τ_{ij} com o campo de velocidade e propriedades mensuráveis do fluido, como a viscosidade (Çengel e Cimbala, 2006). Observa-se que o presente trabalho trata apenas de fluidos newtonianos, os quais apresentam proporcionalidade linear entre a tensão de cisalhamento e a taxa de deformação cisalhante.

Tratando-se de um fluido incompressível e isotérmico, elimina-se a necessidade da equação da conservação da energia, fazendo com que as viscosidades dinâmica e cinemática sejam constantes (Kundu, 1990). Dadas essas hipóteses, o tensor de tensões cisalhantes é dado por:

$$\tau_{ij} = 2 \cdot \mu \cdot \varepsilon_{ij} \quad (2.6)$$

onde μ é a viscosidade dinâmica do fluido e ε_{ij} o tensor de taxa de deformações.

2.3 EQUAÇÃO DE NAVIER-STOKES

A partir das Equações 2.3, 2.5, 2.6 e com alguns rearranjos é obtida a famosa equação de Navier-Stokes para o fluido incompressível:

$$\rho \cdot \frac{DV_i}{Dt} = - \frac{\partial P}{\partial x_i} + \rho \cdot g_i + \mu \cdot \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\frac{\partial v_i}{\partial x_j} \right) \quad (2.7)$$

onde $\frac{\partial}{\partial x_j} \left(\frac{\partial v_i}{\partial x_j} \right)$ é o operador Laplaciano da velocidade.

Fisicamente a Eq. 2.7 representa simplesmente a Segunda Lei de Newton ($m \cdot a_i = F_i$), expressa em unidade de volume, aplicada a uma partícula (ou volume de controle - VC) do fluido em movimento. O termo do lado esquerdo da Equação 2.7 é a aceleração, $\frac{DV_i}{Dt}$, ou seja, a derivada material da velocidade, num contexto Lagrangeano, e ρ é a massa por unidade de volume. No

lado direito tem-se a força resultante (por unidade de volume), composta por três termos: as forças devido ao gradiente de pressão ($\frac{\partial P}{\partial x_i}$); as forças externas devido à gravidade ($\rho \cdot g_i$); e as forças internas devido às tensões cisalhantes por efeito viscoso ($\mu \cdot \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\frac{\partial v_i}{\partial x_j} \right)$).

Matematicamente a Equação 2.7 representa um sistema de três equações diferenciais parciais (EDPs) de segunda ordem para quatro incógnitas, V_x, V_y, V_z e P : as componentes de velocidade do fluido e a pressão no fluido. Portanto, o sistema precisa de mais uma equação, a qual é obtida da condição de continuidade de massa através do volume de controle.

A partir das equações da continuidade, das três equações de Navier-Stokes (uma para cada direção no espaço cartesiano) e da equação da conservação da energia, pode-se modelar o movimento em qualquer fluido newtoniano incompressível. Caso o modelo seja considerado isotérmico, onde não há variação de temperatura, a solução da equação da energia poderá ser dispensada. Dessa forma, a solução do sistema é possível, dada a compatibilidade do número de equações com o número de incógnitas.

A equação de Navier-Stokes é não-permanente, não-linear, de segunda ordem e não possui solução analítica geral. A dificuldade de solução da equação é muito conhecida na mecânica dos fluidos e introduz a necessidade da aplicação de métodos numéricos para obtenção de soluções.

2.4 FLUXO EM MEIOS POROSOS

Quando se trata de meios porosos, as equações de movimento apresentadas nas Seções 2.1 e 2.3 são referentes ao fluido contínuo que preenche os vazios do meio poroso. Contudo, o tratamento do fluxo utilizando o fluido contínuo entre as partículas sólidas não é viável na maioria dos problemas de engenharia, devido à incapacidade de caracterização detalhada da geometria da interface fluido-sólidos. Ademais, o processamento computacional para viabilizar esse tipo de análise pode ser muito demandante, gerando importantes restrições para esse tipo de aplicação.

Visto isso, a hipótese do contínuo entra como substituta mais viável para práticas convencionais de engenharia. Nessa abordagem, o meio poroso multifásico é substituído por um *continuum* fictício e as variáveis são calculadas, utilizando valores médios para o volume elementar representativo (REV, em inglês) do meio ao redor de um ponto considerado. Tendo isso em

vista, surge um problema relacionado a como essas distribuições médias são consideradas (Bear, 1972).

A simplificação é essencial para viabilizar a análise matemática, mas inevitavelmente gera também perdas de informações. Os meios porosos são meios essencialmente discretos. Em geotecnia, eles são compostos usualmente por uma matriz sólida e a matriz de vazios. A matriz de vazios (ou poros) pode ser multifásica e heterogênea e é ocupada por fluidos em forma líquida ou gasosa (Bear e Bachmat, 1986).

2.5 REYNOLDS E FLUXO LAMINAR VS. TURBULENTO

O fluxo em meios porosos é controlado por duas forças: a força viscosa e a força inercial. Para baixos valores de velocidade e gradiente hidráulico, as forças viscosas são predominantes no escoamento e o regime é chamado de laminar, onde há proporcionalidade linear entre a vazão específica e o gradiente de pressões. Na medida em que o gradiente hidráulico aumenta no meio poroso, as forças inerciais se tornam cada vez mais predominantes, fazendo com que a relação entre a velocidade e o gradiente hidráulico deixe de ser linear, sendo necessária a complementação da relação de Darcy (1856) com termos adicionais.

A conhecida relação de Reynolds expressa a razão entre as forças inerciais e as forças viscosas e serve como critério para definição do limite superior do escoamento laminar (Bear, 1972). Observa-se que a relação foi criada para escoamentos de fluidos em tubulações e estendidas para os meios porosos e é dada por:

$$Re = v \cdot \frac{D_c \cdot \rho}{\mu} \quad (2.8)$$

onde Re é o número de Reynolds e D_c é a dimensão característica do escoamento.

Dado que a relação foi inicialmente proposta para tubulações, sua extensão por analogia para meios porosos gera grande dificuldade na definição do valor da dimensão característica do escoamento, visto que a matriz porosa é altamente desordenada. A definição do número de Reynolds em que inicia a transição entre regimes de escoamento é bastante controversa na literatura. Alguns autores como Ergun (1952) e Ozahi (2008) utilizam a dimensão característica das partículas do meio poroso, Collins (1961) e Ward (1964) propõem estimativas para os diâmetros de canais de fluxo.

Outro ponto de destaque é que autores como Fancher (1933), Ergun (1952), Bear (1972) e diversos outros apresentam correlação linear entre o logaritmo do fator de atrito e do Número de Reynolds no regime laminar. Cada autor adota uma diferente formulação para o fator de atrito, mas todas elas têm forma geral:

$$f_p = C \cdot \frac{i}{v^2} \quad (2.9)$$

onde C é composto por um conjunto de parâmetros físicos do meio poroso e outras constantes empíricas.

Na Figura 2.1 apresentam-se os limites de validade do escoamento laminar no gráfico que plota o Número de Reynolds com o fator de atrito.

Nas Seções 2.6 e 2.7 são apresentados alguns modelos de resistência ao fluxo, tanto para regime linear quanto para regimes de transição e turbulento.

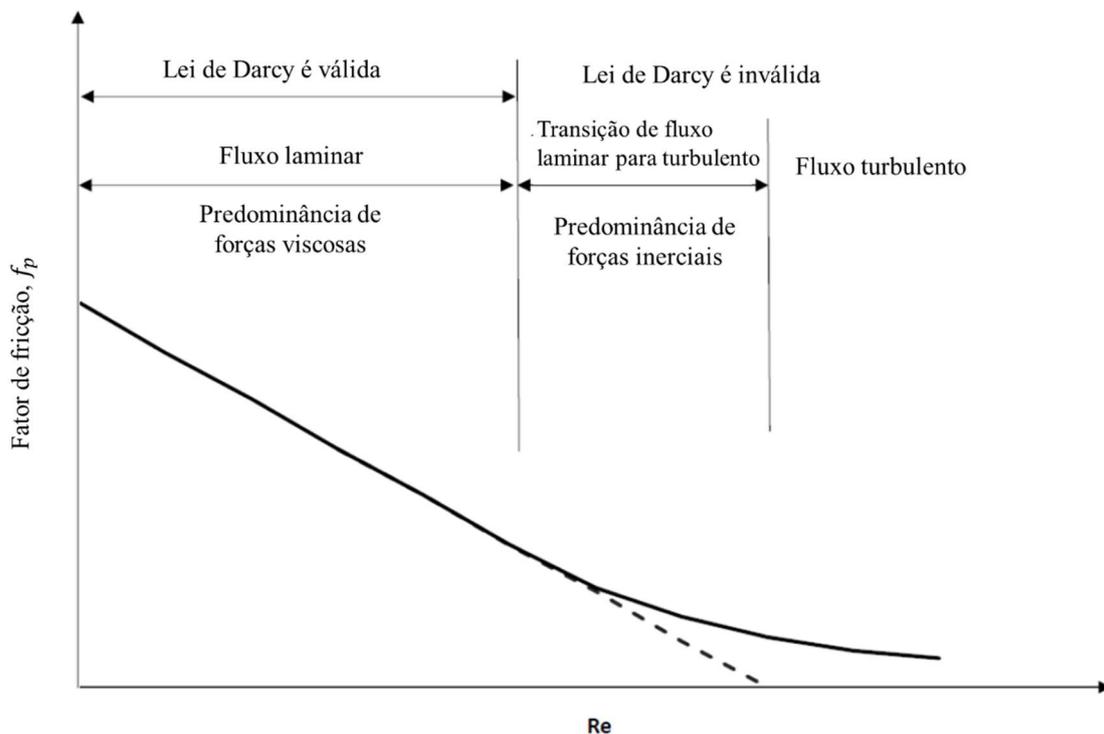


Figura 2.1: Regimes de escoamento em meios porosos (modificada de López *et al.*, 2021)

2.6 MODELOS LAMINARES

Na presente seção detalha-se resumidamente os modelos válidos para o regime de escoamento laminar nos meios porosos.

2.6.1 DARCY

A sistematização do fluxo em meios porosos teve início com Darcy, em 1856, por meio de análises experimentais do movimento da água através de areias utilizadas para filtragem. Darcy observou que a taxa de vazão percolada era proporcional à diferença de carga hidráulica entre as extremidades do filtro de material granular e inversamente proporcional ao comprimento em linha reta do fluxo no interior do meio. O modelo estabelece relação linear entre a vazão específica e o gradiente hidráulico por meio de uma constante de proporcionalidade, denominada condutividade hidráulica ou permeabilidade dada por:

$$q = -k \cdot \frac{d\phi}{ds} \quad (2.10)$$

onde q é a vazão específica (velocidade aparente de Darcy), k é a permeabilidade e $\frac{d\phi}{ds}$ é a derivada da carga hidráulica na direção do fluxo (gradiente hidráulico).

Estendendo o modelo unidimensional de Darcy para o meio tridimensional, as grandezas escalares se tornam vetoriais e a permeabilidade se torna um tensor de segunda ordem simétrico:

$$q_i = -k_{ij} \cdot \frac{\partial \phi}{\partial x_j} \quad (2.11)$$

A condutividade hidráulica (k) é a constante de proporcionalidade do modelo e depende tanto das propriedades do fluido quanto da morfologia da matriz porosa. As propriedades do fluido que afetam a condutividade hidráulica são a densidade e a viscosidade e podem ser relacionadas com a permeabilidade intrínseca do meio poroso por:

$$k = K \cdot \frac{\gamma}{\mu} \quad (2.12)$$

onde K é a permeabilidade intrínseca do meio poroso e k é a condutividade hidráulica.

Diversas fórmulas são descritas na literatura relacionando a permeabilidade intrínseca a propriedades da matriz porosa. Algumas são puramente empíricas e outras puramente teóricas, em sua maioria derivadas da lei de Darcy. Como apresentado por Bear (1972), todas essas equações têm a fórmula geral:

$$K = f_1(s) \cdot f_2(n) \cdot d^2 \quad (2.13)$$

onde $f_1(s)$ é uma função que expressa o efeito da forma dos grãos (ou poros), $f_2(n)$ é uma função que expressa o efeito da porosidade e d é o diâmetro efetivo (ou médio) das partículas.

Também é amplamente encontrada na literatura a formulação de Kozeny-Carman para estimativa da permeabilidade do meio:

$$k = \frac{d_m^2 n^3}{180(1-n)^2} \quad (2.14)$$

onde d_m é a dimensão média do meio poroso.

Diversos trabalhos elaboraram derivações do modelo de Kozeny-Carman. Em sua maioria, os modelos são adequados para as condições físicas ensaiadas pelos autores para meios porosos específicos, usualmente granulares. Kataguiri *et al.* (2017), Xu e Yu (2007), Ren *et al.* (2016) Latief e Fauzi (2012) apresentam interessantes discussões acerca do modelo de Kozeny-Carman aplicado a diferentes tipos de solos e rochas.

2.6.2 HAZEN (1892, 1911) E CHAPUIS (2004)

Hazen (1911) foi possivelmente o primeiro a apresentar uma relação empírica entre o coeficiente de permeabilidade e alguma dimensão característica do solo. Nesse caso, a dimensão utilizada é o D_{10} e a relação entre permeabilidade e a dimensão é dada por um coeficiente que varia da unidade até 1000. A formulação é dada por:

$$k = C_h \cdot D_{10}^2 \quad (2.15)$$

onde C_h é o coeficiente de proporcionalidade e D_{10} é o diâmetro máximo dos 10% de partículas mais finas do material, em peso.

Chapuis (2004) estendeu o conceito de Hazen (1892, 1911) para meios granulares fazendo relação não só entre a permeabilidade e o diâmetro efetivo dos grãos (D_{10}), mas também com o índice de vazios do material. Dessa forma, a relação capta os efeitos do estado de compactidade do meio na permeabilidade e é dada por:

$$k = 2,4622 \cdot (D_{10}^2 \cdot \frac{e^3}{1+e})^{0,7825} \quad (2.16)$$

onde e é o índice de vazios do meio poroso.

2.6.3 KOZENY-CARMAN (CARMAN, 1937 E 1956)

A formulação de Kozeny-Carman é uma relação empírica amplamente utilizada para caracterizar o fluxo em meios porosos. Foi desenvolvida por Carman em seu trabalho de 1937 a partir da Equação proposta por Kozeny (1927). O modelo de Kozeny-Carman foi

desenvolvido para um modelo simplificado de meio poroso, onde as dimensões e a morfologia geral da matriz de vazios são uniformes, o que não é o caso para quase todos os meios porosos aplicados na engenharia. O modelo relaciona a permeabilidade com as propriedades geométricas (considerando o critério de uniformidade) do meio por meio da relação:

$$q = \frac{n^3}{T \cdot k_0 \cdot \mu \cdot S^2} \cdot i \quad (2.17)$$

onde k_0 é um coeficiente empírico próximo de 5 (definido experimentalmente), S é a superfície específica e T é a tortuosidade do meio, definida por Carman (1937) como a relação entre o comprimento real que o fluxo percorre dentro do meio poroso e o comprimento em linha reta entre início e fim do meio.

A tortuosidade é uma variável amplamente discutida na literatura como um forte indicador do comportamento do fluxo em um meio poroso. Porém, a tortuosidade é bastante difícil de ser obtida e é objetivo de discussão de inúmeros trabalhos. Carman (1937, 1956) indica valor de tortuosidade estimado de aproximadamente 1,41 e utiliza esse valor de referência em suas formulações. Dada a dificuldade de obtenção, alguns autores utilizam coeficientes empíricos para caracterizar a influência da tortuosidade na resistência dos meios ao fluxo, como por exemplo Ergun (1952).

Silva *et al.* (2022) apresentam uma interessante discussão sobre essa variável e realiza um levantamento de vários meios de obtenção dessa grandeza apresentados na literatura. A Figura 2.2 apresenta ilustração sobre o conceito.

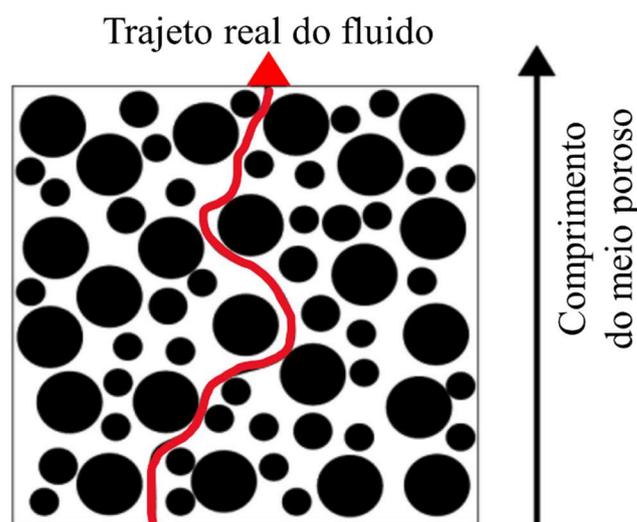


Figura 2.2: Tortuosidade (bidimensional) – Adaptada de Silva (2022)

2.7 MODELOS DE RESISTÊNCIA AO FLUXO EM REGIMES NÃO LAMINARES

Existem inúmeros estudos da relação não linear entre a velocidade de fluxo e o gradiente hidráulico em materiais granulares grossos. Lopez *et al.* (2021) denominam essas relações de modelos de resistência ao fluxo não lineares. Os autores mostram que os modelos usam diferentes abordagens e variáveis para definição das relações, mas que muitas vezes utilizam as mesmas premissas para cálculos.

Porém, surgem nesses modelos coeficientes e variáveis, que dificultam a comparação direta entre eles, mas o trabalho em questão apresenta uma extensa análise e compatibilização desses modelos, facilitando o entendimento geral das relações, tanto de premissas como de resultados.

Como apresentado pelos autores, as relações não lineares podem ser agrupadas em dois grupos de equações:

$$i = a.V^b \quad (2.18)$$

$$i = r.V + s.V^2 \quad (2.19)$$

onde V é a velocidade do fluxo, definida como a média da velocidade na seção transversal, a e r são parâmetros dependentes da característica do meio poroso e do fluido, s é função somente das características do meio poroso e b é função das condições do escoamento.

Nas Seções 2.7.1 a 2.7.4 são detalhados alguns dos modelos de resistência ao fluxo não lineares mais difundidos na literatura.

2.7.1 FORCHHEIMER (1901)

Segundo Bear (1972), Forchheimer foi provavelmente o primeiro a sugerir uma relação não linear entre o gradiente hidráulico e vazão específica para escoamentos com grandes números de Reynolds. Forchheimer adicionou à equação de Darcy um termo quadrático, atribuindo a não linearidade ao aparecimento de turbulência, utilizando a analogia de escoamento em tubos cilíndricos:

$$i = -\frac{\mu}{K}.q + \beta.\rho.q^2 \quad (2.20)$$

onde β é o coeficiente de Forchheimer, que indica a magnitude do desvio de um fluxo da relação linear de Darcy.

Contudo, Bear (1972) questiona a premissa utilizada por Forchheimer, especialmente na questão de transição entre os regimes de escoamento. Em tubos, a transição entre fluxo laminar e turbulento ocorre de forma abrupta, enquanto nos fluxos em meios porosos a transição é bastante gradual. Os valores de Reynolds críticos para escoamento em tubos são ordens de grandeza superiores aos valores encontrados nos escoamentos em meios porosos. Isso se dá pela natureza heterogênea dos meios porosos, que podem gerar turbulências iniciais em poros e canais de fluxo de maiores dimensões, enquanto nos menores poros e canais, o fluxo é ainda laminar.

O autor também cita que autores como Schneebeli (1955), Dudgeon (1966) e Wright (1968) identificaram que os desvios da lei de Darcy ocorrem em números de Reynolds bem inferiores ao aparecimento de turbulências nos meios, confirmando o entendimento de que os desvios não são causados pelo aparecimento de turbulências e sim pelo aumento progressivo das forças inerciais.

2.7.2 ERGUN (1952) E OZAHİ (2008)

Em 1952, Ergun publica talvez o trabalho mais utilizado para quantificação da resistência dos meios porosos à percolação de fluidos, levando em consideração as forças inerciais e adequando seu modelo para qualquer regime de escoamento. Ergun parte das premissas utilizadas nos modelos de Forchheimer (1901) e Kozeny-Carman (Carman, 1937), expandindo-os para obtenção da equação:

$$i = 150 \cdot \frac{(1-n)^2 \cdot \mu \cdot V_m}{n^3 \cdot D_p^2 \cdot g} + 1,75 \frac{(1-n) \cdot \rho \cdot V_m^2}{n^3 \cdot D_p \cdot g} \quad (2.21)$$

onde n é a porosidade, D_p é o diâmetro efetivo das partículas, V_m é a velocidade medida na seção de pressão média.

É importante ressaltar que parâmetros geométricos com exceção da porosidade, como por exemplo a tortuosidade e a superfície específica dos grãos, estão embutidos nos coeficientes empíricos.

Ozahi (2008) apresentou uma adaptação para o modelo de Ergun (1952) onde introduz a esfericidade como forma de correção para a forma das partículas e propõe a alteração dos coeficientes empíricos de 150 para 180 e 1,75 para 1,85 a fim de diminuir o erro nos resultados experimentais realizados. Contudo, o autor critica o empirismo da obtenção desses coeficientes, comentado sobre a impossibilidade da universalização desses coeficientes para diferentes

morfologias das partículas e empacotamentos, surgindo a necessidade de obtenção para cada ensaio realizado.

O modelo proposto por Ozahi (2008) a partir da modificação do modelo de Ergun (1952) é dado por:

$$i = 180. \frac{(1-n)^2 \cdot \mu \cdot V_m}{n^3 \cdot D_p^2 \cdot g \cdot \Phi} + 1,85 \frac{(1-n) \cdot \rho \cdot V_m^2}{n^3 \cdot D_p \cdot g \cdot \Phi^2} \quad (2.22)$$

onde Φ é a esfericidade.

2.7.3 CARMAN (1937) ADAPTADO POR BEAR (1972)

Bear (1972) apresenta adaptação da formulação de Carman (1937) adequada para regimes não-darcianos com números de Reynolds superiores a 2:

$$i = 180. \frac{(1-n)^2 \cdot \mu \cdot V_m}{n^3 \cdot g \cdot D_p^2} + 2,87 \frac{\mu^{0,1} \cdot (1-n)^{1,1} \cdot V_m^{1,9}}{n^3 \cdot g \cdot D_p^{1,1}} \quad (2.23)$$

Observa-se que essa formulação é bastante similar à formulação de Ergun (1952), mas com alterações dos valores das potências em alguns termos e dos coeficientes empíricos.

2.7.4 LEPS (1973)

Leps (1973), a partir dos trabalhos de Wilkins (1956), propõe relação com coeficientes obtidos a partir de investigações de campo:

$$V = 53. R_h^{0,5} \cdot i^{0,54} \quad (2.24)$$

onde R_h é o raio hidráulico médio dos canais de fluxo.

Por meio de ensaios com meios porosos de partículas de rocha com dimensões desde 1.91 cm ($\frac{3}{4}$ "") até 1.22 m (48""), Leps obteve correlação entre raio hidráulico dos canais de fluxo e dimensão característica da partícula média:

$$R_h = \frac{D_e}{8} \quad (2.25)$$

onde D_e é o diâmetro equivalente da esfera com mesmo volume da partícula característica.

2.8 CONTÍNUO VS. DISCRETO

Com a introdução dos modelos de abordagem contínua, um complexo fenômeno físico, onde o tratamento matemático é quase impossível, pode ser substituído por um fenômeno fictício mais simples. Por meio da utilização desses modelos é viabilizado o tratamento teórico e matemático (Bear, 1972). O modelo pode ser entendido como uma forma simplificada de análise de um fenômeno que não pode ser diretamente observado microscopicamente, mas para o qual é possível observar respostas macroscópicas.

Os meios porosos geotécnicos apresentam complexas estruturas de vazios entre os grãos sólidos, sendo justamente a dificuldade da definição geométrica da interface das superfícies sólidas que força a introdução da abordagem contínua como ferramenta para desenvolvimento analítico e teórico (Bear, 1972).

Quando se utiliza a abordagem contínua na dinâmica dos fluidos em meios porosos, há a necessidade de introduzir parâmetros ou coeficientes macroscópicos para acomodar o fenômeno observado e para promover a transição do nível microscópico para o macroscópico contínuo. Exemplos desses parâmetros são: a porosidade, a permeabilidade, a difusividade. Tais parâmetros surgem da incapacidade de resolução dos problemas em escala microscópica e são necessários ensaios experimentais para sua obtenção (Bear, 1972).

Na Figura 2.3 é apresentada a variação de uma grandeza do material (porosidade) relacionada à dimensão do volume elementar representativo.

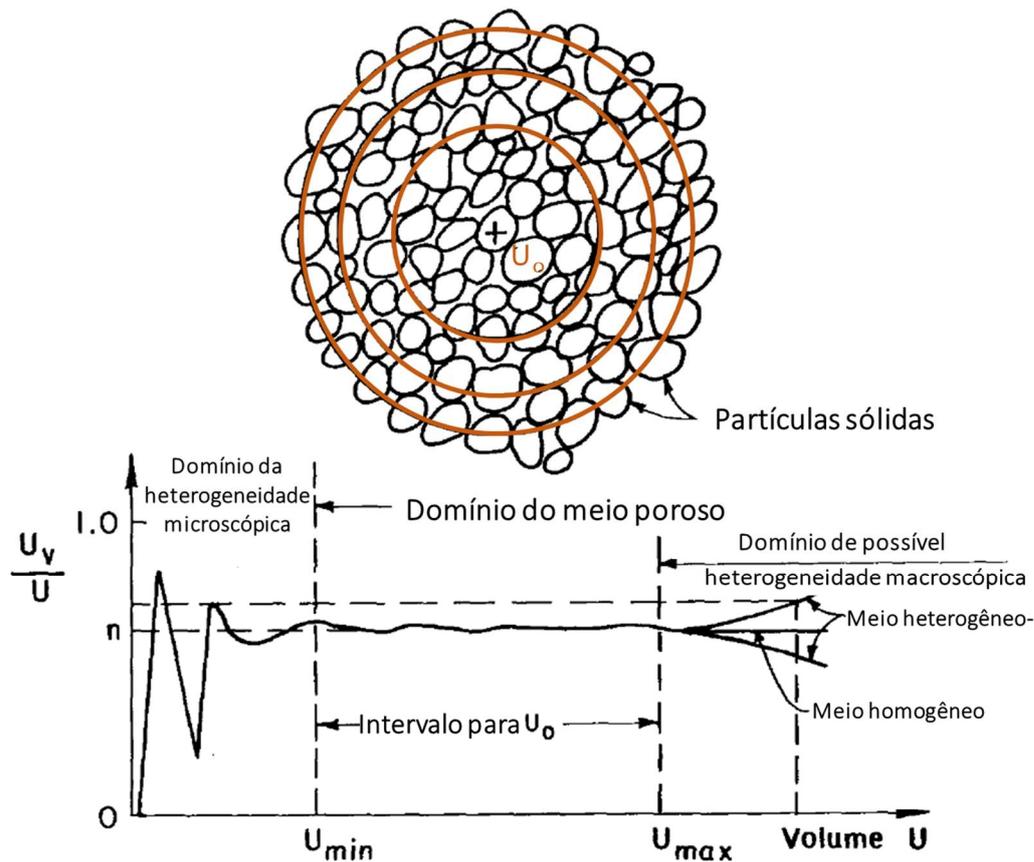


Figura 2.3: Porosidade do meio em diferentes abordagens (Bear e Bachmat, 1984)

Bear (1972) argumenta que há muito mais do que simplificações excessivas na abordagem contínua para fluxo em meios porosos. Apesar da dependência da utilização de experimentos para a determinação de parâmetros e coeficientes, surgem algumas vantagens na introdução de modelos conceituais simplificados do meio, analisando os resultados de forma analítica exata ou estatística. Mesmo que fosse possível resolver esses problemas de fluxo na escala microscópica, essas soluções não teriam valor prático. Na verdade, não haveria maneira simples de até verificar essas soluções no interior dos meios.

Contudo, Hirsch (2007) destaca que é essencial o entendimento de que na abordagem contínua sempre há um inevitável nível de empirismo nos modelos. Portanto, quaisquer premissas utilizadas nesses modelos são associadas com um grau de erro, quando comparados com o fenômeno físico que acontece de fato no interior do meio poroso.

Mesmo apresentando grandes vantagens facilitadoras que obrigam a utilização da abordagem contínua na imensa maioria das análises de fluxo em meios porosos, essa abordagem não

permite a compreensão das distribuições dos valores reais das variáveis que acontecem no fluido que percola através do meio.

2.9 MÉTODOS NUMÉRICOS PARA MEIOS POROSOS DISCRETOS

Para poder contornar as restrições apresentadas na Seção 2.8, foram desenvolvidos nos últimos 50 anos inúmeros métodos numéricos que dispensam a hipótese do meio poroso como contínuo. Dentre eles, podem ser citados o Método dos Elementos Discretos (DEM) e Método de Lattice-Boltzmann (LBM). Esses métodos muitas vezes podem ser combinados entre si e também com métodos contínuos como o Método dos Elementos Finitos (FEM), Método dos Volumes Finitos (FVM) e *Smoothed Particle Hydrodynamics* (SPH). Porém, os métodos contínuos são aplicados agora somente no fluido que preenche a matriz porosa e não mais em todo o volume de material poroso.

Técnicas de caracterização de partículas reais por meio da captação e do processamento digital de imagens estão bastante desenvolvidas e são capazes de gerar modelos de partículas virtuais com muita precisão, mesmo para morfologias extremamente complexas. Utilizando essas técnicas de caracterização em conjunto com algoritmos empacotadores, como apresentado em Morfa *et al.* (2016), Recarey *et al.* (2019) e Valera (2022), é possível construir meios porosos virtuais bastante realistas e daí executar análises de fluxo dentro da matriz de vazios.

Esse trabalho propõe análises de fluxo utilizando esses meios porosos virtuais e a metodologia para obtenção destes será detalhada na Seção 3.1. Na simulação do escoamento do fluido por entre a matriz de vazios, os modelos de fluxo em meios porosos tradicionais são completamente abandonados, voltando às equações de Navier-Stokes e de conservação (Seções 2.1 a 2.3).

Dado o enorme avanço computacional ocorrido nos últimos anos, o processamento dessas equações em modelos numéricos com malhas de números de nós muito elevados hoje é viável. Dessa forma, não há necessidade de simplificações geométricas significativas na interface fluido-sólidos. Para resolução das equações de forma numérica podem ser utilizados métodos numéricos contínuos diversos, todos eles englobados em uma grande área da mecânica dos fluidos chamada de Dinâmica de Fluidos Computacional (CFD).

2.10 DINÂMICA DE FLUIDOS COMPUTACIONAL

A dinâmica de fluidos computacional ou CFD (*Computational Fluid Dynamics*) é a área de estudos que é dedicada à resolução das equações do movimento dos fluidos por meio de métodos numéricos executados computacionalmente (Çengel e Cimbala, 2006).

A resolução dos problemas é realizada por meio da discretização do problema em uma malha estruturada ou não. Hoje, o método dos volumes finitos (FVM) é o mais aplicado na dinâmica de fluidos computacional e tende a se manter no futuro próximo. A razão dessa afirmação se baseia na generalidade do modelo, na simplicidade conceitual e facilidade de implementação para malhas arbitrárias, estruturadas ou não (Hirsch, 2007).

Hirsch (2007) afirma que o método foi inicialmente apresentado por McDonald (1971) e MacCormack (1972) de maneira independente e sua forma mais simples e mais utilizada do método é a centralizada numa célula, onde os valores das variáveis são calculados no centroide da célula. Em seguida, é aplicada interpolação para calcular os valores das variáveis na superfície do volume de controle.

Após a convergência da solução é usual a utilização de *softwares* pós-processadores para exibir os resultados de forma gráfica para facilitar o entendimento da distribuição das variáveis do campo de escoamento.

Hirsch (2007) apresenta a formulação generalizada do modelo a partir da integração das leis de conservação, válida para malhas estruturadas ou não:

$$\int_{\Omega_J} U \, d\Omega \Big|^{n+1} = \int_{\Omega_J} U \, d\Omega \Big|^n - \sum_{\text{faces}} \int_n^{n+1} (\vec{F} \cdot \Delta \vec{S})_f \, dt + \int_n^{n+1} dt \int_{\Omega_J} Q \, d\Omega \quad (2.26)$$

onde o termo do lado esquerdo apresenta a conservação de uma quantidade genérica U , que no contexto do problema de escoamento de fluidos representa as três grandezas apresentadas nas Seções 2.1.1 a 2.1.3: massa, momento e energia. A quantidade U é dada por unidade de volume e Ω_J é o volume de controle associado a um ponto J . O vetor \vec{F} indica a taxa da quantidade U que atravessa a unidade de superfície S (área) por unidade de tempo. A taxa \vec{F} que ocorre em cada face do volume de controle é somada para obtenção da quantidade U que atravessa a área total do volume de controle entre dois passos de tempo subsequentes (n e $n+1$). Q é a contribuição de fontes internas ou externas da quantidade U , como uma bomba que pode atuar

no volume de controle, ou injeção de fluido através de uma face do domínio Ω_J . Em análises onde o fluido é considerado incompressível e o meio poroso saturado sem variação volumétrica, o último termo da Eq. 2.26 é igual a zero.

Um esquema representativo de duas células adjacentes em centradas nos pontos internos está apresentado na Figura 2.4, sem a consideração de fontes.

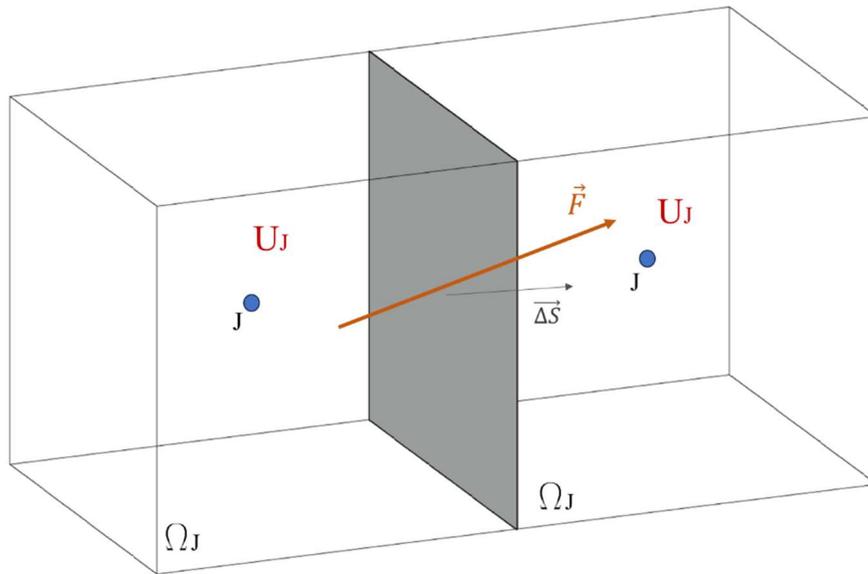


Figura 2.4: Células adjacentes no Método dos Volumes Finitos

3 METODOLOGIA

A metodologia do presente trabalho pode ser dividida em três etapas. A primeira etapa diz respeito à construção de empacotamentos de partículas com morfologia real a partir de um repositório de partículas virtuais obtidas por meio da caracterização de agregados provenientes da pedreira Contagem, localizada no Distrito Federal. A segunda etapa diz respeito às análises de fluxo de água no interior da matriz de vazios obtida de cada empacotamento gerado na primeira etapa. As análises de fluxo foram executadas utilizando a dinâmica de fluidos computacional (CFD), que utiliza o Método dos Volumes Finitos e considera a matriz de vazios preenchida por fluido como um meio contínuo. A última etapa diz respeito ao pós-processamento dos resultados, utilizando *softwares* CFD de pós-processamento para obtenção dos resultados de variáveis, tanto de maneira quantitativa quanto de maneira qualitativa por meio de imagens e valores de contorno. Foi também realizada análise experimental para complementar e validar os resultados numéricos.

Na Figura 3.1 apresenta-se o fluxograma de desenvolvimento da pesquisa e os Itens 3.1 a 3.3.4 apresentam o detalhamento de cada uma das etapas apresentadas aqui.

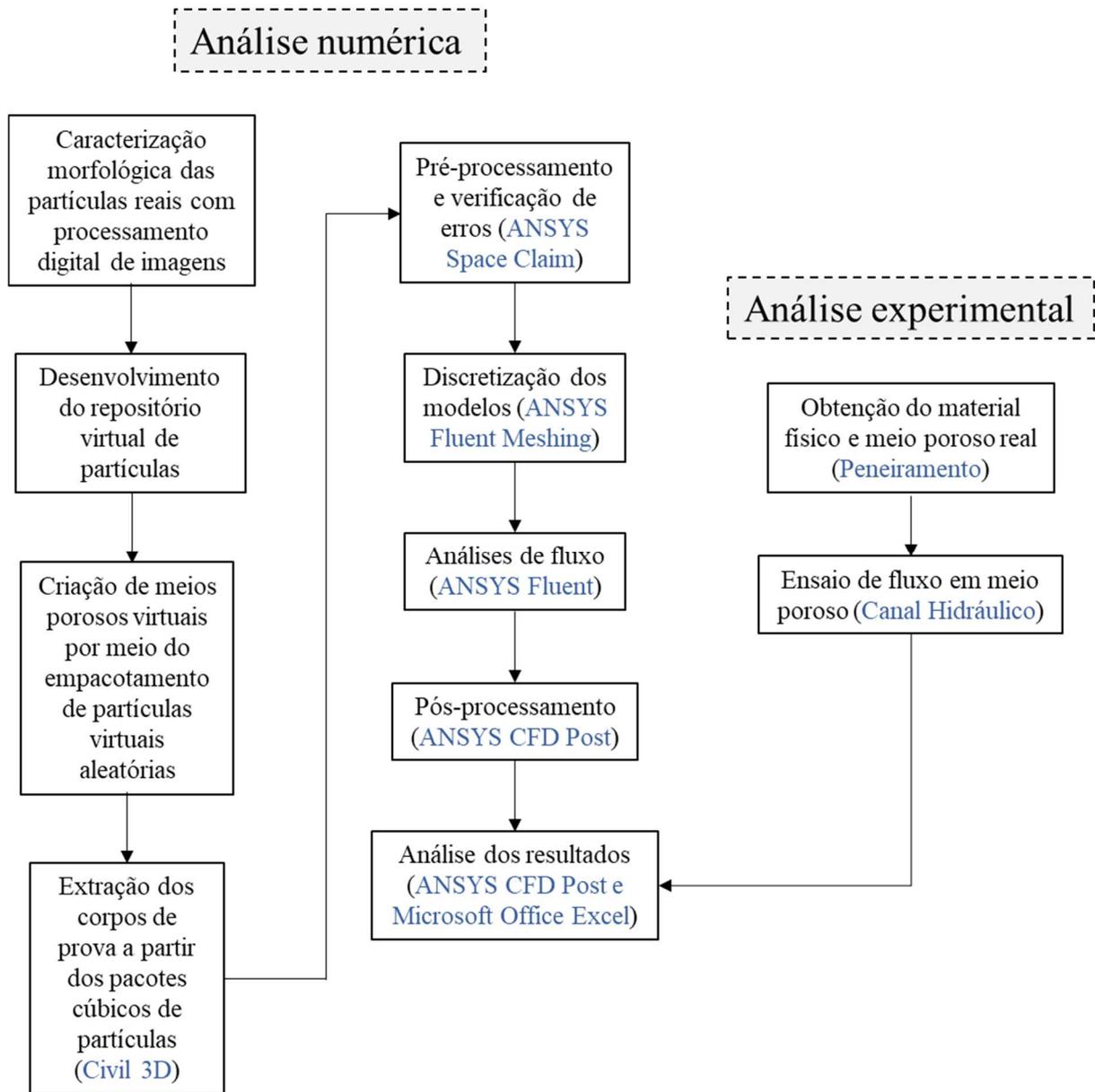


Figura 3.1: Fluxograma da metodologia utilizada

3.1 ELABORAÇÃO DOS PACOTES DE PARTÍCULAS

A primeira etapa de desenvolvimento da pesquisa foi a elaboração de pacotes cúbicos de meios porosos a partir de um repositório de partículas virtuais individuais, construído por meio de processamento digital de imagens. A caracterização morfológica e os algoritmos de empacotamentos das partículas em si não foram desenvolvidos nesse trabalho, e foram obtidos pela parceria entre o Laboratório de Infraestrutura (INFRALAB) da Universidade de Brasília e a Universidad Central Marta Abreu de Las Villas (Cuba).

3.1.1 CARACTERIZAÇÃO MORFOLÓGICA DE AGREGADOS

O presente trabalho utilizou o banco de dados de partículas virtuais construído a partir da caracterização morfológica de agregados executada e apresentada por Diógenes (2021) e derivada de parceria entre a Universidade Federal do Ceará e o Laboratório de Infraestrutura da Universidade de Brasília (INFRALAB).

A geração do banco de dados ou repositório virtual de partículas passa por quatro diferentes processos: captura de imagem, processamento de imagem, cálculo dos parâmetros (descritores de Fourier) e caracterização estatística dos parâmetros.

A captura das imagens dos agregados apresentada em Diógenes (2021) foi realizada utilizando o equipamento *Aggregate Imaging Measurement System* (AIMS). As propriedades de forma que definem uma partícula de agregado são a forma (seções 2D e esfericidade), textura superficial e angularidade. A forma do agregado é definida pela transformada de Fourier por meio de relações com os valores médios de diâmetros curtos (dS), intermediários (dI) e longos (dL).

Na Figura 3.2 está apresentado o equipamento utilizado, na Figura 3.3 apresenta-se um exemplo de caracterização de contorno de partícula utilizando os descritores de Fourier e na Figura 3.4 apresenta-se a representação da partícula final tridimensional a partir das seções transversais.



Figura 3.2: *Aggregate Image Measurement System* (AIMS) (Modificada de Diógenes, 2021)

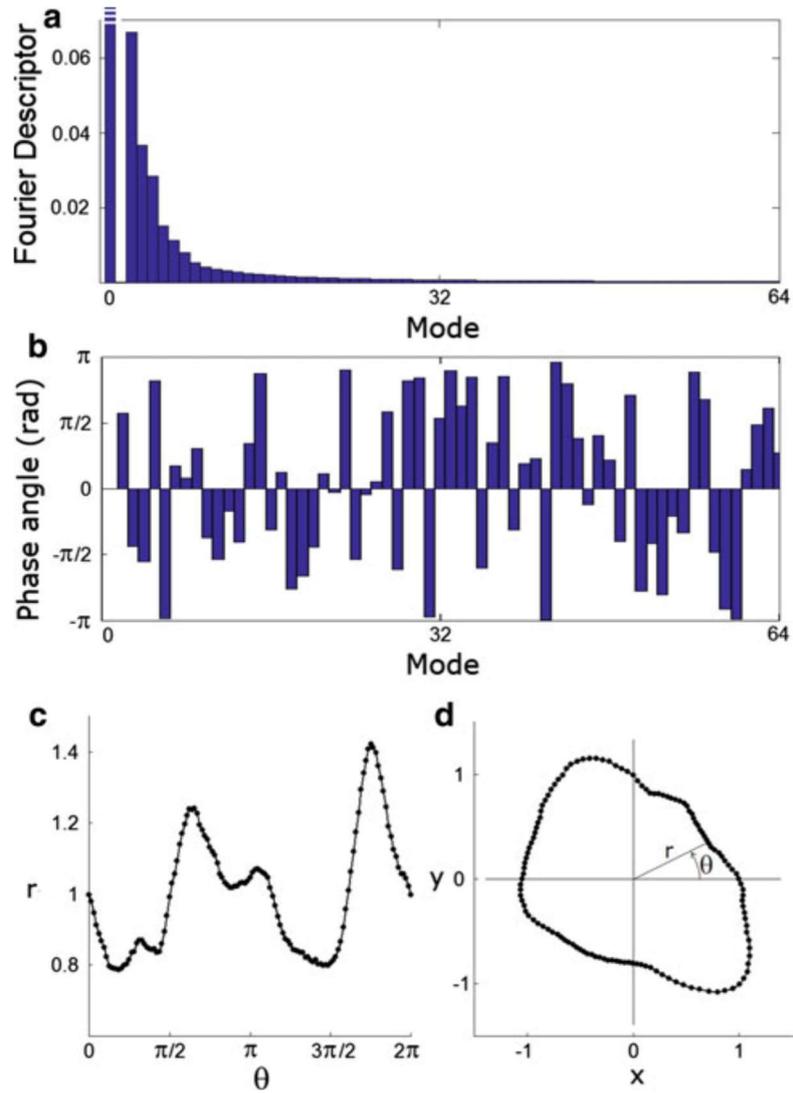


Figura 3.3 (a): Espectro ilustrativo dos descritores de Fourier; (b): Amostragem aleatória dos ângulos de fase; (c): Sinal discreto correspondente $r(\theta)$; (d): Contorno da partícula no plano cartesiano (Mollon e Zhao, 2012)

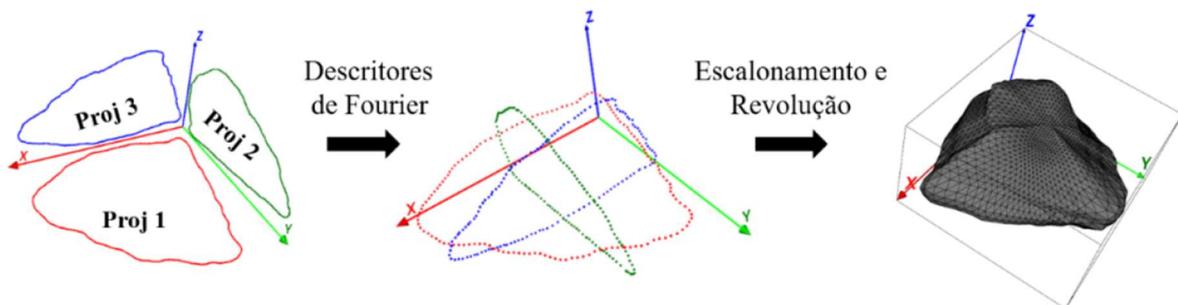


Figura 3.4: Partícula completa a partir de três seções transversais (Diógenes, 2021)

Após o cálculo dos descritores de cada partícula individual e com a repetição do procedimento de caracterização para número de partículas reais não inferior a 30, pode-se obter a distribuição estatística dos descritores de forma. Dessa maneira, obtém-se a malha digital de superfície de cada partícula caracterizada e permite-se a geração de novas partículas virtuais geometricamente diferentes das partículas reais, mas que representam estatisticamente a forma dessas partículas.

Observa-se que essa metodologia permite a caracterização da forma e também da textura das partículas, com malhas de superfície muito detalhadas. Contudo, dado que as análises executadas exigiram grande número de grãos para construção dos meios porosos, foram geradas malhas com menor quantidade de pontos coordenados, focadas na representação morfológica e não na textura das partículas.

Utilizando então esse repositório virtual de partículas, é aplicado um algoritmo para seleção aleatória de valores de descritores, obedecendo as distribuições estatísticas para criar quantas partículas virtuais forem necessárias para os fins desejados. Na Figura 3.5 apresenta-se um exemplo de malha de superfície para uma partícula virtual gerada a partir da caracterização morfológica de partículas reais.

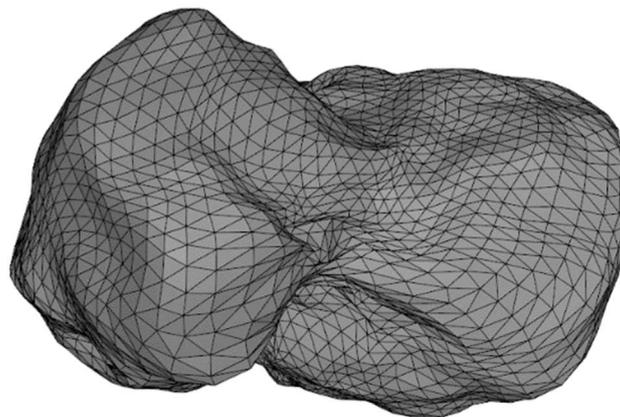


Figura 3.5: Partícula virtual – Malha de superfície

As malhas superficiais de cada uma das partículas virtuais utilizadas nos meios porosos virtuais têm 102 pontos coordenados e 202 faces para definição geométrica.

3.1.2 EMPACOTAMENTOS

O empacotamento de partículas nada mais é do que um algoritmo que aproxima objetos virtuais tridimensionais para formar um meio poroso. Aqui foram utilizadas partículas sorteadas aleatoriamente e escolhidas do repositório virtual construído a partir da caracterização

morfológica apresentada no Item 3.1.1. Os algoritmos que promovem o empacotamento de partículas também não foram desenvolvidos para esse trabalho, sendo fornecidos pela equipe da Universidad Central Marta Abreu de Las Villas (Cuba), elaborados em parceria com o Laboratório de Infraestrutura da Universidade de Brasília (INFRALAB). Os algoritmos proprietários foram utilizados para construir os meios porosos virtuais a serem utilizados como input para as análises apresentadas no Item 1.

A lógica matemática por trás dos algoritmos é baseada no Método dos Elementos Discretos (Cundall e Strack, 1979) e apresentada em trabalhos como Morfa *et al.* (2017), Recarey *et al.* (2019) e Valera (2022). A construção dos empacotamentos é realizada basicamente por aproximação geométrica entre as partículas virtuais selecionadas aleatoriamente do repositório, garantindo pelo menos dois contatos para cada partícula individual.

A frente de avanço dos empacotamentos realizados nesse trabalho foi do centro para as bordas, ou seja, as primeiras partículas são posicionadas ao centro do bloco e as novas partículas são acrescentadas uma a uma a partir do conjunto de partículas iniciais. O avanço do empacotamento a partir das partículas centrais iniciais está apresentado na Figura 3.6.

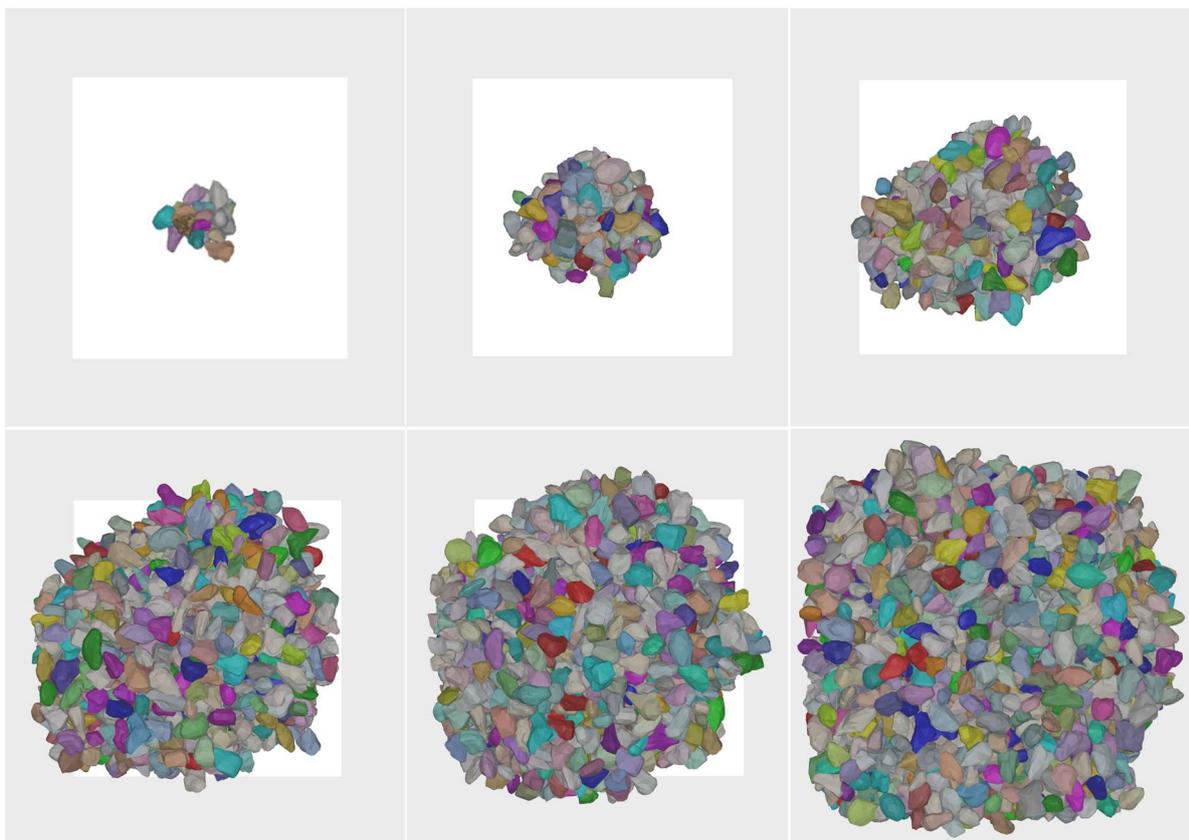


Figura 3.6: Empacotamento de partículas com morfologia real – Avanço do centro para bordas

Nos empacotamentos são também definidos os diâmetros máximo e mínimo das partículas a serem utilizadas a partir do repositório virtual, bem como uma curva granulométrica de referência.

Para o presente trabalho, foram gerados seis diferentes blocos cúbicos de partículas para servir de base para todas as análises a serem apresentadas no Item 4. Na Tabela 3.1 estão apresentados os dados de controle utilizados para os seis blocos de partículas executados.

Tabela 3.1: Dados de controle para os empacotamentos realizados

# Empacotamento	D_{\min} (mm)	D_{\max} (mm)	Distribuição granulométrica
1	12.5	32	Contínua
2	6.35	32	
3	19	25	
4	9.5	19	
5	4.8	19	
6	9.5	15	

É importante ressaltar que os diâmetros máximo e mínimo das partículas são relacionados à dimensão intermediária (D_i), assim como apresentado na Figura 3.7.

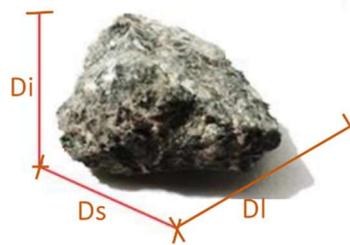


Figura 3.7. Dimensões características das partículas (Adaptado de Diógenes, 2021)

Nas distribuições granulométricas é apresentada somente uma das dimensões características das partículas e, para a definição em questão, foram realizadas comparações entre várias partículas do repositório virtual com a abertura da peneira onde as partículas reais caracterizadas foram retidas. Essa análise apontou de maneira aderente que a dimensão apresentada nas curvas granulométricas é muito próxima da dimensão média da partícula. Vale ressaltar que foram utilizadas somente partículas com esfericidade acima de 0,8. Portanto, para partículas que fogem muito da morfologia cúbica, essa relação poderá ser diferente.

As dimensões de controle escolhidas para os empacotamentos foram definidas buscando diferentes relações entre dimensões máximas e mínimas, com distintos níveis de uniformidade, a fim de avaliar comparativamente o comportamento do fluxo em um maior espectro de distribuições granulométricas.

Os blocos para contenção das partículas têm dimensões externas de 220x220x220 mm e o empacotamento é dado como finalizado quando o algoritmo não consegue encontrar uma posição para a partícula selecionada dentro dos limites do cubo.

A execução desses empacotamentos é bastante dispendiosa, pois os critérios de interpolação geométrica são complexos e a quantidade de partículas resultante pode ser bastante grande. Nos empacotamentos com menor número de partículas, o tempo de processamento foi de cerca de dois dias inteiros, sem interrupções. Já para os empacotamentos com maior número de partículas, o tempo de processamento superou os 14 dias. Observa-se ainda que foi utilizada uma potente workstation com processador Intel Xeon W-2275 (3.30 GHz), 256 Gb de memória RAM e todos os 28 processadores lógicos dedicados à realização dessa atividade.

Na Figura 3.8 apresenta-se um dos pacotes de partículas cúbicos obtidos

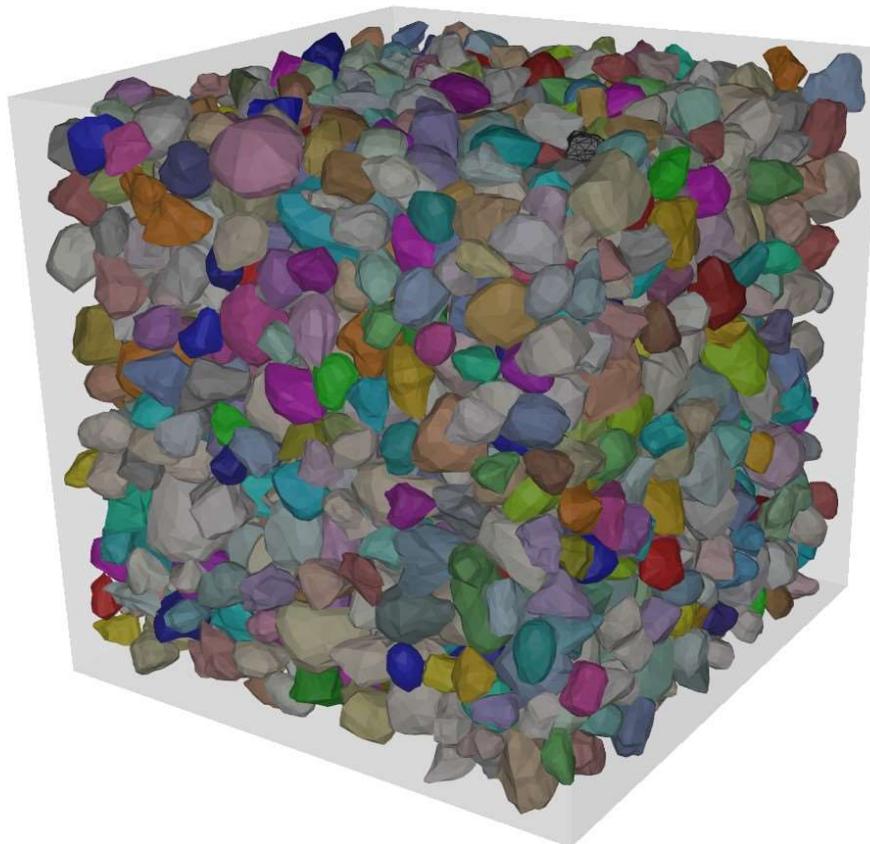


Figura 3.8: Empacotamento #1 finalizado – Bloco cúbico 22cm x 22cm x 22cm

As dimensões das partículas utilizadas em todos os empacotamentos estão entre as faixas estabelecidas para brita 0 até o limite inferior de brita 3.

3.1.3 CURVAS GRANULOMÉTRICAS

Como já descrito anteriormente, o controle do algoritmo de empacotamento pode ser feito por curvas granulométricas “guia”. No caso dos empacotamentos executados para esse trabalho, foram estabelecidas distribuições contínuas. Ou seja, a distribuição da porcentagem de partículas dos diversos tamanhos entre o máximo e o mínimo estabelecido é constante. Contudo, o algoritmo empacotador é guiado por curvas granulométricas que apresentam a porcentagem de partículas com dimensão menor/maior do que de controle e não o peso retido em cada peneira, como na metodologia convencional. Portanto, as distribuições contínuas são estabelecidas nas curvas utilizando a porcentagem do número de partículas e não o peso.

A partir dos volumes de cada uma das partículas no empacotamento e considerando a densidade dos sólidos constante é possível transformar a curva granulométrica com base no número de partículas em curva granulométrica com base no peso. Nas Figura 3.9 e Figura 3.10 estão apresentadas as granulometrias obtidas com base no número de partículas e no peso, respectivamente.

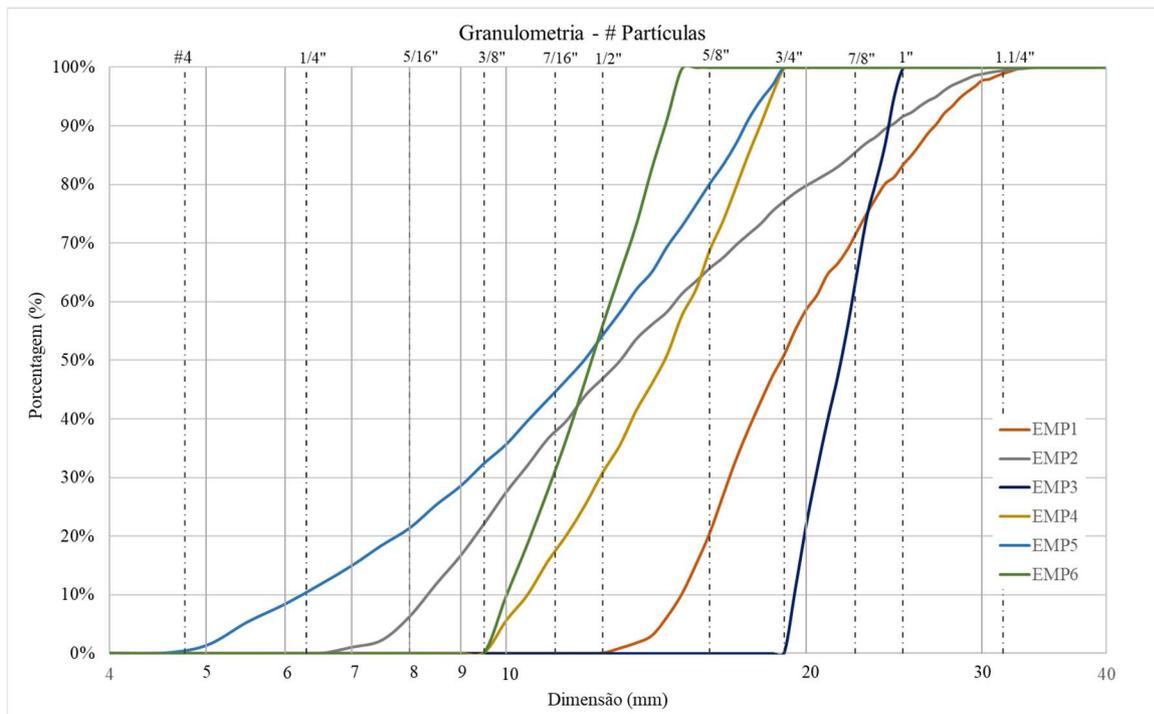


Figura 3.9: Distribuições granulométricas dos empacotamentos com base no número de partículas

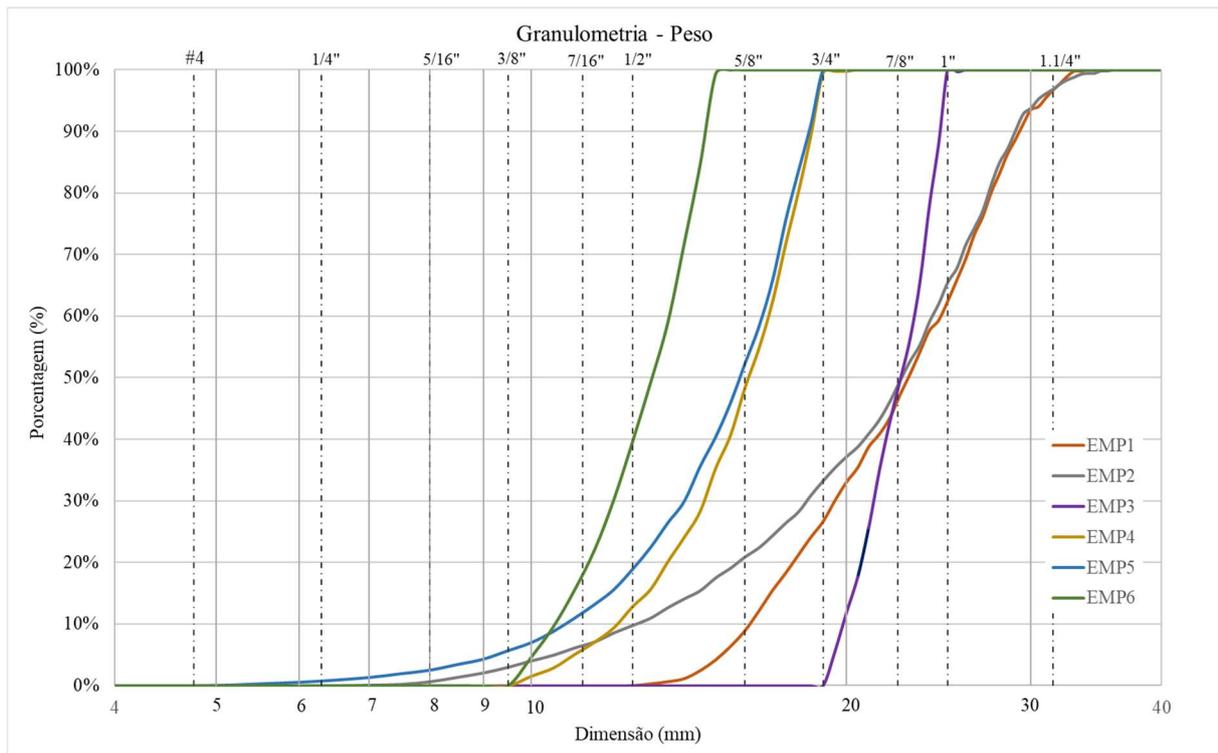


Figura 3.10: Distribuições granulométricas dos empacotamentos com base no peso das partículas

É interessante observar que as curvas granulométricas mais bem distribuídas apresentam diferenças entre os dois tipos muito mais significativas do que as curvas granulométricas mais uniformes. Isso acontece, pois, a fração de partículas mais finas são responsáveis por uma fração muito menor do peso, visto que este varia proporcionalmente ao cubo da dimensão da partícula. Esse fato é bastante notável quando se compara as duas curvas dos empacotamentos 2 e 3.

3.2 PRÉ-PROCESSAMENTO - EXTRAÇÃO DE CORPOS DE PROVA

Finalizados os pacotes de partículas, é necessária a execução de algumas operações em plataforma CAD até obter arquivo de entrada para elaboração das malhas. O arquivo resultante do algoritmo de empacotamento é do tipo texto e é necessária a conversão desses arquivos para formato CAD tridimensional para viabilizar a extração dos corpos prova. Essa extração de corpos de prova é necessária pois as partículas são aproximadas às anteriores até o limite geométrico estabelecido externamente pelo cubo. Se a partícula não cabe integralmente dentro dos limites, ela não é adicionada ao pacote. Visto isso, se o empacotamento fosse utilizado da forma como foi gerado, haveria um fluxo preferencial pelas bordas do modelo, já que nessa região sempre há mais espaço vazio que sólido.

Todas as operações de extração dos corpos de prova foram executadas utilizando o *software* Civil 3D da Autodesk. Dada a quantidade de informação contida em cada bloco de partículas, a extração dos corpos de prova também é uma atividade demorada, que leva cerca de 12 horas para cada corpo de prova.

A matriz de sólidos e a matriz de vazios do corpo de prova extraído do Empacotamento #6 está apresentada na Figura 3.11.

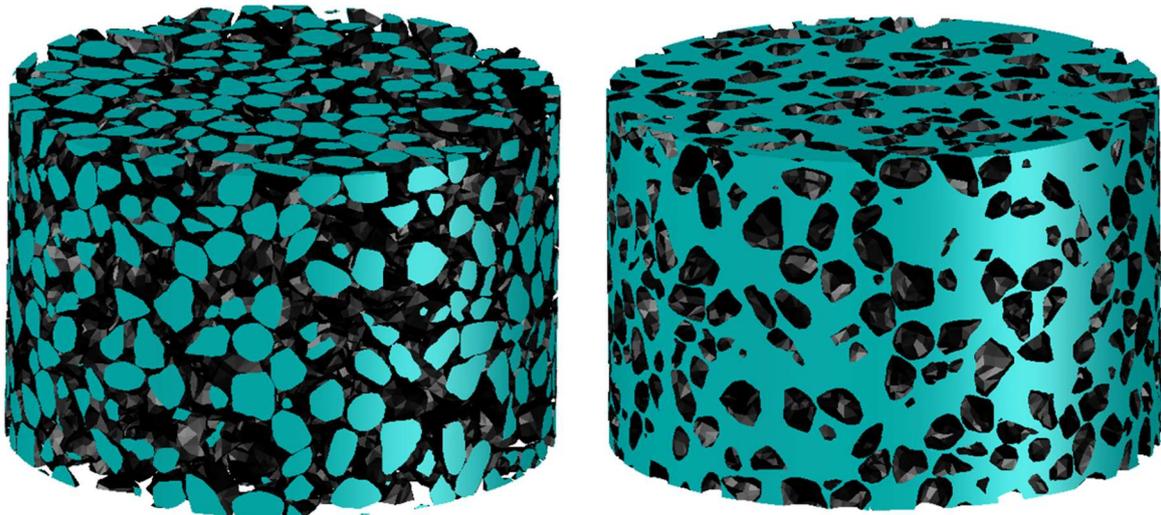


Figura 3.11: Corpo de prova extraído do Empacotamento #6 – Matrix de sólidos (esquerda) e matriz de vazios (direita)

As dimensões dos corpos de prova extraídos foram definidas a partir das dimensões de um permeâmetro de carga constante, ensaio mais difundido para estudo do fluxo na engenharia geotécnica. Essas dimensões são: 15,24 cm (6 polegadas de diâmetro) e 15,50 cm de altura, que corresponde à diferença entre os pontos de leitura manométrica do permeâmetro.

Após os primeiros casos serem executados, observou-se um tempo de processamento muito elevado em todas as etapas das análises, dado o tamanho dos modelos. Foi realizada então uma análise de sensibilidade com o primeiro corpo de prova extraído, a fim de avaliar a possibilidade de redução dos corpos de prova para 10 cm de altura, mantendo o diâmetro.

Os resultados nas duas análises foram muito próximos, com diferença máxima entre valores de 3%, como pode ser observado na Figura 3.12. Foi utilizada a curva obtida de vazão específica com relação ao gradiente para essa avaliação.

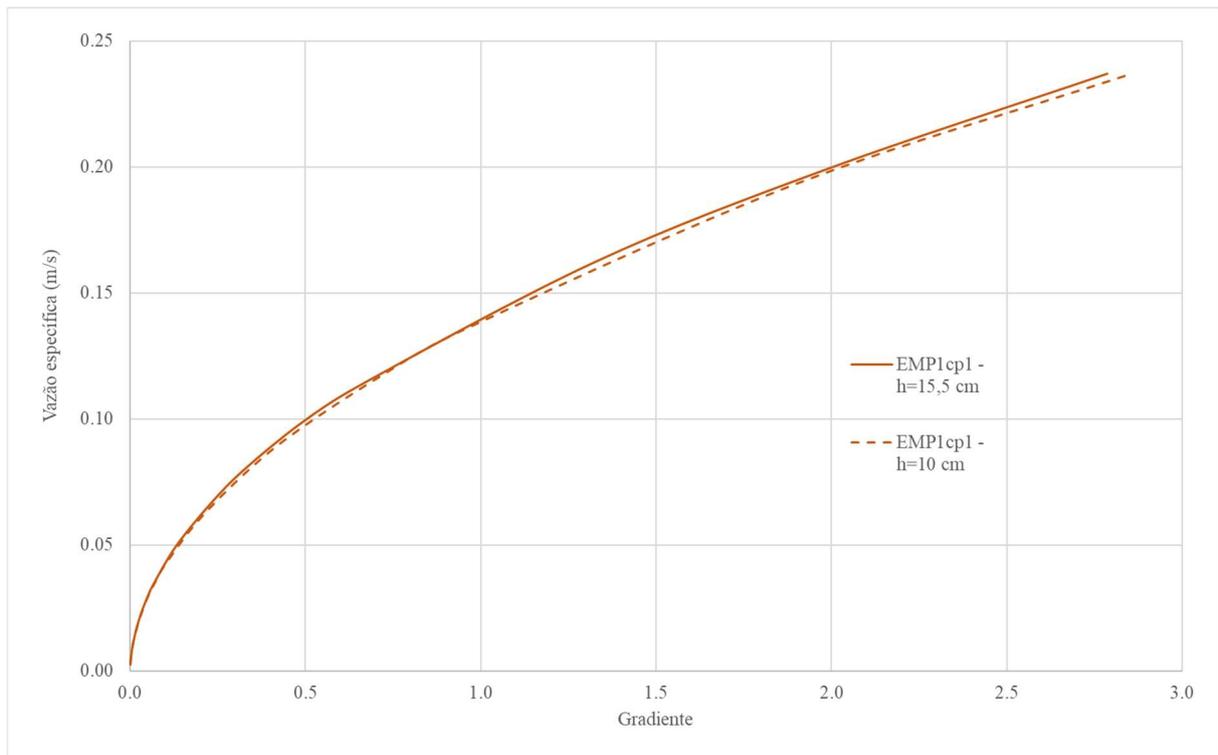


Figura 3.12: Corpo de prova – Definição de altura

Visto que o resultado na análise de sensibilidade foi positivo, foi definido que todos os corpos de prova extraídos teriam altura igual a dez centímetros. É importante ressaltar que o Empacotamento 1 apresenta curva granulométrica com a maior dimensão máxima (32 mm). Para os demais empacotamentos essa diferença tende a ser ainda menor.

Foi extraído um corpo de prova para cada um dos empacotamentos apresentados na Tabela 3.1, com exceção dos empacotamentos 1 e 2, onde foram extraídos três corpos de prova, a fim de avaliar a variabilidade dos resultados de fluxo para corpos de prova extraídos do mesmo pacote de partículas. Essa análise será apresentada no Item 4.1.2.

A posição do cilindro para extração dos corpos de prova foi definida aleatoriamente nos modelos 3D, buscando sempre a região mais central do empacotamento a fim de obter sempre as menores porosidades possíveis. Nos empacotamentos onde foram extraídos mais de um corpo de prova, a posição do cilindro foi definida de forma mais livre dentro da região do pacote de partículas cúbico. Na Tabela 3.2 estão apresentadas as características dos corpos de prova extraídos.

Tabela 3.2: Características dos corpos de prova extraídos

# Empacotamento	# Corpo de prova	Número de partículas	Porosidade (%)
1	1	350	46.26
	2	362	46.55
	3	359	46.41
2	1	583	43.47
	2	574	44.32
	3	576	43.83
3	1	351	45.61
4	1	863	50.28
5	1	1329	48.82
6	1	1251	50.97

3.3 MODELAGEM NUMÉRICA DO FLUXO

Toda a modelagem numérica do fluxo foi realizada utilizando *softwares* de dinâmica de fluidos computacional (CFD) pertencentes à ANSYS Inc, versão 2021. As modelagens foram realizadas seguindo o fluxograma dos *softwares*, em quatro principais fases: pré-processamento no *software* Space Claim; discretização do modelo utilizando o *software* Fluent Meshing; execução dos cálculos utilizando o *software* Fluent Solution e pós-processamento com extração dos resultados utilizando o *software* CFD-Post. Cada uma dessas fases será apresentada nos Itens 3.3.1 a 3.3.4.

3.3.1 SPACE CLAIM

A etapa inicial da modelagem numérica é a adequação do modelo para input no *software* de discretização. O processo de compatibilização foi realizado na plataforma CAD da ANSYS Inc., chamada Space Claim. Nessa plataforma, podem ser realizadas operações booleanas dos modelos tridimensionais, como união, interseção e subtração entre os sólidos, bem como o mapeamento de erros de sobreposição entre as estruturas sólidas contidas no modelo. Além disso, devem ser determinados todos os locais que serão utilizados como condições de contorno.

Os corpos de prova extraídos no Civil 3D não necessitaram de nenhuma operação para adequação da geometria, dado que a geometria já tinha sido obtida integralmente no *software* da etapa anterior. Portanto, a etapa de pré-processamento só foi utilizada para estabelecer as

condições de contorno e verificar os arquivos 3D com relação a possíveis erros de sobreposição de sólidos (partículas).

Todos os corpos de prova foram então compatibilizados e definidas condições de contorno de pressão, tanto na entrada como na saída, a fim de que seja estabelecido valor fixo de gradiente hidráulico médio. Todas as demais superfícies (partículas e paredes do cilindro) foram utilizadas como condições de contorno do tipo *no slip wall*, ou seja, são condições de contorno com velocidade tangencial nula.

3.3.2 DISCRETIZAÇÃO

A discretização do modelo foi realizada utilizando o próprio módulo de discretização do *software* ANSYS Fluent 2021. Nesse módulo, estão disponíveis duas alternativas para discretização do modelo: *Watertight geometry meshing* e *Fault tolerant meshing*. A primeira delas é direcionada para casos em que o fluido está confinado sem nenhuma abertura ou problema de interseção entre as estruturas componentes do modelo. A segunda alternativa é direcionada para casos em que podem ocorrer imperfeições geométricas e pequenas aberturas no modelo, servindo também como alternativa para correção desses problemas listados.

Todas as modelagens desenvolvidas nesse trabalho utilizam a opção *Fault tolerant meshing*. Isso se dá porque a aproximação das partículas nos empacotamentos gera espaços muito pequenos entre os grãos, várias ordens de grandeza inferiores ao tamanho médio das partículas. Esses espaços muitas vezes estão abaixo do nível de tolerância máximo para proximidade entre as faces de diferentes estruturas no *Watertight geometry meshing*. Adicionalmente, os corpos de prova possuem um número de partículas muito elevado, dificultando assim a correção individualizada de eventuais problemas de interseção que existam no modelo. Sendo assim, para malhas com grande número de nós, onde é necessária discretização bastante detalhada, o mais adequado é a utilização do *Fault tolerant meshing*.

Os elementos escolhidos são do tipo *poly-hexcore*, que são sugeridos pelo próprio *software* como a melhor alternativa para malhas extensas. Esse tipo de discretização utiliza mistura de elementos poliédricos com hexaédricos, resultando em um tipo de malha que entrega resultados precisos, mas com muito menos elementos, o que diminui drasticamente o tempo de processamento.

Foi realizada análise de sensibilidade para escolha do tipo de elementos entre os tipos poliédrico, tetraédrico e *poly-hexcore*. Comparativamente, os resultados do modelo com

discretização poliédrica e *poly-hexcore* foram basicamente iguais, sem diferenças significativas em nenhum dos parâmetros de controle utilizados (velocidade e pressão). Contudo, o tempo de processamento do modelo que utilizou elementos *poly-hexcore* foi cerca de três vezes menor. O modelo utilizando elementos tetraédricos se mostrou inviável em termos de processamento e não foi possível concluir os cálculos. Visto isso, foi mantida a recomendação para o tipo de elemento de malha apresentada no manual do *software*, difundido nas análises de dinâmica de fluidos computacional (ANSYS Inc., 2021).

As partículas não foram discretizadas em seu interior, mantendo somente as paredes externas como condições de contorno já apresentadas, a fim de evitar a necessidade de custo computacional adicional.

Na Figura 3.13 apresenta-se um exemplo de malha gerado para um dos corpos de prova utilizados. Na imagem, a coloração azul indica a matriz de vazios preenchida por fluido e a coloração cinza indica a matriz sólida das partículas. A Tabela 3.3 apresenta um resumo das malhas geradas.

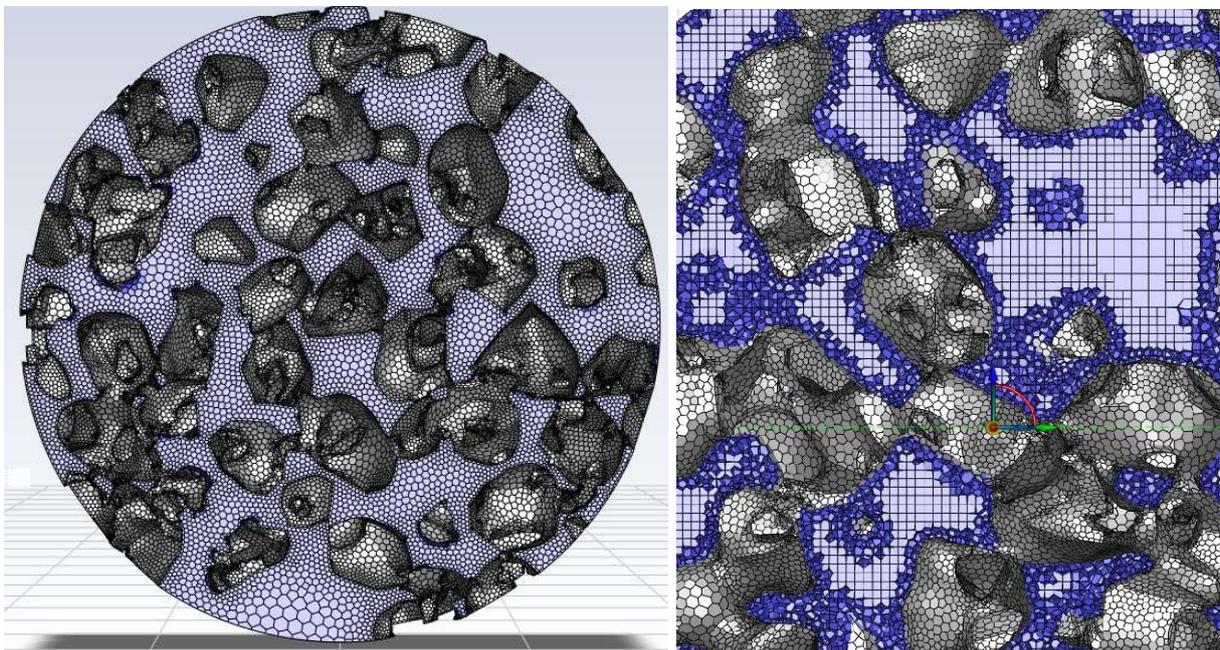


Figura 3.13: Malha do CP1 do Empacotamento 3: vista geral da região de entrada (esquerda) e zoom em um corte que passa pelo centro (direita).

Tabela 3.3: Quantidade de nós e elementos das malhas obtidas

# Empacotamento	# Corpo de prova	Número de nós	Número de elementos
1	1	1,979,661	426,004
	2	3,245,230	728,157
	3	3,196,336	715,387
2	1	3,802,339	832,320
	2	3,806,219	838,096
	3	3,196,336	715,387
3	1	3,210,060	727,624
4	1	6,146,351	1,383,983
5	1	6,819,779	1,456,709
6	1	7,222,670	1,535,004

3.3.3 CÁLCULOS

Os cálculos do fluxo através dos corpos de prova foram executados utilizando o *software* ANSYS *Fluent*, possivelmente o *software* de dinâmica de fluidos computacional (CFD) de maior abrangência mundial.

O *software* utiliza o Método dos Volumes Finitos (FVM). Esse método é o mais comumente utilizado na dinâmica de fluidos computacional, com inúmeras possibilidades de modelagens sem a necessidade de nenhuma simplificação das equações de movimento apresentadas no Item 2.3.

O computador utilizado foi diferente do utilizado para as demais atividades apresentadas aqui e tem as seguintes especificações: Intel Core i9-9900K (3.6 GHz) e 32 Gb de memória RAM. Foram gerados cerca de 180 Gb de dados nas análises executadas.

3.3.3.1 CONDIÇÕES DE CONTORNO

Nas análises realizadas foram adotadas condições de contorno de pressão, tanto na entrada quanto na saída dos modelos, fazendo que o gradiente médio seja estabelecido para cada caso executado.

Foram executados quinze casos para cada corpo de prova, alterando as pressões de entrada e mantendo a pressão de saída sempre nula (pressão atmosférica). Foram executadas ao todo 165 casos. Buscou-se a concentração de análises na região de transição entre o regime laminar e o

regime turbulento. Na Tabela 3.4 apresentam-se os valores de diferença de pressão utilizados para cada caso.

Tabela 3.4: Casos de análise

Caso	ΔP aplicado (Pa)
1	1
2	2
3	5
4	10
5	25
6	50
7	75
8	100
9	200
10	350
11	500
12	750
13	1000
14	2000
15	3000

3.3.3.2 PREMISSAS DE CÁLCULO

O fluido que ocupa a matriz de vazios em todas as análises é a água, com os corpos de prova totalmente saturados. A água para o nível de tensões utilizadas pode ser considerada incompressível e com densidade constante. O fluxo foi adotado como isotérmico, sem a alteração de temperatura. Dessa forma, não há necessidade da solução da equação da conservação da energia. Os parâmetros utilizados para a água são originados do próprio banco de dados do programa e estão listados na Tabela 3.5.

Tabela 3.5: Valores dos parâmetros utilizados

Densidade (kg/m ³)	998.2
Viscosidade dinâmica (kg/m.s)	0.001003

As análises foram executadas em regime permanente de escoamento, sem a consideração de aceleração da gravidade.

O modelo foi considerado como finalizado quando os valores dos residuais de velocidade, continuidade e dos valores k e ω do modelo de turbulência atingiram valores inferiores a 10^{-4} , como sugerido em ANSYS Inc. (2021).

3.3.3.3 MODELO DE TURBULÊNCIA

A turbulência é uma instabilidade espontânea do fluxo, onde as quantidades assumem um comportamento estatístico e caótico. A não-linearidade gera resultados que não são únicos, podendo resultar em diferentes configurações de fluxo para as mesmas condições de contorno (Hirsch, 2007).

Quando o regime do fluxo pode ser turbulento, é necessária a introdução de um modelo de turbulência para cálculo das perdas de energia cinética ocasionadas pela turbulência, bem como para estabelecimento das linhas de corrente. Autores como Gorman *et al.* (2021) e Wilcox (1994) apresentam discussão detalhada dos principais modelos de turbulência e suas equações.

Nesse trabalho, foi utilizado o Modelo $k-\omega$ SST, um dos modelos de turbulência mais difundidos nas análises CFD e indicado como o modelo que melhor simula turbulências pra velocidades baixas e próximo às paredes sólidas, como mostrado por Mishra e Aharwal (2018) e ANSYS Inc. (2021).

É possível escolher também modelo laminar contido no *software*, mas sua aplicação é sugerida quando se tem a certeza de que o regime simulado é de fato laminar. Quando há dúvida, especialmente nas condições de pressão onde ocorre a transição entre laminar e turbulento, é sugerida a utilização do modelo de turbulência para todos os valores de pressão. Nesse caso, o Modelo $k-\omega$ SST também é adequado para essas situações, como apresentado em Gorman *et al.* (2021). Alguns dos outros modelos turbulência não se adequam ao regime laminar, gerando resultados bastante discrepantes.

Foi realizada então uma conferência dos resultados, utilizando Modelo $k-\omega$ SST e o Modelo Laminar, e esses são aderentes nos casos onde a diferença de pressão entre a entrada e a saída é pequena. Ou seja, o Modelo $k-\omega$ SST pode ser utilizado em qualquer um dos regimes sem gerar resultados errôneos.

Essa verificação foi realizada para seis corpos de prova, porém a Figura 3.14 apresenta o resultado apenas para o Corpo de Prova #1 do Empacotamento #1 a fim de facilitar a

visualização. Observa-se que abaixo do valor de diferença de pressão de 50 Pa, os modelos retornam os mesmos resultados de vazão específica.

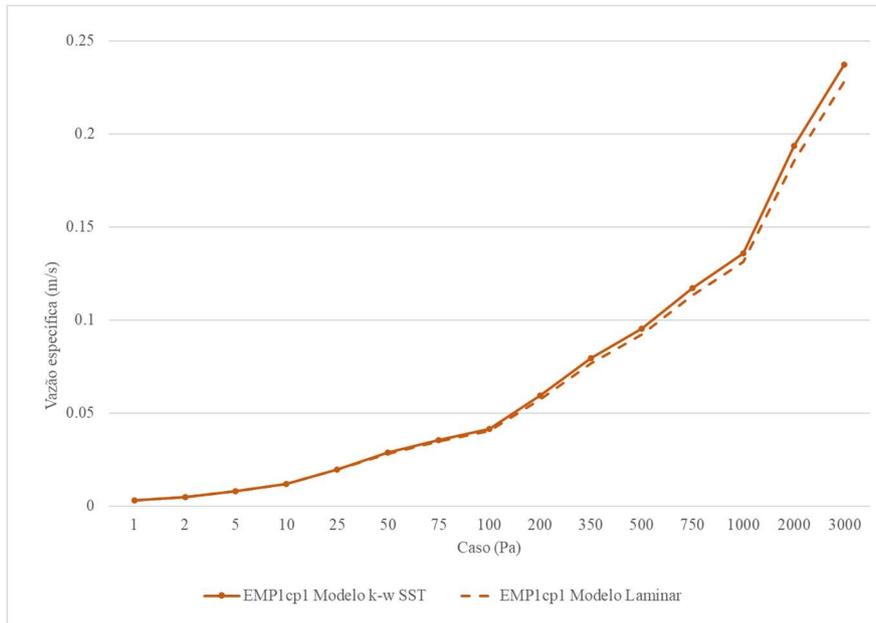


Figura 3.14: Comparação entre os modelos de turbulência (EMP1-cp1) – Modelo $k-\omega$ SST e Modelo Laminar

3.3.4 PÓS-PROCESSAMENTO

É muito usual a utilização de *softwares* de pós-processamento em análises de dinâmica de fluidos computacional (CFD), visto que os resultados podem ser tratados de forma visual, com múltiplas possibilidades de camadas gráficas.

Todos os resultados das análises que serão apresentadas no Item 4 foram pós-processados utilizando o *software* CFD Post, também da ANSYS Inc., e Microsoft Office Excel para tratamento dos dados e elaboração dos gráficos.

3.4 ENSAIOS EXPERIMENTAIS

Essa seção apresenta a metodologia utilizada para obtenção de resultados experimentais complementares para validação dos resultados numéricos.

3.4.1 OBTENÇÃO DO MATERIAL FÍSICO

O Empacotamento 4 foi escolhido para a análise experimental, pois a curva granulométrica desse material possibilita a obtenção de material físico real com curva muito semelhante à virtual, viabilizando a comparação numérico-experimental.

O material obtido da pedra Contagem (DF), que foi utilizado como base para construção do repositório virtual de partículas, foi então peneirado e separado utilizando as peneiras de malha 3/8", 7/16", 1/2", 5/8" e 3/4". Em seguida, foram calculados os pesos proporcionais dos materiais retidos em cada uma das peneiras utilizando a curva virtual do referido material. O material foi então misturado com agitador mecânico. A Figura 3.15 apresenta a curva granulométrica resultante e a Figura 3.16 apresenta o material misturado, com régua como escala para referência visual.

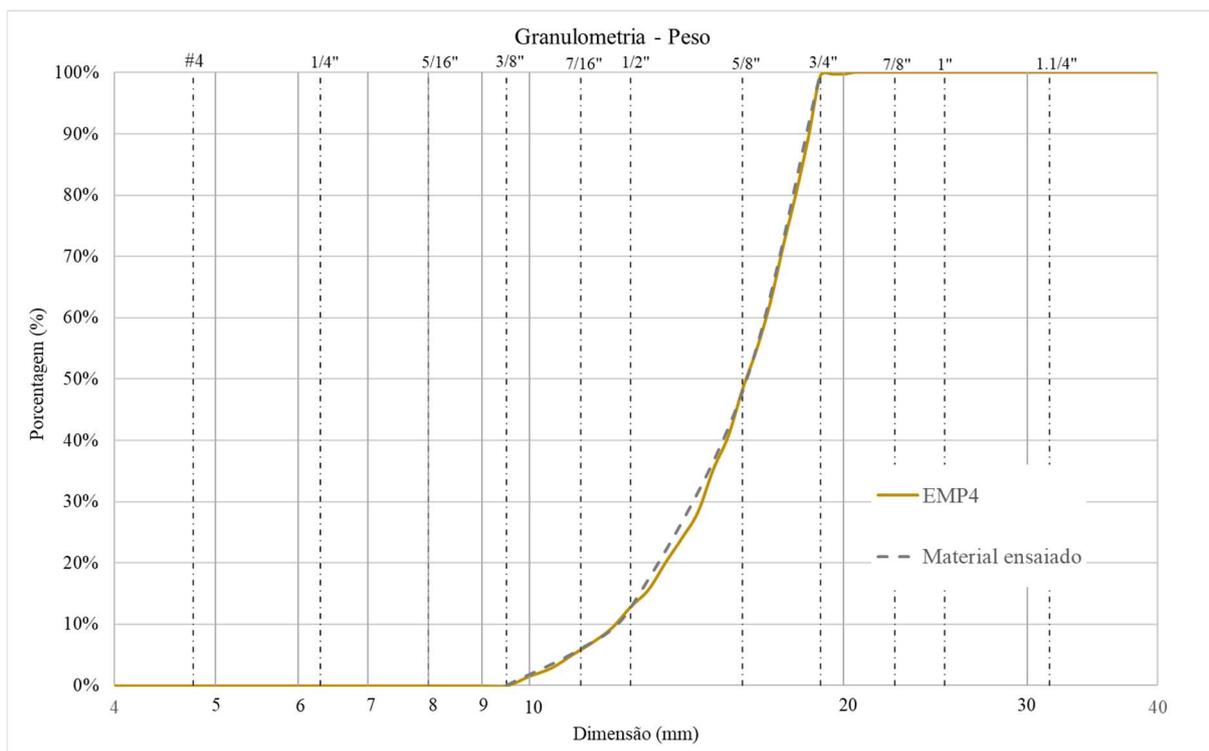


Figura 3.15: Curva granulométrica – Empacotamento 4 – Material virtual e físico.



Figura 3.16: Material com curva granulométrica equivalente ao Empacotamento 4

Após a obtenção do material a ser ensaiado, foi levantada a porosidade do material utilizando o permeâmetro de 15,24 cm (6”) da Soloteste por meio de pesagens do permeâmetro vazio, com material granular e com material granular e água. Dado que os valores de porosidade obtidos para os corpos de prova virtuais ficaram próximos ao limite físico dessa grandeza, o material físico foi colocado cuidadosamente no interior do permeâmetro a fim de minimizar a compactação do meio poroso.

O ensaio de porosidade foi realizado com três repetições, gerando porosidade média de 47,21%. Esse valor representa uma diferença de aproximadamente 6% do valor obtido para o corpo de prova virtual (50,28%).

A Figura 3.17 apresenta o material no interior do permeâmetro, em processo de saturação para ensaio.



Figura 3.17: Permeâmetro com material ensaiado

3.4.2 ENSAIOS DE FLUXO

Após a caracterização do material, prosseguiu-se com a realização dos ensaios de fluxo. Inicialmente, optou-se pelo permeâmetro de carga constante por ser equipamento mais convencional para os ensaios de escoamento em meio poroso. Contudo, após as primeiras tentativas de ensaios, foi observado que a capacidade de vazão máxima possível para o equipamento era muito inferior ao obtido nas análises do Empacotamento 4 para um dado gradiente. Além disso, mesmo quando o reservatório foi colocado na altura mais elevada possível dentro do laboratório, a queda de pressão no corpo de prova foi muito pequena, o que limitaria consideravelmente a faixa de valores obtidos.

Sendo assim, concluiu-se que o equipamento nessas condições não é adequado para modelagem de materiais granulares muito permeáveis e que seria necessário alteração da metodologia de ensaio.

Como alternativa ao problema levantado, foi utilizado um canal hidráulico para simulações de escoamento a fim de modelar ensaio semelhante ao ensaio de permeabilidade, mas ampliando os valores de resultados possíveis. O modelo do canal utilizado é XL06.3, produzido pela

Labtrix (Figura 3.18). Suas dimensões são: 3,0 m de comprimento e 0,30 m de largura, com paredes laterais em vidro temperado em peça única de 10 mm de espessura, 3,0 m de comprimento e 350 mm de altura. O fundo é construído com material polimérico de baixa rugosidade com espessura de 15 mm (LABTRIX, 2022).



Figura 3.18– Canal de transporte de sedimentos (LABTRIX, 2022)

O material granular foi colocado no interior do canal cuidadosamente para minimizar a compactação, e sustentado nas extremidades por tela de plástico para que os taludes de montante e jusante fossem verticais. O espaçamento entre as telas foi de 15 cm. Foram então descartados os primeiros e os últimos 2,5 cm de cada lado do corpo de prova e marcadas seções de controle de altura da freática dentro do material. Essas seções foram posicionadas com 10 cm de distância entre si, no interior do corpo de prova, a fim de evitar instabilidades de leituras próximas à entrada e saída.

As medições de altura da freática nas seções de controle foram realizadas com régua milimétrica, estabelecendo assim o gradiente hidráulico do escoamento. Foram então realizadas cinco leituras de gradiente para cinco diferentes valores de vazão, regulados pelo próprio canal. O fundo do canal foi mantido na horizontal, sem nenhuma inclinação. Na Figura 3.19 apresenta-se o ensaio de fluxo em andamento.



Figura 3.19: Ensaio de fluxo em meio poroso granular

4 RESULTADOS

Os resultados obtidos nas análises de fluxo em meios porosos virtuais serão apresentados na presente seção. Inicialmente, serão apresentadas as dimensões características dos pacotes de partículas construídos, a fim de facilitar a avaliação da influência da granulometria nos parâmetros resultantes das análises.

Na sequência do capítulo, será apresentada análise de sensibilidade dos resultados obtidos para três corpos de prova extraídos de cada um dos Empacotamentos 1 e 2. Essa análise objetiva avaliar a dispersão dos resultados obtidos para corpos de prova extraídos do mesmo empacotamento.

As principais grandezas do fluxo avaliadas nessa seção serão a velocidade e a pressão. Dado que a diferença de pressão entre a entrada e a saída é determinada como condição de contorno das análises, obtém-se as velocidades de fluxo como consequência, juntamente com a distribuição de pressão em todos os pontos da matriz de vazios dos corpos de prova.

A Seção 4.4 apresenta discussão sobre a tortuosidade nas análises. Essa grandeza relaciona o comprimento do caminho real que o fluido percorre dentro do meio poroso com o comprimento em linha reta entre o começo e fim do corpo de prova.

A discussão apresentada na Seção 4.5 foca nos regimes de escoamento a transição entre os regimes laminar e turbulento. Serão também discutidos na Seção 4.6 os principais modelos empíricos e teóricos que relacionam gradiente de pressão com a velocidade no fluido.

No Item 4.7 apresenta-se uma análise da influência da forma das partículas nas variáveis, utilizando os resultados obtidos para o Empacotamento 3 e gerando outro empacotamento com a mesma distribuição granulométrica, mas com partículas de formato esférico. Os resultados experimentais para validação dos modelos numéricos estão dispostos no último item do capítulo.

É importante ressaltar que o volume de dados e figuras é muito grande. Por isso, todas as imagens de resultados visuais dos corpos de prova são do caso 100 Pa de cada empacotamento. Adicionalmente, a partir da Seção 4.3 serão apresentados os resultados de somente um corpo de prova para cada empacotamento e os corpos de prova serão nomeados com a sigla EMP juntamente com o número do pacote de partículas correspondente, para simplificação na apresentação dos dados. Todos os gráficos apresentados apresentam coloração das linhas dos

gráficos em conformidade com as curvas granulométricas apresentadas nas Figura 3.9 e Figura 3.10.

4.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS

Nesse item, serão apresentadas as considerações iniciais que servirão de base para a análise dos resultados apresentados no restante do capítulo. Elas tratam das características dimensionais dos empacotamentos e da variabilidade dos resultados em um mesmo empacotamento.

4.1.1 DIMENSÕES CARACTERÍSTICAS DOS EMPACOTAMENTOS

A partir das curvas apresentadas nas Figura 3.9 e Figura 3.10 e dos dados individuais das partículas nos empacotamentos, foram extraídas as dimensões características, mais comumente utilizadas nos modelos de fluxo, tanto teóricos como empíricos. Na Tabela 4.1 apresentam-se esses valores e será utilizada como guia para análise crítica dos resultados das análises futuras.

Tabela 4.1: Dimensões características dos empacotamentos

# EMP	Dimensão média (mm)	D ₅₀ (mm)	D ₁₀ (mm)	D ₆₀ (mm)	C _u	D _{min} (mm)	D _{max} (mm)	$\frac{D_{max}}{D_{min}}$	Esfericidade média
1	20.0	22.9	16.2	24.8	1.53	12.5	32	2.56	0.875
2	14.7	22.6	12.6	24.2	1.92	6.35	32	5.04	0.876
3	22.0	22.2	19.6	22.8	1.16	19	25	1.32	0.884
4	14.3	16.2	12.1	16.9	1.40	9.5	19	2.00	0.857
5	11.9	15.8	10.8	16.7	1.55	4.8	19	3.96	0.848
6	12.2	13.0	10.6	13.6	1.29	9.5	15	1.58	0.840

Os seis empacotamentos se enquadram em granulometrias que variam entre brita 0 e brita 3, com dimensões variando entre 4,8 e 32 mm. Observa-se mais uma vez que as dimensões apresentadas aqui são as dimensões intermediárias das partículas (Figura 3.7). A esfericidade indica a proximidade da forma das partículas com uma esfera e tem fórmula:

$$\phi = \frac{\pi \cdot (V_p \cdot \frac{6}{\pi})^{\frac{2}{3}}}{A_p} \quad (4.1)$$

onde ϕ é a esfericidade que varia de 0 a 1, V_p é o volume da partícula e A_p é a sua área superficial.

A uniformidade das curvas pode ser avaliada por meio do coeficiente de uniformidade (C_u), que é a relação entre o D_{60} e D_{10} , e da relação entre o diâmetro máximo e diâmetro mínimo.

É interessante observar que os valores de D_{50} , usualmente utilizados como diâmetro médio em vários modelos, são bastante discrepantes das médias das dimensões intermediárias das partículas. Tal fato é tanto mais relevante quanto menos uniforme for a curva. Isso se dá pela diferença de obtenção dessas dimensões: a dimensão média utiliza as dimensões individuais das partículas para cálculo, enquanto o D_{50} indica a dimensão correspondente à metade do peso total da amostra, assim como tratado no Item 3.1.3.

O objetivo da escolha das distribuições granulométricas em questão foi proporcionar a variação de alguns parâmetros enquanto outros são mantidos, aumentando assim o espectro de comparação entre os resultados, mesmo adotando faixas granulométricas mais uniformes quando comparadas com alguns tipos de solo ou transições.

4.1.2 CORPOS DE PROVA EM UM MESMO EMPACOTAMENTO

Inicialmente, foi idealizada a extração de três corpos de prova para cada empacotamento. Contudo, após os primeiros resultados obtidos, observou-se que a variação entre os corpos de prova extraídos do mesmo empacotamento era muito pequena.

A vazão específica (q) apresenta variação de menos de 2% entre todos os casos do Empacotamento 1. Foi então realizada a mesma análise para o Empacotamento 2, a fim de confirmar esse entendimento. Os resultados continuaram muito aderentes entre os três corpos de prova extraídos desse empacotamento, com variação menor que 4%. É importante a observação de que o Empacotamento 2 tem o maior valor de C_u e da relação entre D_{\max} e D_{\min} , sendo potencialmente o pacote de partículas que geraria corpos de prova mais diferentes entre si.

Os gráficos de vazão específica contra gradiente para os três corpos de prova dos empacotamentos 1 e 2 estão apresentados nas Figura 4.1 e Figura 4.2, respectivamente.

Dado que os resultados não apresentaram variações significativas entre os corpos de prova, optou-se por maximizar a quantidade de empacotamentos, somente com um corpo de prova central em cada. Portanto, nas Seções 4.2 a 4.6 serão apresentados os resultados das análises para somente um corpo de prova por empacotamento.

Os corpos de prova escolhidos para os empacotamentos 2 e 3 foram os que resultaram em valores intermediários apresentados nas Figura 4.1 e Figura 4.2: o Corpo de Prova 3 para o Empacotamento 1 e o Corpo de Prova 2 para o Empacotamento 2.

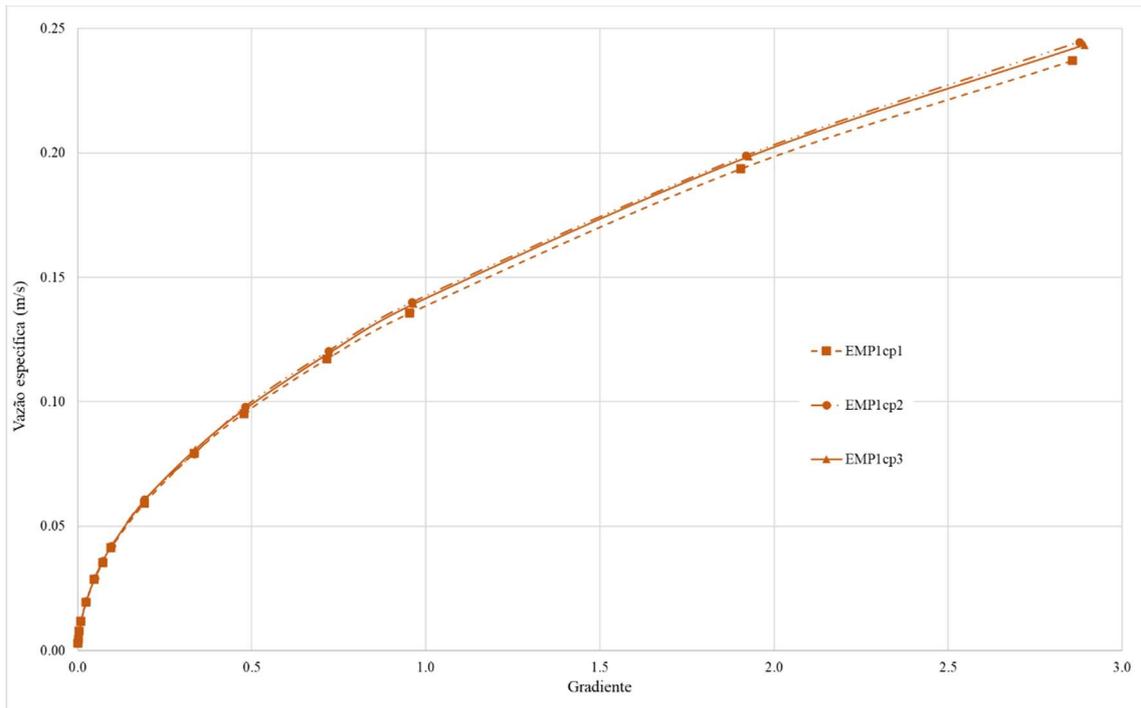


Figura 4.1: Resultados de vazão específica para os três corpos de prova do Empacotamento 1

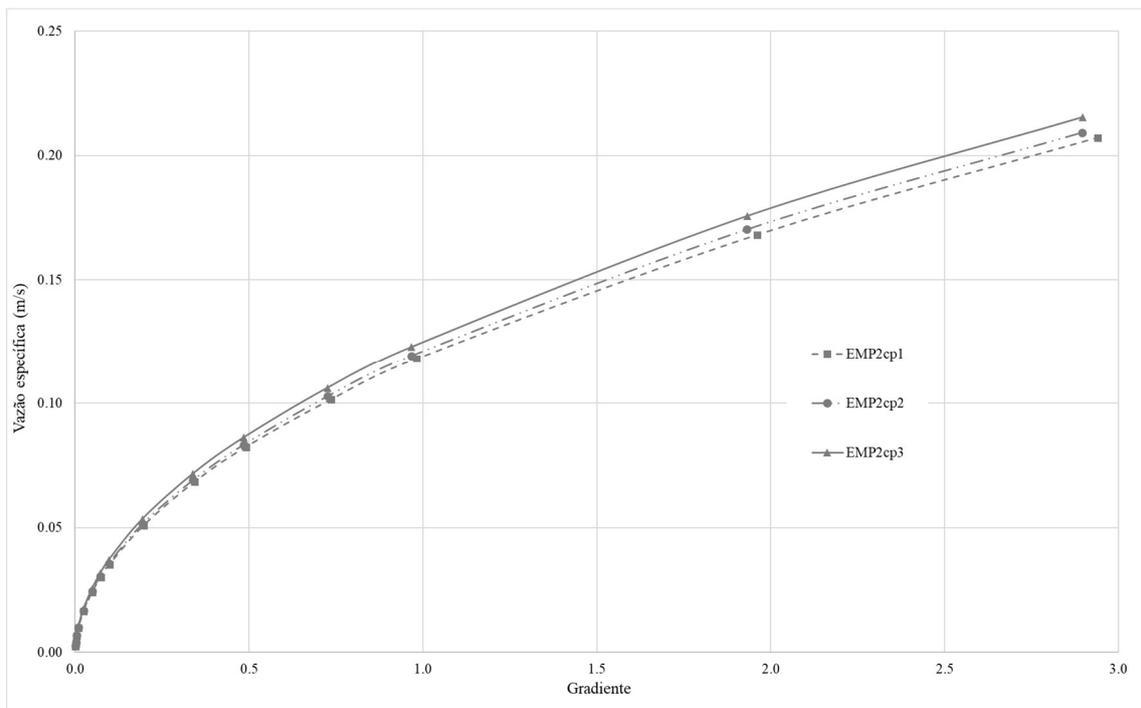


Figura 4.2: Resultados de vazão específica para os três corpos de prova do Empacotamento 2

4.2 LINHAS DE CORRENTE (*STREAMLINES*)

As linhas de corrente ou *streamlines* são linhas imaginárias que seguem a direção instantânea do fluido. Elas são componentes fundamentais da dinâmica de fluidos computacional (CFD) e potencializam a análise visual, que é vantagem chave das análises CFD para as diversas áreas da engenharia. Por meio da visualização das *streamlines* é possível observar padrões como recirculação de fluido, regiões de turbulência, e separação do fluxo.

Nas simulações de fluxo em meios porosos, as *streamlines* favorecem a análise qualitativa de distribuições de velocidade no interior da matriz de vazios e fornece o comprimento real que o fluido percorre através do meio poroso. Esse comprimento pode ser usado para avaliar o quanto o meio fornece resistência à passagem do fluxo com o cálculo da tortuosidade.

A Figura 4.3 apresenta as *streamlines* por dentro do corpo de prova do Empacotamento 6. Nessa figura foi inserida transparência nas partículas para facilitar a visualização. As linhas de corrente foram mantidas em uma única cor pelo mesmo motivo.

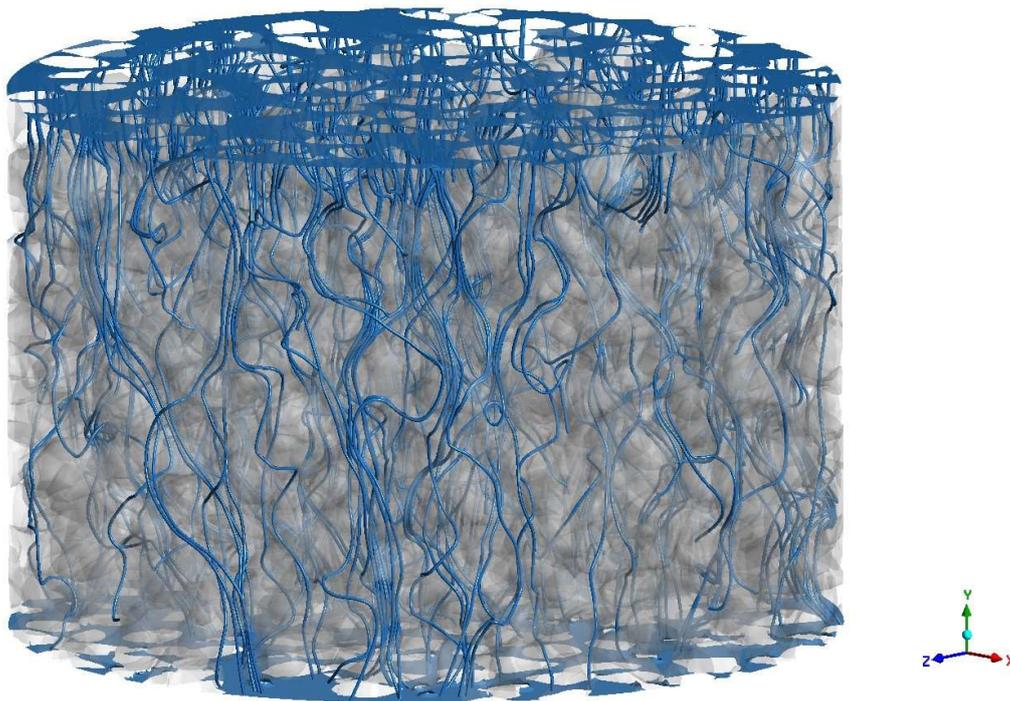


Figura 4.3: *Streamlines* – Empacotamento 6 (partículas com transparência para facilitar a visualização das linhas)

As *streamlines* foram então extraídas para os seis empacotamentos e estão apresentadas na Figura 4.4, agora com as cores correspondentes às velocidades nas linhas e excluída a representação das partículas. Foram plotadas 350 linhas de corrente para cada corpo de prova.

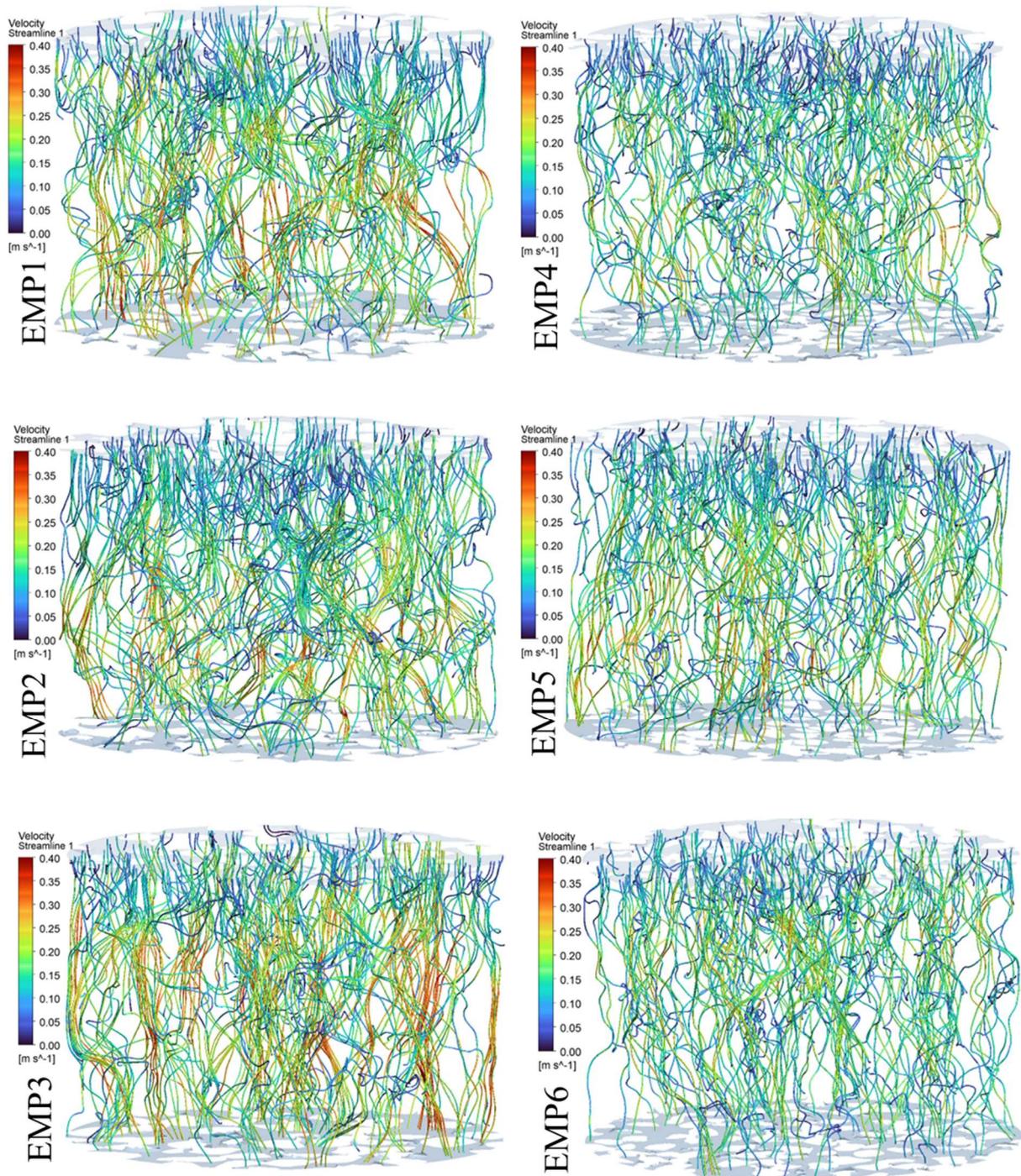


Figura 4.4: *Streamlines* (n=350) – Caso 100 Pa

É possível observar na Figura 4.4 que os resultados de velocidade estão claramente mais bem distribuídos nos empacotamentos mais finos (EMP4, 5 e 6). Não há regiões de grande concentração de linhas, diferentemente do que acontece nos outros três. Essas concentrações são especialmente evidentes na análise EMP3, onde é possível observar várias regiões com

adensamento de linhas e de velocidades mais elevadas. Tal condição condiz com o esperado, já que o Empacotamento 3 apresenta granulometria com maiores diâmetros, em média.

É interessante observar que os corpos de prova dos três primeiros empacotamentos apresentam porosidade inferior aos três últimos empacotamentos, o que descarta a percepção de que essa concentração aconteceria em meios porosos com maior predominância de vazios. Dentro dessa faixa de variação de porosidade dos corpos de prova (43,5 – 51%), o que aparenta ter maior influência na concentração de fluxo e velocidades é mesmo a fração de material de menores dimensões, o que potencialmente torna os canais de fluxo mais equidimensionais.

Mesmo que os empacotamentos 1 e 2 apresentem dimensões máximas maiores do que o Empacotamento 3, a concentração de fluxo ainda é maior neste último. Essa observação sugere que as granulometrias mais grossas e mais uniformes geram morfologias de vazios com canais de maiores dimensões, o que favorece a concentração do fluxo e o aumento das velocidades de escoamento.

É possível perceber em todas as análises linhas de corrente que apresentam vórtices localizados e que não chegam até a parte inferior do modelo. Tal fato indica que as análises apresentam pequenas turbulências no fluido para a queda de pressão de 100 Pa, o que significa gradiente de pressão de aproximadamente 0,1.

4.3 DISTRIBUIÇÃO DE VELOCIDADES E PRESSÃO

A presente seção apresenta a análise do comportamento dos valores de pressão e velocidade no fluido que percola pela matriz de vazios dos corpos de prova. É importante observar que os modelos mais usuais de fluxo em meios porosos consideram a distribuição desses parâmetros ao longo do meio poroso como valores médios. Porém, os resultados apresentados nessa seção mostram que essas grandezas podem assumir valores locais muito diferentes dos médios, visto que são diretamente dependentes da morfologia dos canais de fluxo dos meios porosos.

Considerando uma mesma seção transversal que atravessa o corpo de prova, podem ocorrer valores muito superiores e inferiores à média. Além disso, os resultados que serão apresentados aqui mostram que a dispersão dos valores das variáveis pode ser bastante afetada quando as condições de contorno são alteradas.

4.3.1 PRESSÕES

Na Figura 4.5 e Figura 4.6 apresentam-se os resultados de pressão ao longo dos corpos de prova e da seção longitudinal que passa pelo centro dos corpos de prova.

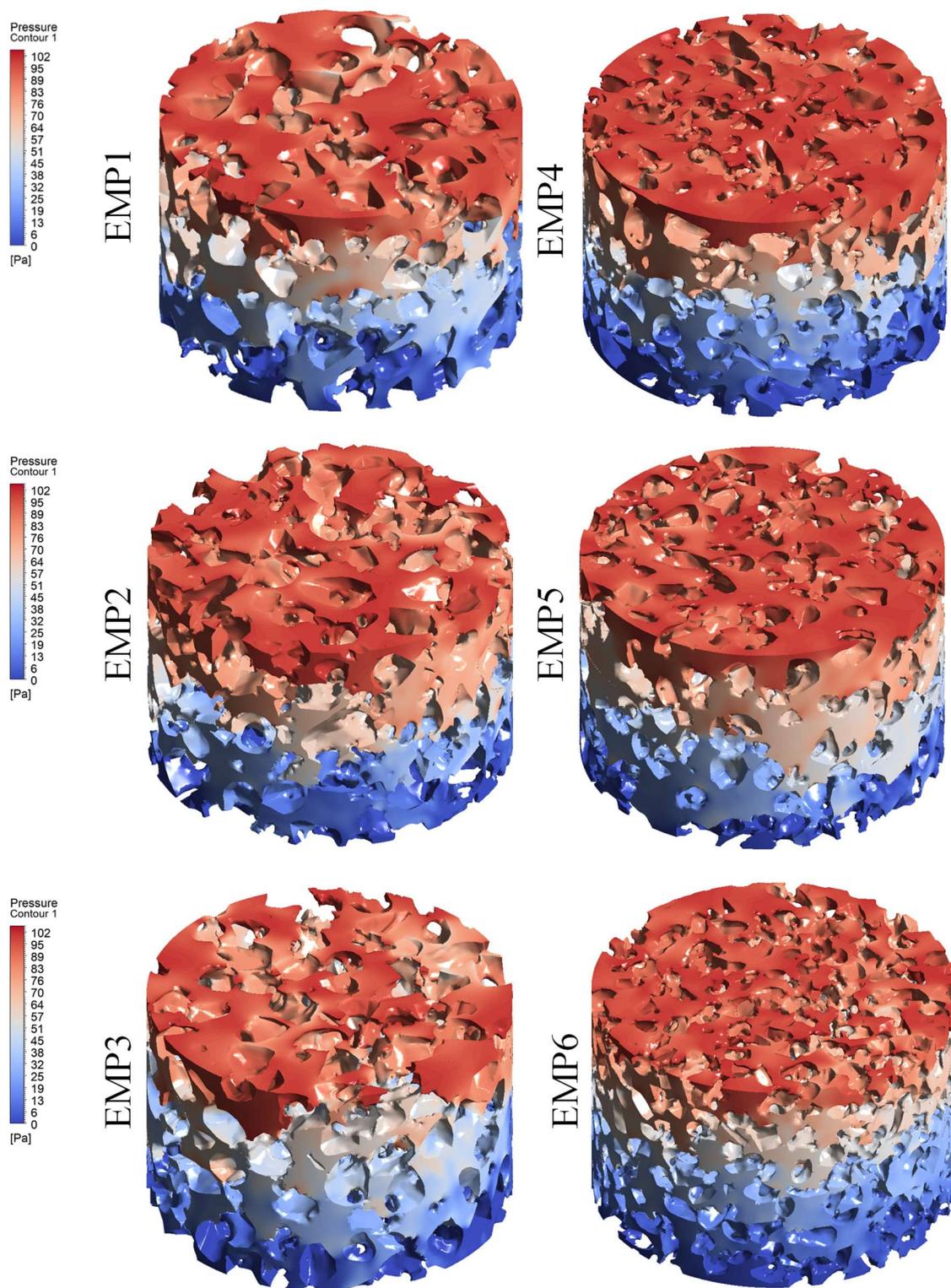


Figura 4.5: Distribuição de pressão nos corpos de prova – Caso 100 Pa

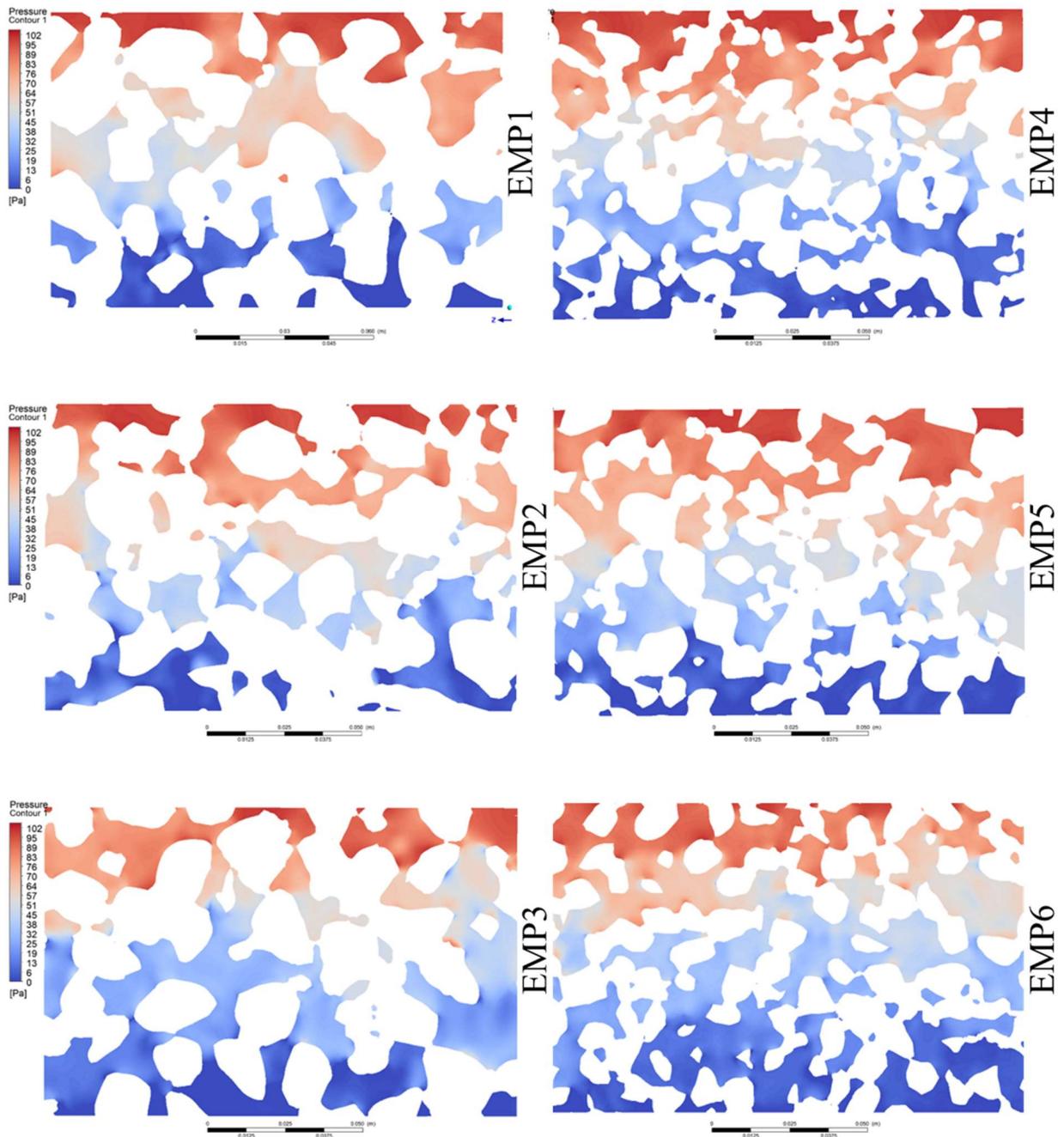


Figura 4.6: Distribuição de pressão em plano central dos corpos de prova – Caso 100 Pa

É importante observar que podem ocorrer pequenas variações nas pressões de entrada, pois a condição de contorno imposta na superfície de entrada é um valor médio a ser atingido pelo *software*. Nos exemplos apresentados para os casos em que foi aplicada pressão de 100 Pa, podem ocorrer pressões ligeiramente diferentes desse valor. Para evitar qualquer tipo de imprecisão, os gradientes de pressão foram calculados com os valores médios das faces de entrada e saída obtidos após as análises concluídas. Portanto, todos os gradientes apresentados

no trabalho são também valores médios entre entrada e saída. Assim como para as pressões, os valores dos gradientes locais podem atingir níveis muito superiores à média. Na Tabela 4.2 estão apresentados os valores obtidos de pressões e gradientes hidráulicos médios.

Tabela 4.2: Valores de ΔP e gradientes hidráulicos resultantes

Caso (Pa)	EMP1		EMP2		EMP3		EMP4		EMP5		EMP6	
	ΔP resultante (Pa)	i										
1	1.0	0.001	1.0	0.001	1.0	0.001	1.0	0.001	1.0	0.001	1.0	0.001
2	1.9	0.002	2.0	0.002	1.9	0.002	2.0	0.002	2.0	0.002	2.0	0.002
5	4.8	0.005	4.8	0.005	4.8	0.005	4.9	0.005	4.9	0.005	4.9	0.005
10	9.6	0.010	9.7	0.010	9.6	0.010	9.8	0.010	9.8	0.010	9.7	0.010
25	23.9	0.024	24.0	0.024	23.7	0.024	24.3	0.025	24.4	0.025	24.1	0.025
50	47.7	0.049	47.8	0.049	47.2	0.048	48.5	0.049	48.7	0.050	48.0	0.049
75	71.5	0.073	71.6	0.073	70.6	0.072	72.6	0.074	73.0	0.074	71.9	0.073
100	95.2	0.097	95.4	0.097	94.3	0.096	96.7	0.099	97.3	0.099	95.7	0.098
200	189.9	0.194	190.4	0.194	188.1	0.192	193.1	0.197	194.0	0.198	191.0	0.195
350	332.0	0.339	332.6	0.339	327.4	0.334	337.4	0.344	339.1	0.346	333.7	0.340
500	473.9	0.483	474.8	0.484	467.0	0.476	481.7	0.491	484.1	0.494	476.2	0.486
750	710.5	0.725	711.7	0.726	700.0	0.714	722.1	0.736	725.7	0.740	713.7	0.728
1000	946.5	0.965	948.2	0.967	932.9	0.951	962.6	0.982	967.2	0.986	951.2	0.970
2000	1890.9	1.928	1894.2	1.932	1862.2	1.899	1923.7	1.962	1933.3	1.971	1899.7	1.937
3000	2836.0	2.892	2840.0	2.896	2793.1	2.848	2884.6	2.942	2900.1	2.957	2848.1	2.904

Observando os resultados qualitativos obtidos do pós-processamento, observa-se que o padrão de transição entre as cores é mais uniforme nos três últimos empacotamentos, apesar de não haver diferença visual drástica. Quando se compara o lado esquerdo da Figura 4.6 com o lado direito, é possível observar que em uma mesma altura “y” em cada corpo de prova, o espectro de cor é menor, indicando que a dispersão em torno da média em seções transversais é também menor. Contudo, as imagens necessitam de complementação com valores quantitativos, pois a sensibilidade nessa análise qualitativa é pequena, diferentemente do que acontece com as *streamlines*.

Adicionalmente, busca-se com a análise quantitativa verificar a distribuição das pressões nas diferentes condições de contorno aplicadas. Observa-se que os modelos são discretizados com um número muito grande de nós, e seria inviável trabalhar com esse imenso volume de dados. Visto isso, foram utilizados os valores de pressão obtidos nas *streamlines* para avaliar a dispersão das pressões em torno da média. Para tal, foram utilizadas 500 linhas de corrente em cada modelo, resultando cerca de 55 mil pontos de pressão para cada um dos 15 casos de pressão.

Os valores de pressão foram plotados contra os valores de geométricos de “y” dos corpos de prova, que iniciam em 0,1 m (entrada do modelo) e finalizam em 0,0 m (saída). Foram então plotadas as linhas de tendência lineares e obtidos os valores de R^2 como medida da dispersão dos valores em torno da média. Na Figura 4.7 estão apresentados esses resultados de pressão obtidos nas *streamlines* para os diferentes casos no Empacotamento 6.

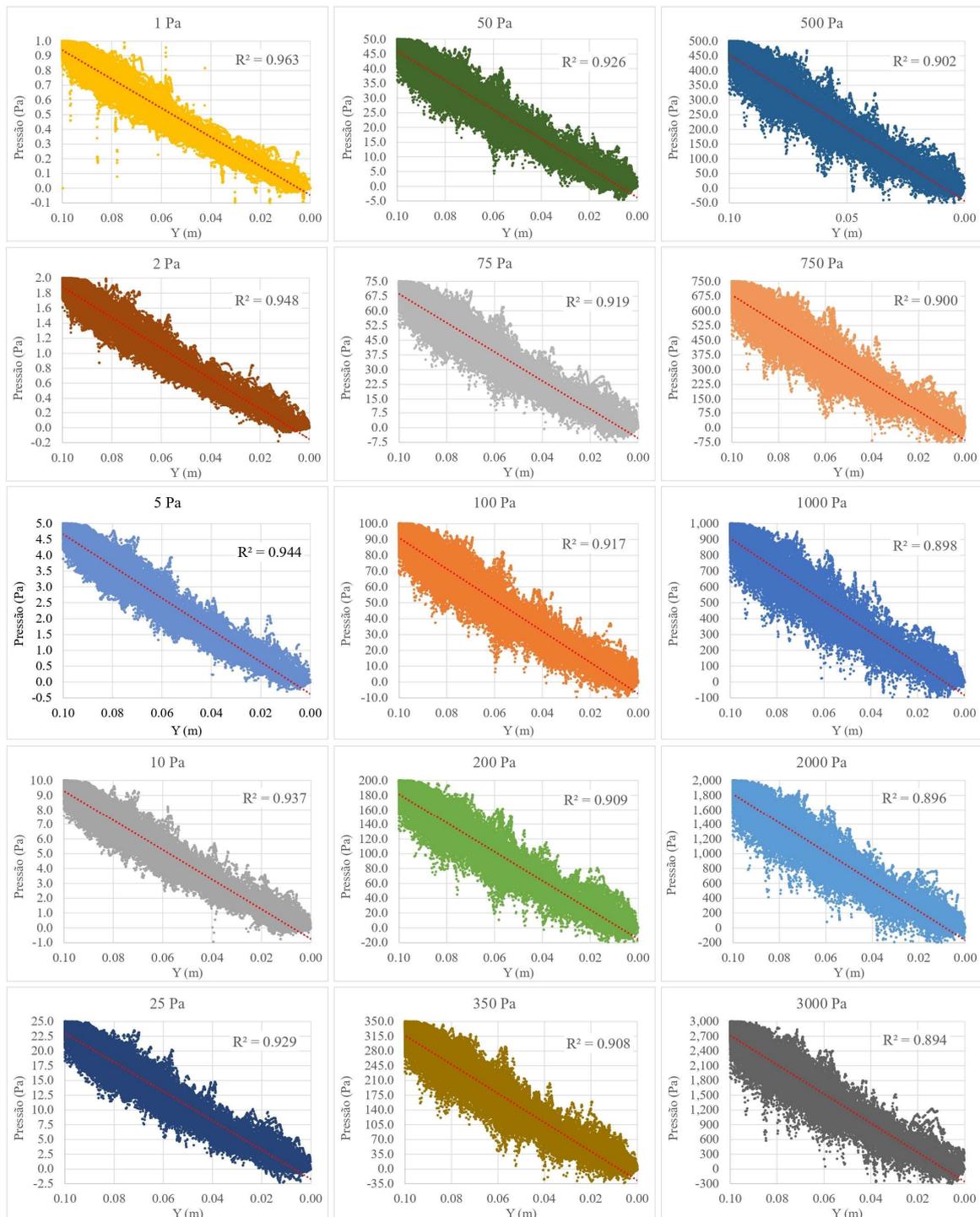


Figura 4.7: Dispersão das pressões obtidas nas *streamlines* em torno da média – Empacotamento 6

Na Figura 4.7 percebe-se claramente que o aumento da diferença de pressão entre entrada e saída (ou gradiente hidráulico) ocasiona maior dispersão dos valores locais em torno da média, com os valores de R^2 diminuindo consistentemente com o aumento das pressões.

Para evitar a repetição de imagens para cada um dos empacotamentos, os valores de R^2 para todos os casos realizados estão apresentados na Tabela 4.3 e de forma gráfica na Figura 4.8. As demais análises serão apresentadas no Apêndice A.

Tabela 4.3: Valores de R^2 para as pressões obtidas nas *streamlines*

Caso (Pa)	Empacotamentos					
	1	2	3	4	5	6
1	0.907	0.918	0.906	0.950	0.965	0.963
2	0.908	0.910	0.897	0.943	0.963	0.948
5	0.899	0.906	0.890	0.936	0.955	0.944
10	0.892	0.899	0.878	0.932	0.948	0.937
25	0.885	0.895	0.873	0.923	0.941	0.929
50	0.873	0.887	0.857	0.914	0.935	0.926
75	0.872	0.886	0.855	0.910	0.930	0.919
100	0.866	0.886	0.853	0.907	0.932	0.917
200	0.865	0.877	0.845	0.904	0.927	0.909
350	0.858	0.867	0.842	0.900	0.926	0.908
500	0.856	0.871	0.839	0.898	0.922	0.902
750	0.852	0.865	0.836	0.888	0.917	0.900
1000	0.857	0.865	0.826	0.894	0.912	0.898
2000	0.850	0.860	0.821	0.891	0.912	0.896
3000	0.844	0.859	0.815	0.889	0.913	0.894

O aumento da dispersão com o aumento do gradiente observado nas análises do Empacotamento 6 foi também observado consistentemente nos demais corpos de prova, confirmando esse comportamento.

Os menores valores de R^2 foram encontrados no Empacotamento 3 e os maiores valores no Empacotamento 5. Novamente, os corpos de prova com menor porosidade apresentaram maior dispersão, indicando que a dispersão pode não estar diretamente vinculada a essa grandeza e que a morfologia dos caminhos de fluxo pode ser mais significativa.

A fração mais fina do material apresenta significativa importância na homogeneização das pressões através do meio poroso. Fica evidente que os materiais com partículas de menores dimensões apresentam não só maiores valores de R^2 , mas também uma queda menor dos valores

com o aumento da pressão. Observar especialmente a comparação entre as análises EMP1 e EMP2 e entre as análises EMP4 e EMP5, que possuem curvas granulométricas quase idênticas até os 50% de material retido (curva granulométrica por peso).

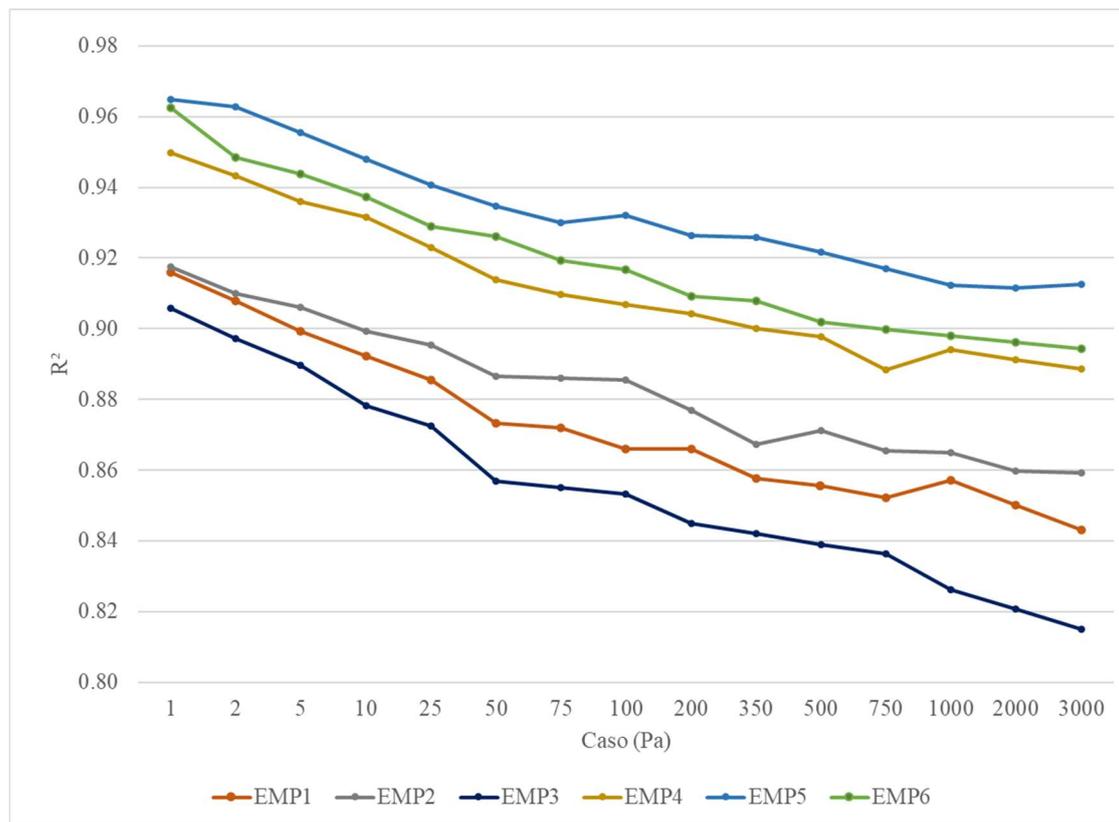


Figura 4.8: Valores de R^2 para as pressões obtidas nas *streamlines*

4.3.2 VELOCIDADES

Assim como na Seção 4.3.1, as velocidades serão analisadas qualitativamente por meio das imagens obtidos pelo *software* CFD e quantitativamente, por meio dos resultados numéricos extraídos dos modelos.

4.3.2.1 VALORES MÉDIOS E LOCAIS

Na Figura 4.9 apresenta-se o mapa de velocidades pelo fluido, utilizando o plano central que passa pelos corpos de prova. A imagem confirma o discutido na Seção 4.2 e mostra o Empacotamento 3 claramente mais discrepante com relação às velocidades, mesmo com a visualização restrita ao plano central neste caso.

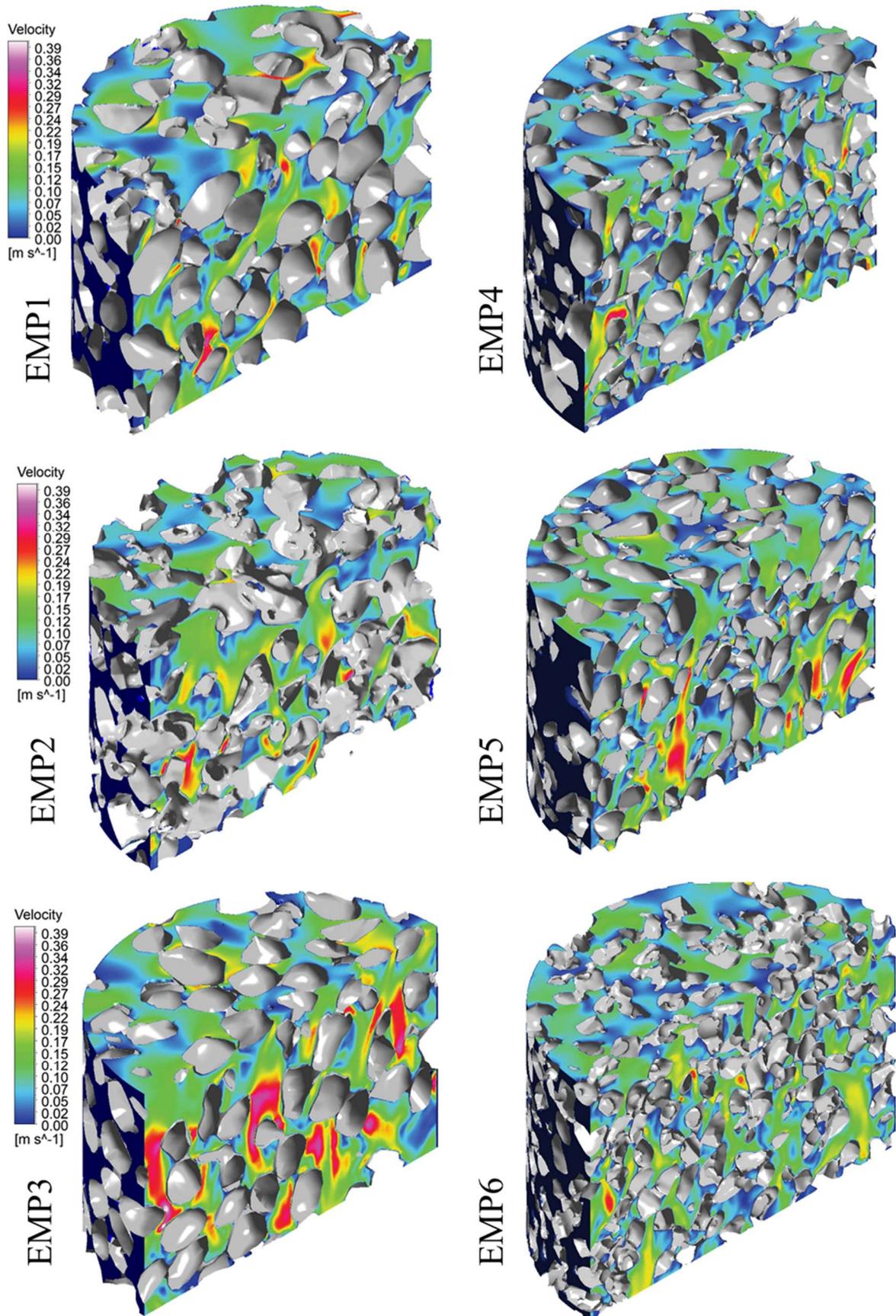


Figura 4.9: Distribuição de velocidade nos corpos de prova – Caso 100 Pa – Plano central

As regiões de concentração de velocidades mais elevadas acontecem em todos os empacotamentos e aparentam ser determinadas diretamente por canais de fluxo com menores dimensões e que restringem a passagem do fluido. Observa-se que as escalas de cores são as mesmas para todas as análises.

Resta então quantificar as velocidades no fluido para análise comparativa. Para tal, foi utilizada a ferramenta de filtros do *software* de pós-processamento para obter a frequência acumulada das velocidades relacionadas ao volume do fluido. Na Figura 4.10 apresentam-se os resultados obtidos. No eixo das abscissas está plotada a velocidade local no interior da matriz porosa e no eixo das ordenadas está indicada a frequência acumulada volumétrica. Mais uma vez foi utilizado o caso com diferença de pressão aplicada de 100 Pa.

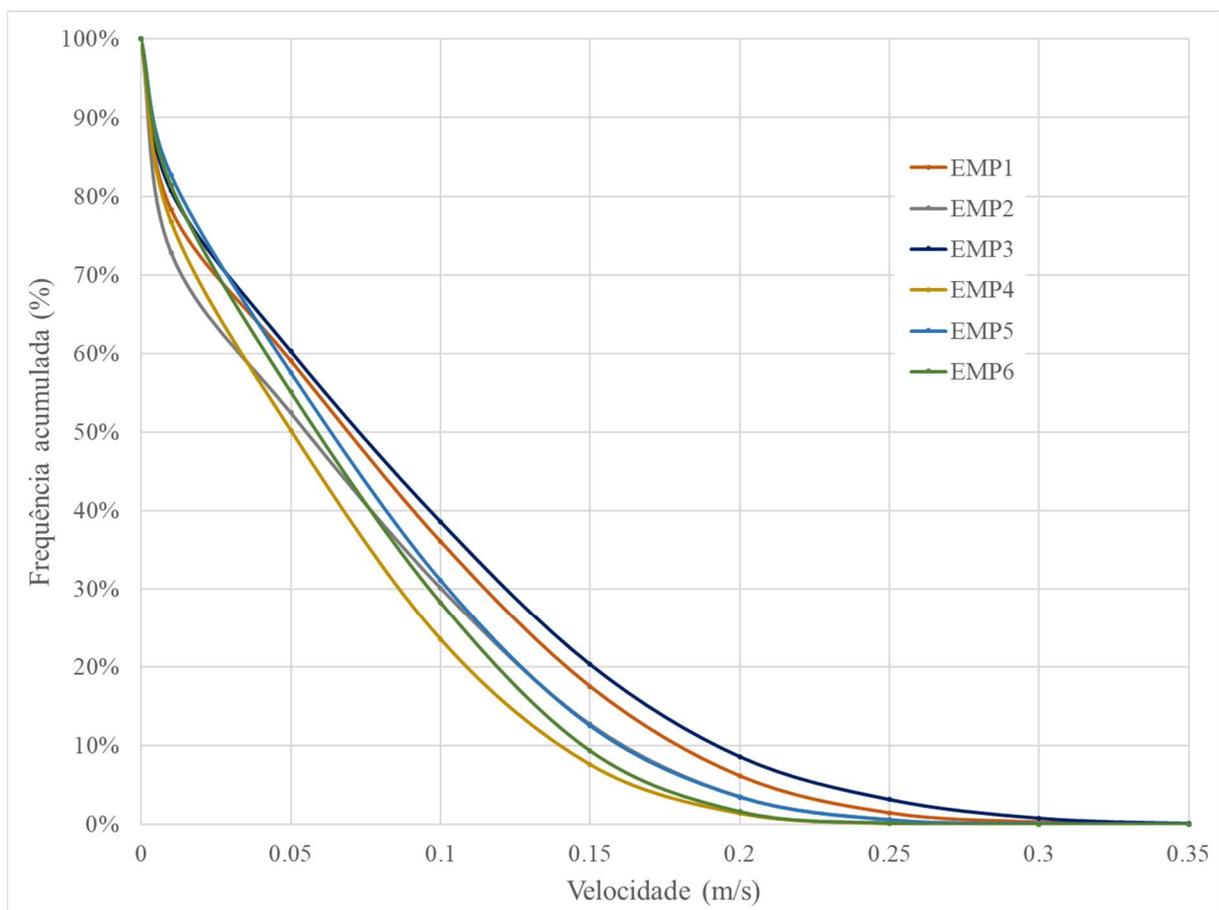


Figura 4.10: Frequência acumulada das velocidades – Caso 100 Pa

O objetivo na Figura 4.10 é avaliar a frequência dos valores de velocidade, ampliando o apresentado no plano central da Figura 4.9 para todo o volume da matriz de vazios. É possível por meio da Figura 4.10 identificar que são encontradas velocidades superiores a 0,2 m/s em

aproximadamente 9% do volume da matriz porosa do Empacotamento 3 e 6% da matriz porosa do Empacotamento 1. As regiões onde são encontradas velocidades mais elevadas ($\geq 0,2$ m/s) nos demais empacotamentos representam menos de 3,5% do volume da matriz de vazios.

As velocidades vetoriais são mais elevadas nos Empacotamentos 1 e 3 e menores no Empacotamento 4. Contudo, é importante observar que as curvas se interceptam em vários pontos, indicando que as regiões de maiores velocidades não são determinadas por características globais dos corpos de prova e sim das restrições geométricas locais devido à morfologia dos vazios.

A análise ainda pode ser complementada com a Figura 4.11, onde são apresentados os resultados das médias dos módulos das velocidades em função do gradiente para todos os casos.

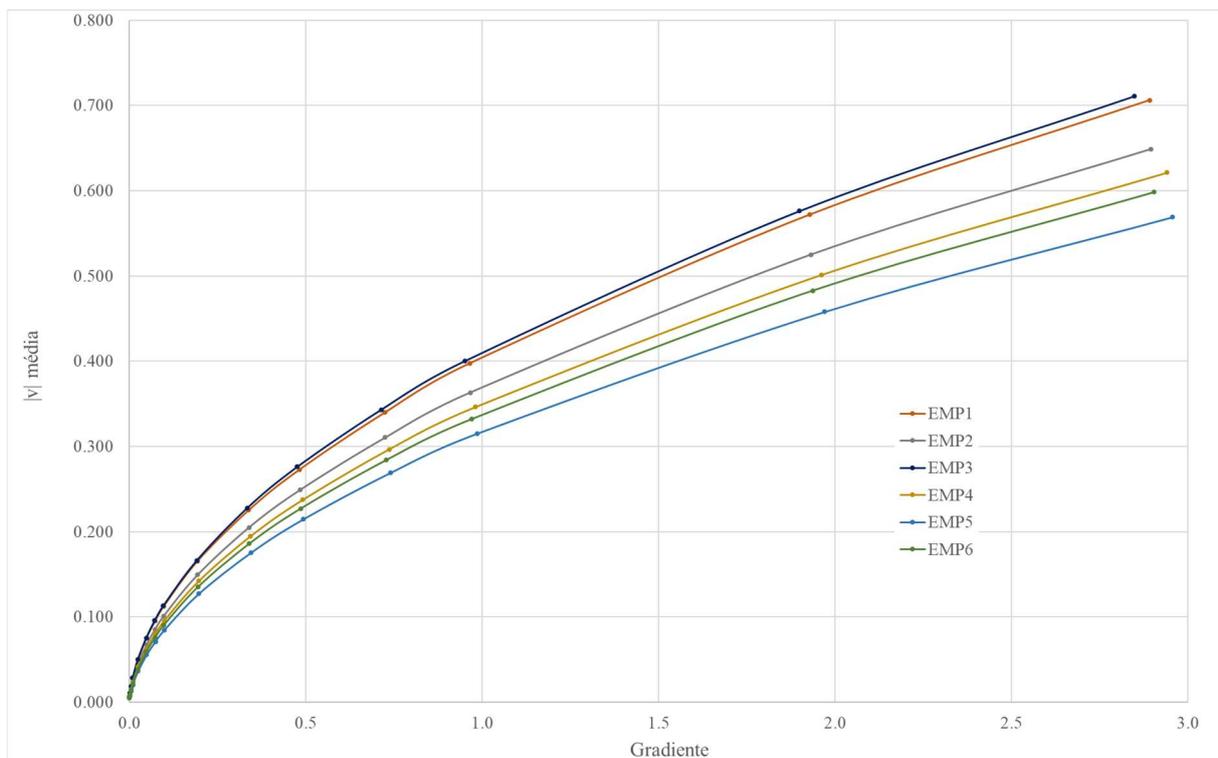


Figura 4.11: Média do módulo da velocidade em função do gradiente

Na Figura 4.11 estão apresentadas as curvas com comportamento geral mais aderente com as expectativas, dadas as dimensões características dos empacotamentos. O gráfico mostra que consistentemente os Empacotamentos 1 e 3 apresentam velocidade média mais elevada. As menores velocidades são encontradas no Empacotamento 5. É interessante observar a forte correlação entre a média da velocidade vetorial com a fração mais fina (dimensões menores que

D₁₀). Observar a comparação entre o Empacotamentos 5 e 6, que apresentam valores de D₁₀ muito similares, mas a dimensão mínima do Empacotamento 5 é aproximadamente 2 vezes menor do que a do Empacotamento 6.

Conclui-se com isso que as velocidades reais médias no fluxo são fortemente relacionadas com a fração fina do meio poroso, mas a distribuição das velocidades na matriz de vazios não apresenta correlação clara com a granulometria e são condicionadas pela morfologia dos poros e canais de fluxo.

Observa-se também que a relação entre as velocidades e o gradiente é claramente não linear, mesmo para gradientes baixos, indicando que o regime de escoamento não é laminar.

4.3.2.2 VAZÃO ESPECÍFICA E VALORES MÁXIMOS

Na presente seção será discutida a variabilidade dos resultados e a relação entre os valores de velocidade obtidos e a vazão específica, que corresponde à vazão que passa através do modelo dividida pela área da seção do corpo de prova. No regime laminar de escoamento a vazão específica é o mesmo que a velocidade aparente do modelo de Darcy.

Os resultados das velocidades serão tratados de forma diferente das pressões, visto que a dispersão das velocidades é muito maior do que das pressões. A representação de valores de R² para as velocidades não faz sentido conceitual, visto que a distribuição é bastante dispersa em uma mesma altura do corpo de prova. Isso acontece pois em toda a região de interface fluido-sólido, a velocidade é nula, enquanto no interior do canal de fluxo ela pode chegar a valores elevados. Já os valores de pressão em dada altura do corpo de prova variam em uma faixa mais estreita em torno da média.

As velocidades foram obtidas da mesma forma que as pressões, em 500 *streamlines* lançadas em cada caso. Os valores resultantes para o Empacotamento 6 estão apresentados na Figura 4.12, juntamente com as linhas que indicam os valores das vazões específicas para cada caso. As figuras para os demais empacotamentos serão apresentadas no Apêndice A.

Dada a quantidade elevada de dados, as tabelas com os valores de vazão específica e vazão máxima para cada caso também serão apresentados Apêndice B.

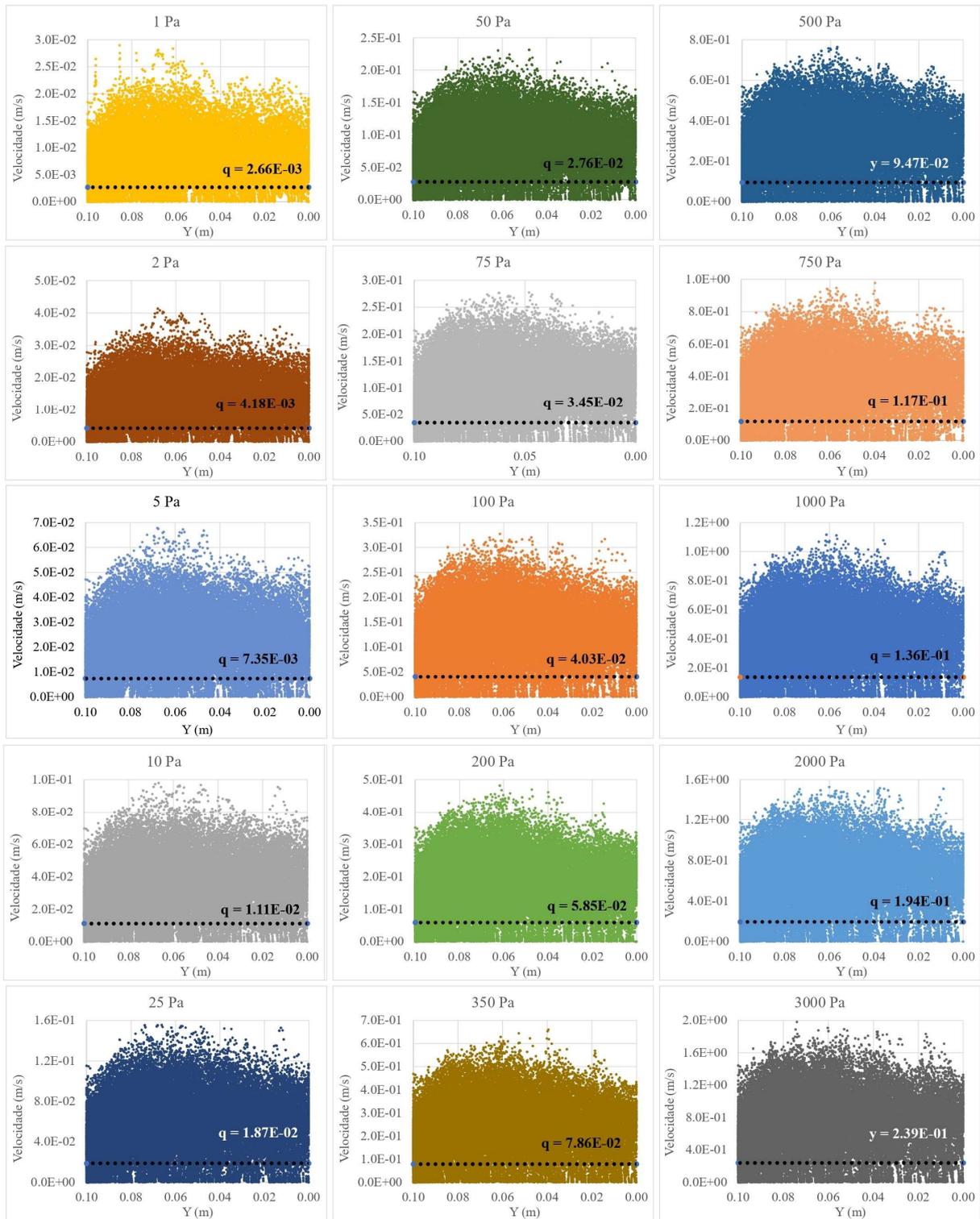


Figura 4.12: Distribuição das velocidades ao longo das *streamlines* – Empacotamento 6

Como é sabido a partir do modelo de Darcy e evidente pela análise da Figura 4.12, as velocidades reais que acontecem localmente no interior da matriz de vazios são muito superiores às vazões específicas, mesmo nos casos com baixa pressão de entrada. É possível

observar também que as velocidades mais elevadas estão localizadas na região mais central do fluxo. Esse fato pode decorrer do próprio processo de construção dos empacotamentos, que tende a gerar região central discretamente mais preenchida por partículas. Contudo, os picos de velocidade isolados na região central são também pouco maiores que nas extremidades.

Vale ressaltar que a relação entre os valores de pico e a vazão específica é relativamente constante entre os diversos casos de pressão, confirmando o entendimento da seção anterior de que os picos de velocidade são determinados pela morfologia local dos canais de fluxo.

A relação entre o módulo das velocidades vetoriais e a vazão específica está apresentada na Figura 4.13 em função do gradiente hidráulico.

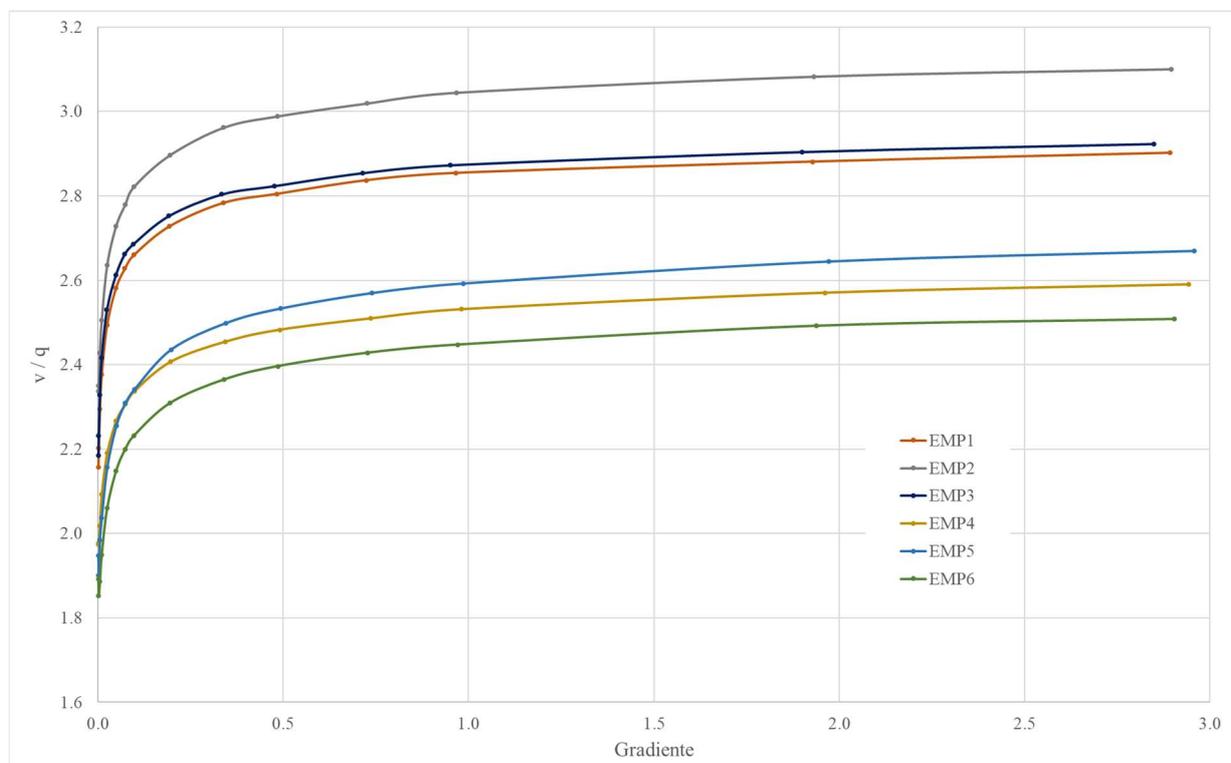


Figura 4.13: Relação entre a média do módulo da velocidade e vazão específica

A Figura 4.13 mostra que a velocidade real é mais impactada do que a vazão específica no corpo de prova com o aumento da pressão. Nos fluxos de baixo gradiente, esse impacto é mais intenso, com maior equalização a partir de gradientes maiores que 0,25.

É interessante observar que, diferente do apresentado por diversos autores em bibliografias tradicionais da engenharia geotécnica, a relação entre a vazão específica (velocidade aparente)

e a velocidade real nos vazios não se dá puramente por meio de um índice físico do meio poroso (ex. porosidade), mesmo para baixos gradientes. Visto que os valores de porosidades dos corpos de prova obtidos aqui se encontram entre 43,5 e 51%, a velocidade aparente seria pouco mais que duas vezes a vazão específica. Porém, o gráfico mostra que essa relação pode chegar a mais de três e é dependente do gradiente hidráulico.

Adicionalmente, observa-se que quanto maior mais grosso o material, maior pode ser a diferença entre a velocidade real e a velocidade aparente.

4.3.3 VAZÃO

Assim como para as velocidades, foram plotados os valores de vazão total contra o gradiente hidráulico na Figura 4.14. Da mesma forma que acontece para as velocidades, as vazões têm dependência não-linear com o gradiente após a região de transição para regime turbulento. Os limites dos regimes de escoamento serão tratados separadamente na Seção 4.5. Contudo, é possível perceber na Figura 4.14 que somente o trecho inicial da curva apresenta comportamento próximo de linear, indicando que a transição de regimes de fluxo ocorre em valores de gradientes bastante baixos.

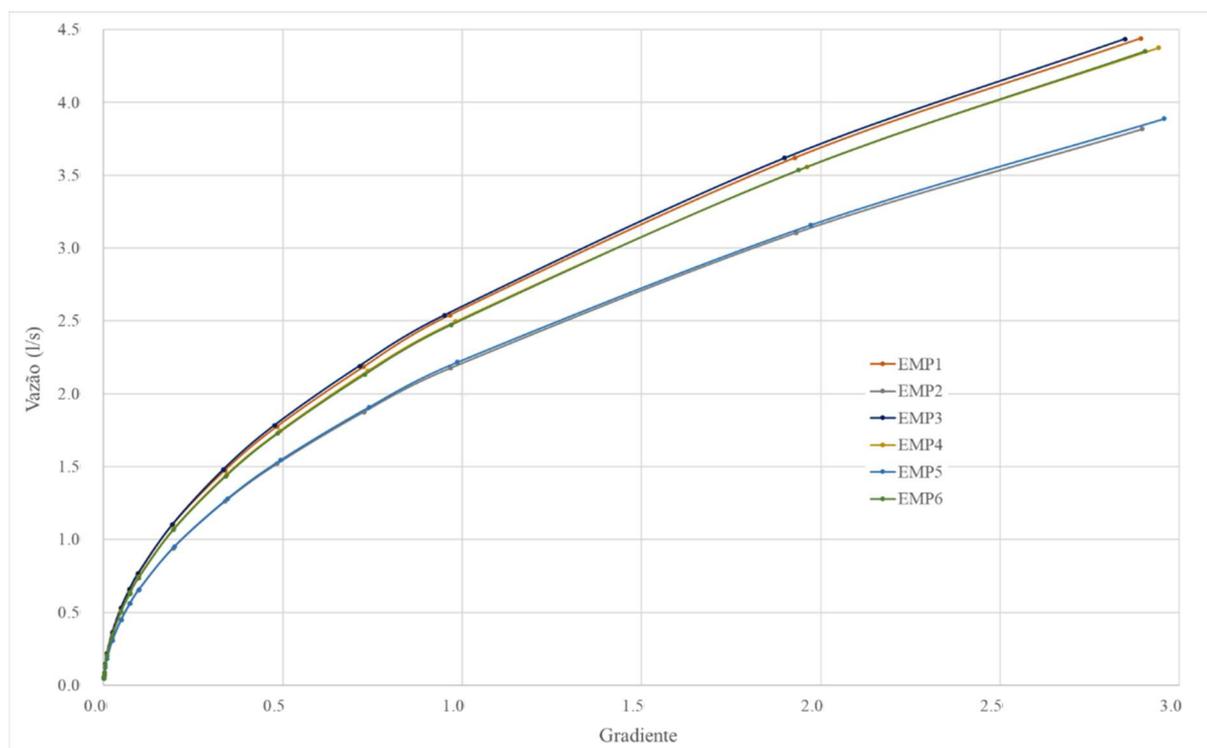


Figura 4.14: Relação entre vazão total e gradiente hidráulico

De forma geral, as vazões obtidas para os Empacotamentos 1, 3, 4 e 6 foram bastante próximas, sendo os valores das análises EMP1 e EMP3 discretamente superiores. As vazões dos Empacotamentos 2 e 5 resultaram inferiores às demais e basicamente idênticas entre si.

Aqui, a porosidade parece ter papel mais importante do que nos demais resultados, juntamente com heterogeneidade das dimensões do material granular. O Empacotamento 2 apresenta a menor porosidade dentre as curvas mais grosseiras (EMP1, EMP2 e EMP3) e o Empacotamento 5 apresenta o menor valor dentre as curvas com menores dimensões. Da mesma forma, as duas curvas granulométricas em questão apresentam maiores valores de C_u , indicando que elas são distribuições mais abertas.

4.4 TORTUOSIDADE

Como já discutido no Item 2.6.3, a tortuosidade é uma grandeza tratada de formas diferentes por vários autores. Contudo, todas as formas de utilização dessa variável representam o mesmo: a relação entre o comprimento do caminho real percorrido pelo fluxo no interior do meio poroso e o comprimento em linha reta entre entrada e saída do corpo de prova. Aqui será tratada a relação que resulta valores maiores que a unidade. Usualmente essa relação ainda é elevada ao quadrado para resultar na tortuosidade propriamente dita. Porém, a tortuosidade será avaliada como a relação direta entre os comprimentos citados, sem aplicação da potência a fim de facilitar a compreensão física.

Para obtenção dos resultados de tortuosidade para cada caso foram utilizadas as 500 *streamlines* lançadas como base para o cálculo. Foi então extraído o comprimento de cada *streamline* e dividido por 10 cm, altura de todos os corpos de prova utilizados. Como na maioria dos casos o regime de escoamento é turbulento, podem ocorrer *streamlines* que não atravessam completamente o meio poroso devido às turbulências localizadas que ocorrem. Portanto, todas as *streamlines* com comprimento menor do que 10 cm foram descartadas para a computação dos resultados em questão.

Após obtidos os valores das relações entre comprimentos para cada linha de corrente individual, foi tirada a média de todos esses valores para cada caso de pressão aplicada. Na Figura 4.15 apresentam-se os resultados da relação entre os comprimentos reais e linear do fluxo.

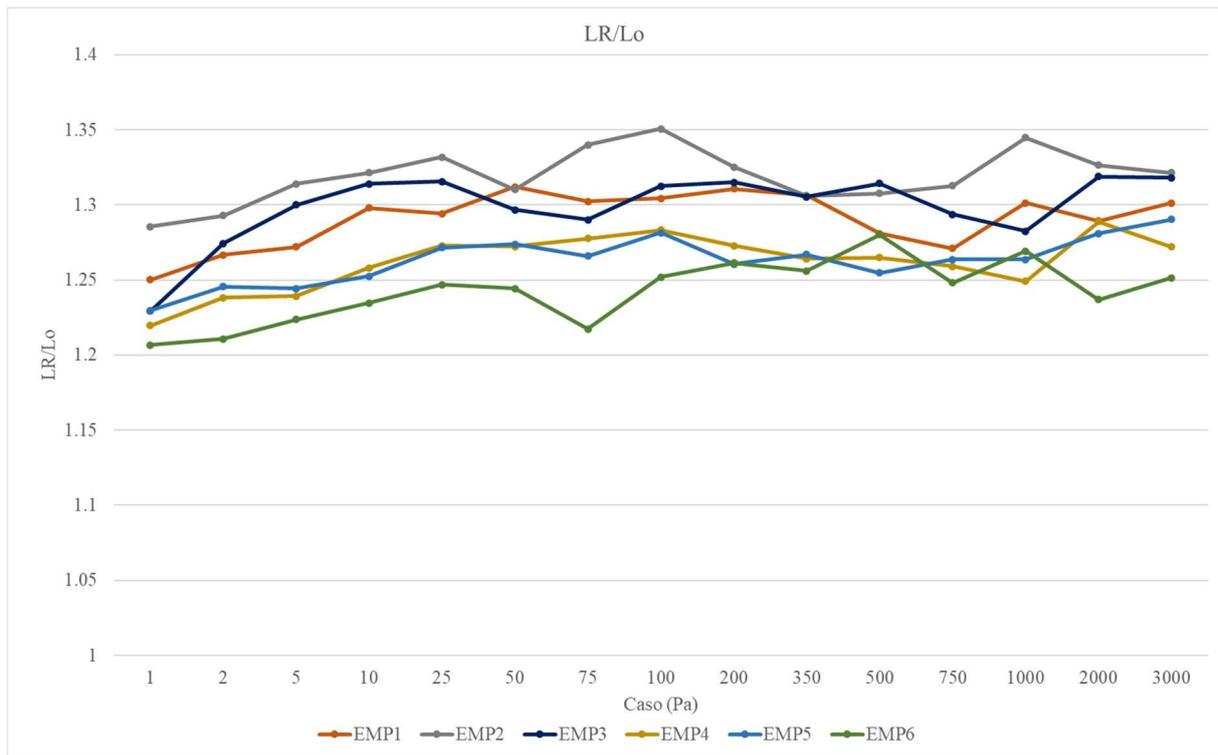


Figura 4.15: Relação entre o comprimento real percorrido pelo fluido e linear do corpo de prova

Os resultados apresentados mostram que os valores de tortuosidade estão situados entre 1.2 e 1.35. Os valores consistentemente maiores nos empacotamentos com granulometrias mais grosseiras, mostrando dependência da grandeza com a fração do material de maiores dimensões, confirmado ainda pela comparação dos resultados de EMP6 com EMP4 e EMP5.

Outra conclusão interessante é que os resultados obtidos mostram dependência da tortuosidade com a pressão, ainda que de forma discreta. Os valores aumentaram levemente com o aumento da pressão de entrada nos corpos de prova.

Para fins de cálculos, a utilização de valor constante médio não traz muitos prejuízos, visto que a diferença dos valores é pequena. Porém, existem diversas estimativas geométricas na literatura, derivadas de Carman (1937 e 1956) que apresentam estimativa da relação entre os comprimentos igual a $\sqrt{2}$ (aproximadamente 1.41). Para materiais granulares grossos com alta porosidade, os valores obtidos foram consistentemente menores que a estimativa teórica.

Na Tabela 4.4 estão apresentados os valores médios de tortuosidade obtidos, juntamente com os valores de desvio padrão.

Tabela 4.4: Valores médios de tortuosidade e desvio padrão

Empacotamento	Tortuosidade média	Desvio Padrão	Coefficiente de variação
EMP1	1.291	0.018	1.4%
EMP2	1.319	0.018	1.4%
EMP3	1.299	0.024	1.8%
EMP4	1.262	0.019	1.5%
EMP5	1.263	0.016	1.3%
EMP6	1.243	0.021	1.7%

4.5 TRANSIÇÃO REGIME LAMINAR PARA TURBULENTO

Na presente seção apresenta-se uma discussão acerca da transição entre os regimes de escoamento linear e turbulento nos meios porosos. Como visto na Seção 2.5, o número de Reynolds relaciona as forças inerciais e as forças viscosas que ocorrem no fluido em movimento. A estimativa do número de Reynolds em meios porosos geotécnicos é sabidamente complexa, dada a incapacidade de definição da dimensão característica a ser utilizada na relação de Reynolds.

Autores como Ergun (1956) e Bear (1972) utilizam o diâmetro médio da partícula como diâmetro característico, mas a dimensão dos canais onde ocorre o fluxo é muito menor que o diâmetro médio das partículas e varia ponto a ponto na rede de poros do meio. Cruz (2009) apresenta que Silveira (1964) constatou que a curva de vazios de uma areia é semelhante à curva granulométrica, só que os diâmetros dos vazios são cerca de oito a dez vezes menores.

Park e Santamarina (2020) apresentam formulação para estimativa do diâmetro médio dos poros de argilas e siltes baseada no índice de vazios e na superfície específica. Já para areias, os autores apresentam a formulação utilizando somente a superfície específica:

$$D_{poros} = \frac{0,92}{S} \quad (4.2)$$

Para o cálculo dos diâmetros dos poros foi utilizada a média das superfícies específicas de cada partícula individual dos empacotamentos. A área e o volume de cada partícula são obtidos diretamente do repositório de partículas virtuais. Os diâmetros médios dos poros obtidos para cada empacotamento estão dispostos na Tabela 4.5. Confirmando o apresentado por Silveira (1964), os diâmetros estimados estão dentro do intervalo estabelecido pelo autor, variando entre 8,1 e 9,0.

Tabela 4.5: Diâmetros médios dos poros obtidos

Empacotamento	D_{50} (mm)	D_{poros} (mm)	D_{50}/D_{poros}
EMP 1	22,9	2,6	8,7
EMP 2	22,6	2,6	8,7
EMP 3	22,2	2,8	8,1
EMP 4	16,2	1,9	8,6
EMP 5	15,8	1,8	9,0
EMP 6	13,0	1,5	8,8

Visto que a Eq. 4.2 apresenta estimativa para areias compactas e os valores das porosidades dos corpos de prova estão no limite físico superior, foi adotada como dimensão característica a dimensão média das partículas dividida por 10. Esse valor é correspondente ao limite superior para materiais granulares grossos apresentado em Cruz (2009). Para fins de simplificação analítica, a Figura 4.16 apresenta a relação entre Número de Reynolds e i/v^2 em substituição ao fator de atrito apresentado na Eq. 2.9, juntamente com o valor gráfico onde ocorre o início do regime de transição linear para turbulento. Essa simplificação não gera alterações nos números de Reynolds onde ocorre a transição, visto que os parâmetros eliminados são constantes.

O objetivo na Figura 4.16 é somente a comparação entre os diferentes casos de análises e não a determinação fidedigna do Número de Reynolds onde ocorre a transição de regimes, dada a dificuldade já explicitada para obtenção do diâmetro representativo e da avaliação da dimensão e forma real dos canais de fluxo nos meios porosos sem a utilização de ferramentas adicionais de análise.

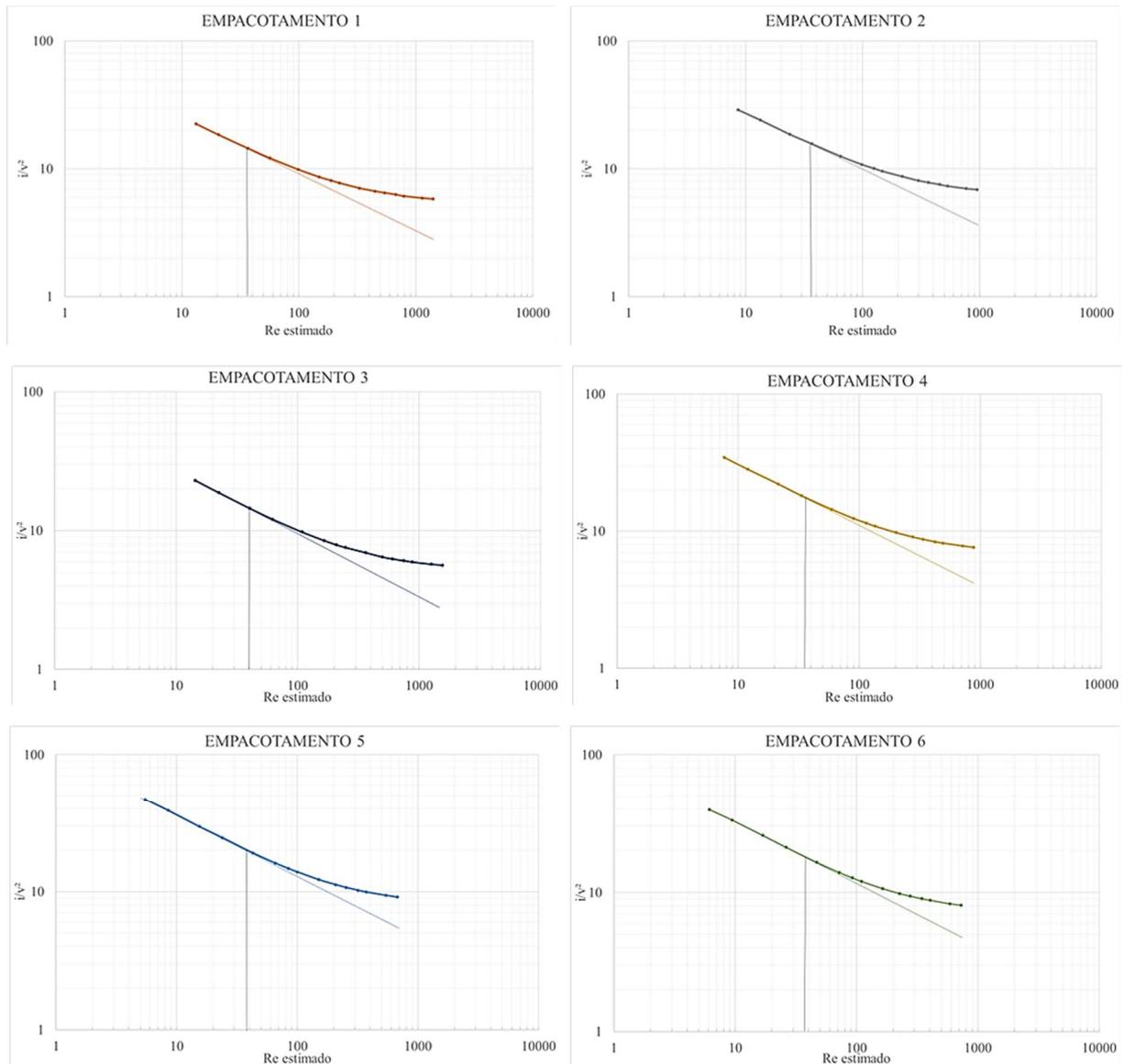


Figura 4.16: Transição entre regime laminar e turbulento

A Figura 4.16 mostra de maneira clara que, para todos os corpos de prova avaliados, a transição entre os regimes ocorre numa mesma região de Números de Reynolds, confirmando a teoria difundida. O interessante é observar que o que varia entre os empacotamentos é o gradiente hidráulico em que a transição ocorre. Quanto mais fina é a granulometria, maior o gradiente hidráulico de transição de regime. Nas análises EMP1 e 3, o gradiente de transição está próximo de 0,005 e para as análises EMP5 e EMP6 está próximo de 0.022. Na Tabela 4.6 estão apresentados os valores estimados de Reynolds e gradiente hidráulico onde ocorre o início da transição entre regimes de escoamento.

Tabela 4.6: Valores estimados de números de Reynolds e gradientes críticos

Empacotamento	Re crítico estimado	Gradiente crítico estimado
EMP 1	36	0.005
EMP 2	37	0.010
EMP 3	40	0.005
EMP 4	36	0.012
EMP 5	39	0.022
EMP 6	39	0.022

É muito importante observar que de forma geral os gradientes de transição são muito baixos para todos os corpos de prova avaliados e, mesmo com a diminuição da porosidade por meio de compactação, ainda se manteriam em patamares muito baixos, pois a redução de porosidade para materiais granulares nos diâmetros utilizados poderia ser reduzida para até 30-35%.

Esse fato pode ser determinante em análises de dimensionamentos de filtros, por exemplo, onde muitas vezes são utilizados modelos válidos somente em regime laminar (ex. Darcy). Dado que a “permeabilidade” no regime turbulento pode ser drasticamente reduzida, a utilização desses modelos com valores típicos de permeabilidade pode gerar significativos erros de dimensionamento, com capacidade de drenagem estimada muito superior à capacidade real do material granular.

Para solução do potencial problema apresentado, devem ser estimados fatores de redução das “permeabilidades” médias para os gradientes operacionais aos quais o sistema de drenagem estará submetido. Ademais, as reduções devem ser levadas em consideração especialmente se não for possível realizar ensaios de laboratório nas condições similares ao funcionamento do sistema.

Finalmente, observa-se que, mesmo com as simplificações empíricas utilizadas para cálculo do número de Reynolds onde ocorre o início da transição entre regimes, os valores obtidos são bastante aderentes aos apresentados por Stephenson (1979), que por sua vez foram obtidos de ensaios realizados por outros autores (Figura 4.17). O valor médio do número de Reynolds crítico obtido nas análises está apresentado na Figura 4.17 com uma seta vermelha.

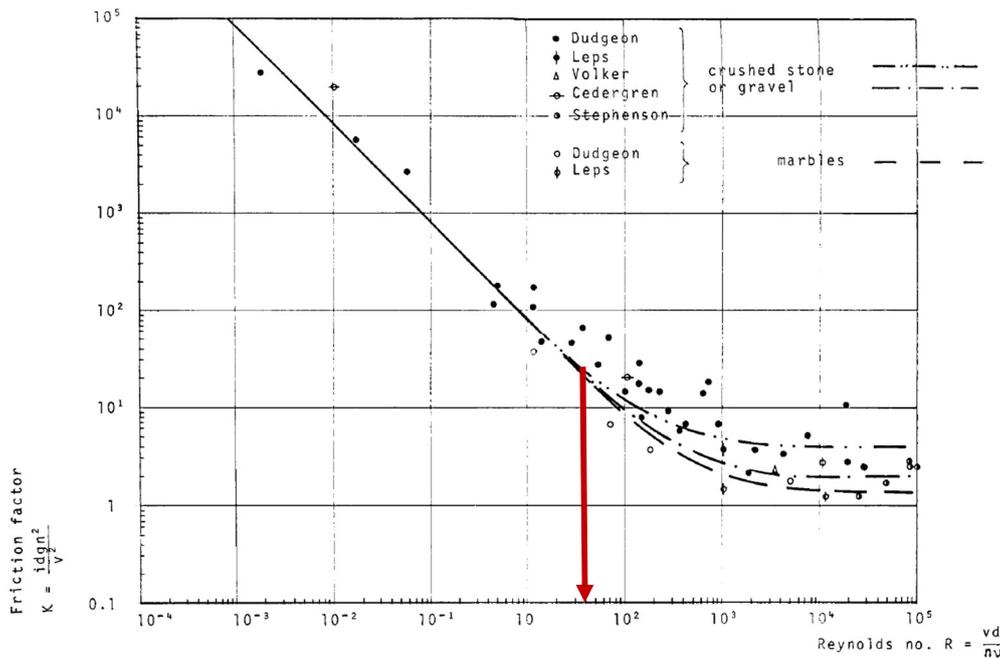


Figura 4.17: Fator de fricção vs. número de Reynolds (Modificada de Stephenson, 1979)

4.6 MODELOS DE RESISTÊNCIA AO FLUXO

Na presente seção serão apresentados os resultados das análises realizadas comparativamente com os resultados de modelos de resistência ao fluxo, utilizados para relacionar as velocidades de fluxo com os gradientes hidráulicos no meio poroso. Os modelos serão divididos em duas partes: modelos lineares em regime laminar e modelos não lineares em regime turbulento.

4.6.1 MODELOS PARA REGIME LAMINAR

Os modelos que utilizam relação linear entre o gradiente hidráulico e a velocidade (ou vazão específica) podem ser utilizados somente dentro dos limites do escoamento laminar. Como apresentado na Seção 2.5, mesmo em regime laminar as perdas de carga devido às forças inerciais são presentes, mas de maneira menos significativa. Os índices físicos, a granulometria e a morfologia dos materiais ensaiados favorecem a heterogeneidade das pressões e velocidades (Seção 4.3) dentro da mesma região do corpo de prova. Portanto, mesmo dentro dos limites do escoamento laminar, a relação obtida não é integralmente linear.

Para a comparação dos resultados obtidos foram escolhidos os modelos empíricos e teóricos largamente utilizados para estimativas de permeabilidade. São eles: Darcy (1856), Hazen (1892), Kozeny-Carman em Carman (1956) e Chapuis (2004).

Os valores de permeabilidade utilizando o modelo de Darcy foram extraídos das linhas de tendência lineares obtidas a partir dos pontos analisados para cada empacotamento que se encontram dentro dos limites do regime laminar, apresentados na Figura 4.16. Vale ressaltar novamente que o início do regime de transição acontece em valores diferentes de gradientes hidráulicos para cada empacotamento.

Foi adotado coeficiente do modelo de Hazen igual 1,5 como sugerido por Chapuis (2004) para correção da permeabilidade para temperatura de 20°C. A Figura 4.18 apresenta os modelos utilizados de forma gráfica e a Tabela 4.7 apresenta os valores de permeabilidades obtidos para cada modelo.

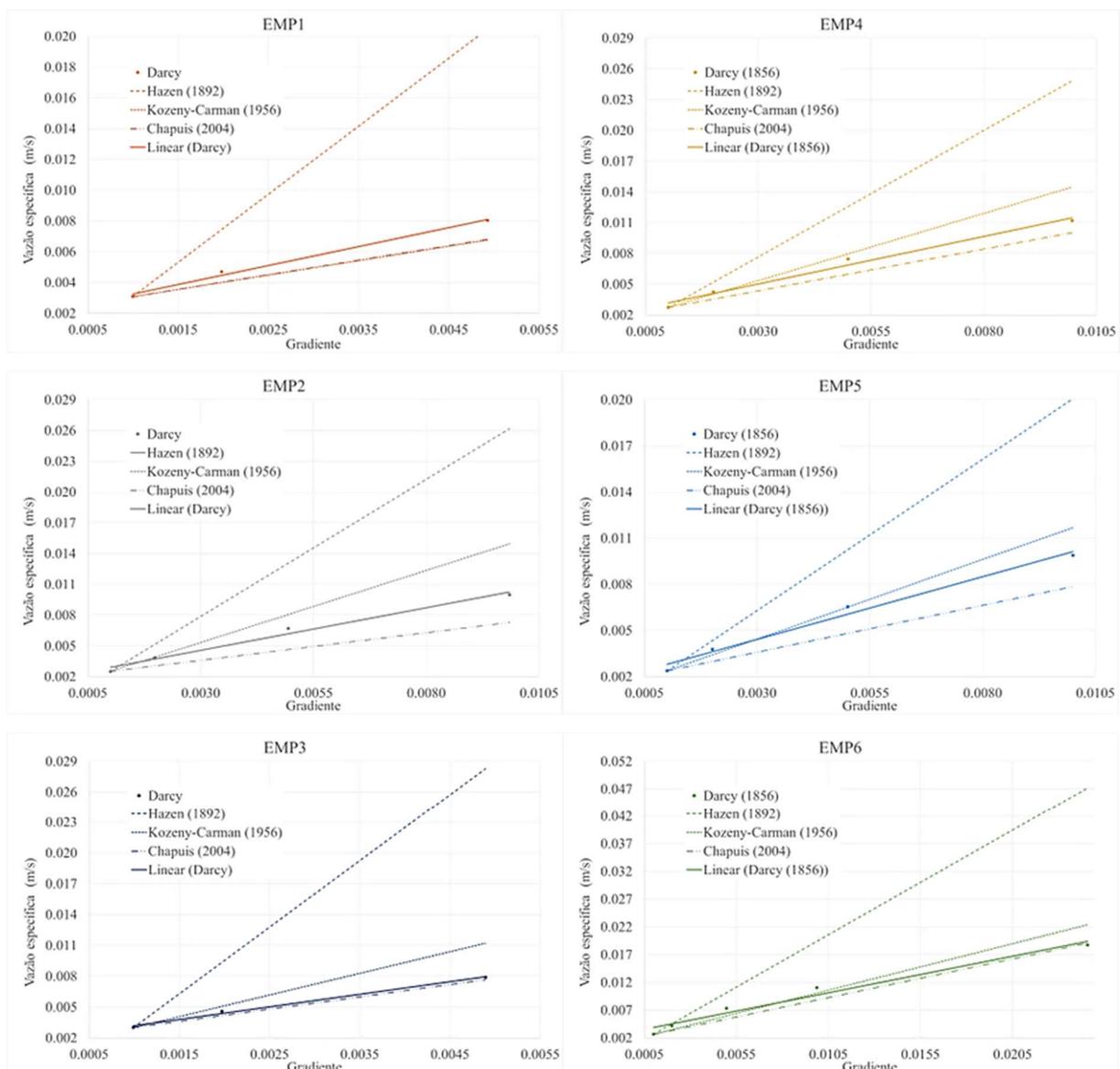


Figura 4.18: Modelos de resistência ao fluxo – Regime laminar

Tabela 4.7: Valores de permeabilidade obtidos para o regime laminar

	Permeabilidade k (m/s)			
	Darcy (1856) - gráfico	Hazen (1892)	Kozeny-Carman (1956)	Chapuis (2004)
EMP1	1.2	3.9	0.7	0.8
EMP2	0.8	2.4	1.1	0.5
EMP3	1.2	5.8	1.7	1.1
EMP4	0.9	2.2	1.0	0.7
EMP5	0.8	1.8	0.8	0.6
EMP6	0.7	1.7	0.7	0.6

Os resultados apresentados mostram que as permeabilidades obtidas em todos os modelos estão na mesma ordem de grandeza, mas o modelo de Hazen (1892) sistematicamente superestimou a condutividade hidráulica. Os modelos de Kozeny-Carman (Carman, 1956) e Chapuis (2004) resultaram em valores mais próximos dos obtidos graficamente utilizando a relação linear de Darcy (1856), especialmente nos empacotamentos com partículas de menores dimensões.

Mesmo com boa aderência dos modelos, é fundamental o entendimento de que meios porosos como os ensaiados favorecem a não-linearidade da relação velocidade-gradiente, fazendo com que o regime laminar só ocorra em gradientes e vazões muito baixas. Esses baixos valores dificilmente serão obtidos em aplicações práticas desses materiais com finalidade de drenagem.

Observa-se que os corpos de prova utilizados apresentam valores de porosidade elevados, próximos ao limite físico superior desse parâmetro. Com a redução da porosidade em meios porosos reais, os valores dos gradientes de transição entre regimes de escoamento seriam aumentados e a validade dos modelos apresentados seria também expandida.

Diversos autores como Caputo (1987), Evirgen *et al.* (2015) e Fell *et al.* (2015) apresentam limite superior para a permeabilidade de britas igual a 1 m/s. Considerando que os empacotamentos gerados para esse trabalho apresentam porosidades também próximas ao limite físico e ausência total de partículas finas, os valores de permeabilidade encontrados pelos modelos de Darcy (1856), Kozeny-Carman (Carman, 1956) e Chapuis (2004) estão adequados e próximos ao valor de permeabilidade máxima encontrado na literatura.

4.6.2 MODELOS PARA REGIME TURBULENTO

No regime de escoamento turbulento ou na transição entre regimes bem definidos, as forças inerciais no fluxo começam a desempenhar papel importante na perda de carga no escoamento no meio poroso. Esse fato torna os modelos que relacionam vazão e gradiente de forma linear inadequados. Surgem então os modelos não lineares que relacionam essas grandezas, utilizando também dados geométricos dos meios porosos como dados de entrada, em sua maioria derivados da premissa de Forcheimer (1901).

Foram utilizados aqui os modelos de Carman (1937) (adaptado por Bear (1972) para fluxo turbulento), Ergun (1952), Leps (1973) e Ergun modificado por Ozahi (2008). Esses modelos foram escolhidos para apresentar os modelos mais largamente utilizados, misturando modelos teóricos e empíricos. Existem diversos outros modelos que são, em sua maioria, derivados desses modelos apresentados, alterando alguns parâmetros para adequação geométrica aos meios porosos utilizados. Optou-se aqui por manter os modelos originais, com exceção da alteração proposta do modelo de Ergun, apresentada por Ozahi (2008).

Dado que foram utilizados quatro modelos, a apresentação das curvas foi individualizada para cada um dos empacotamentos para facilitar a compreensão. Na Figura 4.19 até a Figura 4.24 estão apresentados os resultados obtidos numericamente comparados com os modelos de resistência ao fluxo escolhidos.

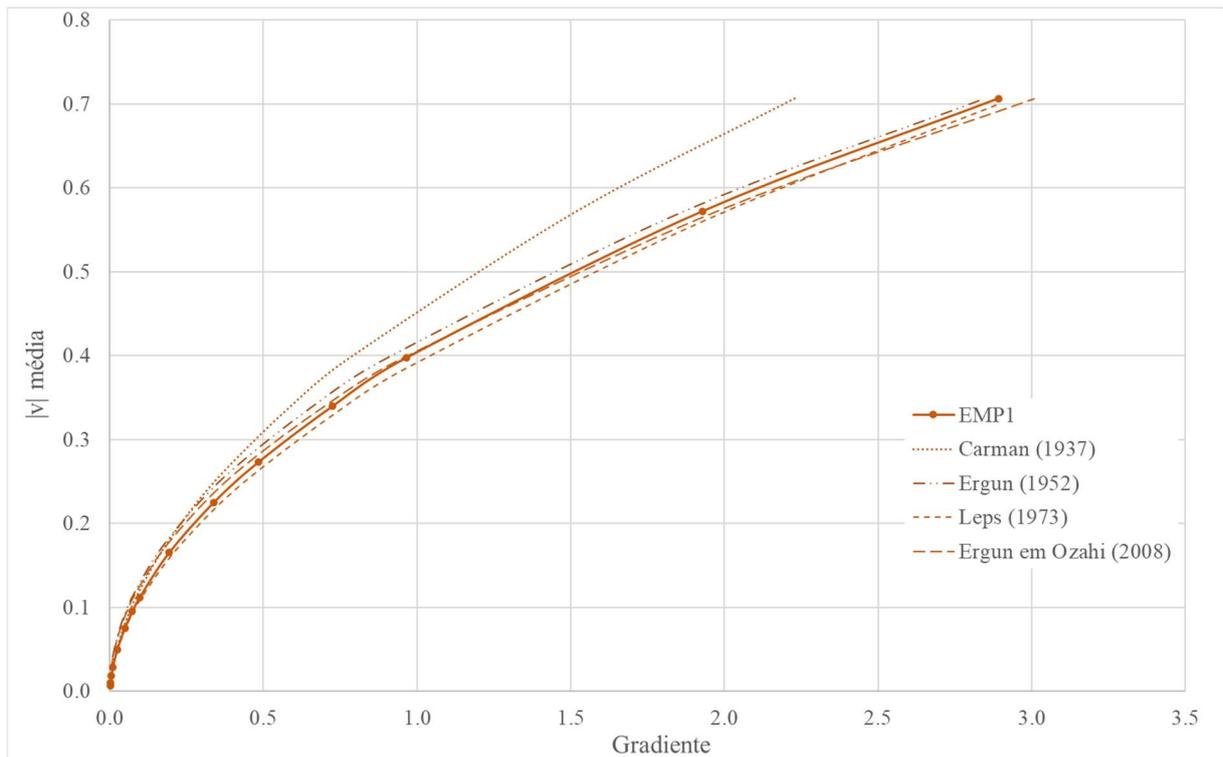


Figura 4.19: Modelos de resistência ao fluxo – Empacotamento 1

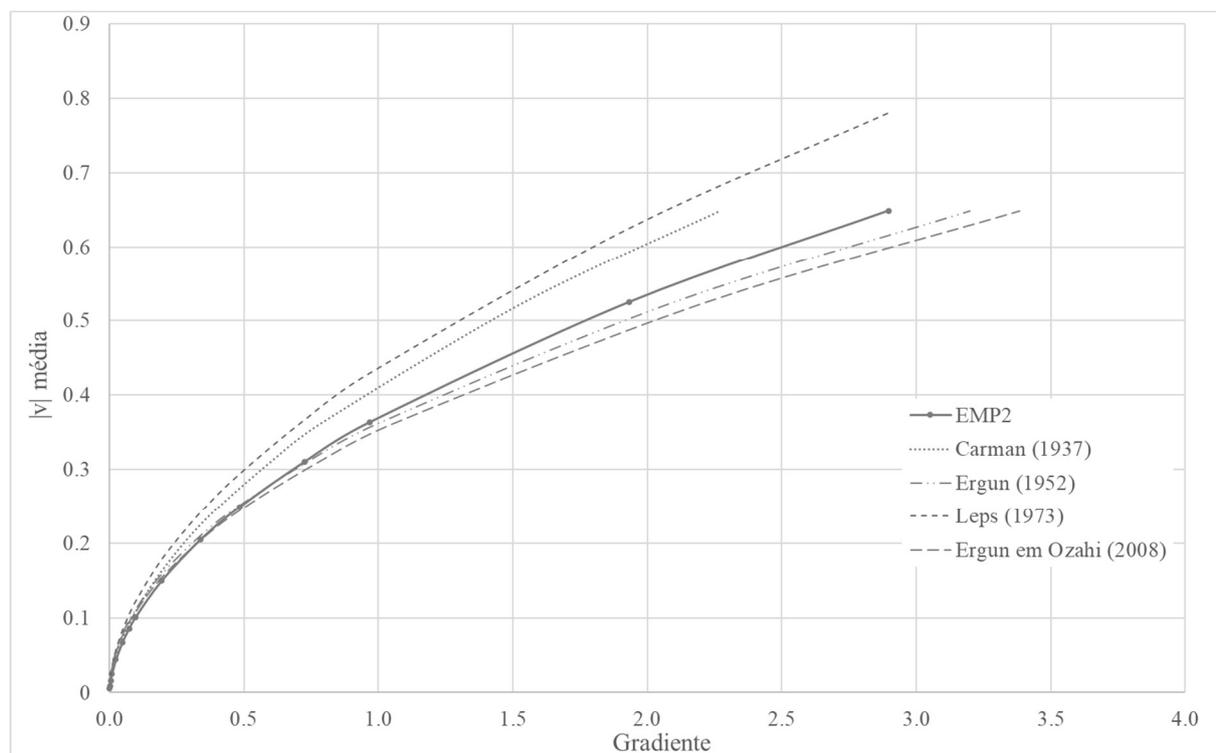


Figura 4.20: Modelos de resistência ao fluxo – Empacotamento 2

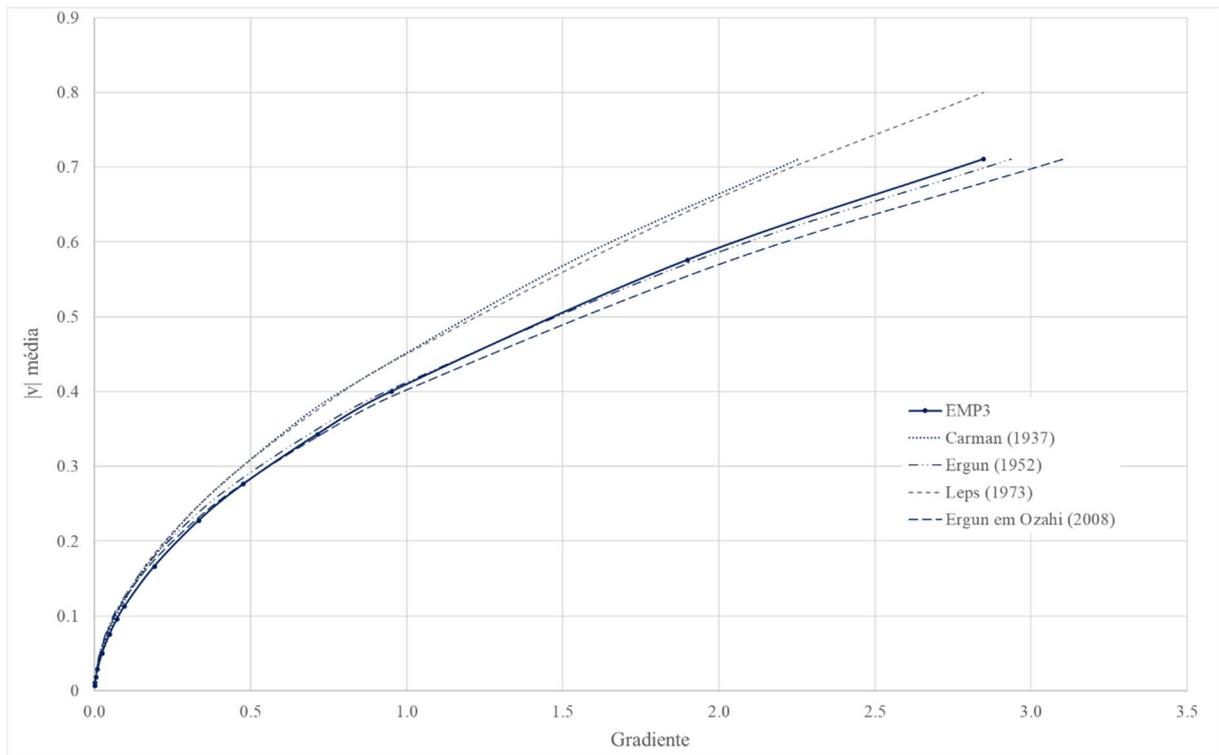


Figura 4.21: Modelos de resistência ao fluxo – Empacotamento 3

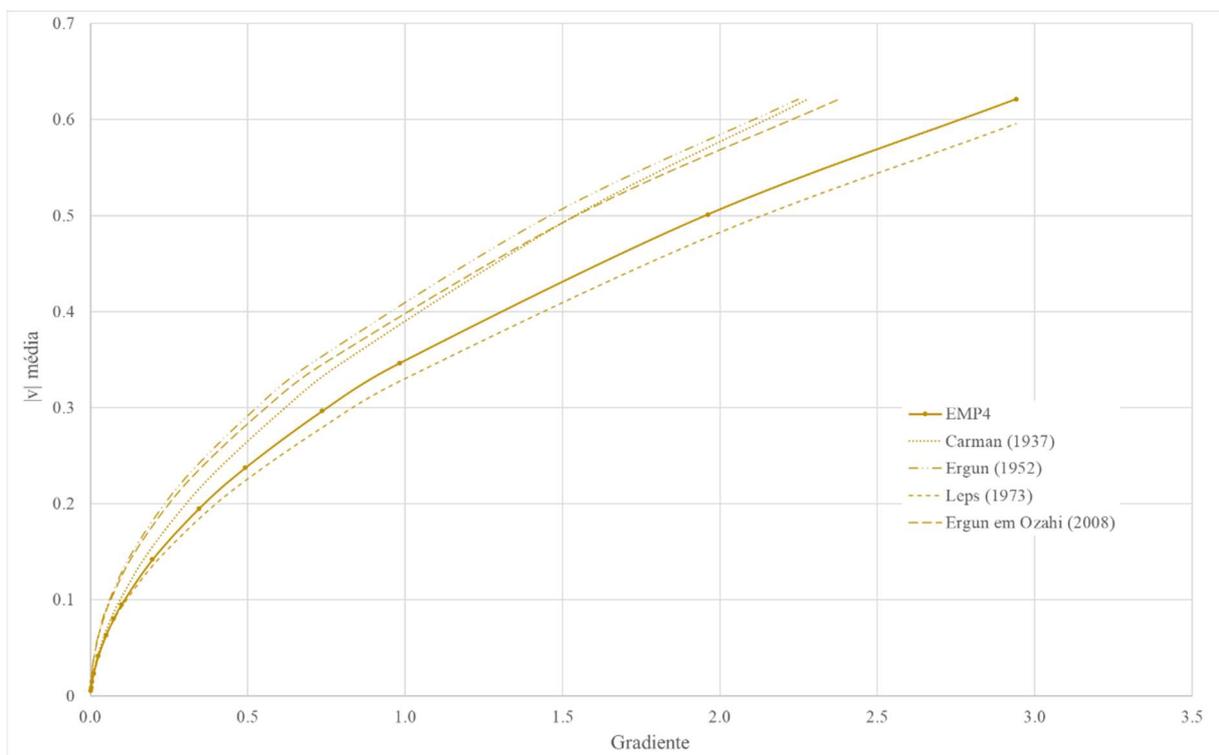


Figura 4.22: Modelos de resistência ao fluxo – Empacotamento 4

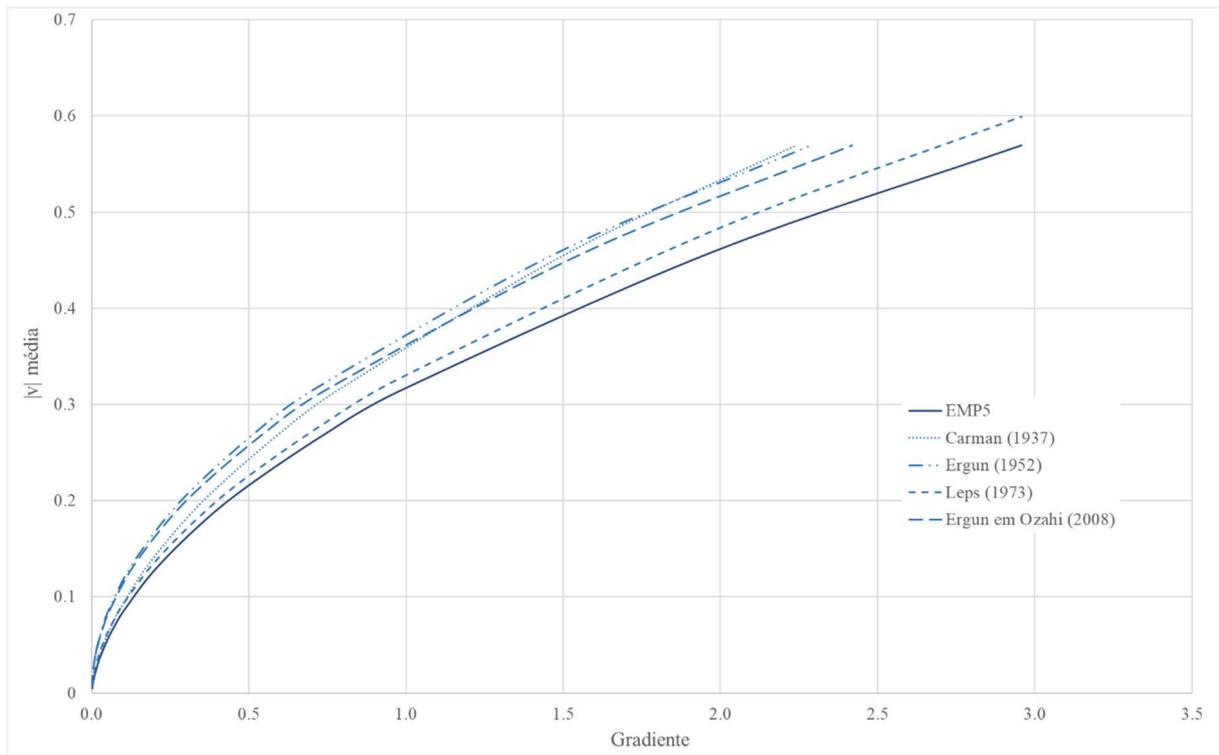


Figura 4.23: Modelos de resistência ao fluxo – Empacotamento 5

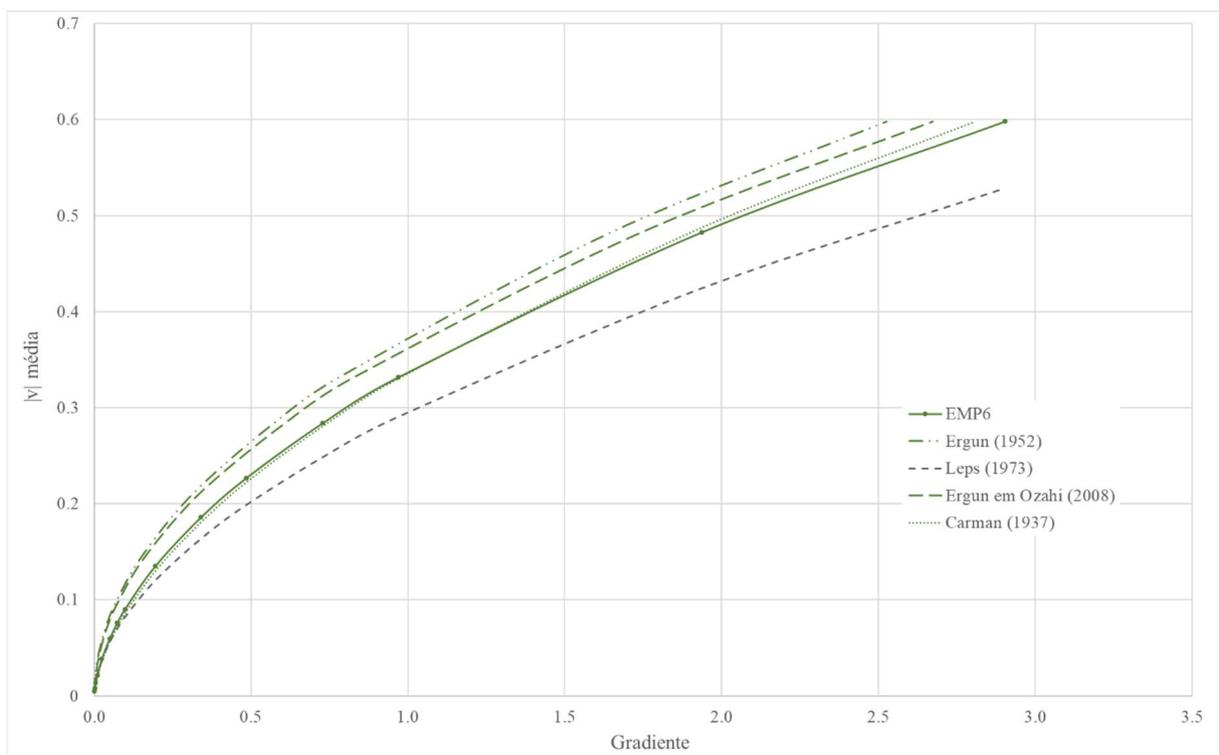


Figura 4.24: Modelos de resistência ao fluxo – Empacotamento 6

Os gráficos apresentados mostram que todos os modelos de resistência apresentam relação não linear entre as velocidades e o gradiente hidráulico, ora mais ou menos aderente aos resultados obtidos numericamente.

É interessante observar que o modelo de Ergun (1952) e sua modificação proposta por Ozahi (2008) apresentaram boa aderência com os três primeiros empacotamentos. Já nos três últimos, os modelos previram quedas de pressão sistematicamente inferiores às obtidas nas modelagens. Esses empacotamentos são justamente os empacotamentos com maiores valores de porosidade.

Ainda que os resultados de gradiente dos Empacotamentos 4 a 6 sejam maiores do que os obtidos pelos modelos de Ergun (1952) e Ozahi (2008), os resultados são satisfatórios, especialmente considerando a heterogeneidade dos meios porosos e a elevada variabilidade intrínseca do fenômeno de fluxo. A diferença máxima foi de aproximadamente 25 % para as faixas de pressão modeladas.

Já os modelos de Carman (1937) e Leps (1973) apresentaram resultados mais erráticos com relação aos valores obtidos dos métodos numéricos. Em alguns dos empacotamentos esses modelos resultaram em gradientes superiores, em outros valores inferiores. Não foi possível determinar uma relação entre as dimensões características dos empacotamentos e a aderência desses dois modelos com os resultados numéricos.

O modelo de Leps (1973) apresenta menor aderência com os resultados obtidos das modelagens, mas a relação empírica é também mais simplificada que as demais, exigindo muito menos dados de entrada. Dado que a discrepância encontrada nesse modelo está dentro do aceitável para estimativas de fenômenos de fluxo, pode-se utilizar essa relação para estudos expeditos e estimativas iniciais em projetos conceituais sem maiores prejuízos.

4.7 INFLUÊNCIA DA FORMA – PARTÍCULAS REAIS VS. ESFERAS

Nesta seção serão discutidas as diferenças entre os resultados obtidos nas análises do Empacotamento 3, com dois tipos de morfologia dos grãos: as partículas com morfologia real obtidas do repositório virtual e esferas. Para tal, foi considerada a mesma curva granulométrica apresentada anteriormente para o Empacotamento 3, só alterando a forma das partículas. Com isso, as dimensões características dos meios porosos são equivalentes, alterando somente os índices físicos dos materiais e, conseqüentemente, a morfologia da matriz de vazios.

As esferas foram consideradas como malhas geodésicas de 162 pontos e 320 faces cada, e a porosidade obtida foi inferior ao valor obtido para o empacotamento com partículas: 42,1% contra 45,6%. Como a curva granulométrica só representa a dimensão média, os volumes individuais são diferentes para partículas de mesma dimensão, mas com diferentes morfologias.

O Empacotamento 3 foi escolhido para essa análise comparativa porque as esferas possuem um número muito superior de pontos coordenados e faces do que as partículas reais utilizadas. Portanto, a utilização de esferas nas curvas granulométricas mais finas gera um enorme aumento no processamento, inviável mesmo para os potentes *workstations* utilizados nesse trabalho.

Todos os procedimentos para obtenção dos corpos de prova e os casos de análise foram mantidos. Na Figura 4.25 apresentam-se os blocos de partículas com morfologia real (esquerda) e esferas.

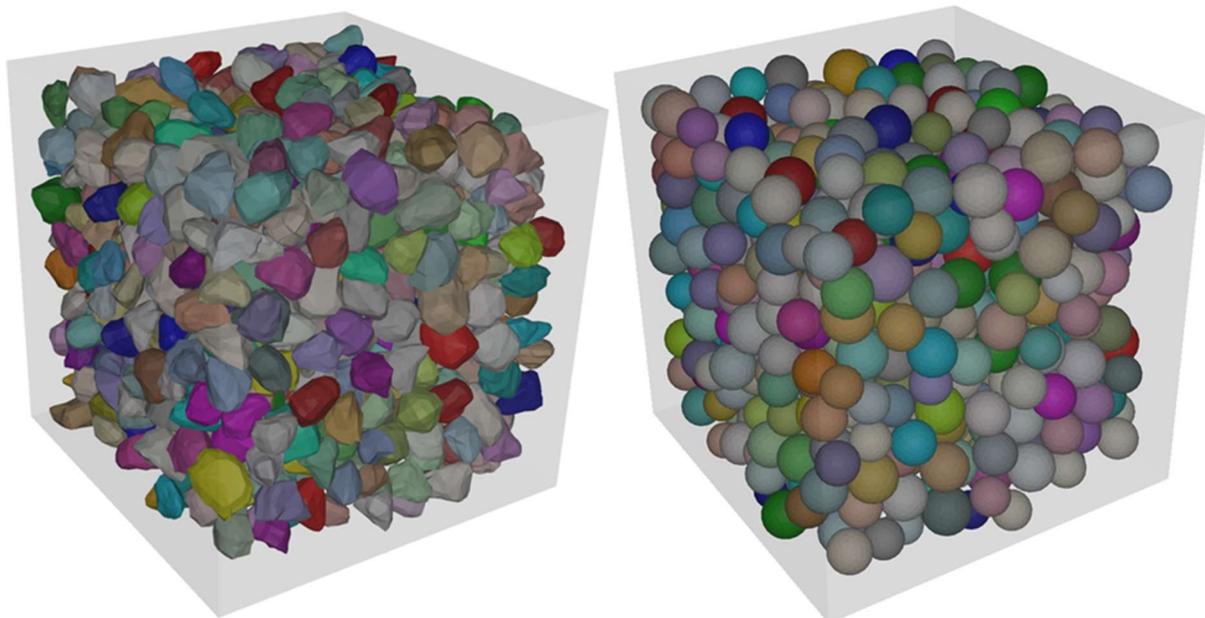


Figura 4.25: Empacotamento 3: Partículas (esquerda) e esferas (direita)

Assim como nas seções 4.3 e 4.4, foram avaliadas as distribuições de pressões, velocidades, vazões e tortuosidade. Os resultados de pressão obtidos nos corpos de prova e nas seções transversais médias estão apresentados na Figura 4.26.

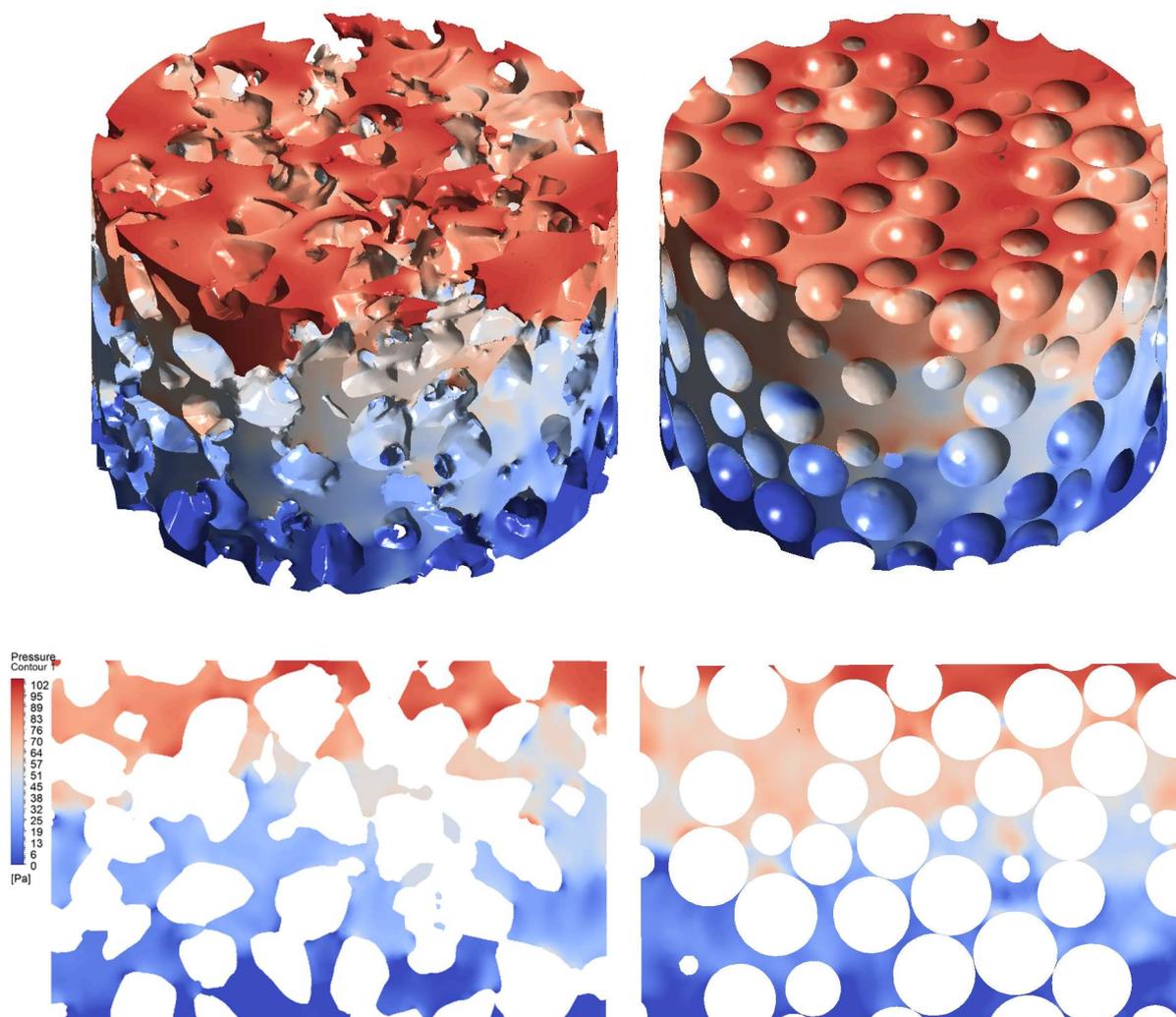


Figura 4.26: Distribuição das pressões no Empacotamento 3 – Corpos de prova (superior) e plano central (inferior) – Partículas (esquerda) e esferas (direita) – Caso 100 Pa

Os resultados apresentados na Figura 4.26 mostram que a queda de pressão ocorre mais rapidamente no corpo de prova com partículas reais do que no corpo de prova com partículas esféricas. A influência da porosidade na perda de carga mais uma vez aparenta não ser direta, visto que o valor do referido índice para o corpo de prova de esferas foi inferior ao valor para o meio poroso de partículas.

No plano transversal do empacotamento com partículas esféricas é possível perceber que ocorrem aumentos de pressão a montante de várias esferas, o que não ocorre de forma tão nítida no empacotamento com partículas reais.

Visualmente, não é possível perceber que as pressões ao longo de uma mesma altura do corpo de prova são mais ou menos dispersas no meio poroso com grãos esféricos. Na Tabela 4.8

apresentam-se os valores de R^2 obtidos para as duas análises, confirmando que os grãos esféricos geram dispersão de pressões mais uniforme. Intuitivamente, o observado na Tabela 4.8 faz sentido, visto que a morfologia das partículas individuais é uniforme, gerando também matriz porosa mais uniforme. Os resultados de R^2 apresentados na Tabela 4.8 mostram redução de valores entre as duas morfologias entre 3 e 5%.

Tabela 4.8: Valores de R^2 para o Empacotamento 3 – Partículas com morfologia real e esferas

Caso (Pa)	Partículas morfologia real	Esferas
1	0.906	0.939
2	0.897	0.930
5	0.89	0.920
10	0.878	0.914
25	0.873	0.901
50	0.857	0.894
75	0.855	0.888
100	0.853	0.887
200	0.845	0.871
350	0.842	0.858
500	0.839	0.859
750	0.836	0.850
1000	0.826	0.842
2000	0.821	0.837
3000	0.815	0.828

Na Figura 4.27 (inferior) estão apresentados os resultados comparativos das velocidades (parte superior) e *streamlines* (inferior).

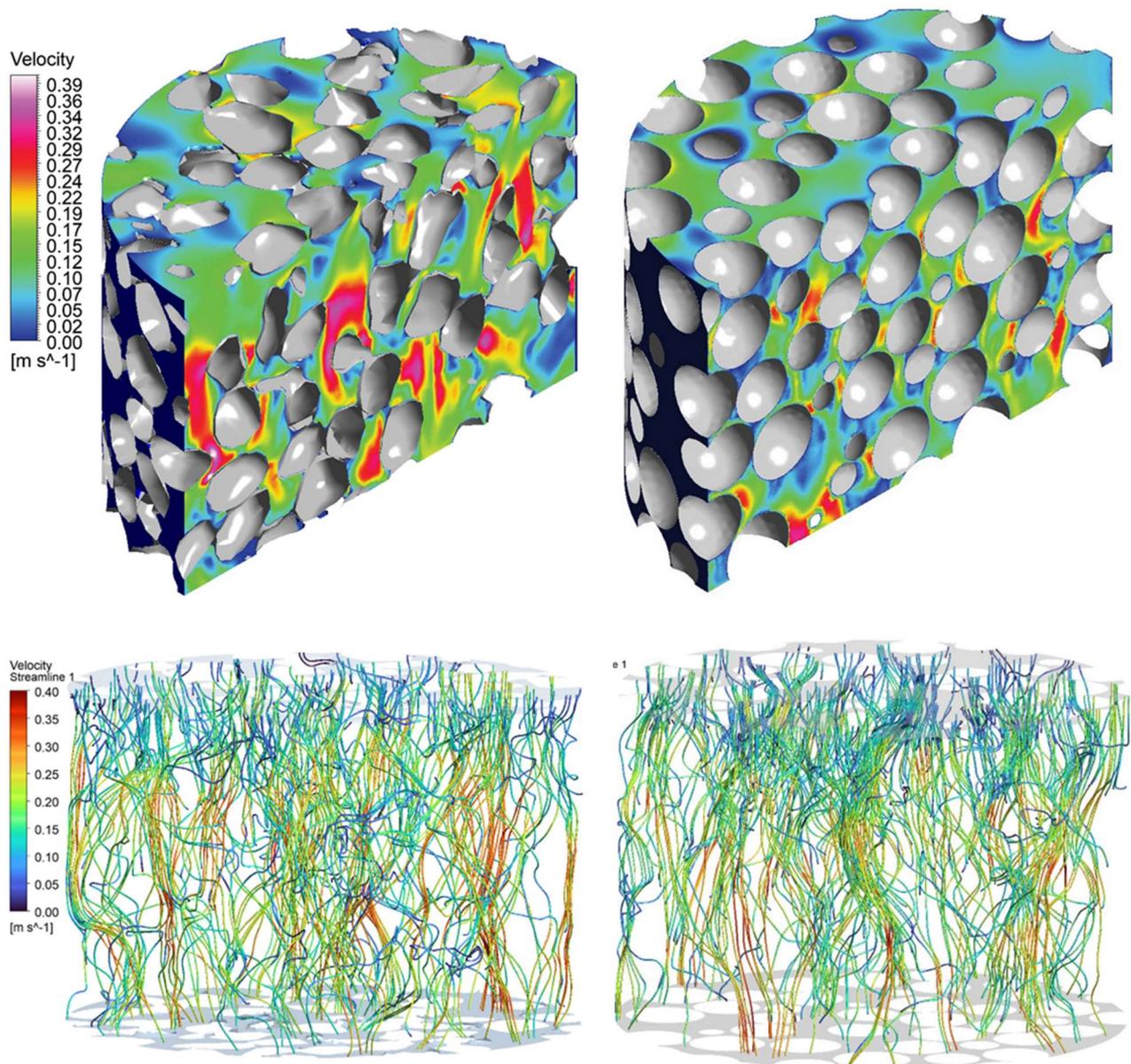


Figura 4.27: Distribuição das velocidades (superior) e *streamlines* (inferior) no Empacotamento 3 – Partículas (esquerda) e esferas (direita) – Caso 100 Pa

Mesmo que os macro poros e os canais de fluxo do meio poroso particulado aparentam ser de maiores dimensões, o meio poroso de partículas esféricas gera maior concentração das linhas de corrente. Ou seja, a matriz de vazios do pacote de partículas esféricas tende a gerar canais mais independentes entre si, provavelmente dada a morfologia dos canais de fluxo, que não apresentam mudanças abruptas de direção devido à ausência de arestas vivas.

Os picos de velocidade elevada são muito mais evidentes no corpo de prova de partículas com morfologias reais. As regiões de altas velocidades no meio poroso de grãos esféricos são claramente definidas nos canais de fluxo entre os macroporos, diferente do que acontece no

outro meio poroso. Esse fato favorece o entendimento de que a relação entre as dimensões dos macroporos e dos canais de fluxo no meio poroso de grãos esféricos é maior. Assim como o apresentado por Otaru *et al.* (2018), as dimensões dos canais de fluxo são muito mais determinantes para a percolação no meio poroso do que as dimensões e morfologia dos macroporos. No meio poroso com grãos esféricos, esse fato é ainda mais evidente.

Um fato interessante que surgiu com a análise da tortuosidade no empacotamento com grãos esféricos é que os valores tendem a decrescer com o aumento de pressão (Figura 4.28), diferente do que ocorreu em todos os meios porosos com partículas de morfologia real analisados. Vale ressaltar que o decréscimo no valor é de pequena monta, mas ainda sim notável para os casos de pressão adotados.

Novamente, pode-se concluir que a inexistência de arestas com ângulos agudos nas partículas esféricas não gera singularidades localizadas com elevadas perdas de carga hidráulica. Portanto, quando o fluxo é acelerado devido ao aumento do gradiente hidráulico, o fluxo se concentra ainda mais nos canais de fluxo já estabelecidos. Contudo, é interessante a realização de mais modelagens em pacotes de esferas para consolidar esse entendimento.

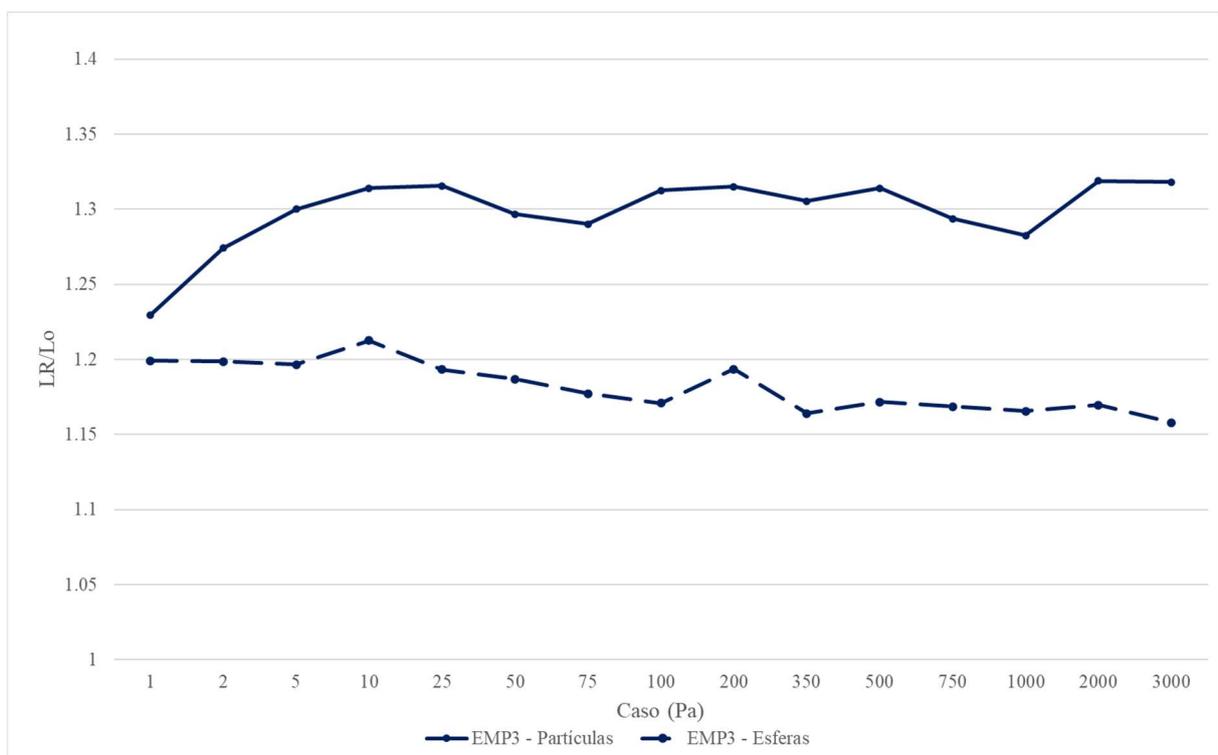


Figura 4.28: Tortuosidade – Empacotamento 3 – Partículas vs. esferas

Finalmente, para concluir a análise comparativa, são apresentadas as curvas de vazão total contra o gradiente hidráulico na Figura 4.29. Observa-se novamente uma diferença interessante entre os valores obtidos para os dois tipos de partículas.

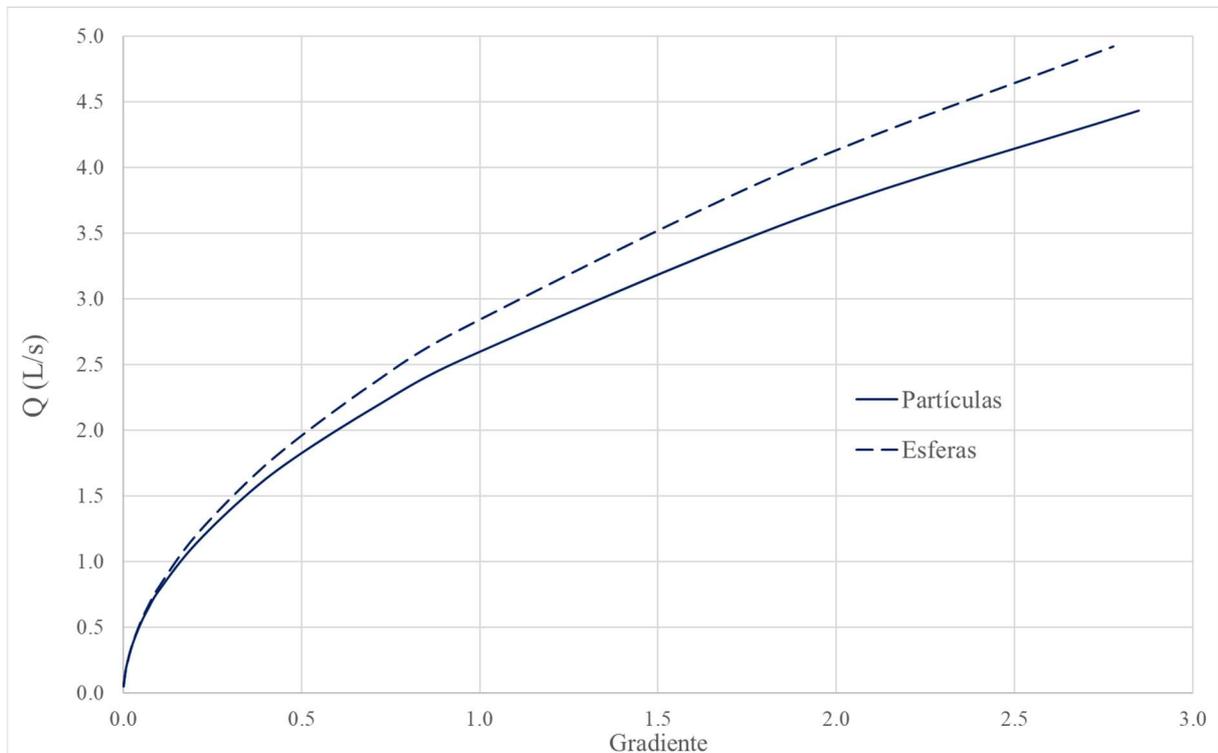


Figura 4.29: Vazões – Empacotamento 3 – Partículas vs. esferas

Apesar de que foi observada na Seção 4.3.3 que a porosidade influencia diretamente nas vazões, a morfologia da matriz porosa também tem papel fundamental na grandeza em questão. Apesar da porosidade do corpo de prova com partículas esféricas ser menor, as vazões foram consistentemente maiores, especialmente para gradientes maiores que 0,25. Essa observação fortalece ainda mais o entendimento de que a ausência de singularidades geométricas nas esferas favorece menores perdas de carga localizadas, aumentando também a capacidade de escoamento do meio poroso.

É possível então estabelecer que para utilização desses materiais para soluções de drenagem, as partículas com maior esfericidade apresentam melhor capacidade drenante. Contudo, é importante ressaltar que as partículas com elevados valores de esfericidade podem gerar piores condições de filtragem entre materiais de diferentes faixas granulométricas, justamente por diminuir o travamento entre os grãos.

4.8 RESULTADOS EXPERIMENTAIS

Na presente seção serão apresentados os resultados experimentais obtidos para complementação dos resultados numéricos. Observa-se que o objetivo da análise experimental é basicamente a validação da ordem de grandeza dos valores obtidos numericamente, sem a pretensão de englobar todos os resultados dos corpos de prova apresentados aqui. Há certa dificuldade de obtenção de algumas das curvas granulométricas obtidas do repositório virtual, visto que algumas delas atravessam poucas peneiras utilizadas para caracterização da curva, o que tornaria o material físico discrepante do material virtual.

Como apresentado na Seção 3.4, o empacotamento que possibilitou a obtenção de curva granulométrica o mais próximo possível do material virtual foi o Empacotamento 4. Portanto, foi utilizado o referido material no ensaio de fluxo.

O ensaio possibilitou a obtenção de valores de vazão total e gradiente hidráulico. Foram então obtidos cinco pontos da curva vazão-gradiente por meio do aumento progressivo da vazão de entrada. O limite máximo de vazão utilizado foi condicionado pela altura máxima do corpo de prova, pois a premissa utilizada é que não poderia haver galgamento do material, forçando todo o fluxo através do meio poroso. Visto isso, não foram obtidas leituras para todo o espectro de gradientes modelados numericamente.

Na Figura 4.30 está apresentado o ensaio em andamento, onde é possível perceber a diferença entre os níveis d'água de montante e jusante, indicando queda da freática. A freática média foi marcada em linha azul pontilhada para facilitar a visualização.



Figura 4.30: Ensaio de fluxo em canal aberto

Os resultados para os cinco pontos de ensaio obtidos estão apresentados na Tabela 4.9 e em forma gráfica na Figura 4.31, que apresenta juntamente a curva obtida na modelagem numérica do Empacotamento 4.

Tabela 4.9: Valores de gradiente hidráulico e vazões obtidos do ensaio no canal hidráulico

h_1 (cm)	h_2 (cm)	i	Q (l/s)
3.0	2.4	0.06	0.32
5.0	3.4	0.16	0.81
7.0	4.5	0.24	1.11
9.1	5.3	0.38	1.60
17.0	9.9	0.71	2.28

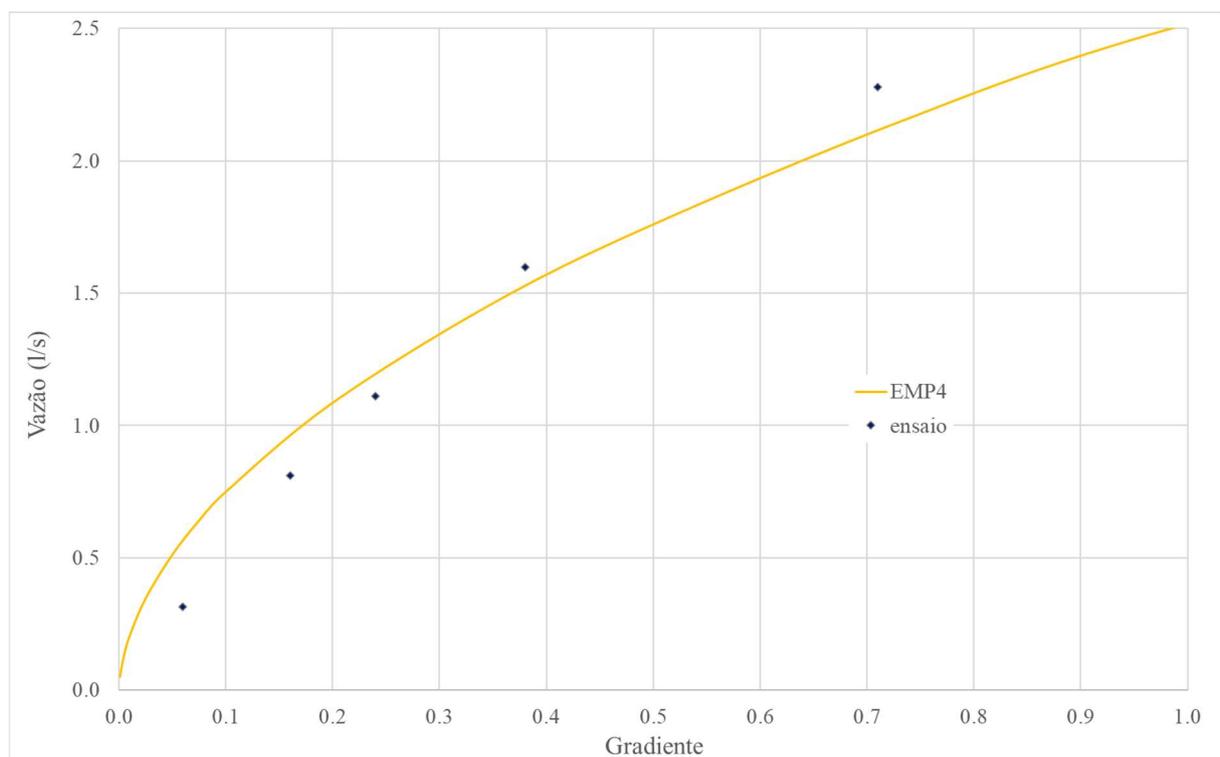


Figura 4.31: Resultado do ensaio de fluxo

Observa-se na Figura 4.31 que os resultados foram aderentes aos obtidos numericamente, especialmente considerando que a geometria do ensaio não corresponde à geometria do corpo de prova modelado. É importante destacar que o material também apresenta porosidade pouco menor que o material virtual. Como apresentado anteriormente, esse parâmetro influencia diretamente nas vazões.

Foi também possível perceber o comportamento não-linear da curva gradiente-vazão também nos pontos ensaiados. Os valores de vazões obtidos para gradientes abaixo de 0,3 foram inferiores aos obtidos numericamente, enquanto as vazões para gradientes maiores que 0,4 foram superiores às vazões das modelagens.

Considerando os fatores apresentados aqui, os resultados podem ser considerados satisfatórios, com diferença de gradiente máxima de aproximadamente 0,1, dada uma mesma vazão.

5 CONCLUSÕES

A utilização de métodos numéricos híbridos é uma ferramenta poderosa para a compreensão do fluxo em meios porosos na escala de grãos, por meio do detalhamento virtual realista da matriz porosa e da dinâmica de fluidos computacional (CFD). Esse tipo de análise, viabilizada pelo avanço da capacidade de processamento dos computadores, diminui drasticamente a necessidade de simplificações excessivas, tanto geométricas quanto físicas.

É evidente que a utilização de modelos de análise na escala de grãos não objetiva substituir modelos estabelecidos na literatura baseados na hipótese do contínuo, dado que a metodologia não apresenta vantagens para decisões práticas de engenharia e exige ainda muito custo computacional para processamento. Contudo, a metodologia apresentada mostra claramente o potencial da ferramenta para expansão do desenvolvimento teórico e prático, viabilizando o tratamento virtual com geometria fidedigna e que complementa de forma bastante realista a prática experimental.

A utilização das *streamlines*, recurso bastante difundido em análises de dinâmica de fluidos computacional, é um interessante artifício para obtenção da tortuosidade, variável que caracteriza complementarmente o fluxo nos meios descontínuos. Dada a dificuldade de obtenção dessa grandeza de forma analítica ou experimental, a metodologia numérica híbrida surge como boa alternativa para tal.

Os resultados obtidos relacionados à tortuosidade nesse trabalho mostram que esses valores aumentam conforme o aumento do gradiente hidráulico, confirmado a hipótese apresentada por Bear (1972). Interessantemente, a tortuosidade apresentou comportamento diferenciado para a análise com partículas esféricas, indicando que há influência direta da forma das partículas e, conseqüentemente, da matriz de vazios do meio poroso nos valores obtidos. Contudo, é interessante a ampliação do número de análises com partículas esféricas para confirmação de tal observação.

Foi possível observar que a concentração das linhas de corrente em canais de fluxo preferenciais dentro do meio poroso é mais acentuada quando são aumentadas as dimensões das partículas e quanto mais uniforme é a curva granulométrica.

A dispersão dos valores locais de pressão na matriz de vazios é também afetada diretamente pela granulometria dos materiais. As pressões são menos dispersas quanto mais fino e bem graduado é o material. A forma dos grãos também mostrou influência direta na distribuição das

pressões. Mesmo que as partículas do repositório virtual apresentem elevados valores de esfericidade, a diferença foi significativa entre os valores de R^2 obtidos para as pressões na comparação entre partículas com morfologia real.

Como amplamente difundido, as velocidades reais do fluido na matriz de vazios são bastante superiores às vazões específicas (velocidade de Darcy). Quanto mais elevado o gradiente hidráulico, maiores são as diferenças entre essas grandezas. No entanto, concluiu-se que a relação entre elas tende a estabilizar para gradientes hidráulicos mais elevados.

Os picos de velocidade que ocorrem no fluido não parecem ter relação direta com as dimensões características do material, mas sim com a morfologia e estrangulamentos dos canais de fluxo da rede porosa.

As vazões totais obtidas nas análises realizadas nesse trabalho foram bastante próximas para todos os materiais analisados, que possuem granulometria entre brita 0 e limite inferior de brita 3. Contudo, os materiais com maior variação de diâmetros e menor porosidade mostraram restringir a capacidade drenante.

A forma dos grãos também desempenha importante influência na drenagem, dado que o empacotamento com partículas esféricas permitiu a passagem de maior vazão, mesmo com porosidade inferior ao corpo de prova com partículas reais. Esse é um claro indicativo de que materiais granulares grossos mais esféricos devem ser preferidos para utilização em soluções de drenagem, quando for necessário o escoamento de vazões elevadas.

O início do regime de transição de escoamento nos meios modelados aconteceu em números de Reynolds muito próximos entre si, alterando somente o gradiente hidráulico limite entre as análises. Mesmo com variação de gradientes limite, foi constatado que a discordância do regime de Darcy ocorre em valores de gradientes muito baixos. Mesmo considerando que os meios porosos virtuais gerados se encontram no limite inferior de compacidade relativa, é muito importante notar que materiais granulares grossos fogem rapidamente da lei de Darcy. Portanto, valores de referência para permeabilidade obtidos da literatura devem ser utilizados com muita cautela, especialmente quando não for possível a execução de ensaios de laboratório em condições análogas à aplicação prática do material.

Os modelos utilizados para caracterização do meio poroso em regime laminar apresentaram boa aderência aos resultados numéricos, com exceção da formulação de Hazen (1911), que apresentou valores sistematicamente superiores aos demais. Os modelos de Kozeny-Carman

(Carman, 1937) e Chapuis (2004) podem ser utilizados para estimativas iniciais, dada a facilidade de obtenção dos parâmetros de entrada.

Os modelos de resistência ao fluxo para regimes não laminares que geraram resultados mais próximos dos obtidos numericamente foram os modelos de Ergun (1952) e Ergun, modificado por Ozahi (2008). As diferenças máximas obtidas foram de aproximadamente 25%. Observa-se, contudo, que os meios porosos apresentam valores de porosidade no limite físico superior, podendo conflitar com as premissas analíticas básicas dos modelos e materiais ensaiados.

É interessante destacar que os resultados experimentais obtidos em ensaio em canal hidráulico foram aderentes, sobretudo considerando a diferença de porosidade entre os materiais virtual e físico, e também diferença geométrica entre os modelos numéricos e o ensaio experimental. Porém, é importante observar a limitação das faixas de gradientes hidráulicos obtidos experimentalmente (menores que 0,75).

Finalmente, o trabalho permite concluir que o surgimento de técnicas modernas de modelagem numérica permite expandir a capacidade analítica do fenômeno físico, utilizando resultados obtidos em escala de grãos e substituindo a necessidade da hipótese do contínuo para o fluxo em meio poroso. Com o avanço exponencial da capacidade de processamento de *workstations* e do desenvolvimento de algoritmos para geração realista de meios porosos virtuais, as restrições inevitáveis impostas por modelos clássicos de fluxo em meios porosos poderão ser contornadas progressivamente.

SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Alguns aspectos não abordados no presente trabalho e que podem complementar as análises apresentadas aqui são:

- Utilização de algoritmos para compactação do pacote de partículas virtuais, a fim de reduzir as porosidades obtidas, avaliando profundamente a influência da compactação relativa em um mesmo material granular.
- Otimização do algoritmo empacotador para utilizar curva granulométrica volumétrica (peso) de referência, a fim de facilitar a criação de materiais realistas.
- Caracterização morfológica da matriz de vazios por meio de *softwares* de análises de imagem (ex. Avizo). Com essa tecnologia é possível a obtenção das dimensões dos canais de fluxo e

dos macroporos, que podem ser utilizadas para estudo consolidado da transição entre regimes de escoamento e da distribuição de velocidades.

- Adaptação de permeâmetro para ensaios de permeabilidade conforme os modelos numéricos, com possibilidade de obtenção de vazões e gradientes hidráulicos elevados.

- Aumento do volume de análises e ensaios para desenvolvimento de modelo não linear de resistência ao fluxo, alterando características morfológicas das partículas.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ANSYS, INC. (2021a). ANSYS Fluent User's Guide. ANSYS Inc., Canonsburg, PA, 4944p.
- ANSYS, INC. (2021b). ANSYS Fluent Workbench Tutorial Guide. ANSYS Inc., Canonsburg, PA, 66p.
- AKANJI, L. T., MATTHAI, S. K. (2009). Finite Element-Based Characterization of Pore-Scale Geometry and Its Impact on Fluid Flow. *Transport in Porous Media*, 81:241–259.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. (1995). NBR 13292: Solo: Determinação do coeficiente de permeabilidade de solos granulares à carga constante. Rio de Janeiro, RJ.
- BACHMAT, Y., BEAR, J. (1986). Macroscopic Modelling of Transport Phenomena in Porous Media. 1: The Continuum Approach. *Transport in Porous Media* 1, 213-240.
- BEAR, J., BACHMAT, Y. (1986). Macroscopic modeling of transport phenomena in porous media. 2: Applications to mass, momentum and energy transport. *Transport in Porous Media* 1, 241-269.
- BEAR, J. (1972). *Dynamics of fluids in porous media*. Elsevier, New York, USA, 756p.
- BLAKE, F.C. (1922). The Resistance of packing to fluid flow. *Trans. American Institute of Chemical Engineers*, 14:415-421.
- BRUN, F., MANCINI, L., KASAE, P., FAVRETTO, S. (2010). Pore3D: A software library for quantitative analysis of porous media. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research*, 615:326–332.
- BURKE, S.P.; PLUMMER, W.B. (1928). Gas flow through packed columns. *Ind. Eng. Chem.*, 20:1196–1200.
- CARMAN, P.C. (1937). Fluid flow through a granular bed. *Trans. Instn. Chem. Engrs*, 15: 150-156.
- CARMAN, P.C. (1956). *Flow of gases through porous media*. Butterworths, London.
- CAPUTO, Homero Pinto. (1987). *Mecânica dos Solos e Suas Aplicações*. Livros Técnicos e Científicos Editora, Rio de Janeiro, RJ, 1044 p.
- CHAPUIS, R. P., AUBERTIN, M. (2003a). Predicting the Coefficient of Permeability of Soils Using the Kozeny-Carman Equation. Report EPM–RT–2003-03, Département des génies civil, géologique et des mines, École Polytechnique de Montréal, Montreal, Canadá, 31p.
- CHAPUIS, R. P., AUBERTIN, M. (2003b). On the use of the Kozeny-Carman equation to predict the hydraulic conductivity of soils. *Canadian Geotechnical Journal*, 40(3): 616-628.
- CHAPUIS, R. P. (2004). Predicting the saturated hydraulic conductivity of sand and gravel using effective diameter and void ratio. *Canadian Geotechnical Journal*, 41 (5): 787-795.

CHILTON, T. H., COLBURN, A. P. (1931). Pressure drop in packed tubes, *Ind Engng. Chem.*, 23(8): 913–919.

COLLINS, R. E. (1961). *Flow of Fluids Through Porous Materials*. Reinhold, New York, USA, 270p.

COSTA, I. A. B., FARIAS, M. M., COSTA NETO, J., GÓIS, F. M. B. M., LUZ, M. P. (2023). Estudo de fluxo em escala de grãos. XXXIV Seminário Nacional de Grandes Barragens, Foz do Iguaçu, PR, 16p.

COSTA NETO, J. A. (2020). Interações Fluido-Sólido via Método Lattice Boltzmann e Elementos Discretos. Dissertação de Mestrado, Publicação G.DM-343/20, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 101 p.

CRESWELL, J. W. (2010). *Projeto de pesquisa: Métodos qualitativo, quantitativo e misto*. Artmed, Porto Alegre, RS, 126p.

CRUZ, P.T. (1996) 100 Barragens Brasileiras: Casos Históricos, Materiais de Construção, Projeto. Oficina de Textos, São Paulo, SP, 647 p.

CRUZ, P. T. (2009). *Barragens de Enrocamento com Face de Concreto*. Oficina de Textos, São Paulo, SP, 448p.

CUNDALL, P. A., STRACK, O. D. L. (1979). A Discrete Numerical Model for Granular Assemblies. *Géotechnique*, 29, 47-65.

ÇENGEL, Y. A., CIMBALA, J. C. (2007). *Mecânica dos Fluidos: fundamentos e aplicações*. AMGH, Porto Alegre, RS, 818p.

DARCY, H. (1856). *Les fontaines publiques de la ville de dijon*. Paris, Dalmont.

DIÓGENES, D. F. (2016). Avaliação das Propriedades de Forma de Agregados Utilizados em Lastro Ferroviário a Partir do Uso do Processamento Digital de Imagens. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, CE, 147p.

DIÓGENES, D. F., CASTELO BRANCO, V. T. F. (2016). Avaliação das propriedades de forma de agregados utilizados em lastro ferroviário a partir do uso do Processamento Digital de Imagens. ANPET XXX. Rio de Janeiro, RJ, 1-12.

DIÓGENES, D. F. (2021). Proposição de Uma Ferramenta para Seleção de Agregados Aplicados em Obras de Infraestrutura de Transportes: Propriedades Petrográficas, Físicas, Morfológicas. Tese de doutorado, Universidade do Ceará, Fortaleza, CE, 298 p.

DUDGEON, R.D. (1966). An experimental study of the flow of water through coarse granular media. *Houllie Blanche*, 7:785–802.

DYCK, N. J., STRAATMAN, A. G. (2014). A new approach to digital generation of spherical void phase porous media microstructures. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 81:470–477.

ERGUN, S. (1952). Fluid flow through packed columns. *Chemical Engineering Progress*, 48:89-94.

EVIRGEN, B., ONUR, M. I., TUNCAN, M., TUNCAN, A. (2015). Determination of the freezing effect on unconfined compression strength and permeability of saturated granular soils. *International Journal of GEOMATE* 8(2):1283-1287.

FANCHER G. H., LEWIS, J. A. (1933). Flow of simple fluids through porous materials. *Ind. Eng. Chem.*, 25:1139–1147.

FELL, R., MacGREGOR, P., STAPLEDON, D., BELL, G., FOSTER, M. (2015). *Geotechnical Engineering of Dams*. Taylor & Francis Group, London, UK, 1336 p.

FORCHHEIMER, P. (1901). *Wasserbewegung durch boden*, Zeit. Ver. Deutsch Ing. v. 45, p. 1781–1788.

GÓIS, F. M. B. M., FARIAS, M. M., MORFA, C. A. R., COSTA NETO, J. A. (2023a). Flow modelling through a packing of real particles. 10th European Conference on Numerical Methods in Geotechnical Engineering, Imperial College, London, 6p.

GÓIS, F. M. B. M., FARIAS, M. M., COSTA NETO, J., LUZ, M. P. (2023b). Avanços no estudo de percolação em meios porosos na escala de grãos utilizando métodos numéricos híbridos. XXXIV Seminário Nacional de Grandes Barragens, Foz do Iguaçu, PR, 15p.

GORMAN, J., BHATTACHARYYA, S., CHENG, L., ABRAHAM, J. P. (2021). *Turbulence Models Commonly Used in CFD. Applications of Computational Fluid Dynamics Simulation and Modeling*, Bhattacharyya, S. (ed.), IntechOpen, London, UK, 19p.

HARR, M. E. (1962). *Groundwater and Seepage*, McGraw-Hill, New York, 283p.

HAZEN, A. (1892). *Some physical properties of sands and gravels, with special reference to their use in filtration*. 24th Annual Report. Massachusetts State Board of Health, Boston, USA.

HAZEN, A. (1911). Discussion of 'Dams on sand foundations' by A. C. Koenig. *Transactions of the American Society of Civil Engineers*, 73:199-203.

HIRSCH, C. (2007). *Numerical Computation of Internal and External Flows: The Fundamentals of Computational Fluid Dynamics*. Butterworth-Heinemann, Oxford. 680p.

HU, H. P., ZHOU, Z. Y., YANG, R. Y., YU, A. B. (2007). Discrete particle simulation of particulate systems: Theoretical developments. *Chemical Engineering Science*, 62(13): 3378-3396.

IRMAY, S. (1958). On the theoretical derivation of Darcy and Forchheimer formulas. *Eos, Transactions American Geophysical Union*, 39(4): 702-707.

JIVKOV, A. P., HOLLIS, C., ETIESE, F., McDONALD, S. A., WITHERS, P. J. (2013). A novel architecture for pore network modelling with applications to permeability of porous media. *Journal of Hydrology*, 486:246–258.

- KATAGUIRI, J., KONNO, Y., YONEDA, J., TENMA, N. (2017). Porescale modeling of flow in particle packs containing graincoating and pore-filling hydrates: Verification of a Kozeny–Carman-based permeability reduction model. *Journal of Natural Gas Science and Engineering*, 45:537-551.
- KOCH K., REVIL, A., HOLLIGER, K. (2012). Relating the permeability of quartz sands to their grain size and spectral induced polarization characteristics. *Geophysical Journal International*, 190: 230-242.
- KOZENY, J. (1927). *Über kapillare Leitung der Wasser in Boden*, Sitzungsber. Akad. Wiss. Wien, 136, 271 – 306.
- KUNDU, P. K., COHEN, I. M. (1990). *Fluid Mechanics*. Academic Press, San Diego, CA, 730p.
- LATIEF, F. D. E., FAUZI, U. (2012). Kozeny-Carman and empirical formula for the permeability of computer rock models. *International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences* 50:117-123.
- LEPS, T. M. (1973). *Flow Through Rockfill*. Embankment Dam Engineering – Casagrande Volume, R.C. Hirschfeld & S.J. Poulos (eds.), John Wiley, New York, USA, pp. 19-37.
- LEHMANN, P., WYSS, P., FLISCH, A., LEHMANN, E., VONTOBEL, P., KRAFCZYK, M., KAESTNER, A., BECKMANN, F., GYGI, A., FLÜHLER, H. (2006). Tomographical imaging and mathematical description of porous media used for the prediction of fluid distribution. *Vadose Zone Journal*, 5:80–97.
- LOPÉZ, J. C., TOLEDO, M. A., MORAN, R. (2021). A unified view of nonlinear resistance formulas for seepage flow in coarse granular media. *Water*, 13(1967): 1-24.
- MACCORMACK, R.W., PAULLAY, A.J. (1972). Computational efficiency achieved by time splitting of finite difference operators. *AIAA Paper* 72–154.
- MARTINS, A., A., A. (2006). *Fenómenos de Transporte em Meios Porosos – escoamento Monofásico e Transporte de Massa*. Dissertação de Doutoramento, Faculdade de Engenharia, Universidade do Porto, Porto, Portugal, 724 p.
- MASAD, E. A., AL-ROUSAN, T., BUTTON, J., LITTLE, D., TUTUMLUER, E. (2005). Test methods for characterizing aggregate shape, texture and angularity. Report NCHRP –555, National Cooperative Highway Research Program. National Research Council, Washington, DC, USA, 85p.
- MATHEWS, T., MATTHEWS, G. P., RIDGWAY, C. J., MOSS, A. K. (1997). Measurement of Void Size Correlation in Inhomogeneous Porous Media. *Transport in Porous Media*, 28:135–158.
- MCDONALD, P. W. (1971). The computation of transonic flow through two-dimensional gas turbine cascades. *ASME Paper* 71-GT-89.

- MISHRA, P., AHARWAL, K.R. (2018). A review on selection of turbulence model for CFD analysis of air flow within a cold storage. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, Kattankulathur, India, 402: 012145. 9p.
- MOLLON, G., ZHAO, J. (2012) Fourier–Voronoi-based generation of realistic samples for discrete modelling of granular materials. *Granular Matter*, 14: 621–638.
- MOLLON, G., ZHAO, J. (2013) Generating realistic 3D sand particles using Fourier Descriptors. *Granular Matter*, 15: 95–108.
- MOLLON, G., ZHAO, J. (2014) 3D generation of realistic granular samples based on random fields theory and Fourier shape descriptors, *Comput. Methods Applied Mechanics and Engineering*, 279: 46–65.
- MORALES, I. P., FARIAS, M. M., VALERA, R. R., MORFA, C. R., CARVAJAL, H. E. M. (2015) Contributions to the generalization of advancing front particle packing algorithms. *International Journal for Numerical Methods in Engineering*, 107(12): 993-1008.
- MORFA, C. R, MORALES, I. P., FARIAS, M. M., NAVARRA, E. O. I., VALERA, R. R., CASAÑAS, H. D. (2016) General advancing front packing algorithm for the discrete element method. *Computational Particle Mechanics*, 5:13-33.
- MORFA, C. R., CORTÉS, L. A., FARIAS, M. M., MORALES, I. P., VALERA, R. R., ONATE, E. (2017) Systemic characterization and evaluation of particle packings as initial sets for discrete element simulations. *Computational Particle Mechanics*, 5:319-334.
- OCAMPO-GÓMEZ, D.A. (2013). Modelagem de Problemas de Fluxo na Escala Granular Usando o Método Lattice Boltzmann. Dissertação de Mestrado, Publicação G.DM-228/13, Departamento de Engenharia Civil, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 118 p.
- OTARU, A. J., MORVAN, H.P., KENNEDY, A. R. (2008) Measurement and simulation of pressure drop across replicated porous aluminium in the Darcy-Forchheimer regime. *Acta Materialia*, 149: 265-273.
- OZAHİ, E., GUNDOĞDU, M. Y., CARPINLIOĞLU, M. Ö. (2007). A Modification on Ergun’s Correlation for Use in Cylindrical Packed Beds With Non-spherical Particles. *Advanced Powder Technology*. 19:369-381.
- PARK, J., SANTAMARINA, J. C. (2020). The critical role of pore size on depth-dependent microbial cell counts in sediments. *Nature Scientific Reports*, 10:21692.
- RECAREY, C., PÉREZ, I., ROSELLÓ, R., MUNIZ, M., HERNÁNDEZ, E., GIRALDO, R., OÑATE, E. (2019). Advances in particle packing algorithms for generating the medium in the Discrete Element Method. *Computer methods in applied mechanics and engineering*. 345: 336-362.
- REN, X., ZHAO, Y., DENG, Q., KANG, J., LI, D., WANG, D. (2016). A relation of hydraulic conductivity — Void ratio for soils based on Kozeny-Carman equation. *Engineering Geology*, 213: 89-97.

- SCHEIDEGGER, A. E. (1957) *The Physics Of Flow Through Porous Media*. University of Toronto Press, Toronto, CAN, 236p.
- SCHNEEBELI, A.E. (1955). Experiences sur la limite de validité de la loi de Darcy et l'apparition de la turbulence dans un écoulement de filtration. *La Houille Blanche*, 9: 141-149.
- SCHULZ, R., RAY, N., ZECH, S., RUPP, A., KNABNER, P. (2019). Beyond Kozeny-Carman: Predicting the Permeability in Porous Media. *Transport in Porous Media* 130:487-512.
- SILVA, M. T. Q. S., CARDOSO, M. R., VERONESE, C. M. P. (2022). Tortuosity: A brief review. *MaterialsToday*, 58(4): 1344-1349.
- STEPHENSON, D.J. (1979). *Rockfill in Hydraulic Engineering*. Elsevier, Amsterdam, Netherlands, 215p.
- TANEDA, S. (1956). Experimental Investigations of the Wakes Behind Cylinders and Plates at Low Reynolds Numbers. *J. Phys. Soc. Japan* 11.
- VALERA, R. R., MORALES, I. P., VANMAERCKE, S., MORFA, C. R., CORTÉS, L. A., CASAÑAS, H. D. (2015). Modified algorithm for generating high volume fraction sphere packings. *Computational Particle Mechanics*, 2: 161-172.
- VALERA, R. L. R., GONZÁLEZ, J.I., OLIVEIRA JUNIOR, M., FARIAS, M. M., FUENTES, M. A. C., MARTÍNEZ, R. T., AGUILA, J. P., ANSELMI, L. A. M., MORFA, C. A. R., OÑATE, E. (2022). Development and coupling of numerical techniques for modeling micromechanical discrete and continuous media using real particle morphologies. *Computational Particle Mechanics*. 10: 121-141.
- WANG, Z., XIE, J., GAO, L., LIU, Y., TANG, L. (2020). Three-dimensional characterization of air voids in porous asphalt concrete. *Construction and Building Materials*, 272:121633.
- WARD, J. C. (1964). Turbulent flow in porous media. *Journal of the Hydraulics Division, ASCE*, 5: 1-12.
- WILCOX, D. C. (2006). *Turbulence Modeling for CFD*. DCW Industries, 3rd ed., LA Cañada, USA, 515p.
- WILKES, J. O. (2006). *Fluid Mechanics for Chemical Engineers – with Microfluidics and CFD*. Pearson Education, New Jersey, USA, 742 p.
- WILKINS, J. K. (1956). Flow of water through rockfill and its application to the design of dams. *Proceedings 2nd Australia-New Zealand Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, NZ Eng*, 10: 382-387.
- WOOD, B. D., HE, X., APTE, S. V. (2020). Modeling turbulent flows in porous media. *Annual Review of Fluid Mechanics* 52:171-203.
- WRIGHT, D.E. (1968). Nonlinear flow through granular media. *J. Hydraul. Div.*, 4:851–872.
- XU, P., YU, B. (2007) Developing a new form of permeability and Kozeny–Carman

constant for homogeneous porous media by means of fractal geometry. *Advances in Water Resources*, 31:74–81.

YU, A.B., STANDISH, N. (1988). An analytical–parametric theory of the random packing of particles. *Powder Technol.*, 55:171–186.

ZUBELDIA, E.H. (2017). Aplicação do método *Smoothed Particle Hydrodynamics* ao estudo de erosão superficial de solos, Publicação G.TD-282/17, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 106 p.

APÊNDICE A - PRESSÃO

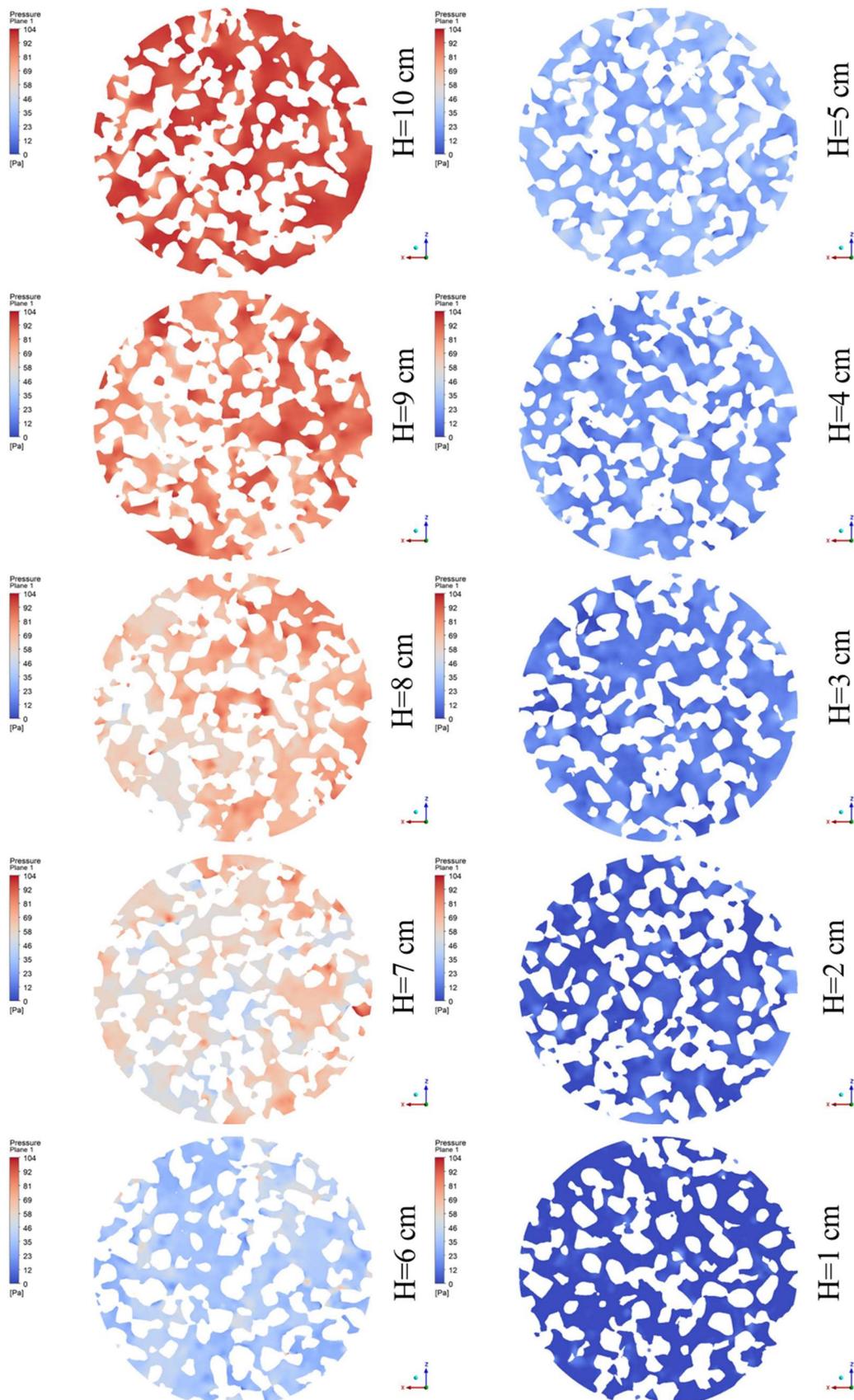


Figura A. 1: Pressões em diferentes alturas do corpo de prova – EMP6 – Caso 100 Pa

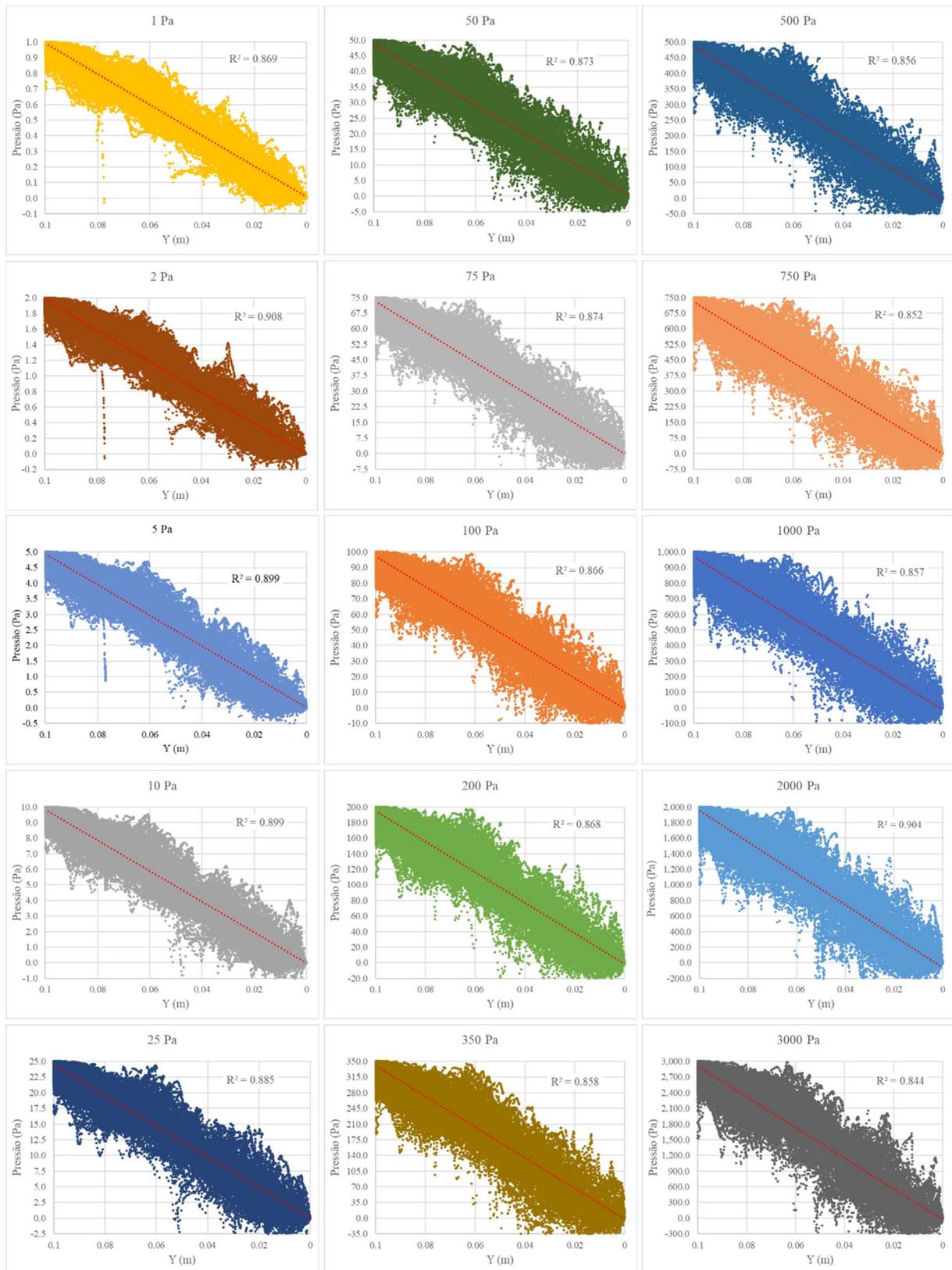


Figura A. 2: Dispersão das pressões obtidas nas *streamlines* em torno da média – Empacotamento 1

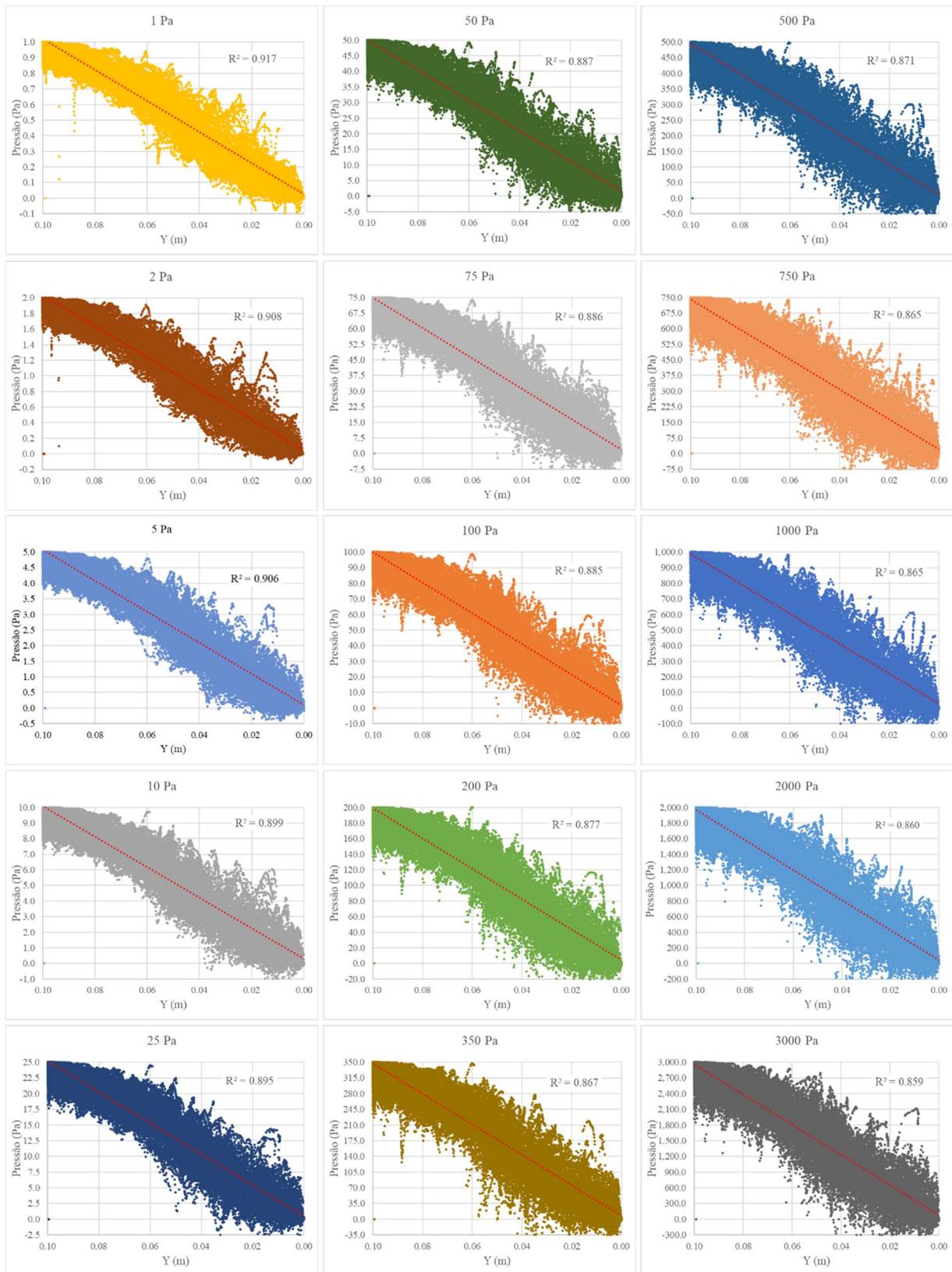


Figura A. 3: Dispersão das pressões obtidas nas *streamlines* em torno da média – Empacotamento 2

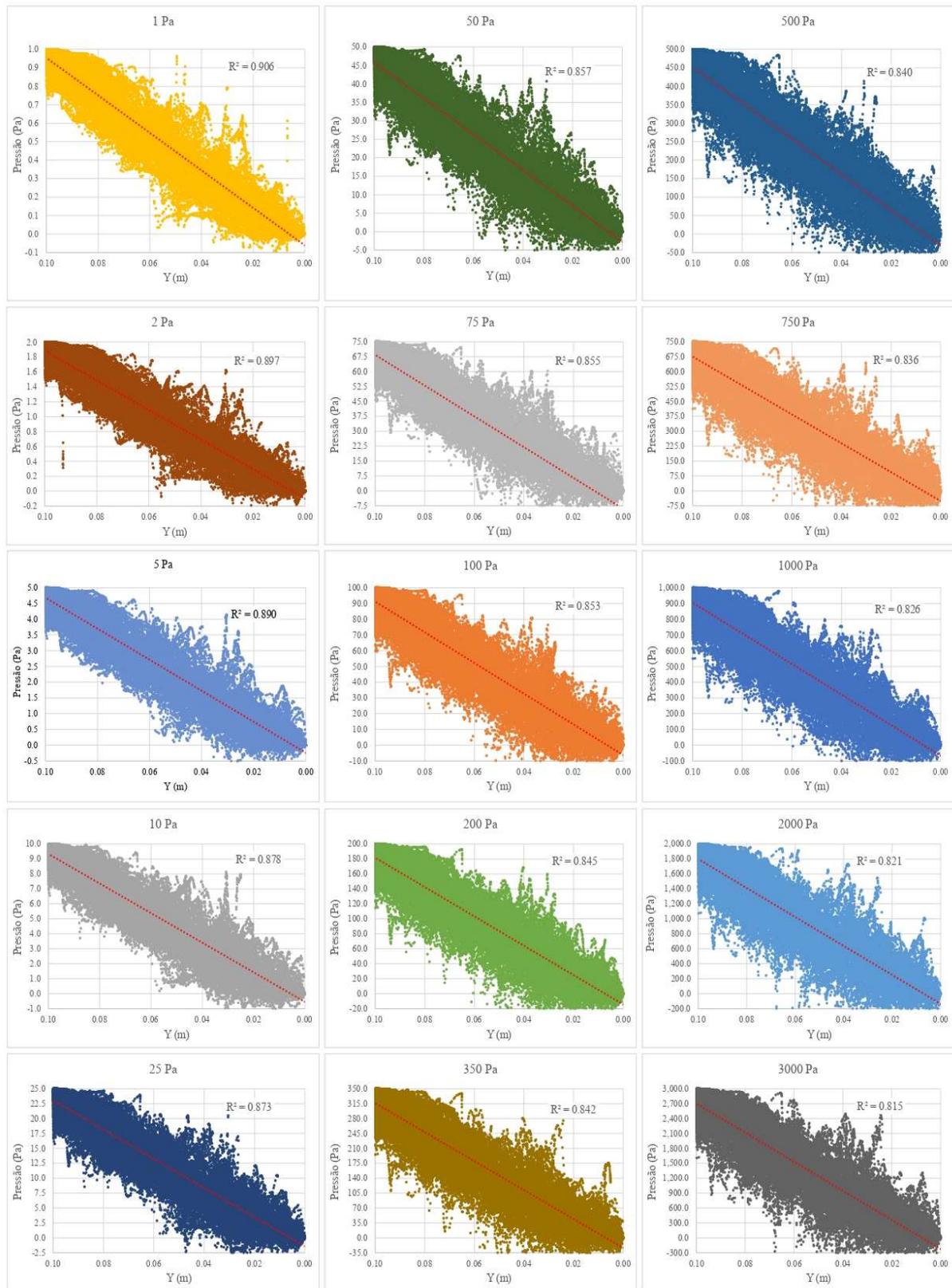


Figura A. 4: Dispersão das pressões obtidas nas *streamlines* em torno da média – Empacotamento 3

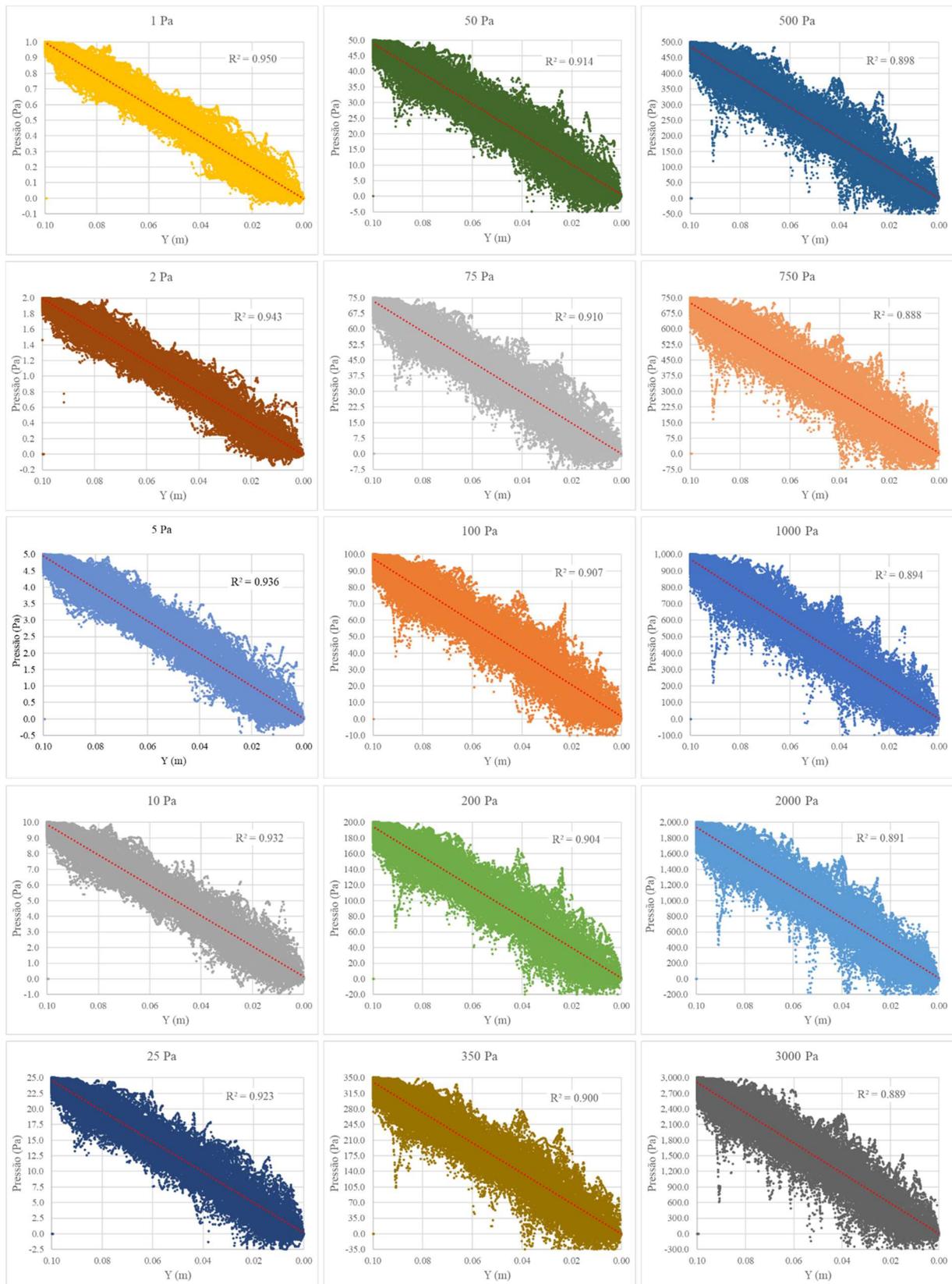


Figura A. 5: Dispersão das pressões obtidas nas *streamlines* em torno da média – Empacotamento 4

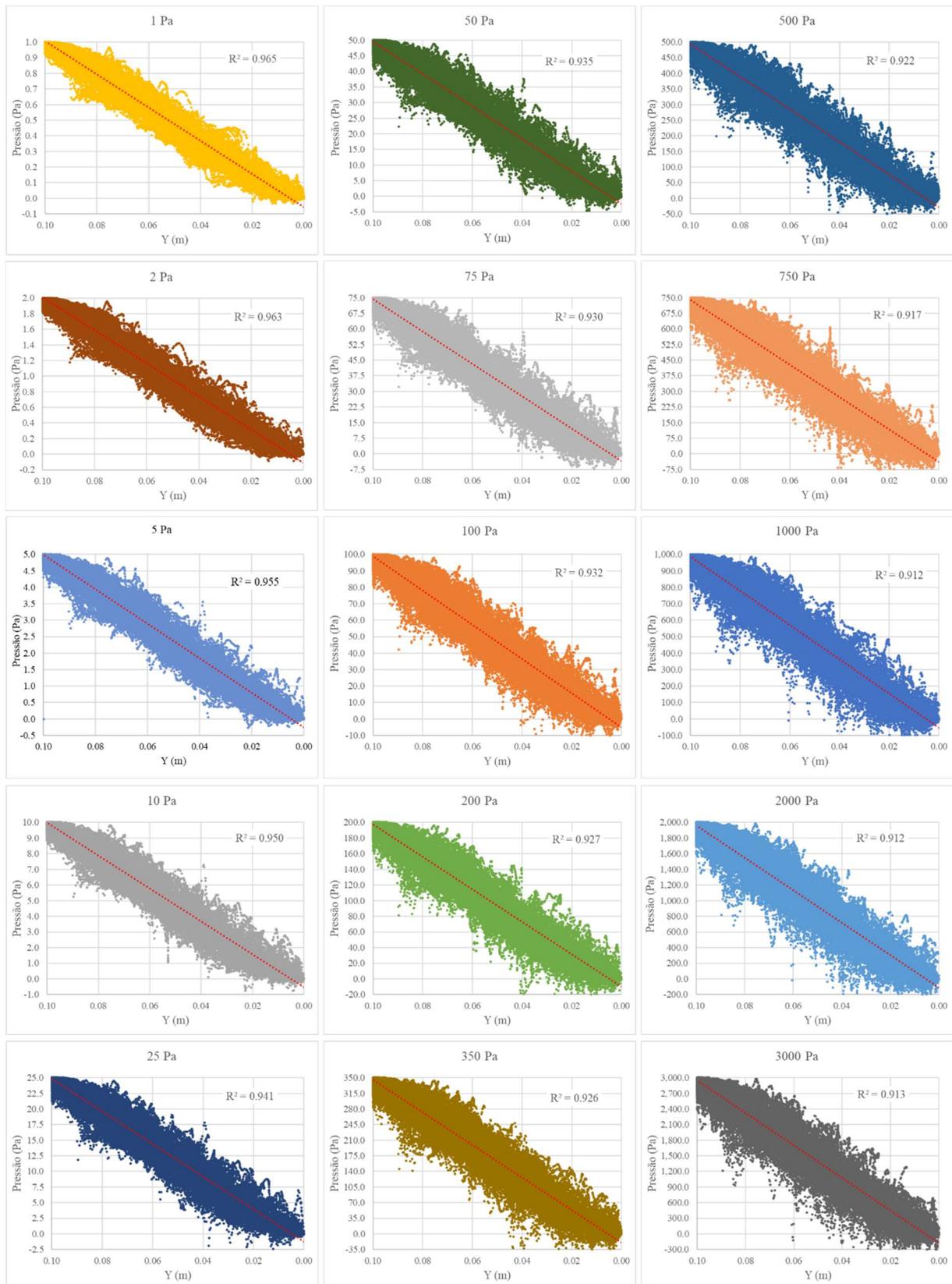


Figura A. 6: Dispersão das pressões obtidas nas *streamlines* em torno da média – Empacotamento 5

APÊNDICE B - VELOCIDADE

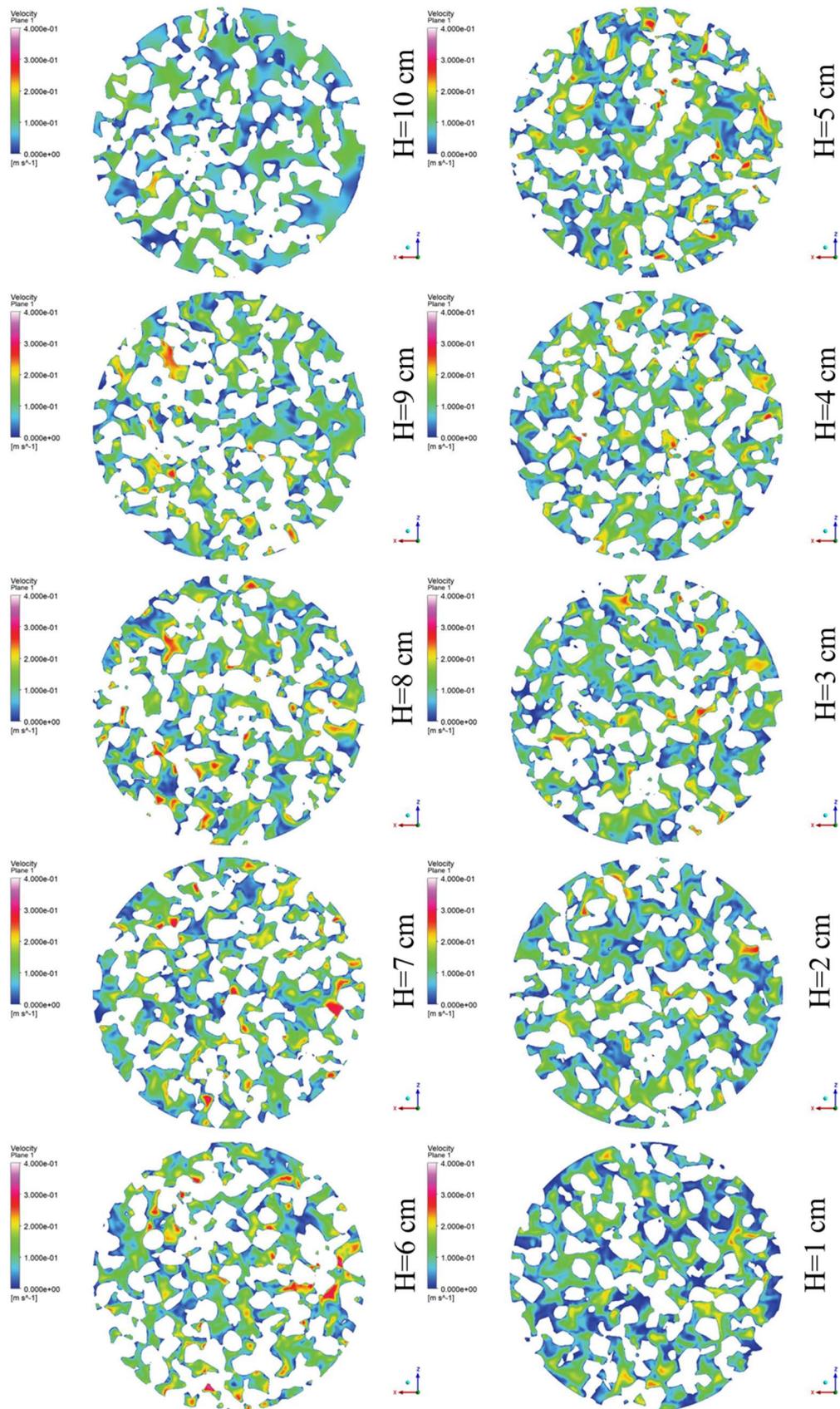


Figura B. 1: Velocidades em diferentes alturas do corpo de prova – EMP6 – Caso 100 Pa

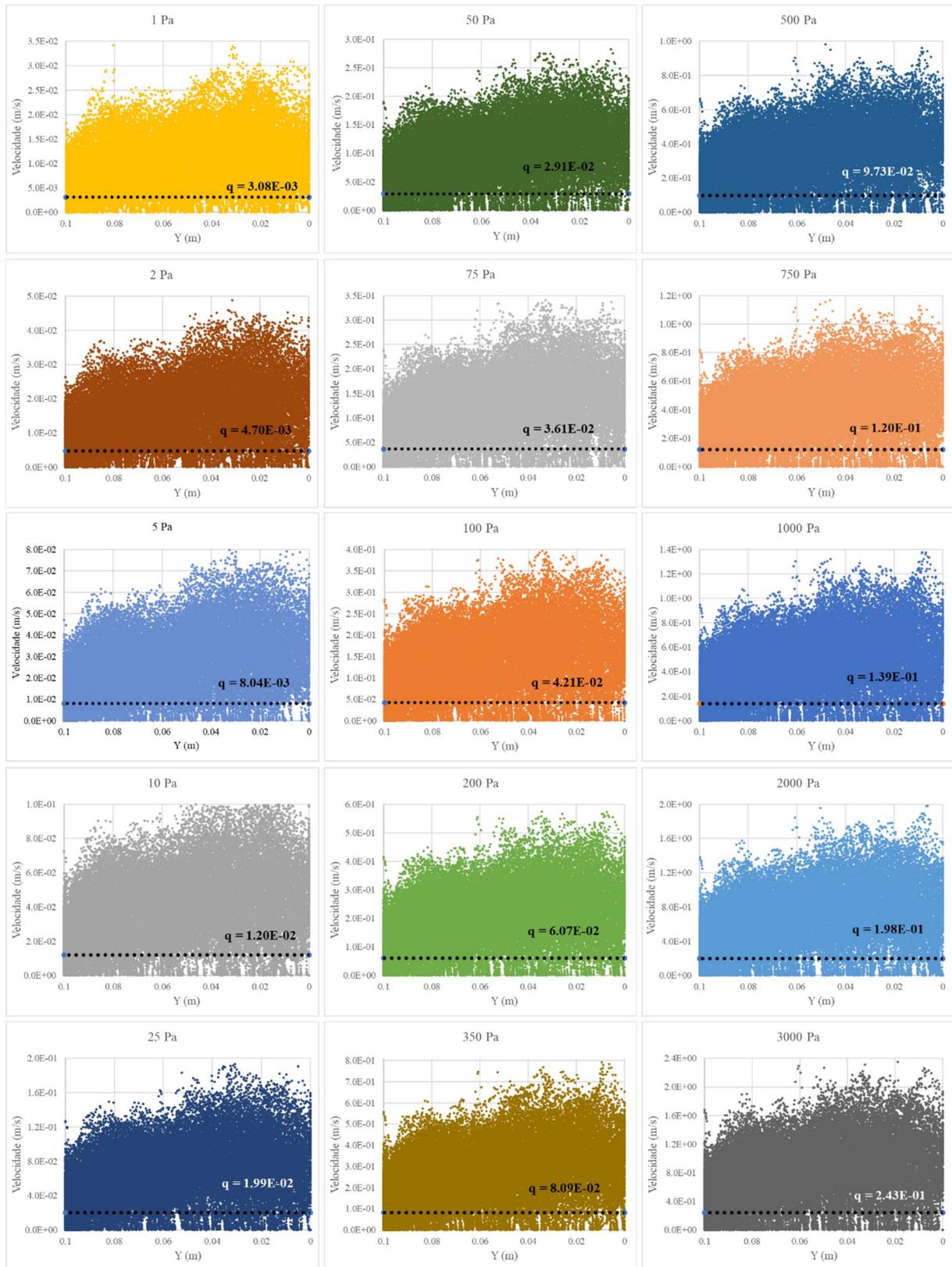


Figura B. 2: Distribuição das velocidades ao longo das *streamlines* – Empacotamento 1

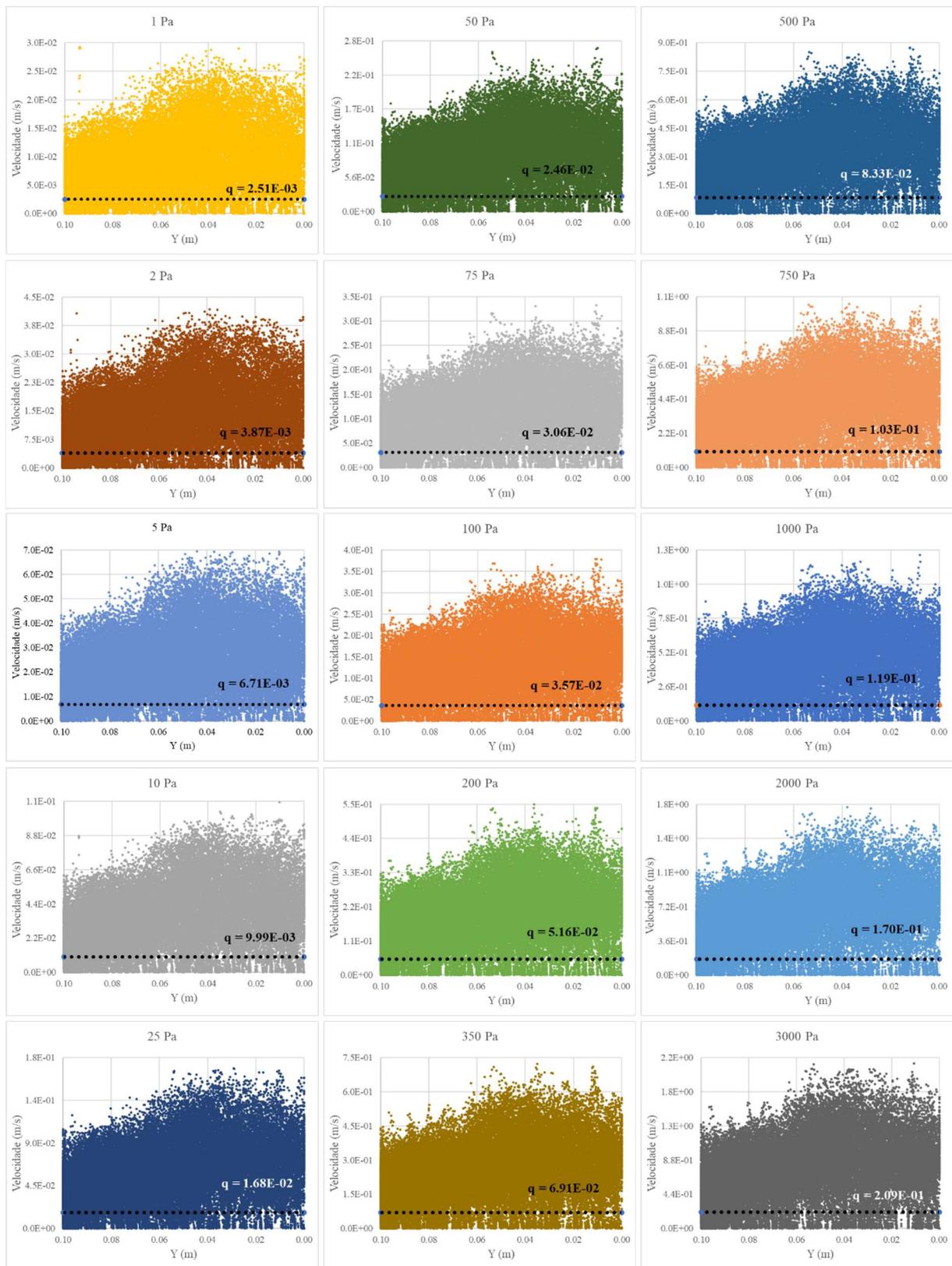


Figura B. 3: Distribuição das velocidades ao longo das *streamlines* – Empacotamento 2

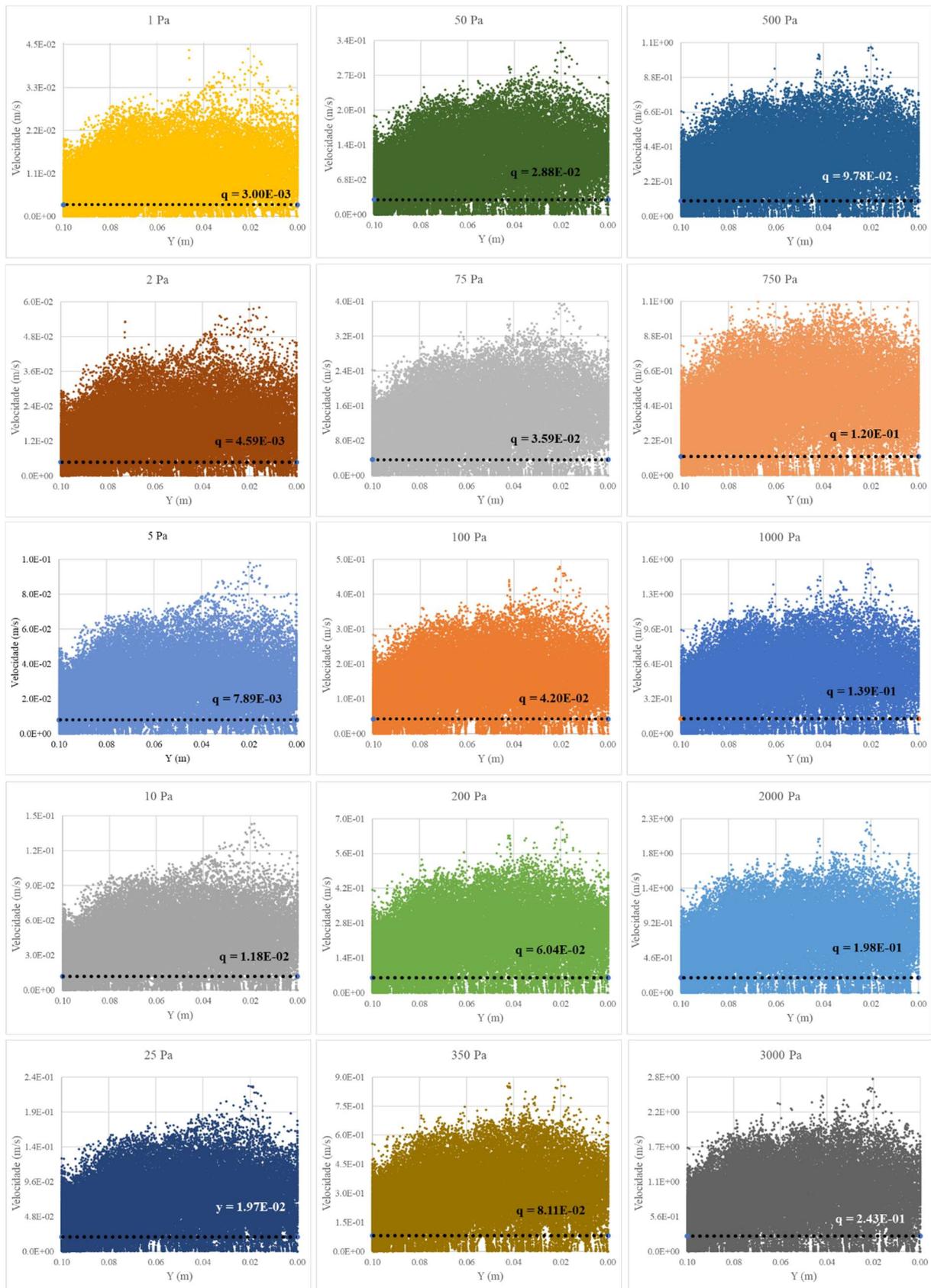


Figura B. 4: Distribuição das velocidades ao longo das *streamlines* – Empacotamento 3

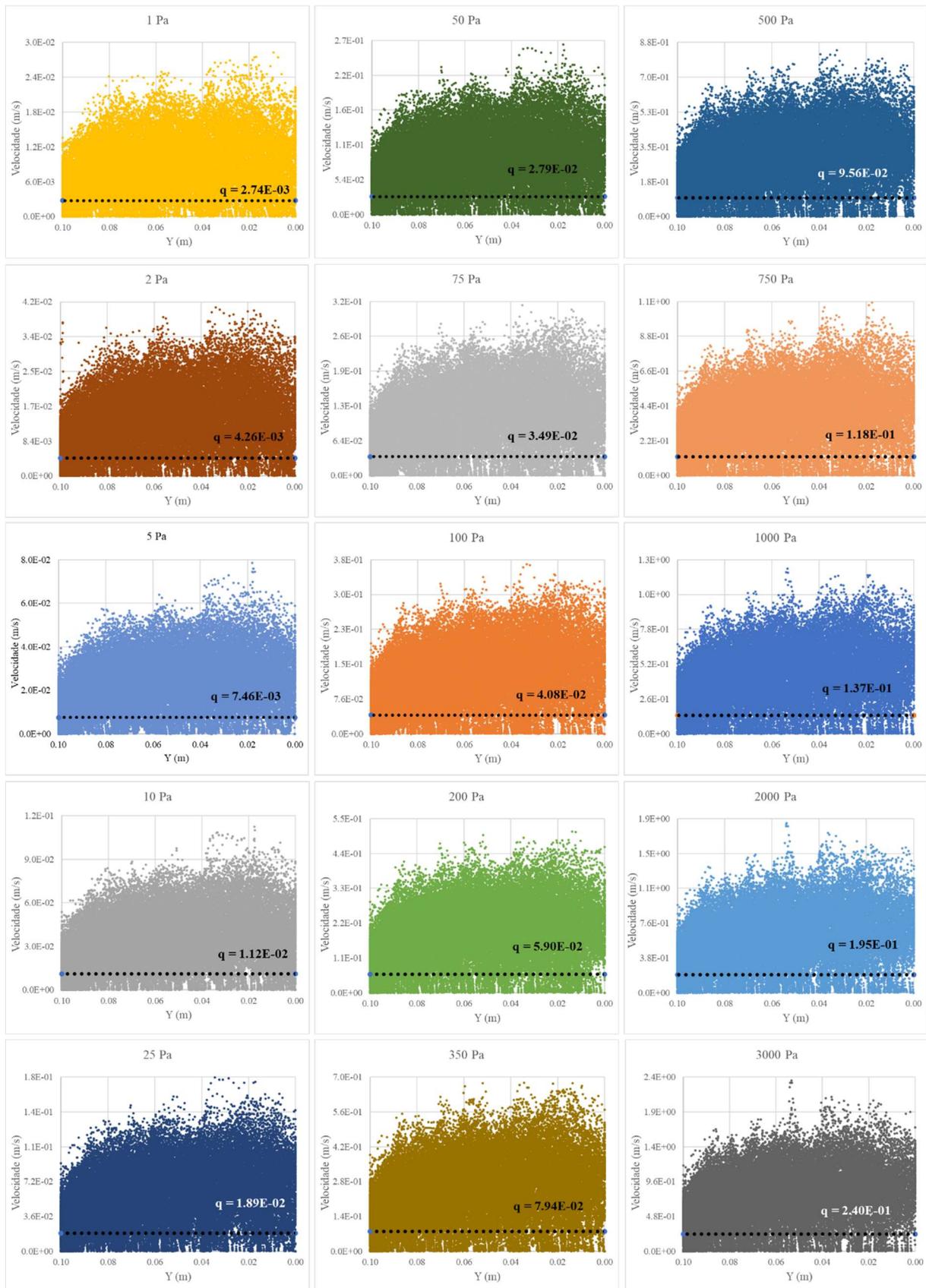


Figura B. 5: Distribuição das velocidades ao longo das *streamlines* – Empacotamento 4

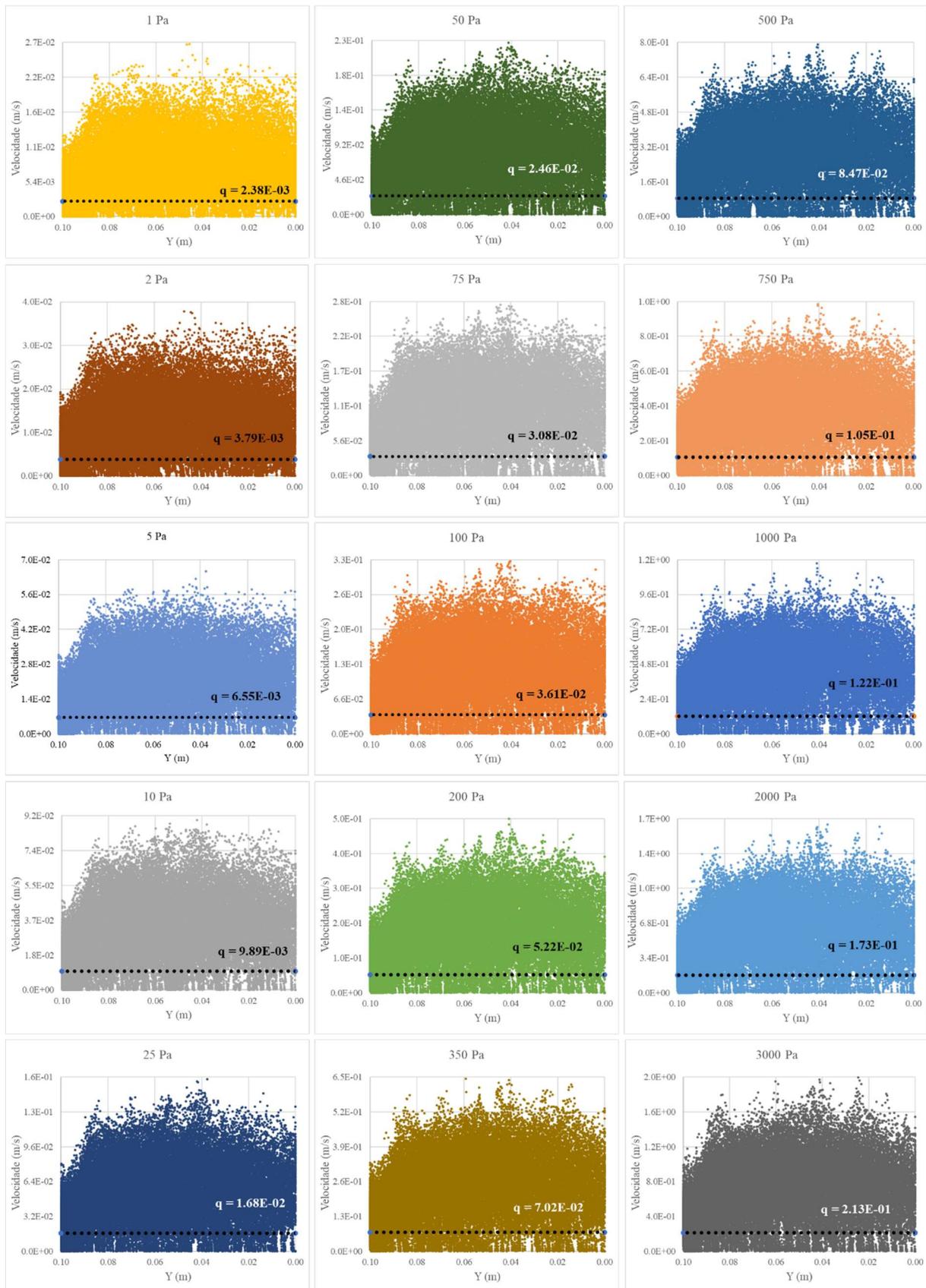


Figura B. 6: Distribuição das velocidades ao longo das *streamlines* – Empacotamento 5

Tabela B. 1: Valores de velocidades médias e máximas

Caso (Pa)	EMP1			EMP2			EMP3		
	q (m/s)	v (m/s)	Vmax (m/s)	q (m/s)	v (m/s)	Vmax (m/s)	q (m/s)	v (m/s)	Vmax (m/s)
1	3.1E-03	6.6E-03	3.5E-02	2.5E-03	5.9E-03	2.9E-02	3.0E-03	6.6E-03	4.4E-02
2	4.7E-03	1.0E-02	5.0E-02	3.9E-03	9.1E-03	4.3E-02	4.6E-03	1.0E-02	5.8E-02
5	8.0E-03	1.8E-02	8.0E-02	6.7E-03	1.6E-02	7.0E-02	7.9E-03	1.8E-02	1.0E-01
10	1.2E-02	2.8E-02	1.0E-01	1.0E-02	2.5E-02	1.1E-01	1.2E-02	2.8E-02	1.4E-01
25	2.0E-02	5.0E-02	1.9E-01	1.7E-02	4.4E-02	1.7E-01	2.0E-02	5.0E-02	2.3E-01
50	2.9E-02	7.5E-02	2.8E-01	2.5E-02	6.7E-02	2.7E-01	2.9E-02	7.5E-02	3.4E-01
75	3.6E-02	9.5E-02	3.5E-01	3.1E-02	8.5E-02	3.3E-01	3.6E-02	9.6E-02	4.0E-01
100	4.2E-02	1.1E-01	4.0E-01	3.6E-02	1.0E-01	3.8E-01	4.2E-02	1.1E-01	4.9E-01
200	6.1E-02	1.7E-01	5.8E-01	5.2E-02	1.5E-01	5.5E-01	6.0E-02	1.7E-01	7.0E-01
350	8.1E-02	2.3E-01	8.0E-01	6.9E-02	2.0E-01	7.4E-01	8.1E-02	2.3E-01	9.0E-01
500	9.7E-02	2.7E-01	1.0E+00	8.3E-02	2.5E-01	8.6E-01	9.8E-02	2.8E-01	1.0E+00
750	1.2E-01	3.4E-01	1.2E+00	1.0E-01	3.1E-01	1.0E+00	1.2E-01	3.4E-01	1.1E+00
1000	1.4E-01	4.0E-01	1.3E+00	1.2E-01	3.6E-01	1.2E+00	1.4E-01	4.0E-01	1.6E+00
2000	2.0E-01	5.7E-01	2.0E+00	1.7E-01	5.2E-01	1.8E+00	2.0E-01	5.8E-01	2.3E+00
3000	2.4E-01	7.1E-01	2.4E+00	2.1E-01	6.5E-01	2.1E+00	2.4E-01	7.1E-01	2.8E+00
Caso (Pa)	EMP4			EMP5			EMP6		
	q (m/s)	v (m/s)	Vmax (m/s)	q (m/s)	v (m/s)	Vmax (m/s)	q (m/s)	v (m/s)	Vmax (m/s)
1	2.7E-03	5.4E-03	2.9E-02	2.4E-03	4.6E-03	2.7E-02	2.7E-03	5.0E-03	2.9E-02
2	4.3E-03	8.4E-03	4.1E-02	3.8E-03	7.2E-03	3.8E-02	4.2E-03	7.7E-03	4.2E-02
5	7.5E-03	1.5E-02	8.0E-02	6.6E-03	1.3E-02	6.4E-02	7.4E-03	1.4E-02	6.9E-02
10	1.1E-02	2.3E-02	1.1E-01	9.9E-03	2.0E-02	9.0E-02	1.1E-02	2.2E-02	1.0E-01
25	1.9E-02	4.1E-02	1.8E-01	1.7E-02	3.6E-02	1.6E-01	1.9E-02	3.9E-02	1.6E-01
50	2.8E-02	6.3E-02	2.7E-01	2.5E-02	5.6E-02	2.3E-01	2.8E-02	5.9E-02	2.3E-01
75	3.5E-02	8.0E-02	3.2E-01	3.1E-02	7.1E-02	2.8E-01	3.4E-02	7.6E-02	2.8E-01
100	4.1E-02	9.5E-02	3.8E-01	3.6E-02	8.5E-02	3.3E-01	4.0E-02	9.0E-02	3.3E-01
200	5.9E-02	1.4E-01	5.0E-01	5.2E-02	1.3E-01	5.0E-01	5.8E-02	1.4E-01	4.8E-01
350	7.9E-02	1.9E-01	6.9E-01	7.0E-02	1.8E-01	6.5E-01	7.9E-02	1.9E-01	6.5E-01
500	9.6E-02	2.4E-01	8.6E-01	8.5E-02	2.1E-01	8.0E-01	9.5E-02	2.3E-01	7.6E-01
750	1.2E-01	3.0E-01	1.1E+00	1.0E-01	2.7E-01	1.0E+00	1.2E-01	2.8E-01	1.0E+00
1000	1.4E-01	3.5E-01	1.2E+00	1.2E-01	3.2E-01	1.2E+00	1.4E-01	3.3E-01	1.1E+00
2000	2.0E-01	5.0E-01	1.9E+00	1.7E-01	4.6E-01	1.7E+00	1.9E-01	4.8E-01	1.6E+00
3000	2.4E-01	6.2E-01	2.4E+00	2.1E-01	5.7E-01	2.0E+00	2.4E-01	6.0E-01	2.0E+00