



Beatriz Rodrigues Soares

**Ensaio de Permeabilidade de Laboratório na Areia da
Praia de Ipanema e em uma Amostra de Microesferas de Vidro**

Dissertação de Mestrado

Dissertação apresentada como requisito parcial
para obtenção do grau de Mestre pelo Programa
de Pós-Graduação em Engenharia Civil do
Departamento de Engenharia Civil e Ambiental
da PUC-Rio.

Orientador: Prof. DSc. Vitor Nascimento Aguiar
Co-orientador: Prof. DSc. Ian Schumann Marques Martins

Rio de Janeiro
Setembro de 2021



Beatriz Rodrigues Soares

**Ensaio de Permeabilidade de Laboratório na Areia da
Praia de Ipanema e em uma Amostra de Microesferas de Vidro**

Dissertação apresentada como requisito parcial
para obtenção do grau de Mestre pelo Programa
de Pós-Graduação em Engenharia Civil da
PUC-Rio. Aprovada pela Comissão Examinadora
abaixo assinada.

Prof. Vitor Nascimento Aguiar

Orientador

Departamento de Engenharia Civil e Ambiental - PUC-Rio

Prof. Ian Schumann Marques Martins

Co-Orientador

COPPE/UFRJ

Prof. Eurípedes do Amaral Vargas

Departamento de Engenharia Civil e Ambiental - PUC-Rio

Prof. Dr. Marcos Fábio Porto de Aguiar

Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Ceará - IFCE

Todos os direitos reservados. É proibida a reprodução total ou parcial do trabalho sem autorização do autor, do orientador e da universidade.

Beatriz Rodrigues Soares

Graduada em Engenharia Civil, pela Universidade de Fortaleza (Unifor), e em Tecnologia em Estradas, pelo Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Ceará (IFCE). Ingressou no mestrado na Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro em março de 2018, desenvolvendo dissertação na linha de pesquisa de Geotecnia Experimental.

Ficha Catalográfica

Soares, Beatriz Rodrigues

Ensaio de Permeabilidade de Laboratório na Areia da Praia de Ipanema e em uma Amostra de Microesferas de Vidro / Beatriz Rodrigues Soares; orientador: Vitor Nascimento Aguiar ; co-orientador: Ian Schumann Marques Martins – 2021.

211 f. : il. color. ; 30 cm

Dissertação (mestrado) – Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Departamento de Engenharia Civil, 2021.

Inclui bibliografia

1. Engenharia civil – Teses. 2. Areia da Praia de Ipanema. 3. Microesferas de Vidro. 4. Ensaio de Permeabilidade. 5. Condutividade Hidráulica. I. Aguiar, Vitor Nascimento. II. Martins, Ian Schumann Marques. III. Vargas, Eurípedes do Amaral. IV. Aguiar, Marcos Fábio Porto de. V. Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro. Departamento de Engenharia Civil. VI. Título.

CDD: 624

Dedico essa pesquisa à Deus e aos meus pais,
Maninha Rodrigues e Hélio Beltrão.

Agradecimentos

À Deus, em primeiro lugar sempre, que nos momentos de medo e incerteza, tão profundos e particulares, não me deixou faltar a fé e sentir, de alguma forma, Sua presença; e aos meus protetores, Santa Terezinha e Santo Expedito.

Ao professor Vitor Aguiar, um exemplo profissional, por toda dedicação, empenho, auxílio e, principalmente, paciência, durante este trabalho. Para além disso, minha gratidão por aceitar ser meu orientador e por doar tantos ensinamentos e conselhos, com os quais eu pude aprender e amadurecer muito.

Aos meus pais, por acreditarem e investirem nas minhas escolhas; e à minha família em geral (irmãs, tios e primos), pela união, pelo incentivo e por se fazerem sempre um porto seguro, em todos os momentos.

Ao meu melhor amigo e amor, Ícaro Rodrigues, que há quase nove anos vem sendo um parceiro de profissão e pessoal; deixando meu dia a dia mais leve em meio a tantos “perrengues”. E aos seus pais, Tereza e Ademar, pela atenção e carinho de sempre.

Aos meus amigos/irmãos, Rafaella Villela e Rômulo Costa, que foram os presentes desse mestrado, por sempre me apoiarem e estarem comigo nos momentos mais difíceis. Ao meu grupo de mestrado: Cristina Kei, Douglas Oliveira, Gabriela Ernandes, Jéssica Marotti, Marcela Strongylis e Pedro Bogossian, pelos incentivos, momentos de descontração e de estudo durante esse período do mestrado. À Sirley Melo, por toda luz e carinho para comigo nesses anos. Ainda, aos demais parceiros acadêmicos, que de alguma forma, compartilharam comigo os momentos de alegria e desespero desses anos.

Aos meus amigos de laboratório: Aline Roza, Bárbara Viapiana, Elaine Barreto, Larissa Lago, Natacha Oliveira e Vitor Guerra, pelo apoio e pelas colaborações durante os ensaios. Aos funcionários do Laboratório de Geotecnia e Meio Ambiente (LGMA) da PUC-Rio, Edson, Josué, Amaury e Sandra, pelo auxílio, em especial ao Carlos, por toda assistência nas mudanças dos equipamentos e por reproduzir, fisicamente, minhas ideias de peças e utensílios de ensaio.

À D. Márcia Temporal e à D. Verena, por me acolherem tão gentilmente em suas casas; às minhas vizinhas Cláudia Romano e Vitória, pelos momentos de alegria e de força; e à Dani Temporal, sempre tão querida e atenciosa.

Aos meus amigos “antigos” de jornada acadêmica, Fernando Feitosa e Yago Machado, que muito me apoiaram e incentivaram nos momentos mais difíceis no início desse mestrado.

Aos meus professores, Marcos Porto e Carla Beatriz, por serem meus mentores geotécnicos, com os quais conheci a geotecnia e aprendi a ser pesquisadora.

Aos professores e funcionários do Departamento de Engenharia Civil da Puc-Rio.

Ao CNPq e à PUC-Rio, pelos auxílios concedidos, sem os quais este trabalho não poderia ter sido realizado. O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES) - Código de Financiamento 001.

Resumo

Soares, Beatriz Rodrigues; Aguiar, Vitor Nascimento; Martins, Ian Schumann Marques. **Ensaio de Permeabilidade de Laboratório na Areia da Praia de Ipanema e em uma Amostra de Microesferas de Vidro.** Rio de Janeiro, 2021. 211 p. Dissertação de Mestrado. Departamento de Engenharia Civil, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

Esta pesquisa teve como principal objetivo contribuir para a avaliação da influência da forma dos grãos na condutividade hidráulica (k) de areias. Para tanto, ensaios de laboratório foram realizados em uma amostra da areia da Praia de Ipanema ($D_{10} = 0,28$ mm, $D_{30} = 0,34$ mm, $D_{50} = 0,41$ mm, $D_{60} = 0,45$ mm, $C_{NU} = 1,61$ e $C_c = 0,92$), constituída por grãos subarredondados a arredondados (esfericidade = 0,65 e arredondamento = 0,70), e em uma amostra de microesferas de vidro, tipo Drop-On II A (esfericidade = 0,95 e arredondamento = 0,95), preparada com granulometria igual à da areia. O programa experimental envolveu: (a) limpeza e tratamento das amostras; (b) análises microscópicas para avaliação da forma dos grãos; (c) ensaios de granulometria por peneiramento; (d) reconstituição granulométrica da amostra de microesferas de vidro; (e) densidade relativa (G_s) das microesferas de vidro; (f) ensaios de índices de vazios máximo, pelo método B da ABNT (2020), e ensaios de índices de vazios mínimo e intermediários, pelo método MSP de Miura & Toki (1982); e (g) ensaios de permeabilidade sob carga hidráulica constante em permeâmetro de parede rígida e em permeâmetro de parede flexível. Para ambas as amostras, verificou-se experimentalmente a validade da relação linear entre a condutividade hidráulica (k) e $e^3/(1+e)$, sendo e o índice de vazios, em consonância com as formulações teóricas propostas por Kozeny-Carman (1927) e por Taylor (1948). Para um dado índice de vazios, constatou-se que a condutividade hidráulica da amostra de microesferas de vidro é maior do que a da amostra da areia da Praia de Ipanema.

Palavras-chave

Areia, Microesferas de Vidro; Ensaio de Permeabilidade; Condutividade Hidráulica; Coeficiente de Permeabilidade.

Abstract

Soares, Beatriz Rodrigues; Aguiar, Vitor Nascimento; Martins, Ian Schumann Marques. **Laboratory Permeability Tests on Ipanema Beach Sand and on a Sample of Glass Microspheres.** Rio de Janeiro, 2021. 211 p. Dissertação de Mestrado. Departamento de Engenharia Civil, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

The main objective of this research was to contribute to the evaluation of the influence of the grain shape on the hydraulic conductivity (k) of sands. For that, laboratory tests were carried out on a sample from Ipanema Beach sand ($D_{10} = 0.28$ mm, $D_{30} = 0.34$ mm, $D_{50} = 0.41$ mm, $D_{60} = 0.45$ mm, $C_{NU} = 1.61$ e $C_C = 0.92$), composed by sub-rounded to rounded grains (sphericity = 0.65 and roundness = 0.70), and on a sample of glass microspheres, Drop-On II A type (sphericity = 0.95 and roundness = 0.95), prepared with the same grain size distribution of the sand. The experimental program comprised: (a) cleaning and processing of the samples; (b) microscopic analysis to evaluate the grain shape; (c) grain-size analysis by sieving; (d) reconstitution of the grain-size distribution of the glass microspheres sample; (e) glass microspheres specific gravity (G_s); (f) maximum void ratio tests, by method B of ABNT (2020), and minimum and intermediate void ratio tests, by MSP method of Miura & Toki (1982); and (g) constant head permeability tests in rigid-wall permeameter and in flexible-wall permeameter. For both samples, it was experimentally verified the validity of the linear relationship between the hydraulic conductivity (k) and " $e^3/(1+e)$ ", being " e " the void ratio, in agreement with the theoretical formulations proposed by Kozeny-Carman (1927) and by Taylor (1948). For a given void ratio, it was observed that the hydraulic conductivity of the glass microsphere sample is higher than that of the sample from Ipanema Beach sand.

Keywords

Sand; Glass Microspheres; Hydraulic Conductivity; Coefficient of Permeability.

Sumário

1.	Introdução	22
1.1	Considerações iniciais e motivação da pesquisa	22
1.2	Objetivos	23
1.3	Organização do trabalho	23
2.	Revisão Bibliográfica	24
2.1	Propriedades das Areias	24
2.1.1	Considerações iniciais	24
2.1.2	Forma dos grãos das areias	25
2.1.3	Granulometria	29
2.1.4	Índices de vazios (e) e compacidade relativa (CR)	31
2.2	Permeabilidade	33
2.2.1	Considerações iniciais	33
2.2.2	Lei de Darcy	33
2.2.3	Condutividade hidráulica (k)	40
2.2.3.1	Formulações propostas para cálculo da condutividade hidráulica	40
2.2.3.2	Fatores que afetam a condutividade hidráulica	44
2.2.3.3	Ordem de grandeza de valores da condutividade hidráulica em solos	49
2.2.4	Determinação da condutividade hidráulica em laboratório	50
2.2.4.1	Considerações iniciais	50
2.2.4.2	Ensaio de permeabilidade em permeâmetro de parede rígida sob carga constante	51
2.2.4.3	Ensaio de permeabilidade em permeâmetro de parede flexível	53
2.2.4.4	Vantagens e desvantagens do permeâmetro de parede rígida e do permeâmetro de parede flexível	57

3.	Materiais e Métodos	59
3.1	Materiais amostrados	59
3.1.1	Areia da Praia de Ipanema	59
3.1.2	Microesferas de vidro	61
3.2	Preparação das amostras	62
3.2.1	Limpeza da amostra da areia da Praia de Ipanema	62
3.2.2	Tratamento das microesferas de vidro	65
3.3	Análises Microscópicas	70
3.4	Granulometria	73
3.5	Reconstituição granulométrica da amostra de microesferas de vidro	75
3.6	Densidade relativa dos grãos (G_s)	78
3.7	Índices de vazios máximo, intermediários e mínimo	82
3.7.1	Índices de vazios máximo	83
3.7.2	Índices de vazios mínimo e intermediários	86
3.8	Ensaio de permeabilidade	92
3.8.1	Ensaio de permeabilidade em permeâmetro de parede rígida	92
3.8.2	Ensaio de permeabilidade em permeâmetro de parede flexível	100
4.	Resultados obtidos e análises	121
4.1	Caracterização das amostras	121
4.1.1	Salinidade da areia da Praia de Ipanema	121
4.1.2	Microscopia	122
4.1.3	Granulometria da amostra da areia da Praia de Ipanema	127

4.1.4	Reconstituição granulométrica da amostra de microesferas de vidro	130
4.1.5	Densidade relativa dos grãos	131
4.2	Índices de vazios máximo, intermediários e mínimo	137
4.2.1	Índice de vazios máximo	137
4.2.2	Índice de vazios mínimo e intermediários	138
4.2.3	Comparação entre os valores de índices de vazios máximo e mínimo da areia da Praia de Ipanema e da amostra de microesferas de vidro	143
4.3	Determinação da condutividade hidráulica no permeâmetro de parede rígida	144
4.3.1	Amostra da areia da Praia de Ipanema	144
4.3.2	Amostra de microesferas de vidro	153
4.4	Determinação da condutividade hidráulica em permeâmetro de parede flexível	161
4.4.1	Considerações iniciais	161
4.4.2	Características dos corpos de prova	161
4.4.3	Saturação por contrapressão e medições do parâmetro B	162
4.4.4	Compressão hidrostática	169
4.4.5	Estabelecimento de fluxo para determinação da condutividade hidráulica	175
4.5	Condutividade hidráulica da amostra da areia da Praia de Ipanema versus da amostra de microesferas de vidro	182
5.	Conclusões e sugestões para pesquisas futuras	187
5.1	Conclusões	187
5.2	Sugestões para pesquisas futuras	191
	Referências bibliográficas	192

Apêndice A – Projeto do permeâmetro de parede rígida	196
Apêndice B – Modificações no sistema do permeâmetro de parede flexível	200
Apêndice C – Calibração do transdutor de deslocamento	206
Apêndice D – Calibração dos transdutores de poropressão	209

Lista de Figuras

Figura 1 - Fases presentes em uma amostra de solo.	24
Figura 2 - Determinação da forma dos grãos (inspirada em Muszynski & Vitton, 2012 e Maroof et al., 2019).	26
Figura 3 - Fator de forma dos grãos (adaptada de Fair & Hatch, 1933).	27
Figura 4 - Arredondamento grãos, proposto por Pettijohn (adaptada de Pettijohn, 1949 e Lambe & Whitman, 1969).	28
Figura 5 - Arredondamento dos grãos, proposto por Powers (adaptada de Powers, 1953).	28
Figura 6 - Esfericidade, arredondamento e constante de regularidade dos grãos (adaptada de Cho et al., 2006).	28
Figura 7 - Curvas granulométricas.	31
Figura 8 - Aparelho utilizado nos experimentos de Darcy. Em (a) o modelo original e em (b) um esquema equivalente (adaptado de Darcy, 1856; Cushman & Tartakovsky, 2017).	34
Figura 9 - Velocidades de fluxo em uma amostra de solo.	35
Figura 10 - Zonas de fluxo, sendo: (I) laminar, (II) de transição e (III) turbulento (adaptada de Taylor, 1948).	36
Figura 11 - Relação entre o coeficiente de atrito de Fanning e o número de Reynolds através de meios porosos (Rose, 1943; apud Todd, 1959).	37
Figura 12 - Seções transversais idealizadas de arranjos estruturais de solos arenosos (inspirada em Weil & Brady, 2017).	46
Figura 13 - Representação esquemática de um fluxo (a) laminar e (b) fluxo turbulento em um depósito granular. (Driscoll, 1986, apud Poehls & Smith, 2009).	47
Figura 14 - Variação do coeficiente de viscosidade dinâmica da água com a temperatura (traduzida de Cederghren, 1967).	47
Figura 15 - Razão entre os coeficientes de viscosidade dinâmica da água a uma temperatura T e à 20 °C em função da temperatura (traduzida de Head, 1994).	48
Figura 16 - Relações índice de vazios versus condutividade hidráulica para diferentes tipos de solo (adaptada de Lambe & Whitman, 1969).	50
Figura 17 - Esquema simples de um ensaio em um permeâmetro de parede rígida sob carga constante (adaptado de Daniel, 1994).	52
Figura 18 - Esquema do permeâmetro de parede flexível.	54
Figura 19 - Esquema de ensaio do permeâmetro de parede flexível	55

Figura 20 - Variação do valor de contrapressão a ser aplicada em função do grau de saturação inicial do corpo de prova e do grau de saturação final requerido (Sharma & Lewis, 1994 apud Costa, 2021).	56
Figura 21 - Ponto de amostragem da areia da Praia de Ipanema.	59
Figura 22 - Armazenamento das microesferas de vidro no laboratório.	62
Figura 23 - Ciclo de lavagem da amostra da areia da Praia de Ipanema, sendo em: a) adição de água da torneira à amostra, b) revolvimento da amostra, c) descanso da amostra e d) retirada do líquido com as impurezas da amostra.	63
Figura 24 - Condutivímetro.	64
Figura 25 - Medição da condutividade elétrica com o condutivímetro.	65
Figura 26 - Grumos formados pelo contato das microesferas de vidro com água.	66
Figura 27 - Primeiro dia do teste de proporção entre as microesferas de vidro e a solução defloculante.	67
Figura 28 - Retirada da solução defloculante das amostras de microesferas de vidro.	68
Figura 29 - Finalização do teste, sendo em (a) a última passagem de água destilada para retirada da solução defloculante e em (b) os papéis filtro com a amostra pós secagem em estufa.	68
Figura 30 - Comparação da formação de grumos pós-tratamento.	69
Figura 31 - Etapas do tratamento das microesferas de vidro.	70
Figura 32 - Utensílios e amostras utilizadas no microscópio M1.	71
Figura 33 - Microscopia da areia da Praia de Ipanema.	72
Figura 34 - Microscopia da amostra de microesferas de vidro.	72
Figura 35 - Avaliação das superfícies das microesferas de vidro, sendo em (a) sem tratamento e em (b) pós-tratamento.	73
Figura 36 - Quarteamento das amostras, sendo em (a) pirâmide formada com a amostra; (b) quadrantes nas quais a amostra era dividida; e (c) quadrantes diametralmente opostos para a formação de uma nova pirâmide.	74
Figura 37 - Peneiramento das amostras, sendo em (a) a amostra sendo colocada nas peneiras e (b) peneiramento no agitador eletromecânico.	75
Figura 38 - Processos da reconstituição granulométrica da amostra de microesferas de vidro, sendo em (a) o armazenamento da amostra por nº de peneira e em (b) as porções pesadas para homogeneização.	77

Figura 39 - Determinação do peso específico das microesferas de vidro pelo método da proveta, sendo em (a) os materiais utilizados no ensaio e em (b) a amostra em álcool isopropílico.	79
Figura 40 - Procedimentos de ensaio de densidade relativa das microesferas de vidro pelo método do picnômetro.	82
Figura 41 - Esquema do método B, apresentado pela ABNT (2020), para esta pesquisa.	83
Figura 42 - Procedimentos do método B para determinação do índice de vazios máximo no molde do permeâmetro de parede flexível, sendo: (a) posicionamento do molde mais tubo no centro da bandeja; (b) inserção da amostra no tubo com auxílio de funil; (c) tubo mais amostra no nível correspondente a 1,3 o volume do molde; (d) extração do tubo; (e) molde mais amostra pós extração do tubo; (f) arrasamento do corpo de prova.	85
Figura 43 - Esquemas do aparelho de pluviação com peneiramento múltiplo (MSP), sendo em (a) o original, Miura & Toki (1982); e (b) o desenvolvido para esta pesquisa.	86
Figura 44 - Resultado do teste de comparação das alturas entre o funil e a tela da primeira peneira (mais superior).	88
Figura 45 - Comparação entre as peneiras superiores durante a vazão da amostra por um funil de bocal de 100 mm, sendo em: (a) peneira de nº 7 durante a vazão; (b) peneira de nº 7 logo após o encerramento da vazão; (c) peneira de nº 4 durante a vazão; e (d) peneira de nº 4 logo após o encerramento da vazão.	90
Figura 46 - Procedimentos para execução do ensaio MSP, sendo em: (a) posicionamento do aparelho MSP; (b) marcação para centralização do molde e aterramento do aparelho; (c) vazão da amostra pelo funil; e (d) molde com amostra após o arrasamento do topo.	91
Figura 47 - Permeâmetro de parede rígida utilizado na pesquisa, sendo em (a) o desenho esquemático e (b) a fotografia do equipamento confeccionado.	92
Figura 48 - Esquema do ensaio de permeabilidade em permeâmetro de parede rígida.	93
Figura 49 - Procedimentos do ensaio de permeabilidade em permeâmetro de parede rígida.	98
Figura 50 - Sistemas do permeâmetro de parede flexível.	102
Figura 51 - Esquema do corpo de prova no interior da câmara, sendo em (a) a vista de O1 da Figura 50 e em (b) a vista de O2 da Figura 50.	104
Figura 52 - Etapas de preparação para moldagem do corpo de prova.	107
Figura 53 - Arranjo final do molde tripartido para moldagem do corpo de prova.	107
Figura 54 - Arranjo das moldagens do corpo de prova, sendo em (a) aparato de escape em formato de cone para moldagem com índice de vazios máximo e em (b) aparato de escape retangular para moldagem com índice de vazios intermediário e mínimo	108

Figura 55 - “Saturação” por percolação do corpo de prova.	109
Figura 56 - Procedimentos para fixação do top-cap, sendo em (a) pós retirada do colarinho, (b) posicionamento do top cap com auxílio da barra de fixação e (c) pós posicionamento do top-cap.	110
Figura 57 - Procedimentos da quinta etapa do ensaio, onde em: (a) a seringa de sucção; (b) sucção aplicada ao corpo de prova; (c) determinação da altura do corpo de prova; (d) medição das circunferências do corpo de prova; e (d) enchimento da câmara com água.	111
Figura 58 - Esquema do estabelecimento de fluxo no corpo de prova.	114
Figura 59 - Esquema de apresentação das pressões aplicadas no corpo de prova.	115
Figura 60 - Salinidades da areia da Praia de Ipanema.	121
Figura 61 - Imagens analisadas para a determinação do arredondamento e da esfericidade dos grãos da amostra da areia da Praia de Ipanema e das microesferas de vidro.	123
Figura 62 - Histograma e curva de distribuição normal do arredondamento dos grãos da areia da Praia de Ipanema.	124
Figura 63 - Histograma e curva de distribuição normal da esfericidade dos grãos da areia da Praia de Ipanema.	124
Figura 64 - Histograma e curva de distribuição normal do arredondamento das microesferas de vidro.	125
Figura 65 - Histograma e curva de distribuição normal da esfericidade das microesferas de vidro.	125
Figura 66 - Classificação dos grãos da areia da Praia de Ipanema por meio das escalas gráficas de Powers (1953) e Cho et al. (2006).	126
Figura 67 - Curvas granulométricas da areia da Praia de Ipanema obtidas nesta pesquisa e pelos demais autores Simões (2015) e Costa (2020).	128
Figura 68 - Determinação dos diâmetros D10, D30, D50 e D60 da areia da Praia de Ipanema.	129
Figura 69 - Granulometria da amostra da areia da Praia de Ipanema versus granulometria original da amostra de microesferas de vidro.	130
Figura 70 - Granulometria da amostra da areia da Praia de Ipanema versus granulometria reconstituída da amostra de microesferas de vidro.	131
Figura 71 - Curva de calibração do picnômetro 1.	133
Figura 72 - Curva de calibração do picnômetro 2.	133
Figura 73 - Curva de calibração do picnômetro 3.	133
Figura 74 - Curva de calibração do picnômetro 4.	134

Figura 75 - Curva de calibração do picnômetro 5	134
Figura 76 - Curvas de “índice de vazios versus diâmetro do bocal do funil” obtidas nesta pesquisa, em Simões (2015) e Costa (2020).	140
Figura 77 - Índice de vazios médio e compactidade relativa versus diâmetro do bocal do funil para a areia da Praia de Ipanema.	141
Figura 78 - Curvas de “índice de vazios versus diâmetro do bocal do funil” obtidas para a areia da Praia de Ipanema e para a amostra de microesferas de vidro com granulometria reconstituída.	143
Figura 79 - Comparação entre os valores de índices de vazios máximo e mínimo da areia da Praia de Ipanema e da amostra de microesferas de vidro, desta pesquisa	144
Figura 80 - Velocidade aparente versus gradiente hidráulico medido, para o CP-A1.	151
Figura 81 - Velocidade aparente versus gradiente hidráulico medido, para o CP-A2.	152
Figura 82 - Velocidade aparente versus gradiente hidráulico medido, para o CP-A3.	152
Figura 83 - Velocidade aparente versus gradiente hidráulico medido, para o CP-A4.	153
Figura 84 - Velocidade aparente versus gradiente hidráulico medido, para o CP-E1.	159
Figura 85 - Velocidade aparente versus gradiente hidráulico medido, para o CP-E2.	159
Figura 86 - Velocidade aparente versus gradiente hidráulico medido, para o CP-E3.	160
Figura 87 - Relação entre o parâmetro B e a contrapressão aplicada.	164
Figura 88 - Curvas “parâmetro B versus grau de saturação (S_r) estimado” dos quatro corpos de prova ensaiados.	168
Figura 89 - Curvas “deformação específica volumétrica versus tensão efetiva (hidroestática)” (escala aritmética) dos quatro corpos de prova	171
Figura 90 - Curva “índice de vazios versus tensão efetiva (hidrostática), em escala aritmética” do corpo de prova CP-A1.	172
Figura 91 - Curva “índice de vazios versus tensão efetiva (hidrostática), em escala aritmética” do corpo de prova CP-A2.	172
Figura 92 - Curva “índice de vazios versus tensão efetiva (hidrostática), em escala aritmética” do corpo de prova CP-E1.	172
Figura 93 - Curva “índice de vazios versus tensão efetiva (hidrostática), em escala aritmética” do corpo de prova CP-E2.	173
Figura 94 - Curva “índice de vazios versus tensão efetiva (hidrostática), em escala logarítmica” do corpo de prova CP-A1.	173
Figura 95 - Curva “índice de vazios versus tensão efetiva (hidrostática), em escala logarítmica” do corpo de prova CP-A2.	174

Figura 96 - Curva “índice de vazios versus tensão efetiva (hidrostática), em escala logarítmica” do corpo de prova CP-E1.	174
Figura 97 - Curva “índice de vazios versus tensão efetiva (hidrostática), em escala logarítmica” do corpo de prova CP-E2.	174
Figura 98 - Valores de $k_{20^{\circ}\text{C}}$ em função de “ $e^3/(1+e)$ ” para os corpos de prova da amostra da areia da Praia de Ipanema ensaiados no PPR.	184
Figura 99 - Valores de $k_{20^{\circ}\text{C}}$ em função de “ $e^3/(1+e)$ ” para os corpos de prova da amostra de microesferas de vidro ensaiados no PPR.	185
Figura 100 - Comparação da relação $k_{20^{\circ}\text{C}}$ versus “ $e^3/(1+e)$ ” para as amostras da areia da Praia de Ipanema de microesferas de vidro.	186

Lista de Tabelas

Tabela 1 - Classificação quanto à compacidade relativa (Lambe & Whitman, 1969).	32
Tabela 2 - Formulações para determinação indireta da condutividade hidráulica de solos arenosos.	42
Tabela 3 - Alguns valores típicos da condutividade hidráulica (modificado de Pinto, 2006).	49
Tabela 4 - Valores típicos da condutividade hidráulica dos solos saturados (Das, 2007).	50
Tabela 5 – Vantagens e desvantagens dos permeâmetros de parede flexível e de parede rígida, apresentadas por Daniel (1994)	58
Tabela 6 - Características da areia da Praia de Ipanema por Costa (2020) e Simões (2015).	61
Tabela 7 - Razões entre os diâmetros das peneiras utilizadas no método MSP e o D_{50} da amostra e a quantidade de peneiras utilizadas e sua sequência, por diferentes autores.	89
Tabela 8 - Procedimentos de limpeza da areia da Praia de Ipanema por Costa (2020) e presente pesquisa	122
Tabela 9 - Resultados do ensaio de densidade relativa das microesferas de vidro (G_s) pelo método da proveta, norma ABNT (2021).	132
Tabela 10 - Resultados do ensaio de densidade relativa dos grãos (G_s) pelo método do picnômetro, norma ABNT (1984).	135
Tabela 11 - Índice de vazios máximo obtido pelo método B (ABNT, 2020) na amostra da areia da Praia de Ipanema.	137
Tabela 12 - Índice de vazios máximo obtido pelo método B (ABNT, 2020) na amostra de microesferas de vidro.	138
Tabela 13 - Índices de vazios mínimo e intermediários da areia da Praia de Ipanema obtidos pelo método de Miura & Toki (1982), utilizando o molde PPR	139
Tabela 14 - Índices de vazios mínimo e intermediários da areia da Praia de Ipanema obtidos pelo método de Miura & Toki (1982), utilizando o molde PPF	139
Tabela 15 - Índices de vazios mínimo e intermediários da amostra de microesferas de vidro obtidos para diferentes diâmetros de bocal dos funis, utilizando molde PPF	142
Tabela 16 – Métodos de moldagem dos corpos de prova com a areia da Praia de Ipanema, em PPR	145
Tabela 17 – Características iniciais dos corpos de prova moldados com a areia da Praia de Ipanema em PPR	145

Tabela 18 - Resultados obtidos nos estabelecimentos de fluxo para cálculo do valor da condutividade hidráulica do CP-A1.	147
Tabela 19 - Resultados obtidos nos estabelecimentos de fluxo para cálculo do valor da condutividade hidráulica do CP-A2.	148
Tabela 20 - Resultados obtidos nos estabelecimentos de fluxo para cálculo do valor da condutividade hidráulica do CP-A3.	149
Tabela 21 - Resultados obtidos nos estabelecimentos de fluxo para cálculo do valor da condutividade hidráulica do CP-A4.	150
Tabela 22 – Valores da condutividade hidráulica a 20 °C para os corpos de prova moldados com a areia da Praia de Ipanema com diferentes índices de vazios	153
Tabela 23 - Métodos de moldagem dos corpos de prova com a amostra de microesferas de vidro de granulometria reconstituída, em PPR	154
Tabela 24 – Características iniciais dos corpos de prova moldados com a amostra de microesferas de vidro em PPR	154
Tabela 25 - Resultados obtidos nos estabelecimentos de fluxo para cálculo do valor da condutividade hidráulica na temperatura do ensaio (k_T) do CP-E1.	156
Tabela 26 - Resultados obtidos nos estabelecimentos de fluxo para cálculo do valor da condutividade hidráulica na temperatura do ensaio (k_T) do CP-E2.	157
Tabela 27 - Resultados obtidos nos estabelecimentos de fluxo para cálculo do valor da condutividade hidráulica na temperatura do ensaio (k_T) do CP-E3.	158
Tabela 28 – Valores da condutividade hidráulica a 20 °C para os corpos de prova moldados com a amostra de microesferas de vidro com diferentes índices de vazios	160
Tabela 29 – Métodos de moldagem dos corpos de prova ensaiados no PPF	161
Tabela 30 - Características iniciais dos corpos de prova ensaiados no PPF	162
Tabela 31 - Resultados da medição do parâmetro B do CP-A1	163
Tabela 32 - Resultados da medição do parâmetro B do CP-A2	163
Tabela 33 - Resultados da medição do parâmetro B do CP-E1	164
Tabela 34 - Resultados da medição do parâmetro B do CP-E2	164
Tabela 35 - Resultados do processo de saturação do CP-A1	165
Tabela 36 - Resultados do processo de saturação do CP-A2	165

Tabela 37 - Resultados do processo de saturação do CP-E1	165
Tabela 38 - Resultados do processo de saturação do CP-E2	166
Tabela 39 - Volumes totais de água que entraram nos corpos de prova ao longo do processo de saturação	166
Tabela 40 - Relação entre o grau de saturação (S_r) estimado e o parâmetro B para o CP-A1	167
Tabela 41 - Relação entre o grau de saturação (S_r) estimado e o parâmetro B para o CP-A2	167
Tabela 42 - Relação entre o grau de saturação (S_r) estimado e o parâmetro B para o CP-E1	168
Tabela 43 - Relação entre o grau de saturação (S_r) estimado e o parâmetro B para o CP-E2	168
Tabela 44 - Resultados obtidos das etapas de adensamento hidrostático do CP-A1	170
Tabela 45 - Resultados obtidos das etapas de adensamento hidrostático do CP-A2	170
Tabela 46 - Resultados obtidos das etapas de adensamento hidrostático do CP-E1	170
Tabela 47 - Resultados obtidos das etapas de adensamento hidrostático do CP-E2	171
Tabela 48 - Resultados obtidos nas percolações para cálculo dos valores da condutividade hidráulica do CP-A1.	177
Tabela 49 - Resultados obtidos nas percolações para cálculo dos valores da condutividade hidráulica do CP-A2	178
Tabela 50 - Resultados obtidos nas percolações para cálculo dos valores da condutividade hidráulica do CP-E1.	179
Tabela 51 - Resultados obtidos nas percolações para cálculo dos valores da condutividade hidráulica do CP-E2.	180
Tabela 52 – Valores médios de condutividade hidráulica obtidos em cada estágio de tensão efetiva para o CP-A1	181
Tabela 53 – Valores médios de condutividade hidráulica obtidos em cada estágio de tensão efetiva para o CP-A2	181
Tabela 54 – Valores médios de condutividade hidráulica obtidos em cada estágio de tensão efetiva para o CP-E1	181
Tabela 55 – Valores médios de condutividade hidráulica obtidos em cada estágio de tensão efetiva para o CP-E2	181
Tabela 56 - Valores de $k_{20^{\circ}\text{C}}$ determinados em PPR, para cada corpo de prova da areia da Praia de Ipanema	183

Tabela 57 - Valores de $k_{20^{\circ}\text{C}}$ determinados em PPR, para cada corpo de prova da amostra de microesferas de vidro

184

1. Introdução

1.1 Considerações iniciais e motivação da pesquisa

A permeabilidade pode ser entendida como a facilidade com que um fluido percola por um meio poroso, sendo expressa quantitativamente pelo coeficiente de permeabilidade (k), o qual depende tanto de características do meio poroso (percolado) quanto de características do fluido (percolante). O coeficiente de permeabilidade é um parâmetro de grande importância no âmbito geotécnico, sendo fundamental nas análises de percolação em diferentes tipos de projetos de engenharia.

Na Mecânica dos Solos, geralmente, o termo coeficiente de permeabilidade é apresentado como condutividade hidráulica, visto que: (a) há uma similaridade da Lei de Darcy com as equações que descrevem fenômenos de condução, e (b) a grande maioria dos problemas geotécnicos são associados ao fluxo de água. A condutividade hidráulica depende da granulometria, forma dos grãos, índice de vazios e estrutura do solo, assim como do peso específico e do coeficiente de viscosidade da água.

Em areias, além da influência na condutividade hidráulica, a forma dos grãos também interfere nos valores de índices de vazios máximo ($e_{\text{máx.}}$) e mínimo ($e_{\text{mín.}}$), na resistência ao cisalhamento e na compressibilidade. Contudo, apesar do reconhecimento da importância de uma análise desse aspecto, a forma dos grãos ainda é um assunto pouco estudado e pouco abordado na literatura.

Diante de tudo exposto, esta autora sentiu-se motivada a contribuir na investigação da influência da forma dos grãos no índice de vazios máximo e mínimo e na condutividade hidráulica das areias.

1.2 Objetivos

Dentro deste contexto, este trabalho pretende contribuir:

- a) Na avaliação da influência da forma dos grãos na condutividade hidráulica de areias, mediante a realização de ensaios de permeabilidade em laboratório.
- b) Na verificação experimental da validade da relação linear entre a condutividade hidráulica (k) e $e^3/(1+e)$, sendo “ e ” o índice de vazios, que aparece nas formulações teóricas propostas por Kozeny-Carman (1927) e Taylor (1948) para determinação da condutividade hidráulica de areias; e
- c) Na avaliação da influência da forma dos grãos nos índices de vazios máximo e mínimo de areias.

1.3 Organização do trabalho

Este trabalho está organizado em cinco capítulos, a saber:

- Capítulo 1, no qual são feitas algumas considerações que motivaram esta pesquisa e os seus objetivos;
- Capítulo 2, onde é apresentada uma breve revisão dos conceitos teóricos relacionados às propriedades das areias e à permeabilidade, importantes para a compreensão dos estudos realizados nesta pesquisa;
- Capítulo 3, no qual são apresentadas as metodologias empregadas nos ensaios de laboratório, sendo esses realizados em duas amostras: da areia da Praia de Ipanema e microesferas de vidro, tipo Drop-On II A;
- Capítulo 4, no qual são apresentados e analisados os resultados obtidos dos ensaios de laboratório; e,
- Capítulo 5, onde são apresentadas as conclusões desta pesquisa e algumas sugestões para pesquisas futuras.

2. Revisão Bibliográfica

2.1 Propriedades das Areias

2.1.1 Considerações iniciais

Solos são materiais resultantes da decomposição física e química das rochas. Constituídos por três fases (Figura 1), os solos são formados por partículas (grãos) minerais que se tocam e vazios que se conectam; podendo estes vazios estarem preenchidos por água e ar, de forma isolada ou conjunta (adaptado de Martins, 2010 e Fernandes, 2016). Ainda, os solos podem conter matéria orgânica em maior ou menor grau.

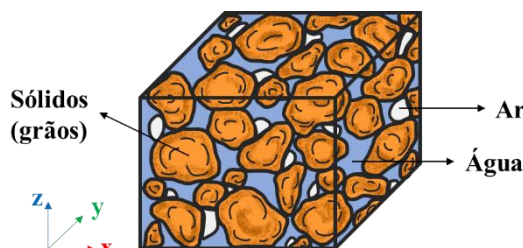


Figura 1 - Fases presentes em uma amostra de solo.

Quanto ao processo de origem e formação, no aspecto geológico, os solos são divididos em dois grandes grupos, a saber: solos residuais e solos sedimentares. Solos residuais são aqueles cujas partículas minerais resultantes do intemperismo rochoso permanecem no local de formação, sem transporte, sobre a rocha de origem. Solos sedimentares (ou transportados) são aqueles formados pela deposição de partículas minerais deslocadas de seu local de formação por agentes de transporte, sendo estes: a gravidade, o vento, a água líquida e o gelo (geleiras).

No âmbito geotécnico, os solos são identificados com base nas suas características de distribuição granulométrica e limites de consistência (plasticidade). Em rigor, o termo areia é utilizado, simplesmente, para designar um

intervalo de diâmetro equivalente de partículas de solo (faixa granulométrica) delimitado por: 0,06 mm e 2,00 mm, segundo a ABNT (1995), ou, por 0,075 mm e 4,75 mm, de acordo com a ASTM (2017). Por via de regra, a faixa granulométrica areia não apresenta plasticidade.

Assim, com base nos conceitos geológicos e geotécnicos, entende-se como areia os solos formados por partículas provenientes do intemperismo físico das rochas, com diâmetros equivalentes dentro dos domínios supracitados e sem plasticidade.

2.1.2

Forma dos grãos das areias

Conforme mencionado, o principal processo de formação das areias é o intemperismo físico rochoso; de modo que, as partículas originadas nesse processo são volumosas, conservando a composição mineralógica da rocha de origem (Craig, 2012). Por compor a maioria das formações rochosas, possuindo alta resistência à desagregação e grande estabilidade química, o quartzo é o principal mineral presente nas areias, com hábito prismático e granular, sem clivagem e peso específico (γ) de 2,65 gf/cm³ (adaptado de Frascá e Sartori, 1998).

As partículas das areias são aproximadamente equidimensionais, isto é, tomando três dimensões com direções ortogonais entre si, elas são, em geral, da mesma ordem de grandeza (Fernandes, 2016). As formas assumidas pelos grãos de areia dependem da exposição destes aos agentes físicos: temperatura, água, vento, *etc.* Solos arenosos residuais tendem a apresentar formas de grãos mais angulares, ao passo que, solos arenosos sedimentares tendem a apresentar forma de grãos mais arredondadas (Das, 2014). Cho *et al.* (2006) pontuam que a ação química e a abrasão aumentam com a idade do solo. Por esta razão, areias mais “velhas” tendem a possuir grãos mais arredondados, independentemente de seus tamanhos.

A forma dos grãos e o reconhecimento de sua influência nas propriedades físicas, mecânicas e hidráulicas das areias são temas recorrentes na literatura (Holubec & D'Appolonia, 1973; Youd, 1973; Cho *et al.*, 2006; Göktepe & Sezer, 2010; Calabar & Akbulut, 2016a e 2016b, entre outros). Constata-se influência da forma dos grãos nos índices de vazios máximo ($e_{máx.}$) e mínimo ($e_{mín.}$), na condutividade hidráulica (k), na resistência ao cisalhamento e na compressibilidade

das areias. Contudo, apesar do reconhecimento da importância da análise da forma dos grãos para estimativa e interpretação do comportamento mecânico e hidráulico de uma areia, este aspecto é pouco estudado, não sendo levado em consideração, inclusive, nos sistemas atuais de classificação dos solos (ver seção 2.1.3). Pinto (2006) associa essa pouca atenção dada à forma dos grãos a uma aparente dificuldade de estimá-la de maneira simples e rápida.

Os métodos propostos para análise da forma dos grãos baseiam-se em três aspectos (Figura 2), a saber:

- Esfericidade (S): do inglês “*sphericity*”, expressa a extensão em que o grão é esférico; refere-se à forma global do grão e reflete a semelhança entre o seu comprimento, a sua altura e a sua largura; pode ser quantificada pela razão entre o diâmetro da maior esfera inscrita no grão e o diâmetro da menor esfera circunscrita ao grão.
- Arredondamento (R): do inglês “*roundness*”, expressa a angularidade do grão, sendo dependente da nitidez de suas bordas e de seus cantos; o método considerado mais preciso para a sua determinação é apresentado por Wadell (1995), o qual o define como a razão entre a média dos raios de curvatura dos cantos da imagem do grão pelo raio da esfera máxima inscrita no grão.
- Rugosidade: do inglês “*roughness*”, descreve a textura da superfície do grão.

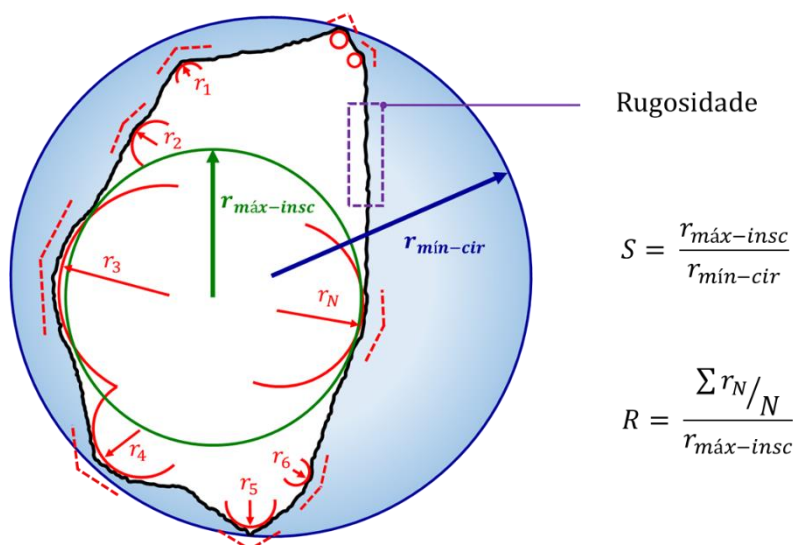


Figura 2 - Determinação da forma dos grãos (inspirada em Muszynski & Vitton, 2012 e Maroof et al., 2019).

Os três aspectos supracitados são independentes, ou seja, quando um dos parâmetros varia, os outros dois parâmetros podem permanecer inalterados. Além desses, o achatamento e o alongamento dos grãos também podem ser utilizados para descrever a forma desses (Maroof *et al.*, 2019).

Em escalas gráficas, nas quais são apresentadas as silhuetas dos grãos ou suas fotografias, a determinação da esfericidade e do arredondamento pode ser realizada por meio da comparação visual. Assim, quatro metodologias são apresentadas para análise dos aspectos que envolvem a forma dos grãos. Fair & Hatch (1933) (Figura 3) propõe cinco classificações para forma dos grãos de uma areia com base em um valor de fator de forma.

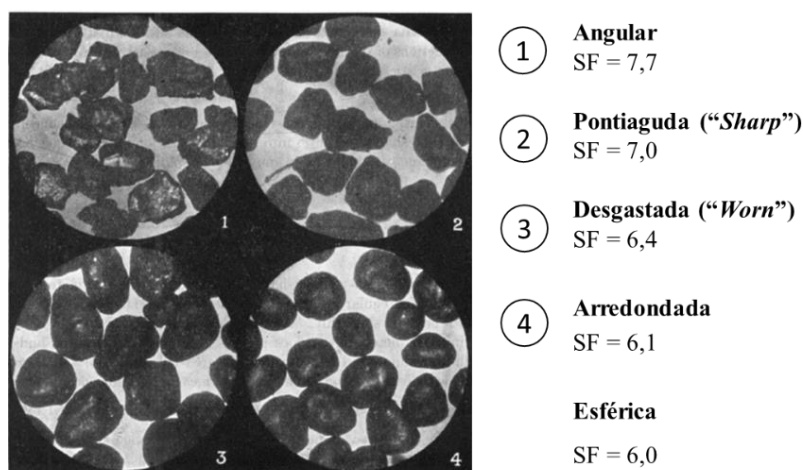


Figura 3 – Fator de forma dos grãos (adaptada de Fair & Hatch, 1933).

Na metodologia de Pettijohn (1949), cinco classes para classificação do arredondamento dos grãos são apresentadas, com seus respectivos valores limites e média geométrica (Figura 4). Uma nova classe para o arredondamento é proposta por Powers (1953), a classe “muito angular” (Figura 5); novos valores para os limites das classes são definidos e uma análise dos extremos da esfericidade é abordada. Em Cho *et al.* (2006), uma constante de regularidade das partículas (ρ) é apresentada como sendo a média entre R e S (Figura 6).

Observa-se que os métodos de análise não abordam a rugosidade, visto que este é um aspecto de difícil medição direta. Ademais, esses métodos são aplicados em um plano geométrico (2D); por isso, estudos envolvendo modelos tridimensionais a partir tomografias vem sendo desenvolvidos de modo a quantificar melhor os aspectos das formas dos grãos (Maroof *et al.*, 2019).

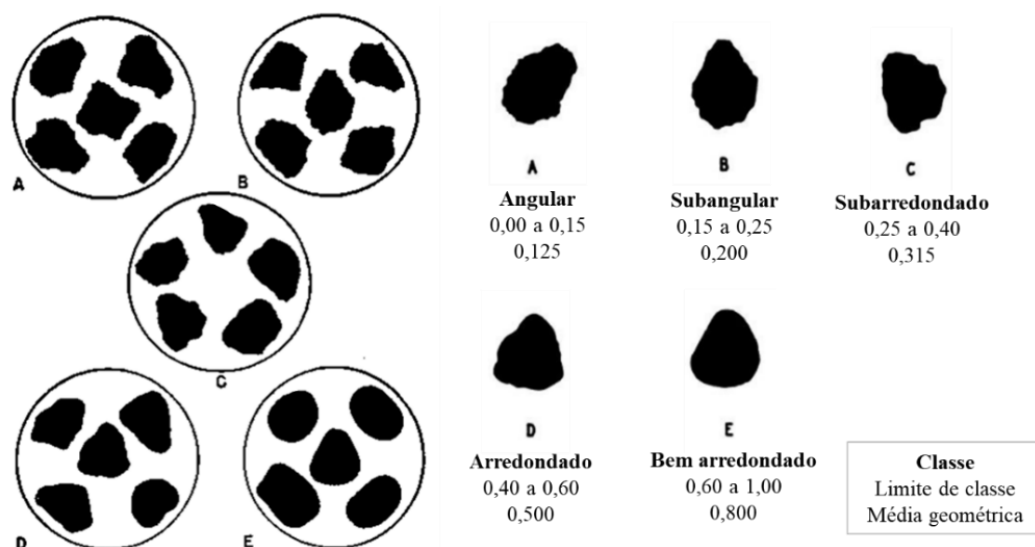


Figura 4 - Arredondamento grãos, proposto por Pettijohn (adaptada de Pettijohn, 1949 e Lambe & Whitman, 1969).

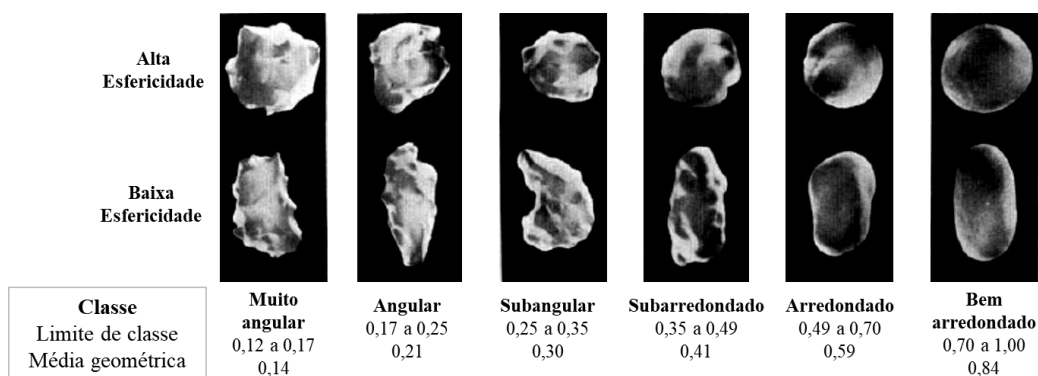


Figura 5 - Arredondamento dos grãos, proposto por Powers (adaptada de Powers, 1953).

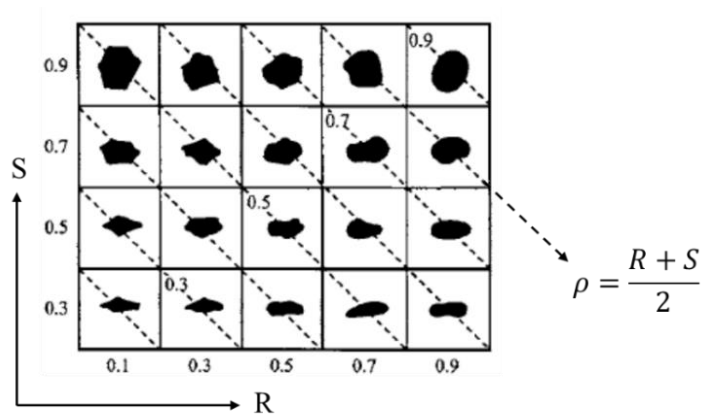


Figura 6 - Esfericidade, arredondamento e constante de regularidade dos grãos (adaptada de Cho *et al.*, 2006).

2.1.3 Granulometria

Como mencionado na seção 2.1.1, os sistemas de classificação dos solos estão fundamentados em dois aspectos: a distribuição dos tamanhos dos grãos (granulometria) e os índices de consistência (plasticidade). Sendo os solos arenosos, por via de regra, isentos de plasticidade, a classificação desses baseia-se na granulometria.

A norma ABNT (1995) define como areia a fração granulométrica correspondente ao intervalo de diâmetros equivalentes de grãos de 0,06 mm a 2,00 mm, sendo a faixa: de 0,06 mm a 0,20 mm, correspondente à fração areia fina; de 0,20 mm a 0,60 mm, à fração areia média; e de 0,60 mm a 2,00 mm, à fração areia grossa.

No Sistema Unificado de Classificação dos Solos (SUCS), apresentado na norma ASTM (2017), a fração granulométrica areia corresponde ao intervalo de diâmetros equivalentes de grãos de 0,075 mm (peneira nº 200) a 4,75 mm (peneira nº 4), sendo a faixa: de 0,075 mm a 0,425 mm (peneira nº 40), correspondente à fração areia fina; de 0,425 mm a 2,00 mm (peneira nº 10), à fração areia média; e de 2,00 mm a 4,75 mm (peneira nº 4), à fração areia grossa.

A composição granulométrica do solo é representada graficamente pela curva granulométrica, que expressa a distribuição dos diâmetros equivalentes dos grãos em termos de porcentagem em relação ao peso total seco da amostra (Figura 7). Assim, a partir das curvas granulométricas, pode-se avaliar se o solo é bem graduado ou mal graduado.

Solos bem graduados contêm grãos em uma ampla faixa de diâmetros (curva achatada), sem apresentar ausência de grãos dentro de um ou mais subintervalos de diâmetros; ou seja, sem apresentar descontinuidades na curva granulométrica. Ainda, apresentam um melhor comportamento mecânico, isto é, menor compressibilidade e maior resistência ao cisalhamento, devido ao maior entrosamento entre os grãos, propiciado pela ocupação dos vazios dos grãos maiores pelos grãos menores (modificado de Pinto, 2006).

Solos mal graduados são caracterizados por possuírem grãos, em sua maioria, do mesmo tamanho (curva íngreme), ou por apresentarem grãos em uma ampla

faixa de diâmetros (curva achatada), porém com ausência de grãos dentro de um ou mais subintervalos de diâmetros (curva com descontinuidades).

Essas variações dos diâmetros dos grãos de uma massa de solo refletem na geometria da sua curva granulométrica, podendo ser avaliada por meio de dois coeficientes que relacionam os valores de D_{10} , D_{30} , e D_{60} , sendo esses os diâmetros abaixo dos quais se situam 10 %, 30 %, e 60 % dos grãos da amostra em peso, respectivamente. Os dois coeficientes são:

$$\blacksquare \text{ Coeficiente de não uniformidade } (C_{NU}) = \frac{D_{60}}{D_{10}} \quad (1)$$

$$\blacksquare \text{ Coeficiente de curvatura } (C_C) = \frac{(D_{30})^2}{D_{10} \cdot D_{60}} \quad (2)$$

Tal como argumentado por Costa (2020), embora normas e publicações denominem a razão D_{60}/D_{10} como “coeficiente de uniformidade” (C_U), nesta dissertação, tal razão será designada como “coeficiente de não uniformidade” (C_{NU}), conforme apresentado em Pinto (2006, p. 54); uma vez que, quanto maior o valor desta razão, mais não uniforme (ou desuniforme) é o solo.

De acordo com a norma ASTM (2017), para que uma areia seja classificada como bem graduada duas condições devem ser satisfeitas: $C_{NU} \geq 6,0$ e $1,0 \leq C_C \leq 3,0$. Portanto, segundo a referida norma, para que uma areia seja classificada como mal graduada deve-se ter: $C_{NU} < 6,0$ e/ou [$C_C < 1,0$ ou $C_C > 3,0$].

A norma ABNT (1995) classifica os solos quanto ao coeficiente de não uniforme (C_{NU}) da seguinte forma: se $C_{NU} < 5,0$, o solo é uniforme; se $5,0 < C_{NU} \leq 15,0$, o solo é medianamente uniforme; e se $C_{NU} > 15,0$, o solo é desuniforme.

Por tudo o que foi dito acima, deve-se ter em mente que: (a) todo solo uniforme é obrigatoriamente mal graduado (Curva 1 da Figura 7); (b) todo solo bem graduado é obrigatoriamente não uniforme, ou seja, desuniforme (Curva 4 da Figura 7); (c) nem todo solo não uniforme é bem graduado (Curvas 3 e 2 da Figura 7). Um exemplo de (c) é um solo com uma curva granulométrica achatada (solo não uniforme), porém com descontinuidades (solo mal graduado), representado pela Curva 2 da Figura 7.

Na seção 2.1.2 foi mencionada a influência da forma dos grãos nas propriedades físicas, mecânicas e hidráulicas das areias. Desse modo, Göktepe & Sezer (2010) pontuam que, para a devida investigação dos efeitos da forma dos

grãos sobre as propriedades das areias, amostras de areias uniformes devem ser utilizadas. Tal afirmação é pautada no fato de areias bem graduadas e desuniformes tenderem a ter os espaços vazios entre suas partículas de maior diâmetro preenchidos por partículas de menor diâmetro, devido a uma larga faixa de distribuição granulométrica; não possibilitando, por tanto, associar o arranjo entre os grãos ao formato desses.

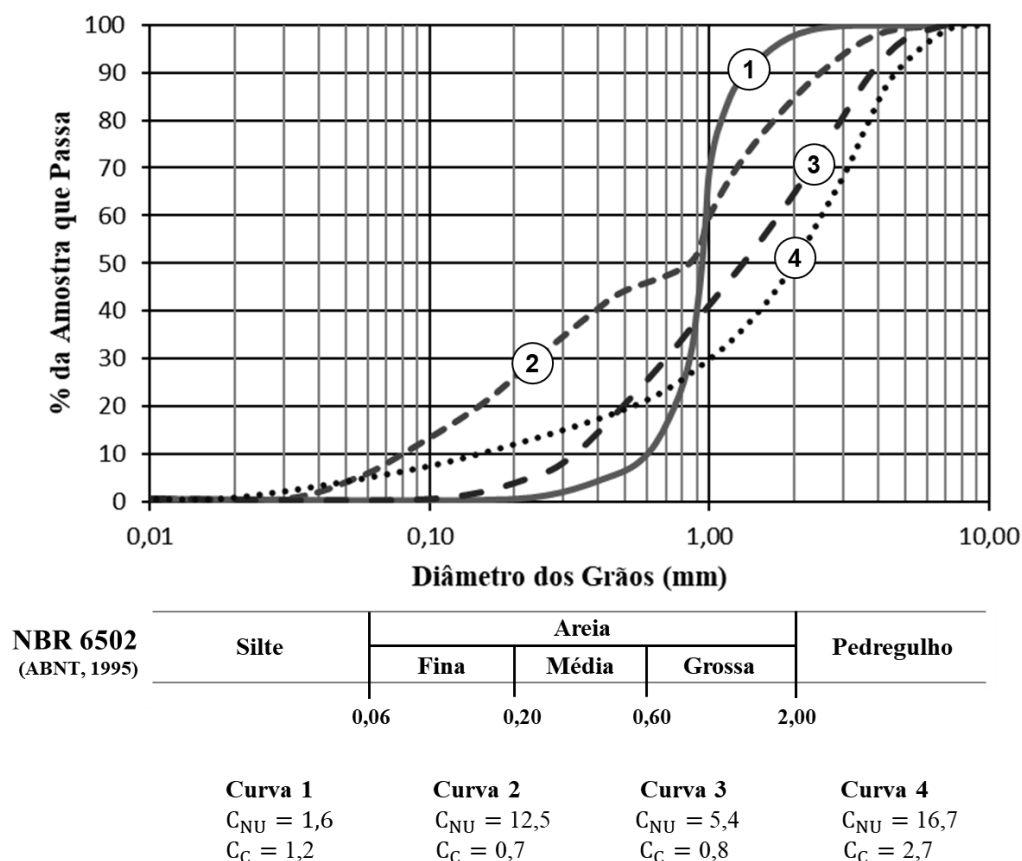


Figura 7 - Curvas granulométricas.

2.1.4

Índices de vazios (e) e compacidade relativa (CR)

O índice de vazios de um solo é definido como a razão entre o volume de vazios (V_v) e o volume de sólidos (V_s). Uma areia com uma dada granulometria e forma de grãos possui um índice de vazios máximo e um índice de vazios mínimo, os quais delimitam o intervalo de valores de índices de vazios que esta areia pode assumir em função dos diferentes arranjos dos seus grãos.

O estado do índice de vazios de uma areia em relação aos seus índices de vazios máximo e mínimo é descrito por meio da sua compacidade relativa (CR), definida por:

$$CR = \frac{e_{\text{máx}} - e}{e_{\text{máx}} - e_{\text{mín}}} \times 100\% \quad (3)$$

onde: $e_{\text{máx}}$ = índice de vazios máximo da areia;

$e_{\text{mín}}$ = índice de vazios mínimo da areia; e

e = índice de vazios no qual a areia se encontra.

Os valores de CR variam de 0 %, para solos com o índice de vazios (e) igual ao índice de vazios máximo ($e_{\text{máx}}$), até 100 %, para solos com o índice de vazios (e) igual ao índice de vazios mínimo ($e_{\text{mín}}$).

Lambe & Whitman (1969) apresentam a seguinte classificação para as areias com base nos valores de compacidade relativa (Tabela 1):

Tabela 1 - Classificação quanto à compacidade relativa (Lambe & Whitman, 1969).

Compacidade Relativa (%)	Classificação
0 – 15	Muito fofo
15 – 35	Fofo
35 – 65	Médio
65 – 85	Compacto
85 – 100	Muito compacto

Conforme mencionado, os valores dos índices de vazios máximo e mínimo são particulares a cada areia, visto que estes dependem da granulometria e da forma dos grãos. Pinto (2006, p. 27) mostra que a faixa entre os valores dos índices de vazios máximo e mínimo são tão maiores quanto mais uniformes são as areias e quanto mais angulares são seus grãos; fato observado também em Holubec & D'Appolonia (1973).

Diversas metodologias podem ser empregues na determinação dos valores dos índices de vazios máximo e mínimo de uma areia. Um estudo experimental amplo dessas metodologias é apresentado por Costa (2020).

2.2 Permeabilidade

2.2.1 Considerações iniciais

Conforme mencionado na seção 2.1.1, o solo é constituído por partículas minerais que se tocam e vazios que se conectam. Essas conexões entre os vazios fazem com que os solos sejam materiais permeáveis, ou seja, capazes de serem “atravessados” por um fluido (adaptado de Cedergren, 1977).

A permeabilidade pode ser entendida como a facilidade com que um fluido percola por um meio poroso, quando submetido a uma diferença de carga entre dois pontos do meio (adaptado de Taylor, 1948; Todd, 1959; Lambe, 1965 e Head, 1994). Quando quantificada, levando em consideração as características do meio poroso percolado e do fluido percolante, a permeabilidade é expressa pelo parâmetro chamado de coeficiente de permeabilidade (k).

A determinação do coeficiente de permeabilidade é fundamental para a concepção de diferentes tipos de projetos de engenharia, podendo-se citar como exemplo: a sua aplicação nos cálculos dos movimentos das águas subterrâneas, do petróleo e do gás natural através de solos e de rochas; na determinação da vazão de infiltração de água no subsolo de fundação e no maciço de barragens e em escavações (modificado de Carman, 1997). Diante disso, tem-se que o coeficiente de permeabilidade é uma propriedade de grande importância no âmbito geotécnico.

2.2.2 Lei de Darcy

A publicação “*Les Fontaines Publiques de la Ville de Dijon*”, de Henry Darcy (Darcy, 1856), marca o desenvolvimento de soluções para problemas de fluxo em meios porosos. A relevância desta obra está na conclusão experimental, apresentada na página 570 de seu Apêndice D, na qual Darcy relata:

“Ces expériences démontrent positivement que le volume d'eau qui passe à travers une couche de sable d'une nature donnée est proportionnel à la pression et en raison inverse de l'épaisseur des couches traversées...”,

cujas tradução livre é:

“Esses experimentos demonstram positivamente que o volume de água que passa por uma camada de areia de uma determinada natureza é proporcional à pressão e na razão inversa à espessura das camadas permeadas...”

Deste modo, Darcy observa que a vazão de água (Q) que passa em uma camada de areia — com seção transversal de área A — é diretamente proporcional à diferença de carga hidráulica registrada nos tubos manométricos (Δh) e inversamente proporcional à espessura das camadas (L), conforme apresentado na equação 4. A proporcionalidade entre os termos é uma constante, denominada coeficiente de permeabilidade (k), resultando na equação 5. A razão entre a variação da carga hidráulica (Δh) e a distância na qual essa carga é dissipada (L) é o gradiente hidráulico (i). Assim, na equação 6 é apresentada a Lei de Darcy, na qual se tem que a velocidade aparente do fluxo (v) é igual ao produto do coeficiente de permeabilidade (k) e do gradiente hidráulico (i).

A Figura 8 apresenta o aparelho utilizado por Darcy em seus experimentos, sendo: na Figura 8a, o modelo original, e na Figura 8b, um esquema do mesmo com identificação dos termos apresentados na equação 6.

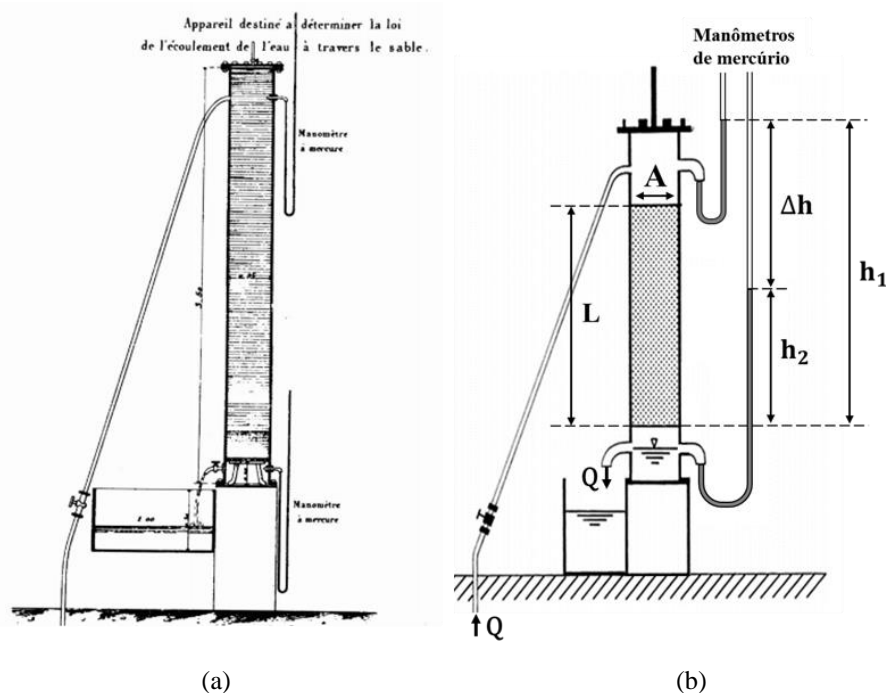


Figura 8 - Aparelho utilizado nos experimentos de Darcy. Em (a) o modelo original e em (b) um esquema equivalente (adaptado de Darcy, 1856; Cushman & Tartakovsky, 2017).

$$Q \sim \frac{\Delta h}{L} \cdot A \quad (4)$$

$$Q = v \cdot A = k \cdot \frac{\Delta h}{L} \cdot A \quad (5)$$

$$v = k \cdot \frac{\Delta h}{L} = k \cdot i \quad (6)$$

A velocidade do fluxo na Lei de Darcy é dita aparente por pressupor que o fluxo ocorre na área total da seção transversal ao fluxo (A), incluindo a área de sólidos (A_s), na qual, na realidade, não há fluxo (Figura 9). Desse modo, a velocidade real do fluxo (v_r), apresentada na Figura 9c, correspondente à área de vazios (A_v), ou seja, a área real por onde ocorre o fluxo, pode ser calculada a partir da velocidade aparente do fluxo (v) e da porosidade (n) do solo por meio da equação 9. Lembrando que a porosidade (n) é definida como a relação entre o volume de vazios (V_v) e o volume total (V) do solo.

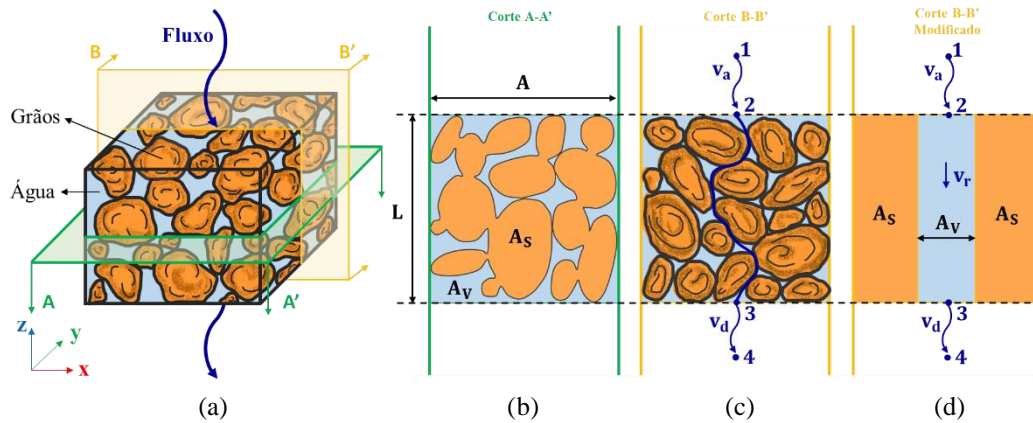


Figura 9 - Velocidades de fluxo em uma amostra de solo.

$$Q = v \cdot A = v_r \cdot A_v \quad (7)$$

$$v = v_r \cdot \frac{A_v}{A} \times \left(\frac{L}{L} \right) = v_r \cdot \frac{V_v}{V} \quad (8)$$

$$v_r = \frac{v}{n} \quad (9)$$

A velocidade aparente de fluxo (v) também é denominada de velocidade de aproximação (v_a) ou velocidade de descarga (v_d). Sendo a porosidade (n) sempre menor que um, a velocidade real do fluxo (v_r) é sempre maior que a velocidade aparente do fluxo (v).

Reynolds (1883) em seus experimentos clássicos, que tinham como objetivo visualizar o padrão de escoamento de água através de um tubo de vidro ao inserir um corante no fluxo, demonstrou a existência de dois tipos de escoamentos: o escoamento laminar, no qual cada partícula do fluido viaja ao longo de um caminho definido, nunca cruzando o caminho de qualquer outra partícula; e o escoamento turbulento, no qual os caminhos das partículas são irregulares e tortuosos, cruzando-se e recruzando-se aleatoriamente (modificado de Taylor, 1948). Diante disso, Reynolds (1883) propôs uma expressão para determinar o tipo de escoamento em tubos, apresentada na equação 10, de modo que: $Re < 2000$, o escoamento é laminar, representado pela Zona I da Figura 10; $2000 < Re < 2400$, o escoamento é de transição, representado pela Zona II; e $Re > 2000$, o escoamento é turbulento, representado pela Zona III (Brunetti, 2005). A velocidade mínima entre o escoamento laminar e o escoamento turbulento é denominada velocidade crítica mínima (v_c) (Taylor, 1948; Netto et al., 1998).

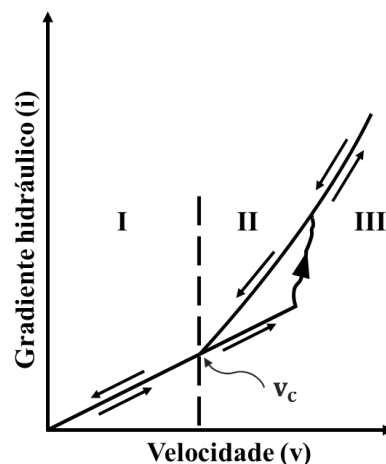


Figura 10 - Zonas de fluxo, sendo: (I) laminar, (II) de transição e (III) turbulento (adaptada de Taylor, 1948).

$$Re = \frac{v D \gamma}{\mu g}; \text{ sendo } v = v_c \text{ para } Re = 2000 \quad (10)$$

Onde: Re = número de Reynolds, grandeza adimensional;

v = velocidade do fluxo no tubo;

D = diâmetro do tubo;

γ = peso específico do líquido que escoa no tubo;

μ = coeficiente de viscosidade dinâmica do líquido; e

g = aceleração da gravidade; e

v_c = velocidade crítica mínima de fluxo no tubo;

Reynolds (1883) observou que a relação de linearidade, dada por uma reta que passa pela origem, entre “ v ” e “ i ” só era válida para o escoamento laminar (Zona I, da Figura 10). Da mesma forma, por analogia, a Lei de Darcy (equação 6) somente é válida dentro do domínio do fluxo laminar. Conforme apresenta Taylor (1948, p.122) e Todd (1959, p. 45), diversos trabalhos (Fancher *et al.*, 1933; Muskat, 1937; Rose, 1943) estipularam um intervalo de validade da Lei de Darcy ao colocar o fator de atrito de Fanning (f), sendo este $\frac{1}{4}$ do fator de atrito de Darcy-Weisbach, em função do número de Reynolds (Re), conforme apresentado na Figura 11. Nesta, pode-se observar uma relação linear entre os fatores para valores de $1 < Re < 10$, indicando um intervalo de no qual o fluxo é laminar em ambos e, logo, para o qual a Lei de Darcy é válida.

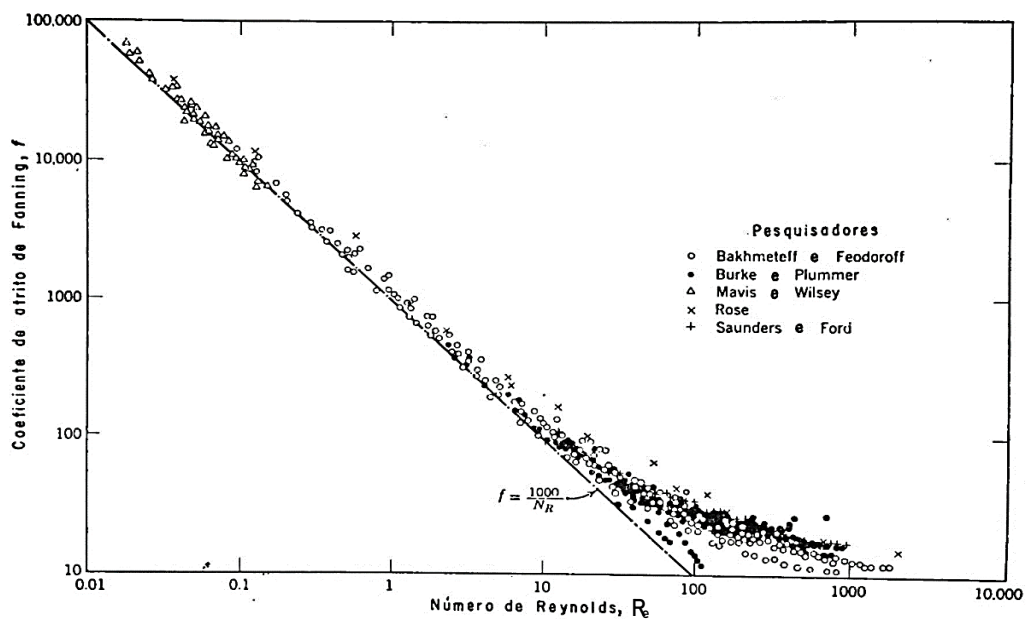


Figura 11 - Relação entre o coeficiente de atrito de Fanning e o número de Reynolds através de meios porosos (Rose, 1943; apud Todd, 1959).

Assim, adotando uma estimativa mais conservadora, Fancher *et al.* (1933) apud Taylor (1948, p.122) propuseram a equação 11 como um critério do limite de aplicabilidade da Lei de Darcy.

$$\frac{v D_a \gamma}{\mu g} \leq 1 \quad (11)$$

Onde: v = velocidade aparente de fluxo;

D_a = diâmetro de uma esfera que possui um volume igual ao quociente entre o volume total de grãos da amostra dividido pelo número de grãos presentes na amostra;

γ = peso específico do líquido percolante;

μ = coeficiente de viscosidade dinâmica do líquido percolante; e

g = aceleração da gravidade.

Observa-se que o diâmetro do tubo (D) da expressão do número de Reynolds (equação 10) é substituído por um diâmetro representativo dos grãos da amostra porosa (D_a) na equação 11. Tal fato ocorre para que seja possível estimar o diâmetro médio dos poros da massa de solo de forma mais fácil e mais prática (modificado de Todd, 1959). Taylor (1948, p.122) utiliza a equação 11 para estimar o maior diâmetro de grão ($D_{m\acute{a}x}$) de um solo uniforme, que apresentará fluxo sempre laminar, sob um gradiente hidráulico (i) unitário. Para isso, o referido autor substitui os termos da equação 11 da seguinte forma: a velocidade (v) é determinada pela Lei de Darcy, sendo o coeficiente de permeabilidade (k) definido pela expressão de Hazen (1892), cujo referido autor define como $k = 100 \cdot D_{10}^2$, estando D em cm; sendo o fluido em análise a água, os valores do peso específico e do coeficiente de viscosidade dinâmica são de 1 g/cm^3 e $10^{-5} \text{ g}\cdot\text{s/cm}^2$, respectivamente, para uma temperatura de 20°C ; por fim, a aceleração da gravidade é 980 cm/s^2 . Deste modo, tem-se a formulação da equação 12, resultando em um valor de $D_{m\acute{a}x}$ aproximadamente igual a 0,5 mm.

$$\frac{(100D^2) i \cdot D \cdot \gamma_w}{\mu_w g} = \frac{(100D^2) \cdot 1 \cdot D \cdot 1}{10^{-5} \cdot 980} = 1 \therefore D_{m\acute{a}x} \approx 0,5 \text{ mm} \quad (12)$$

Na seção 2.2.3.1, a expressão de Hazen (1892) encontra-se de acordo com a proposta original, estando em um formato de apresentação diferente ao expresso em Taylor (1948). Tal diferença é justificada pela unidade de entrada do valor do diâmetro efetivo (D_{10}); em Hazen (1892), D_{10} é expresso em milímetros (mm), enquanto que em Taylor (1948), D_{10} está em centímetros (cm). Logo, sendo D_{10} elevado ao quadrado, para entrada do valor desse em cm de forma direta na expressão, o fator “c” da fórmula original de Hazen (1892) deve ser multiplicado

por 100, conforme apresentado em Taylor (1948). Contudo, essa expressão utilizada por Taylor (1948) não está completamente de acordo com a proposta por Hazen (1892), já que o valor da constante “c” a ser multiplicado por 100, devido a correção das unidades, deveria ser de 1,50, ao invés de 1,0, pois os valores dos demais termos da equação 12 são referentes a uma temperatura de 20°C. Desse modo, o valor de $D_{\text{máx}}$ seria aproximadamente igual a 0,4 mm.

Duas observações importantes devem ser feitas no que diz respeito à nomenclaturas utilizadas em relação ao termo permeabilidade. A primeira é que muitos autores consideram o termo permeabilidade como sinônimo do coeficiente de permeabilidade (Taylor, 1948; Lambe, 1965; Head, 1994; Terzaghi & Peck, 1996; Carman, 1997); contudo, em demais bibliografias (Cedergren, 1977; Todd, 1959; Harr, 1991; Mitchell e Soga, 2005), o termo permeabilidade pode ser encontrado como sinônimo da permeabilidade intrínseca (K). Assim, para distinguir esses termos, deve-se observar as unidades nas quais as grandezas são expressas. Uma vez que o gradiente hidráulico é adimensional, o coeficiente de permeabilidade tem dimensão de velocidade [LT^{-1}] (equação 6). Por sua vez, a permeabilidade intrínseca (K) é expressa por unidade de área [L^2], sendo essa uma propriedade apenas do meio poroso percolado (esqueleto sólido), ou seja, independe do fluido percolante. A equação 13 apresenta a correlação entre o coeficiente de permeabilidade (k), de Darcy (1856), e a permeabilidade intrínseca (K).

$$K = \frac{\mu}{\gamma} \cdot k \quad (13)$$

Onde: μ = coeficiente de viscosidade dinâmica do fluido percolante,

γ = peso específico do fluido percolante.

De fato, como apresenta Daniel (1994), o coeficiente de permeabilidade da Lei de Darcy não depende apenas das propriedades do meio poroso, mas também, das propriedades do líquido percolado. Diante disso, o mesmo autor apresenta a equação 14 como alternativa à expressão dada pela equação 5, ao empregar a permeabilidade intrínseca (K) da equação 13 em vez do coeficiente de permeabilidade (k).

$$Q = K \cdot \frac{\gamma}{\mu} \cdot \frac{\Delta h}{L} \cdot A \quad (14)$$

A segunda observação é que muitos autores (Freeze & Cherry, 1979; Daniel, 1994; Mitchell & Soga, 2005; Das, 2014; Cabalar & Akbulut, 2016; etc.) utilizam o termo condutividade hidráulica ao invés de coeficiente de permeabilidade. Conforme citado por Daniel (1994) e apresentado em Mitchell & Soga (2005), tal designação decorre da similaridade da Lei de Darcy (equação 5) às equações que descrevem os fenômenos de condução. Nessas, os coeficientes de proporcionalidade entre os termos são chamados de condutividade, como por exemplo, a condutividade térmica na Lei de Fourier. Além disso, como a grande maioria dos casos de problemas geotécnicos estão associados ao fluxo de água, o emprego do termo condutividade hidráulica permite evidenciar que o fluido em análise é a água (modificado de Romanel, 2021). Deste modo, neste trabalho, sempre que o fluido em estudo seja a água, o fator “k” da Lei de Darcy será denominado condutividade hidráulica.

2.2.3

Condutividade hidráulica (k)

2.2.3.1

Formulações propostas para cálculo da condutividade hidráulica

Chapuis & Aubertin (2003) afirmam que após a publicação de Seelheim (1880), na qual é apresentada uma correlação entre a condutividade hidráulica do solo e o quadrado de um diâmetro característico de seus poros, muitas equações foram propostas a fim de estimar a condutividade hidráulica (k) a partir das características do solo e do fluido. Dentre essas equações, algumas são de origem empírica (Seelheim, 1880; Hazen, 1892), ou seja, formuladas a partir de observações experimentais; enquanto outras, além das evidências experimentais, derivam de soluções teóricas (Kozeny-Carman, 1956; Taylor, 1948), cujas formulações baseiam-se em fundamentos da hidrodinâmica e na modelagem de um material poroso como um conjunto de tubos capilares.

Nem todas as equações podem ser aplicadas em solos grossos e finos. Ademais, poucas apresentam resultados próximos aos obtidos em ensaios, devido

à dificuldade de incluir todas as possíveis variações dos meios porosos, principalmente no que diz respeito à distribuição granulométrica, formato dos grãos e porosidade (modificado de Todd, 1959). Os fatores que afetam a condutividade hidráulica são apresentados e comentados na seção 2.2.3.2.

A Tabela 2 apresenta cinco formulações desenvolvidas com a finalidade de estimar a condutividade hidráulica (k) a partir de características do solo (percolado) e do fluido (percolante), ou seja, de determinar o valor de “ k ” de modo indireto. Estas equações são frequentemente apresentadas nas literaturas que tratam da permeabilidade de solos arenosos saturados ($S_r = 100\%$). Na Tabela 2, ainda, são apresentados os respectivos autores das equações, bem como algumas observações acerca das limitações e particularidades da aplicação das mesmas. As definições das variáveis de entrada das equações são apresentadas abaixo da Tabela 2.

Na equação original proposta por Hazen (1892), equação (i) na Tabela 2, “ c ” é uma constante cujo valor aproximado é 1000 para “ k ” em unidade de metro/dia. Alterando a unidade da condutividade hidráulica (k) para cm/s, essa constante “ c ” assume um valor aproximado de 1,16. A unidade do diâmetro efetivo (D_{10}) é milímetros (mm) e da temperatura (T) é graus Celsius ($^{\circ}\text{C}$). Para a temperatura da água de 10°C , a equação (i) pode ser escrita na forma da equação (ii). Muitas literaturas (Taylor, 1948; Cedergren, 1967; Das, 2014; entre outras), ao apresentarem a equação (ii) como a equação de Hazen, não ressaltam o fato desta ser aplicada para uma temperatura de 10°C .

Carrier (2003) explicita faixas de valores de “ c ” apresentados por diferentes autores, observando que este varia de 1 a 1.000 para “ D_{10} ” em cm e “ k ” em cm/s, ou seja, em três ordens de grandeza. Segundo o mesmo autor, este deveria ser um fato que desqualificaria o uso da fórmula de Hazen; no entanto, observa que tal formulação continua a ser utilizada devido à sua simplicidade e facilidade de memorização.

O termo “ C_s ” da equação (iii) da Tabela 2 é denominado fator de forma. Esse fator “ C_s ” é equivalente ao inverso do coeficiente empírico de Kozeny-Carman (“ C_{KC} ”) apresentado em Carrier (2003), cujo valor relatado em Carman (1956, p. 14) é de $4,8 \pm 0,3$, para esferas uniformes; sendo, geralmente, considerado $C_{KC} = 5$. Em Mitchell & Soga (2005, p. 255), “ C_{KC} ” é representado pelo produto de dois fatores: o fator de forma do poro (k_0) e o fator de tortuosidade (FT) elevado ao quadrado; de modo que, para solos arenosos de poros aproximadamente uniformes,

tem-se: “ k_0 ” $\approx 2,5$ e “FT” = $\sqrt{2}$. Logo, o produto desses fatores é equivalente ao valor geralmente utilizado para C_{KC} , conforme apresentado por Carrier (2003). Sendo C_s o inverso de C_{KC} , ter-se-ia então $C_s = 0,2$ com base em Carman (1956).

Ainda, na equação (iii), a superfície específica dos grãos (S_s) é definida como a razão entre área superficial dos grãos e o volume de grãos, com dimensão de $[1/L]$. Ressalta-se que, por definição, essa variável difere da: (a) área superficial específica (SSA), sendo essa a razão entre a área superficial dos grãos e a massa dos grãos, cuja dimensão é $[L^2/M]$; e, (b) superfície específica do solo (S_v), sendo essa a razão entre a área superficial dos grãos e o volume total solo, cuja dimensão é $[1/L]$.

Tabela 2 - Formulações para determinação indireta da condutividade hidráulica de solos arenosos.

Autor/ Pesquisador	Equação	Observações
Hazen (1892)	(i) $k = c D_{10}^2 (0,70 + 0,03 T)$ (ii) $k = c D_{10}^2$; para $T = 10^\circ\text{C}$	“k” em cm/s, “ D_{10} ” em mm, “T” em $^\circ\text{C}$ (Celsius) e $c = 1,16$ Aplicáveis apenas em areias com $C_{NU} < 5$ e $0,1 \text{ mm} < D_{10} < 3,0 \text{ mm}$.
Kozeny-Carman (Kozeny, 1927; Carman, 1937 e 1956)	(iii) $k = C_s \frac{1}{S_s^2} \cdot \frac{\gamma_w}{\mu} \cdot \frac{e^3}{1+e}$	$C_s = 0,2$, geralmente; Aplicáveis em solos com: $0,05 \text{ mm} < D_{10} < 3,0 \text{ mm}$.
Taylor (1948)	(iv) $k = D_s^2 \cdot \frac{\gamma_w}{\mu} \cdot \frac{e^3}{1+e} C$	Não apresenta valores para C.
Carrier (2003)	(v) $k = 1,99 \times 10^4 \frac{1}{S_0^2} \cdot \frac{e^3}{1+e}$; para $T = 20^\circ\text{C}$	$S_0 = \frac{SF}{D_{eff}}$; sendo $D_{eff} = \frac{100 \%}{\sum f_i / (D_{li}^{0,404} \times D_{si}^{0,595})}$
Chapuis (2004)	(vi) $k = 2,4622 \left(D_{10}^2 \frac{e^3}{1+e} \right)^{0,7825}$	k em cm/s e D_{10} em mm Aplicação mais efetiva em solos com $0,13 \text{ mm} < D_{10} < 1,98 \text{ mm}$ e $0,4 < e < 1,5$.

Definição das variáveis:

c = constante de Hazen (1892);
 C_s = fator de forma de Kozeny-Carman;
 C = fator de forma de Taylor (1948);
 D_{10} = diâmetro efetivo;
 D_{eff} = diâmetro efetivo, de Carrier (2003);
 D_{li} = abertura da peneira maior;
 D_{si} = abertura da peneira menor;
 D_s = diâmetro de um grão esférico que possui a mesma razão entre o volume e área superficial dos grãos do solo em média.

e = índice de vazios;
 f_i = fração de partículas entre dois tamanhos de peneiras (%);
 S_s = superfície específica dos grãos;
 S_0 = superfície específica dos grãos, de Carrier (2003);
 SF = fator de forma dos grãos;
 T = temperatura;
 γ_w = peso específico da água;
 μ = viscosidade dinâmica da água;

Segundo Das (2019) a equação Kozeny-Carman funciona bem para descrever solos arenosos, nos quais o coeficiente de permeabilidade tem uma relação linear com $e^3/(1+e)$. Mitchell & Soga (2005) afirmam que discrepâncias são observadas quando essa equação é aplicada à solos argilosos; isso porque as argilas não possuem tamanhos de poros uniformes e mudanças nas características do fluido que percola por esses poros acarretam em alterações na espessura da camada adsorvida aos grãos de argila, interferindo nos tamanhos dos poros e modificando a estrutura do esqueleto sólido, logo, afetando a condutividade hidráulica (k).

A equação apresentada por Taylor (1948) possui o mesmo embasamento teórico da fórmula de Kozeny-Carman, o que justifica a similaridade entre ambas. Contudo, a fórmula de Kozeny-Carman relaciona a condutividade hidráulica (k) com a superfície específica dos grãos (S_s), o que a difere da formulação de Taylor (1948), na qual “ k ” está relacionada ao diâmetro de um grão esférico que possui a mesma razão entre o volume e área superficial dos grãos do solo em média (D_s). O fator de forma (C) de Taylor (1948) é composto por uma constante de forma geométrica da seção transversal ao fluxo (C_g), por uma constante numérica e demais influências relacionadas à forma dos grãos (como o caminho sinuoso do fluxo entre os grãos e a forma e o arranjo dos grãos).

Como observado por Costa (2020), diferentemente das demais equações propostas para o cálculo da condutividade hidráulica (k), a expressão de Kozeny-Carman não considera o diâmetro equivalente dos grãos de solo de forma direta, mas sim, a superfície específica dos mesmos (S_s). Sendo a superfície específica dos grãos uma característica não determinada frequentemente, Carrier (2003) propôs uma modificação na determinação dessa, de modo que, “ S_s ” foi designada por “ S_0 ”, cujo o cálculo é dado pela razão do fator de forma dos grãos (SF) e um diâmetro efetivo do solo (D_{eff}), apresentada na equação (v) da Tabela 2. Ao contrário do diâmetro efetivo “ D_{10} ”, sendo este o diâmetro abaixo dos qual se situam 10 % dos grãos da amostra em peso, o diâmetro efetivo de Carrier (2003) é calculado considerando toda a distribuição granulométrica. Na equação (v), segundo Carrier (2003), o valor de $1,99 \times 10^4$ resulta da substituição dos termos (γ_w/μ) e (C_s) da expressão (iii), para uma temperatura de 20°C, sendo $\gamma_w/\mu = 9,93 \times 10^4$ (1/cm·s) e $C_s = 0,2$.

Carrier (2003) relata que uma fórmula similar à proposta pelo mesmo é apresentada em Fair & Hatch (1933), chamando atenção para a data de publicação.

Além disso, o referido autor apresenta os valores propostos por Fair & Hatch (1933) para o fator de forma dos grãos (SF), conforme já apresentado na seção 2.1.2 deste trabalho.

Chapuis (2004) propõe uma nova formulação para a determinação indireta da condutividade hidráulica (k) com base em duas metodologias, a de Hazen e a do *Naval Facilities Engineering Command* (NAVFAC), as quais o referido autor considera serem as mais utilizadas, atualmente, na engenharia. Essa formulação encontra-se apresentada na Tabela 2 pela equação (vi), na qual o valor de D_{10} é dado em mm e a condutividade hidráulica (k) é obtida em cm/s. Das (2019) afirma que esta equação é válida para areias e pedregulhos uniformes, de modo que “ k ” esteja em uma faixa de 10^{-1} a 10^{-3} cm/s; podendo, ainda, ser aplicada em areias e siltes, desde que, não haja plasticidade alguma.

2.2.3.2

Fatores que afetam a condutividade hidráulica

A condutividade hidráulica (k) é influenciada pela(o): distribuição dos tamanhos das partículas do solo (granulometria), forma e textura (rugosidade) das partículas, índice de vazios, arranjo da estrutura do solo (“*fabric*”), composição mineralógica, grau de saturação, tipo de fluxo, características do fluido percolante e temperatura (modificado de Taylor, 1948; Cedergren, 1977; Head, 1982). A composição mineralógica é incluída na lista acima pelo fato dela ser um dos fatores determinantes na espessura da camada adsorvida aos grãos e, por conseguinte, nos tamanhos dos poros disponíveis para o fluxo, em solos plásticos. Para solos sem plasticidade, a composição mineralógica não possui relevância.

De uma forma ou de outra, muitos dos fatores supracitados são observados nas variáveis apresentadas nas equações da Tabela 2 para a determinação indireta da condutividade hidráulica de solos arenosos. Desse modo, particularmente, no que diz respeito aos solos arenosos, esta seção abordará algumas considerações sobre estes fatores.

Nas estruturas das areias, as partículas encontram-se dispostas diretamente umas sobre as outras sob efeito da gravidade (Caputo, 1967). Os arranjos dessas estruturas são decorrentes da distribuição granulométrica e da forma dos grãos, podendo encontrar-se mais compacta ou mais fofa, a depender do entrosamento

entre as partículas; de modo que, estes mesmos fatores, acabam influenciando na porosidade da massa de solo e, conseqüentemente, na condutividade hidráulica. Taylor (1948) apresenta duas razões para justificar o fato do aumento da porosidade, em macroescala, proporcionar um aumento da condutividade hidráulica: sendo a primeira, atribuída ao aumento na porcentagem de área disponível ao fluxo na seção transversal de solo e, a segunda, atribuída ao aumento nas dimensões dos poros.

Head (1994) faz as seguintes considerações à respeito das influências das propriedades da estrutura do esqueleto sólido na diminuição da condutividade hidráulica em areias: (a) quanto menor o diâmetro dos grãos, menores os vazios entre esses, logo, maior a resistência ao fluxo; (b) partículas mais angulares e alongadas criam caminhos de fluxo mais tortuosos; (c) partículas com uma textura áspera fornecem maior resistência ao fluxo; e (d) a compacidade relativa tem efeito considerável no tamanho e na disposição dos vazios entre as partículas.

A Figura 12 apresenta quatro seções transversais idealizadas de massas de solo constituídas por diferentes arranjos entre os grãos. Os cortes A e B são formados por grãos de forma esférica, enquanto os cortes C e D apresentam grãos angulares. Nos cortes A e C, a distribuição granulométrica é uniforme, enquanto que, nos cortes B e D, a distribuição granulométrica é bem graduada.

Com base na comparação entre as seções da Figura 12, fica perceptível que a condutividade hidráulica em solos arenosos é tanto maior quanto: mais uniforme é a granulometria; maior o diâmetro e mais esférica seja a forma dos grãos; e maior a porosidade (ou o índice de vazios), ou seja, menor a compacidade relativa. Apesar de pressuposto que a condutividade hidráulica seja tanto maior quanto mais esférica a forma dos grãos, o grau dessa influência não é aspecto muito investigado, sendo, por isso, um dos objetivos desta pesquisa.

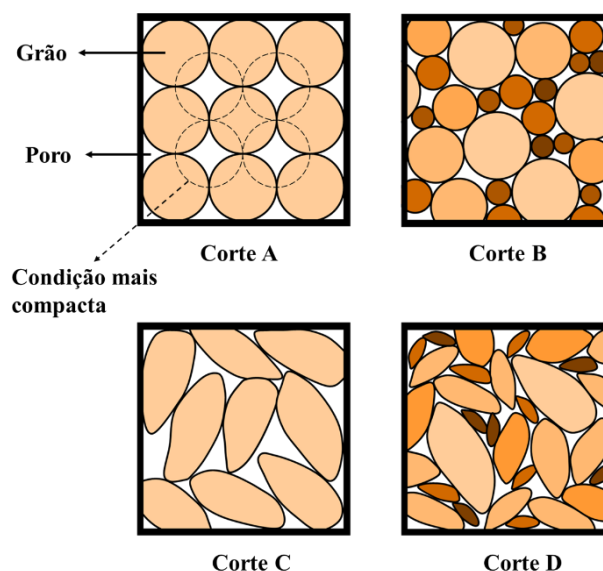


Figura 12 - Seções transversais idealizadas de arranjos estruturais de solos arenosos (inspirada em Weil & Brady, 2017).

Taylor (1948) e Head (1994) discutem a importância do grau de saturação (S_r) do solo nas medições da condutividade hidráulica (k); isso, porque, bolhas de ar aprisionadas nos vazios entre os grãos, mesmo que em quantidades muito pequenas, podem alterar significativamente o resultado da medição de “ k ”. As bolhas de ar diminuem o espaço entre os grãos preenchidos por água disponível para o fluxo, reduzindo, consideravelmente, a condutividade hidráulica. Portanto, quanto menor o grau de saturação (S_r), menor a condutividade hidráulica medida. Head (1994) pontua que para um grau de saturação inferior a cerca de 85% a Lei de Darcy torna-se invalidada devido à continuidade do ar nos vazios.

Quanto ao tipo de fluxo, conforme discutido na seção 2.2.2, a Lei de Darcy somente é válida dentro do regime de fluxo laminar, o qual ocorre sob velocidades, ou gradientes hidráulicos, relativamente baixos. Head (1994) pontua que, em solos com grãos de diâmetro médio correspondentes à faixa de pedregulhos, ou mais grosseiros, nos quais pouco ou nenhum material fino está presente nos grandes

espaços vazios entre os grãos, a velocidade do fluxo pode ser alta o suficiente para tornar o fluxo turbulento (Figura 13).

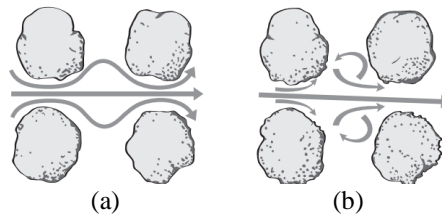


Figura 13 - Representação esquemática de um fluxo (a) laminar e (b) fluxo turbulento em um depósito granular. (Driscoll, 1986, *apud* Poehls & Smith, 2009).

Conforme discutido por Head (1994), sendo notória nas equações apresentadas na Tabela 2 da seção anterior e na equação 13, as propriedades do fluido (percolante) relevantes para a determinação da condutividade hidráulica são o peso específico (γ) e o coeficiente de viscosidade dinâmica (μ). Desse modo, tem-se que o coeficiente de permeabilidade é diretamente proporcional ao peso específico e inversamente proporcional ao coeficiente de viscosidade dinâmica. Para a água, o peso específico varia pouco nas faixas de temperaturas normalmente utilizadas nos experimentos (15 - 30°C); contudo, o coeficiente de viscosidade dinâmica (μ) varia significativamente. Cedergren (1967, p. 34) apresenta o gráfico da Figura 14 para mostrar que a variação do coeficiente de viscosidade dinâmica da água para uma faixa mais ampla de temperaturas normalmente relacionadas a ensaios de permeabilidade pode ser de 100%.

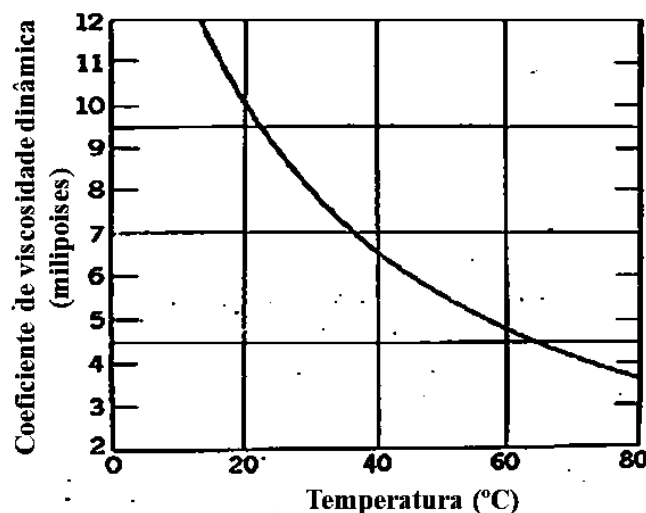


Figura 14 -Variação do coeficiente de viscosidade dinâmica da água com a temperatura (traduzida de Cedergren, 1967).

A Figura 14 mostra que o aumento da temperatura causa diminuição do coeficiente de viscosidade dinâmica da água, tornando-a mais "fluida", e consequentemente, aumentando o valor da condutividade hidráulica. Assim, diante da influência da temperatura sobre a viscosidade do fluido percolante, é habitual padronizar os valores medidos de “k” à temperatura de referência de 20°C, por meio da equação 14.

$$k_{20} = k_T \cdot \left(\frac{\mu_T}{\mu_{20}} \right) \quad (14)$$

, onde:

k_{20} = condutividade hidráulica na temperatura de 20°C;

k_T = condutividade hidráulica medida na temperatura T (°C) do ensaio;

μ_T = coeficiente de viscosidade dinâmica da água na temperatura T (°C) do ensaio; e

μ_{20} = coeficiente de viscosidade dinâmica na água na temperatura de 20 °C;

A razão entre o coeficiente de viscosidade dinâmica da água na temperatura T (°C) do ensaio e o coeficiente de viscosidade dinâmica da água na temperatura de referência de 20 °C pode ser determinada de forma direta a partir do gráfico da Figura 15, apresentada em Head (1994, p. 85).

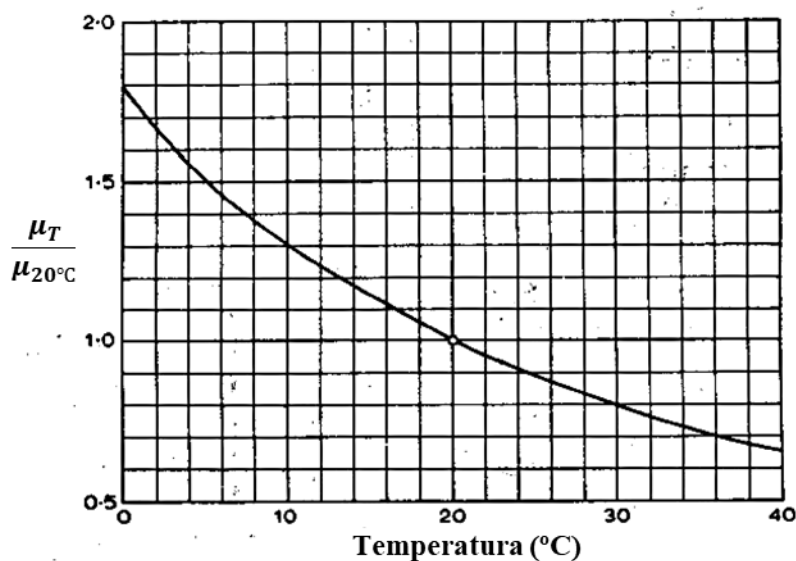


Figura 15 - Razão entre os coeficientes de viscosidade dinâmica da água a uma temperatura T e à 20 °C em função da temperatura (traduzida de Head, 1994).

Head (1994) recomenda a utilização de água deaerada nos ensaios de laboratório para determinação da condutividade hidráulica, uma vez que o ar contido na água tende a formar bolhas à medida que flui pelos vazios estreitos entre as partículas do solo. Não havendo a disponibilidade de água deaerada, é aconselhável utilizar, ao menos, água destilada, já que as principais objeções ao uso de água da torneira não tratada são a presença de ar dissolvido, sólidos dissolvidos e possivelmente bactérias (modificado de Head, 1994).

2.2.3.3

Ordem de grandeza de valores da condutividade hidráulica em solos

Cedergren (1977) pontua que nenhuma outra propriedade na engenharia geotécnica é tão amplamente variável quanto a condutividade hidráulica. A variação dos valores típicos de “k” é da ordem de 10 bilhões de vezes entre as faixas limites de classificação dos solos, de argila a pedregulho. Escalas que apresentam valores típicos de “k” mediante a classificação dos solos são fundamentadas nos resultados obtidos por diversos autores em ensaios de permeabilidade realizados em diferentes tipos de solo.

Lambe & Whitman (1969, p. 286) apresentam relações “índice de vazios *versus* condutividade hidráulica” obtidas a partir de resultados de ensaios de permeabilidade realizados em laboratório em 30 amostras de solos de características distintas. Esses resultados são apresentados na Figura 16, na qual os solos são classificados quanto à drenagem em “praticamente impermeável”, “muito baixa”, “baixa”, “média” e “alta”. Nas Tabelas 3 e 4, a seguir, são apresentados mais valores típicos de condutividade hidráulica (k) de solos sedimentares saturados, publicados por Pinto (2006) e Das (2007), respectivamente.

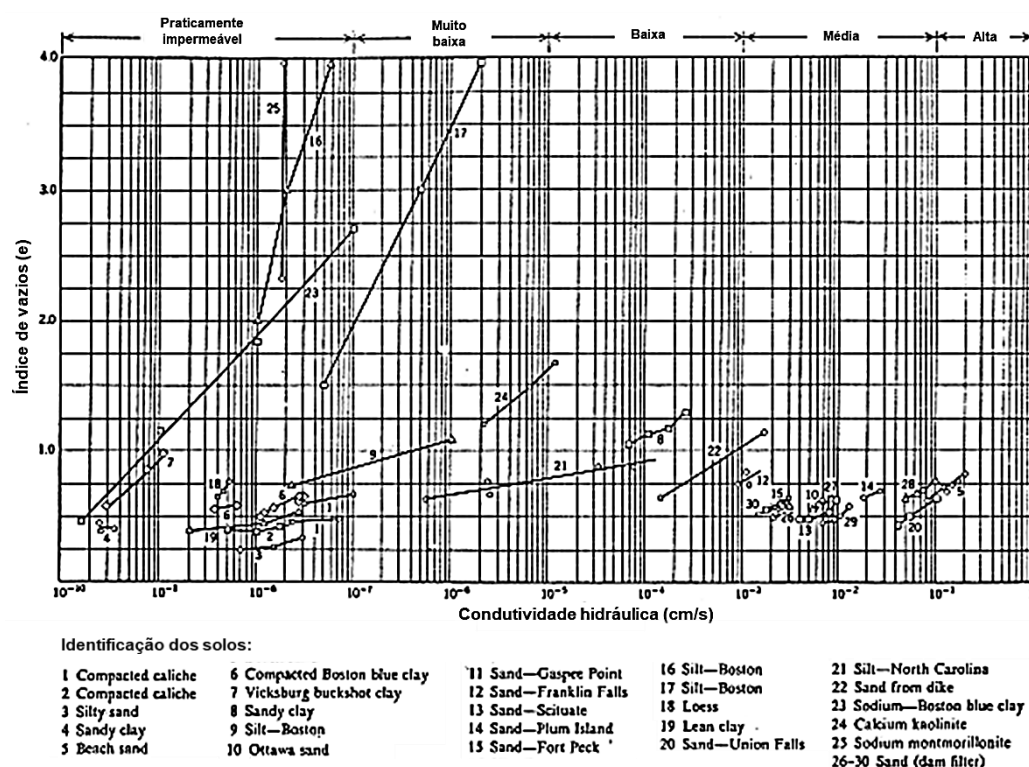
Tabela 3 - Alguns valores típicos da condutividade hidráulica (modificado de Pinto, 2006).

Classificação do solo	Condutividade hidráulica (cm/s)*
Argilas	$k < 10^{-7}$
Siltes	$10^{-4} < k < 10^{-7}$
Areias argilosas	10^{-5}
Areias finas	10^{-3}
Areias médias	10^{-2}
Areias grossas	10^{-1}

*A unidade da publicação original foi modificada, sendo essa expressa em m/s, vide página 105, da referência.

Tabela 4 - Valores típicos da condutividade hidráulica dos solos saturados (Das, 2007).

Tipo de solo	Condutividade hidráulica (cm/s)
Argila	$k < 10^{-6}$
Argila com silte	$10^{-3} < k < 10^{-5}$
Areia fina	$10^{-2} < k < 10^{-3}$
Areia grossa	$1 < k < 10^{-2}$
Pedregulho limpo	$10^2 < k < 1$

Figura 16 – Relações índice de vazios *versus* condutividade hidráulica para diferentes tipos de solo (adaptada de Lambe & Whitman, 1969).

2.2.4 Determinação da condutividade hidráulica em laboratório

2.2.4.1

Considerações iniciais

As formulações apresentadas na seção 2.2.3.1 permitem estimar o valor da condutividade hidráulica (k). Entretanto, a determinação direta do valor da condutividade hidráulica é realizada por meio da execução de ensaios de laboratório ou de campo (“*in situ*”). De acordo com Head (1994, p. 98), a realização de ensaios de campo é o método mais satisfatório para determinar a permeabilidade de solos

de granulometria grossa em seu estado natural, uma vez que, amostras indeformadas, representativas do estado “*in situ*”, são difíceis de serem obtidas. Contudo, os ensaios em laboratório possibilitam o estudo da relação entre a condutividade hidráulica e os demais fatores que a influenciam, sob condições de contorno impostas e com alto controle da execução do ensaio (modificado de Lambe & Whitman, 1969).

Os equipamentos que permitem determinar a condutividade hidráulica em laboratório são chamados de permeâmetro, podendo ser: de parede rígida ou de parede flexível; e sob carga hidráulica constante ou sob carga hidráulica variável. A escolha do equipamento depende das informações requeridas e das características do solo e do fluido percolante. Daniel (1994) afirma que permeâmetros de parede rígida são preferidos para solos de granulometria grossa, enquanto que, para solos de granulometria fina, que possuem baixa condutividade hidráulica, podem ser utilizados tanto os permeâmetros de parede rígida quanto os de parede flexível. Ensaios de permeabilidade em permeâmetro de parede flexível não são recomendados para solos de alta permeabilidade devido às perdas de carga em tubos, válvulas e acessórios.

Segundo Head (1994), permeâmetros de parede rígida sob carga constante são indicados para solos de alta permeabilidade, como areias; enquanto que os de parede rígida sob carga variável são recomendados para solos de permeabilidade intermediária e baixa, inferiores a 10^{-2} cm/s, como siltes e argilas. Isso, porque, ensaios de carga variável em solos de alta permeabilidade resultariam em uma variação volume de fluido de forma muito rápida, em um intervalo de tempo muito curto, dificultando a medição. Por outro lado, ensaios de carga constante em solos de baixa permeabilidade demandariam um tempo excessivo para coleta de um volume do fluido representativo, possibilitando erros na medição devido a evaporação da água.

2.2.4.2

Ensaio de permeabilidade em permeâmetro de parede rígida sob carga constante

Existem várias possibilidades de arranjo para execução de ensaios de permeabilidade em permeâmetro de parede rígida sob carga hidráulica constante. Um dos esquemas mais simples é o apresentado na Figura 17.

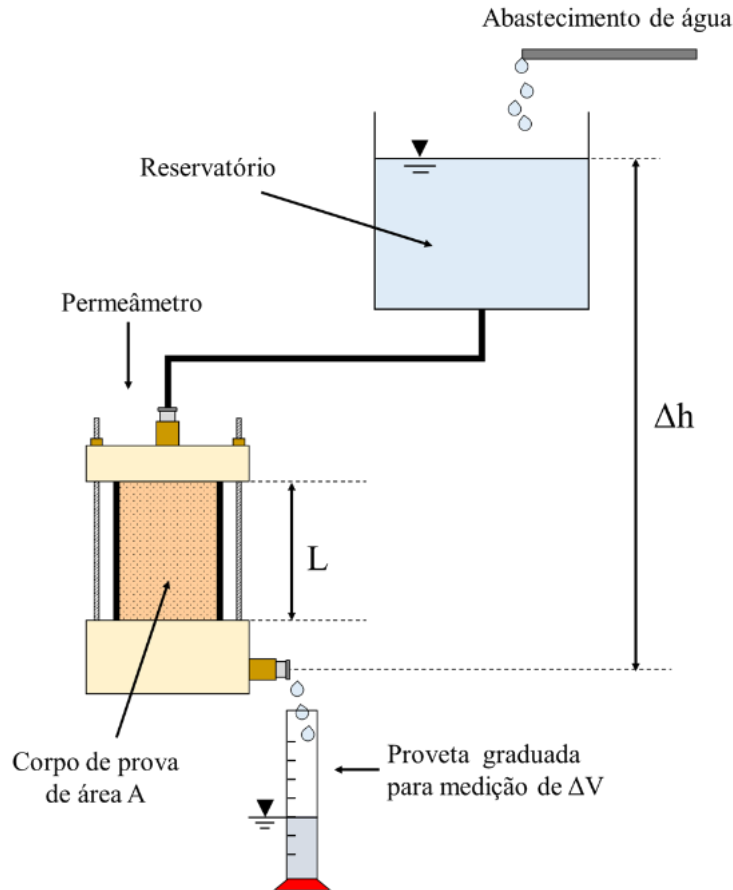


Figura 17 - Esquema simples de um ensaio em um permeâmetro de parede rígida sob carga constante (adaptado de Daniel, 1994).

Nesse ensaio, a condutividade hidráulica (k) é determinada pela medição do volume de água (ΔV) que percola, em um intervalo de tempo (Δt), um corpo de prova cilíndrico com seção transversal de área (A) e altura (L). O nível d'água no reservatório que alimenta o fluxo é mantido constante em relação ao nível d'água na saída do fluxo, de modo que, diferença de carga hidráulica (Δh) entre esses é mantida constante. Na Figura 17, admite-se que toda a perda de carga hidráulica (Δh) ocorre entre o topo e a base do corpo de prova, de modo que, o gradiente hidráulico (i) no corpo prova é calculado como $i = \Delta h/L$. Associando a Lei de Darcy ($v = k \cdot i$) à Equação da Continuidade ($Q = v \cdot A$, onde v é a velocidade aparente do fluxo), e sabendo-se que $Q = \Delta V/\Delta t$, chega-se facilmente à expressão para o cálculo de k , a seguir:

$$k = \frac{\Delta V / \Delta t}{i \cdot A} \quad (15)$$

A temperatura da água durante o ensaio deve ser registrada, possibilitando a correção do valor de “k” para a temperatura padrão de 20°C.

No esquema da Figura 17, perdas de carga durante a percolação podem ocorrer fora do corpo de prova, como em: tubos, válvulas, conexões, discos perfurados e telas; o que invalidaria a premissa de que toda a perda de carga (Δh) ocorre entre o topo e a base do corpo de prova (L). Por isso, conforme ressaltado por Daniel (2014), recomenda-se medir a perda de carga hidráulica entre dois pontos do interior do corpo de prova, por meio de piezômetros instalados na parede do permeâmetro, a fim de determinar com acurácia o gradiente hidráulico (i) que de fato comanda o fluxo dentro do corpo de prova.

Segundo Daniel (1994), em solos de granulometria grossa, altas velocidades de fluxo são necessárias a fim de obter uma perda de carga mensurável, o que pode acarretar em fluxo turbulento. Assim, a melhor forma de garantir que o fluxo turbulento não está afetando os resultados é determinando a condutividade hidráulica em três gradientes hidráulicos diferentes, garantindo que os valores desta seja aproximadamente o mesmo. Além disso, durante o ensaio, a variação da carga hidráulica no corpo de prova pode acarretar em alterações nas bolhas de ar que podem estar presentes nos vazios, com isso o volume do corpo de prova pode mudar, devendo ser registrada essa possível variação ao final do ensaio.

Daniel (1994) pontua ainda que as principais vantagens do ensaio sob carga hidráulica constante em relação ao ensaio sob carga hidráulica variável são a simplicidade de cálculo da condutividade hidráulica e a manutenção da carga hidráulica constante no corpo de prova. O item 2.2.4.5 apresenta as vantagens e desvantagens desse equipamento em relação ao permeâmetro de parede flexível.

2.2.4.3

Ensaio de permeabilidade em permeâmetro de parede flexível

No permeâmetro de parede flexível, o corpo de prova é colocado em uma câmara de pressão, estando delimitado em sua base e em seu topo por pedras porosas, ou telas, e, respectivamente, pelo pedestal e pelo *top-cap*, tal como ilustrado na Figura 18. No pedestal e no *top cap*, há linhas de drenagem pelas quais é estabelecido o fluxo de água pelo corpo de prova. A superfície lateral do corpo de

prova é envolta por uma membrana flexível de látex, fixada com anéis de borracha (*o-rings*) junto ao pedestal e ao *top cap*.

A câmara de pressão é preenchida com água, pressurizando a membrana de látex contra o corpo de prova e, dessa forma, minimizando o fluxo lateral entre o corpo de prova e a membrana (modificado de Daniel, 1994). A membrana flexível tem a finalidade de impedir o fluxo de água entre câmara o corpo de prova.

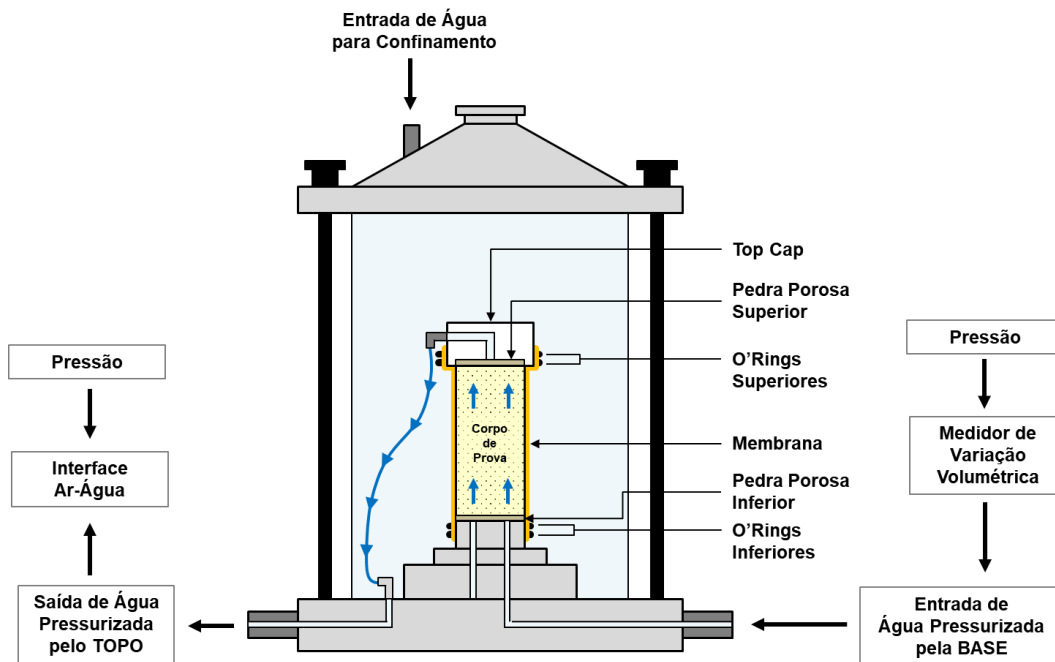


Figura 18 – Esquema do permeâmetro de parede flexível.

A Figura 19 ilustra um esquema simplificado da configuração dos elementos que compõe o equipamento de permeâmetro de parede flexível utilizado nesta pesquisa, o qual será mais detalhado adiante, na seção 3.8.2. Observa-se que o equipamento é consideravelmente mais complexo do que o permeâmetro de parede rígida.

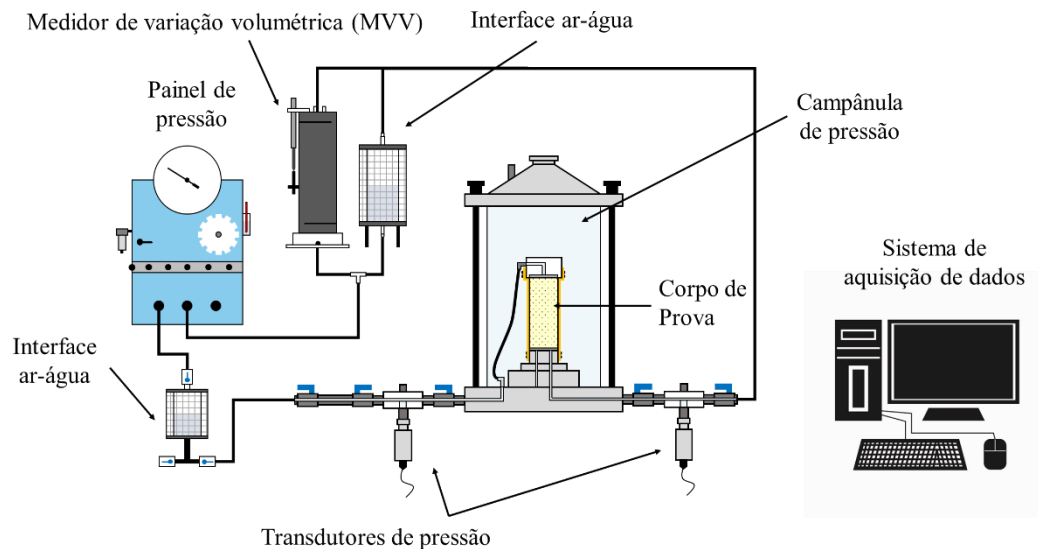


Figura 19 - Esquema de ensaio do permeâmetro de parede flexível

A tensão efetiva (hidrostática) no corpo de prova corresponde à diferença entre a pressão aplicada na água que preenche a câmara, que vem a ser a tensão total (hidrostática) que age no corpo de prova, e a pressão de água nos poros do solo (poropressão). Para que o topo e a base não estejam sob tensões verticais efetivas distintas, a razão comprimento/diâmetro do corpo de prova não deve ser muito maior que 2, o que acarretaria em um adensamento para diferentes valores de índice de vazios em solos muito compressíveis.

Este ensaio tem por vantagem a avaliação da saturação do corpo de prova por meio da determinação do parâmetro B de Skempton (1954). A determinação do parâmetro B é feita aplicando-se um incremento da pressão confinante (tensão total), $\Delta\sigma$, e mensurando a consequente variação da poropressão, Δu , de modo que:

$$B = \frac{\Delta u}{\Delta \sigma} \quad (16)$$

De acordo com a norma ASTM (2016), corpos de prova de solos de granulometria grossa podem ser considerados como saturados para valores de parâmetro B maiores, ou iguais, a 0,95. O processo de saturação pode ser realizado por percolação, com gradientes hidráulicos baixos, de modo a não alterarem a tensão efetiva, ou por contrapressão, que corresponde à aplicação de uma poropressão de mesmo valor no topo e na base do corpo de prova, simultaneamente.

A saturação do corpo de prova por contrapressão é realizada em estágios de

incremento de pressão na água que preenche os vazios do solo, podendo cada estágio durar por horas. Antes de iniciar um estágio de contrapressão, deve ser aplicada uma variação na tensão total, de mesmo valor do incremento de poropressão, com as válvulas das linhas de drenagem do corpo de prova fechadas, de modo que, quando forem abertas, simultaneamente, para a aplicação da contrapressão, não haja variação de volume no corpo de prova devido à alteração da tensão efetiva. A aplicação da contrapressão na água que preenche os vazios do solo deve ser precedida por uma aplicação de tensão total de igual valor à contrapressão com as linhas de drenagem do corpo de prova fechadas, para que quando da aplicação da contrapressão pelas linhas de drenagem, a tensão efetiva no corpo de prova seja alterada e o mesmo não sofra variação de volume. Com o aumento da poropressão, as bolhas de ar presente nos poros do corpo de prova são dissolvidas na água que preenche os poros, ao longo do tempo. Tal procedimento será melhor detalhado na seção 3.8.2.

Lowe & Johnson (1960) recomendam um ábaco que possibilita estimar a contrapressão a ser aplicada em função do grau de saturação inicial do corpo de prova e do grau de saturação final desejado, apresentado na Figura 20.

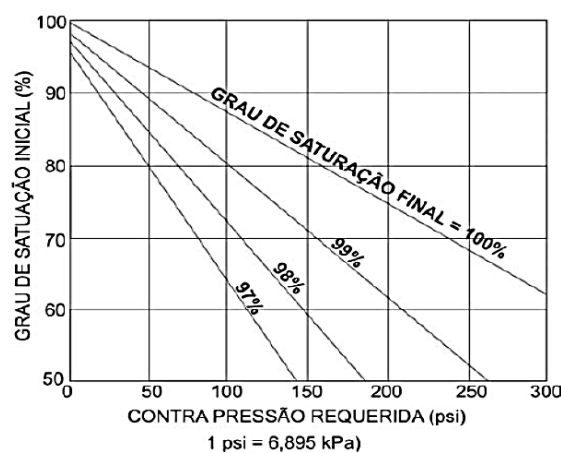


Figura 20 - Variação do valor de contrapressão a ser aplicada em função do grau de saturação inicial do corpo de prova e do grau de saturação final requerido (Sharma & Lewis, 1994 apud Costa, 2021).

Após a saturação do corpo de prova, pode se realizar, eventualmente, uma etapa de adensamento hidrostático no corpo de prova a fim de aplicar uma tensão efetiva hidrostática de interesse sob qual se queira estabelecer o fluxo pelo corpo de prova para a determinação da condutividade hidráulica. Para estabelecimento do

fluxo, entre a base e o topo do corpo de prova é aplicada uma diferença de carga hidráulica (Δh), que é determinada mediante os valores de poropressão na base (u_B) e no topo (u_T) do corpo de prova, registrados pelos transdutores de pressão. Sendo o gradiente hidráulico igual a razão entre a diferença de carga hidráulica (Δh) e a altura do corpo de prova (L), registrando-se o volume de água que percola o corpo de prova (ΔV) durante um intervalo de tempo (Δt) e conhecendo a área da seção transversal do corpo de prova (A), determina-se a condutividade hidráulica pela mesma expressão da equação 15. Tal procedimento será explicado em mais detalhes na seção 3.2.8.

Assim como para o permeâmetro de parede rígida, a seção 2.2.4.5 apresenta as vantagens e desvantagens do permeâmetro de parede flexível.

2.2.4.4

Vantagens e desvantagens do permeâmetro de parede rígida e do permeâmetro de parede flexível

A Tabela 5 é um resumo das vantagens e desvantagens do permeâmetro de parede rígida e do permeâmetro de parede flexível, apresentadas por Daniel (1994).

Tabela 5 – Vantagens e desvantagens dos permeâmetros de parede flexível e de parede rígida, apresentadas por Daniel (1994)

Permeâmetro	Vantagens	Desvantagens
Parede rígida	<ul style="list-style-type: none"> - Simplicidade de construção, operação e de baixo custo; - Podem ser construídos em grandes dimensões; - Uma ampla gama de materiais pode ser usada (incluindo materiais químicos); - Pode ser permitida a expansão vertical do corpo de prova, possibilitando avaliar...; - Pode ser considerada uma tensão vertical nula. 	<ul style="list-style-type: none"> - Pode ocorrer fluxo lateral, entre o solo e a parede do permeâmetro é possível; - Não há controle das tensões horizontais; - Não é possível confirmar a saturação do corpo de prova pelo parâmetro B, de Skempton (1954); - Há dificuldade para saturar o corpo de prova.;
Parede flexível	<ul style="list-style-type: none"> - Saturação do corpo de prova por contrapressão; - Verificação da saturação pela medição do parâmetro B; - Controle das tensões totais e efetivas que atuam no corpo de prova; - Menor possibilidade de ocorrência de fluxo lateral, entre o corpo de prova e a membrana de látex. 	<ul style="list-style-type: none"> - Maior custo do equipamento; - A operação do equipamento é mais complicada, isto é, a realização do ensaio é mais complicada;

3. Materiais e Métodos

3.1 Materiais amostrados

3.1.1 Areia da Praia de Ipanema

O procedimento de amostragem da areia da Praia de Ipanema foi realizado de modo análogo ao descrito por Simões (2015) e Costa (2020). A Figura 21 apresenta o local de coleta da amostra da areia da Praia de Ipanema, realizada no dia 21/10/2020. O ponto de amostragem está localizado a cerca de 50 metros de distância do calçadão, determinada com base no comprimento de passada, em frente ao edifício nº 272 da Avenida Vieira Souto.

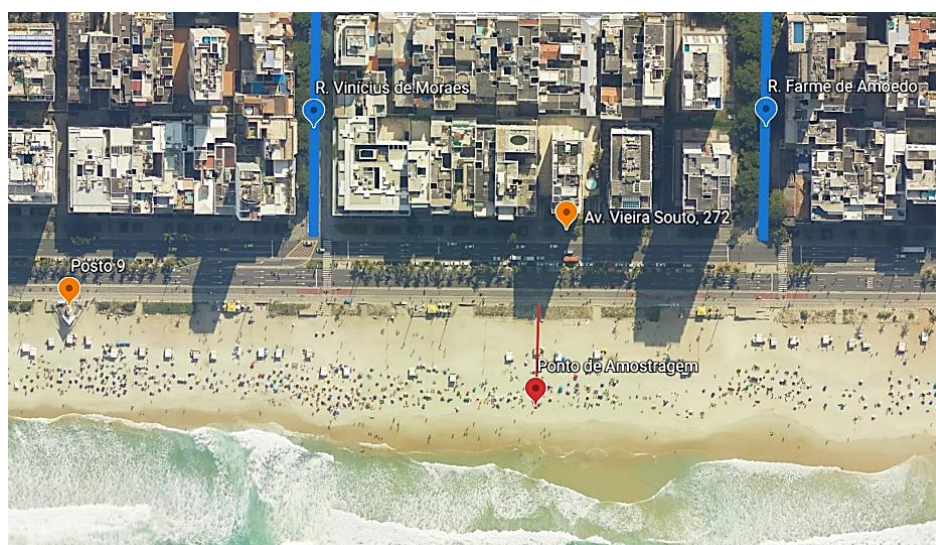


Figura 21 - Ponto de amostragem da areia da Praia de Ipanema.

Inicialmente, com intuito de evitar a coleta de uma amostra contaminada pelo deslocamento de veículos e por pedestres na orla, escavou-se uma camada de aproximadamente 20 cm de profundidade, com auxílio de baldes plásticos. Em seguida, a partir dos 20 cm escavados, coletou-se a amostra da areia da Praia de Ipanema utilizada nesta pesquisa.

Durante o transporte, do ponto de amostragem ao Laboratório de Geotecnia e Meio Ambiente (LGMA) da Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro (PUC-Rio), a amostra da areia da Praia de Ipanema foi armazenada em baldes plásticos envoltos por sacolas plásticas. No laboratório, a amostra foi depositada em dois recipientes plásticos transparentes, com tampa, devidamente identificados, com capacidade de 30 L cada. A amostra coletada não continha impurezas grosseiras (como pipetas de cigarro, objetos pequenos, folhas, gravetos, entre outros) e encontrava-se com uma umidade natural de 2,33%, determinada no laboratório, pelo método da estufa apresentado no Anexo A da norma NBR 6457 (ABNT, 2016).

Simões (2015) e Costa (2020) desenvolveram suas pesquisas utilizando a areia da Praia de Ipanema como amostra. A Tabela 6 apresenta os resultados dos ensaios de caracterização obtidos pelos referidos autores. Apesar de uma diferença de cinco anos entre as pesquisas, pode-se observar uma semelhança nos resultados obtidos.

Tabela 6 - Características da areia da Praia de Ipanema por Costa (2020) e Simões (2015).

Propriedade	Costa (2020)		Simões (2015)	
	Classificação/ Valor	Metodologia/ Norma	Classificação/ Valor	Metodologia/ Norma
Granulometria	Areia fina (60%) e média (40%), com: D ₁₀ = 0,27 mm D ₃₀ = 0,32 mm D ₅₀ = 0,38 mm D ₆₀ = 0,42 mm	ASTM (2017)	Areia média, com: D ₁₀ = 0,22 mm D ₃₀ = 0,30 mm D ₆₀ = 0,42 mm	ABNT (1988)
Coeficiente de não uniformidade (C _{nu})	1,56	Determinado pela razão D_{60}/D_{10}	1,90	Determinado pela razão D_{60}/D_{10}
	Mal graduada	ASTM (2017)	Mal graduada	Pinto (2006)
	Uniforme	ABNT (1995)	Uniforme	ABNT (1995)
Coeficiente de curvatura (C _c)	0,90	Determinado por: $D_{30}^2/(D_{10} \times D_{60})$	0,97	Determinado por: $D_{30}^2/(D_{10} \times D_{60})$
Formato dos grãos	Subangulares a arredondados, com esfericidade (S) = 0,7, e arredondamento (R) = 0,5	Krumbein & Slurry (1963), <i>apud</i> Cho <i>et al.</i> (2006)	Subangulares a arredondados	Pettijohn (1949), <i>apud</i> Lambe & Whitman (1969)
Densidade relativa dos grãos (G _s)	2,656	ABNT (1984)	2,659	ABNT (1984)
Índice de vazios mínimo	0,435	Método de pluviação sobre peneiras (Miura & Toki, 1982)	0,461	Método de pluviação sobre peneiras (Miura & Toki, 1982)
Índice de vazios máximo	0,760	Método B da norma ASTM (2016)	0,732	Método do funil, Kolbuszewski (1948)

3.1.2 Microesferas de vidro

As microesferas de vidro foram utilizadas nesta pesquisa para simular uma areia constituída por grãos perfeitamente esféricos, possuindo a mesma distribuição granulométrica da areia da Praia de Ipanema. Assim, com base no diâmetro equivalente D₅₀ da areia da Praia de Ipanema determinado por Costa (2020), foram utilizadas microesferas de vidro do tipo Drop-On II A, fornecidas pela empresa Sferolux, como um solo sintético.

As microesferas de vidro utilizadas são comercializadas, principalmente, para emprego nas sinalizações horizontais viárias, sendo regulamentas pela ABNT (2021), que determina tanto as especificações quanto a metodologia de

caracterização desse material. Segundo relatórios técnicos disponibilizados no *site* da empresa Sferolux, as microesferas de vidro do tipo Drop-On II A apresentam uma granulometria na faixa de 0,18 a 0,85 mm e peso específico de 2,40 gf/cm³.

As microesferas de vidro foram entregues no LGMA em dois sacos de 25 kg, cada, sendo, em seguida, armazenada em recipientes plásticos transparentes, com tampa, devidamente identificados, com capacidade de 30 L cada, conforme apresentado na Figura 22.

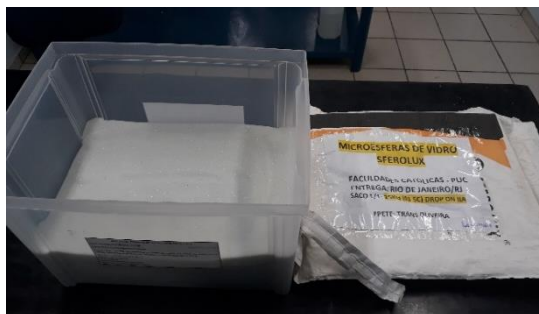


Figura 22 - Armazenamento das microesferas de vidro no laboratório.

3.2

Preparação das amostras

3.2.1

Limpeza da amostra da areia da Praia de Ipanema

Após a coleta e transporte ao laboratório, a amostra da areia da Praia de Ipanema foi lavada para retirada de eventuais pequenas impurezas e do sal. Entretanto, antes de serem realizados os procedimentos de lavagem, foi averiguada a presença de grãos com diâmetros equivalentes inferiores à abertura da peneira de nº 200, igual a 0,075 mm. Tal averiguação foi feita peneirando uma parte da amostra, previamente seca em estufa à 100 °C, no agitador de peneiras sobre a peneira nº 200 e fundo de peneiras. Desse modo, constatou-se que na amostra da areia da Praia de Ipanema não haviam grãos com diâmetros inferiores a 0,075 mm, conforme também observado por Simões (2015) e Costa (2020). Essa constatação possibilitou a lavagem da areia da Praia de Ipanema sobre a peneira de nº 200 sem alteração de sua granulometria.

O procedimento inicial de lavagem da amostra da areia da Praia de Ipanema deu-se da seguinte forma: (a) em cada recipiente plástico no qual a amostra encontrava-se armazenada, foi adicionado um volume de água da torneira tal que

esse cobrisse todo o material (Figura 23a); (b) a amostra foi revolvida com a mão para desagregar as eventuais pequenas impurezas (Figura 23b), sendo observada a formação de uma camada de espuma; (c) os recipientes foram então tampados e a mistura deixada em descanso por um período de 12 horas (Figura 23c); e (d) após um período de descanso, o líquido com as impurezas da amostra (soro) foi retirado do recipiente plástico e descartado (Figura 23d).

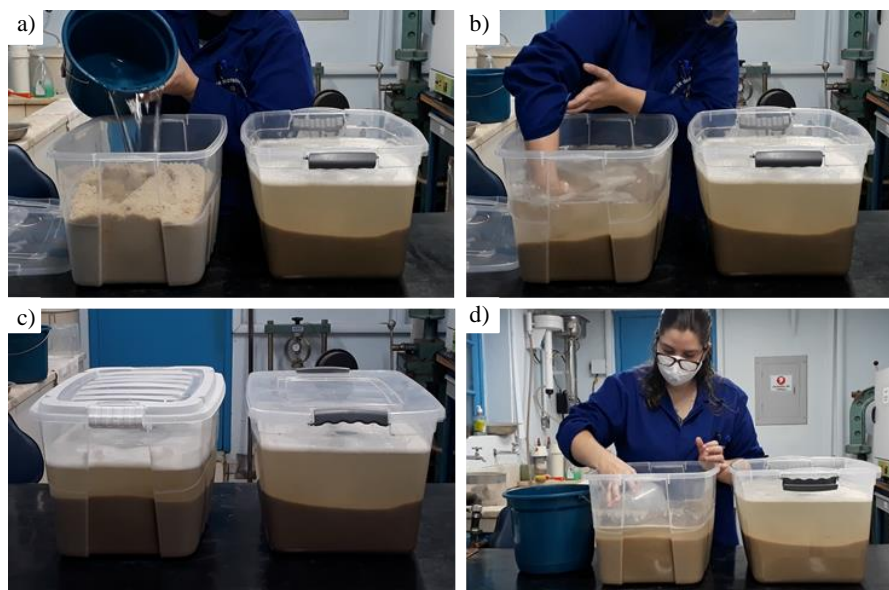


Figura 23 - Ciclo de lavagem da amostra da areia da Praia de Ipanema, sendo em: a) adição de água da torneira à amostra, b) revolvimento da amostra, c) descanso da amostra e d) retirada do líquido com as impurezas da amostra.

Após o primeiro ciclo de lavagem, apresentado na Figura 23, foram realizadas trocas de água, repetindo todo o procedimento acima descrito, até ser observado que o “soro” estava límpido; o que resultou em seis trocas de água, ou seja, um total de sete ciclos de lavagem. Cada ciclo contou com um intervalo de descanso em torno de 1 hora, à exceção do primeiro e do último, nos quais manteve-se um período de descanso de 12 horas. Esse intervalo de descanso, mesmo que curto, foi importante para a deposição dos grãos da areia da Praia de Ipanema no fundo do recipiente. Ao fim dos sete ciclos, a amostra foi lavada em peneiras de nº 200, sendo, posteriormente, novamente armazenada nos recipientes plásticos.

A determinação da salinidade na amostra da areia da Praia de Ipanema lavada (pós os sete ciclos de lavagem e lavagem em peneira de nº 200) foi realizada com um condutivímetro (Figura 24). O condutivímetro é um aparelho que mede a condutividade elétrica (CE) de uma solução por meio da imersão de um eletrodo de

oxigênio dissolvido (sensor) na solução. A partir do valor da condutividade elétrica (CE) medida pelo condutivímetro, em milisiemens por centímetro (mS/cm), pode-se calcular a salinidade, em gramas por litro (g/L), através da expressão:

$$\text{Salinidade (g/L)} = 0,4665 \cdot \text{CE}^{1,0878} \quad (17)$$

A Figura 24 apresenta o condutivímetro utilizado nessa pesquisa, sendo esse o modelo pH/Cond 340i, da marca WTW.



Figura 24 - Condutivímetro.

Foram determinadas as condutividades elétricas de três amostras, a saber: a areia da Praia de Ipanema ensaiada por Costa (2020), a areia da Praia de Ipanema natural (sem lavagem) e a areia da Praia de Ipanema pós-lavagem. Em cada uma das amostras, foi realizado o seguinte procedimento: (a) em uma balança digital com capacidade de 4.100 gf e resolução de 0,01 gf, tarou-se o frasco de vidro no qual seria inserido o material; (b) pesou-se cerca de 120 gf do material, inserido diretamente no frasco de vidro (Figura 25a); (c) adicionou-se cerca de 350 mL de água destilada ao frasco, de modo que, a altura da lâmina d'água permitisse a entrada da sonda do condutivímetro no frasco sem encostar no material; (d) a mistura de material mais água destilada foi revolvida com auxílio de um bastão de vidro; e (e) após a deposição do material no fundo do frasco de vidro, realizou-se a medição da condutividade elétrica (CE), em microsiemens por centímetro ($\mu\text{S/cm}$), e da temperatura (T), em graus Celsius ($^{\circ}\text{C}$) (Figura 25b).

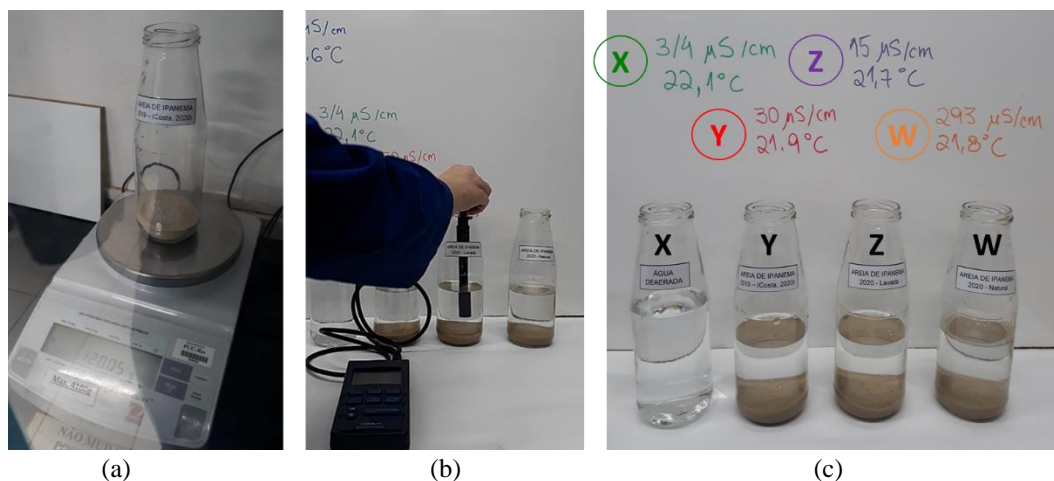


Figura 25 - Medição da condutividade elétrica com o condutivímetro.

Na imagem da Figura 25c, tem-se no recipiente: “X”, água destilada; “Y”, areia da Praia de Ipanema de Costa (2020); “Z”, areia da Praia de Ipanema pós-lavagem; e “W”, areia da Praia de Ipanema natural (sem lavagem).

Após as medições das condutividades elétricas, toda a amostra da areia da Praia de Ipanema lavada foi depositada em bandejas metálicas revestidas com papel *craft*, e colocada para secar em estufa à $60^{\circ}C$, por um período de 48 horas. Após secagem, a amostra foi recolocada nos recipientes plásticos limpos, secos e identificados, que foram tampados para evitar que a contaminação da amostra; sendo essa a utilizada para os demais ensaios dessa pesquisa.

3.2.2

Tratamento das microesferas de vidro

As microesferas de vidro utilizadas nesta pesquisa são produzidas a partir da reciclagem do vidro *float*, que são os vidros planos comuns. Os vidros *float* são do tipo soda-cal ($SiO_2 - Na_2CO_3 - CaO$), formados por uma mistura de: areia, composta por sílica (SiO_2); barrilha, nome comercial para o carbonato de sódio (Na_2CO_3); e cal, o óxido de cálcio (CaO). Quando em contato com a sílica, o carbonato de sódio diminui sua viscosidade e seu ponto de fusão, contudo, aumenta sua solubilidade. Por essa razão, introduz-se o óxido de cálcio, que diminui a solubilidade da sílica (Akerman, 2000). De acordo com a norma ABNT (2021), as microesferas de vidro do tipo II-A devem possuir um teor de sílica mínimo de 65 % e devem ser tratadas para aumento da sua fluidez e aderência às resinas.

A Figura 26 mostra a reação das microesferas de vidro quando em contato com a água, formando “grumos”. Tal comportamento é justificável, visto que o vidro é um material de elevada estabilidade química e praticamente inerte, ou seja, quando em contato com água, não sofre transformações químicas.

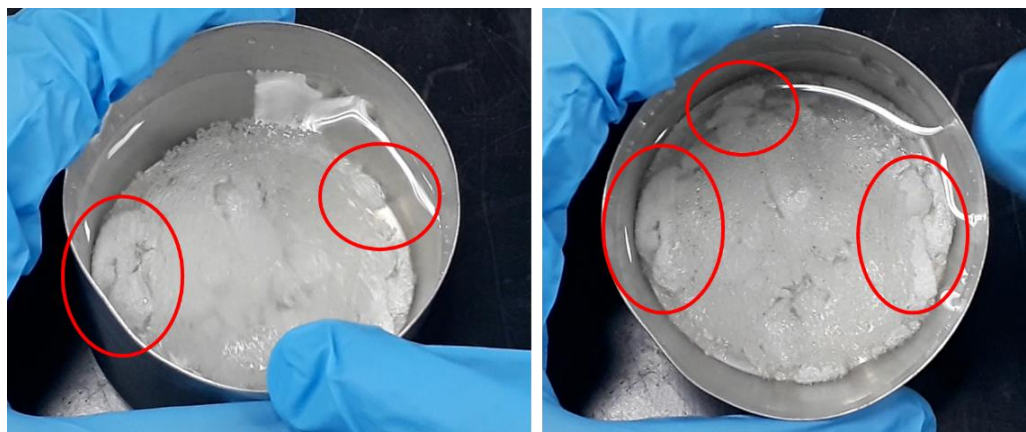


Figura 26 - Grumos formados pelo contato das microesferas de vidro com água.

Contudo, o vidro está sujeito à corrosão quando em soluções básicas ($\text{pH} > 7$), especialmente àquelas com $\text{pH} > 9$ (Akerman, 2000; Perkoff, 2001). Quanto mais óxidos alcalinos (sódio) tiver o vidro, mais hidrofílico este será, ou seja, mais solúvel em água. A solução defloculante para ensaios de granulometria por sedimentação utilizada em laboratório é uma mistura de água destilada, hexametáfosfato de sódio ($\text{Na}_6\text{P}_6\text{O}_{40}$) e carbonato de sódio (Na_2CO_3), com $8 < \text{pH} < 9$. Com base nessas informações, foram testadas três proporções entre o peso da amostra de microesfera de vidro e o volume de solução defloculante, visando obter uma relação que diminuísse a formação dos “grumos”. Para isso, foram separados quatro béqueres, conforme ilustrado na Figura 27, nos quais: em “B1”, havia apenas a solução defloculante; em “B2”, 100 gf de amostra para 250 mL de solução defloculante (1,00 gf : 2,50 mL); em “B3”, 100 gf de amostra para 375 mL de solução defloculante (1,00 gf : 3,75 mL); e em “B4”, 100 gf de amostra para 500 mL de solução defloculante (1,00 gf : 5,00 mL).

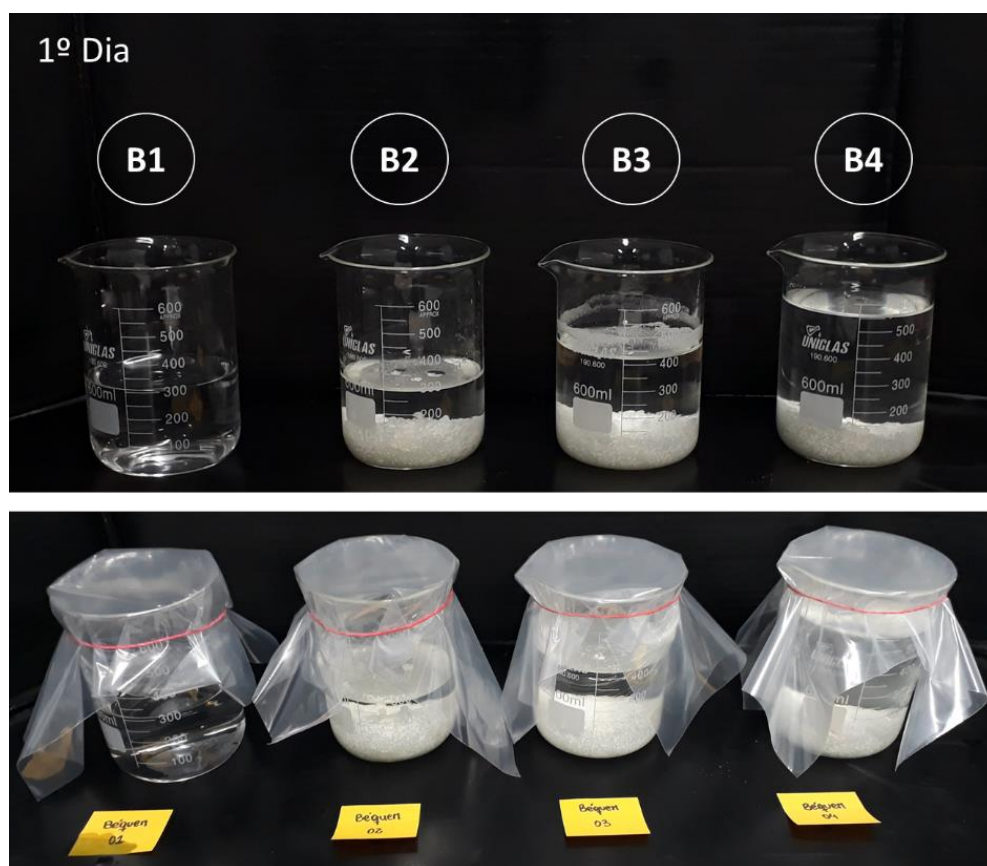


Figura 27 - Primeiro dia do teste de proporção entre as microesferas de vidro e a solução defloculante.

As microesferas de vidro permaneceram em solução por três dias, com os béqueres vedados com papel filme e sacos plásticos presos com elástico, com intuito de evitar uma possível reação química entre o ambiente e a solução, assim como, uma contaminação. Em cada dia, a amostra era revolvida com um bastão de vidro e leituras da condutividade elétrica, do pH e da temperatura eram efetuadas. Ao final dos três dias, as microesferas de vidro de cada béquer foram transferidas para funis revestidos com papel filtro, deixando-se passar 2 L (litros) de água destilada para retirada da solução (Figura 28). Durante esse processo, observou-se que a água fluía de forma mais rápida nos funis correspondentes aos béqueres “B4” e “B3”, em relação ao béquer “B2”.



Figura 28 - Retirada da solução defloculante das amostras de microesferas de vidro.

Após a retirada da solução defloculante, os funis com as amostras foram transferidos para béqueres limpos, deixando-se passar mais 300 mL de água destilada, na qual foi realizada uma última leitura da condutividade elétrica, do pH e da temperatura (Figura 29a). Em seguida, os papéis filtro com as amostras foram transferidos para pratos metálicos e colocados para secagem em estufa a 100 °C por 24 horas (Figura 29b).



Figura 29 – Finalização do teste, sendo em (a) a última passagem de água destilada para retirada da solução defloculante e em (b) os papéis filtro com a amostra pós secagem em estufa.

As amostras secas em estufa foram colocadas novamente em béqueres limpos e mais 300 mL de água destilada foram adicionadas (Figura 30a). Em um béquer “B5”, adicionou-se 100 gf da amostra de microesferas de vidro sem tratamento e

300 mL de água destilada, de modo que foi possível comparar o efeito da solução na formação dos “grumos”. Como pode ser observado na Figura 30b, a proporção de 1,00 gf de peso da amostra para 5,00 mL de volume da solução defloculante (Béquer B4) apresentou uma melhor estabilização das microesferas de vidro em meio à água destilada, com menor formação de “grumos”.

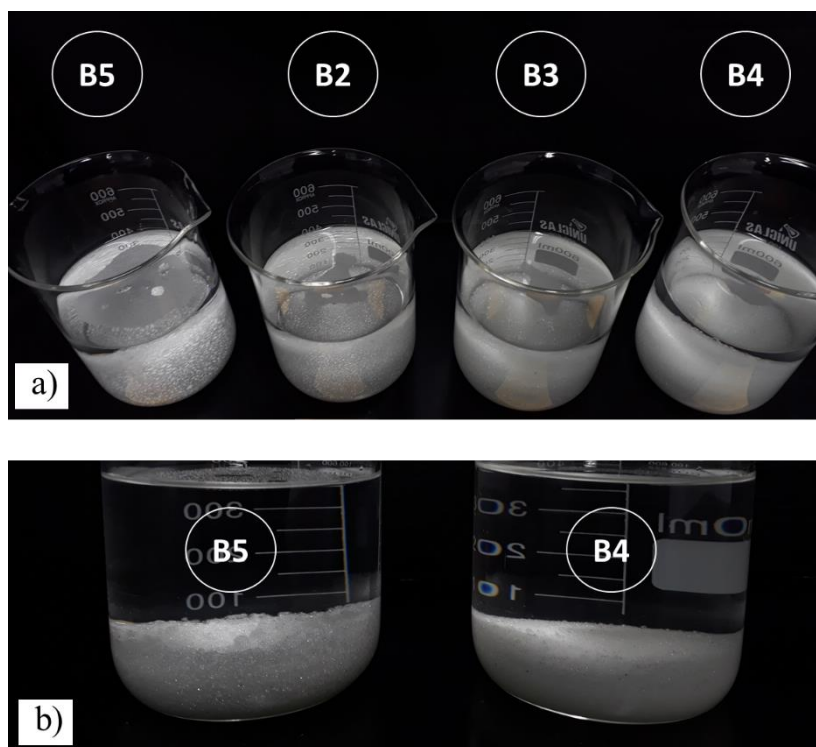


Figura 30 - Comparação da formação de grumos pós-tratamento.

Diante desta constatação, foi utilizada a proporção 1,00 gf de amostra para 5,00 mL de solução defloculante para tratamento de toda a amostra de microesferas de vidro. Para otimizar o processo, o tratamento foi realizado em porções de 800 gf da amostra de microesferas de vidro para 4 L de solução defloculante, armazenadas em baldes plásticos com torneiras, vedados com touca plástica e elástico, por três dias (Figura 31a). Após os três dias, realizava-se o seguinte procedimento: (a) posicionamento de um balde limpo e uma peneira de nº 200 sob a torneira do balde com as microesferas de vidro em solução defloculante (Figura 31b); (b) abertura da torneira para retirada da amostra (Figura 31c); (c) limpeza do balde com pisseta com água destilada (Figura 31d); (d) lavagem da amostra sobre a peneira com água destilada (Figura 31e); (e) transferência da amostra para um prato metálico para secagem em estufa (Figura 31f); (f) retorno da solução defloculante para o balde

com torneira e acréscimo de nova porção de 800 gf da amostra de microesferas de vidro para estabilização.

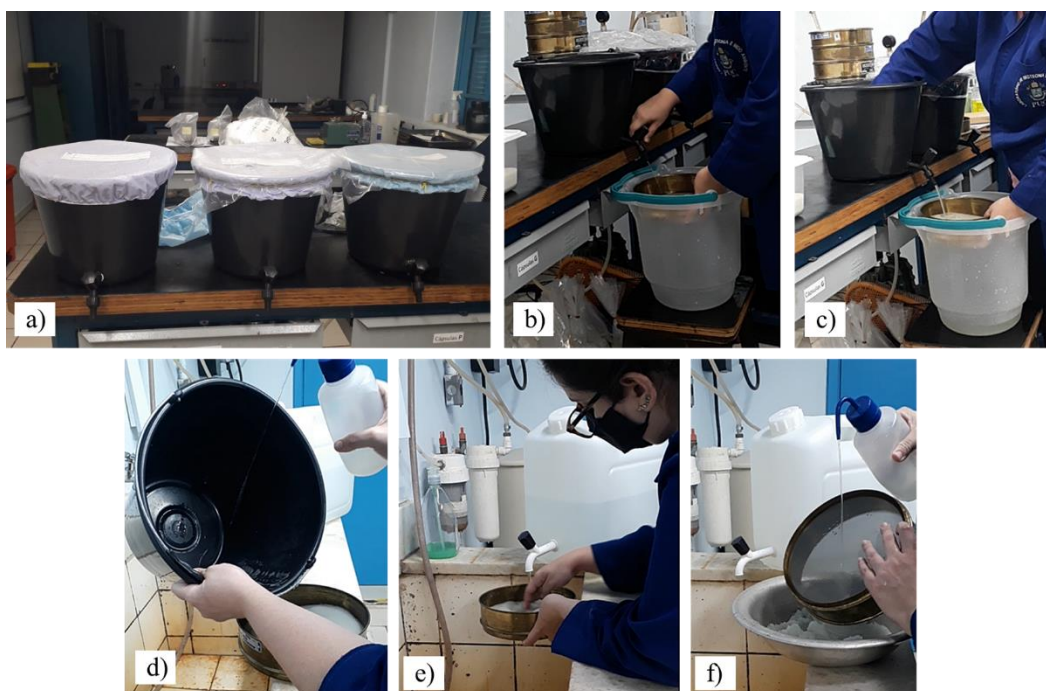


Figura 31 - Etapas do tratamento das microesferas de vidro.

As amostras de microesferas de vidro tratadas e secas eram armazenadas em um recipiente de acrílico, vedado com touca plástica e elástico, até o início dos procedimentos de separação de seus grãos por faixa de diâmetro, apresentados na seção 3.5, adiante.

3.3 Análises Microscópicas

As análises microscópicas foram realizadas em dois equipamentos, a saber: microscópio “M1”, de modelo SMZ800N da marca Nikon, instalado no Laboratório de Estruturas e Materiais (LEM) da PUC-Rio; e microscópio “M2”, de modelo SC30 da marca Olympus, instalado no LGMA da PUC-Rio.

No microscópio “M1”, foram analisadas duas amostras: a areia da Praia de Ipanema pós-lavagem e as microesferas de vidro sem tratamento, chamada aqui de “naturais”. Cada cápsula metálica identificada na Figura 32a continha o equivalente a 2 gf de amostra, sendo que para a amostra da areia da Praia de Ipanema avaliou-se uma única cápsula, enquanto que para a amostra de microesferas de vidro foram

avaliadas quatro cápsulas. Essa diferença de quantidade de cápsulas avaliadas deu-se devido à investigação da presença de “pontos pretos” na amostra recebida de microesferas de vidro, cuja origem era desconhecida. Embora a quantidade analisada não fosse representativa de toda a amostra de material, foi necessário utilizar pequenas porções para melhores resultados na lente do microscópio. Na Figura 32b, pode ser observado um dos dois recipientes retangulares, de fundo preto e com escala milimétrica, elaborados para servir como apoio da amostra para a visualização de seus grãos via microscópio. Os recipientes também realçavam os grãos na captura de imagem das visualizações.

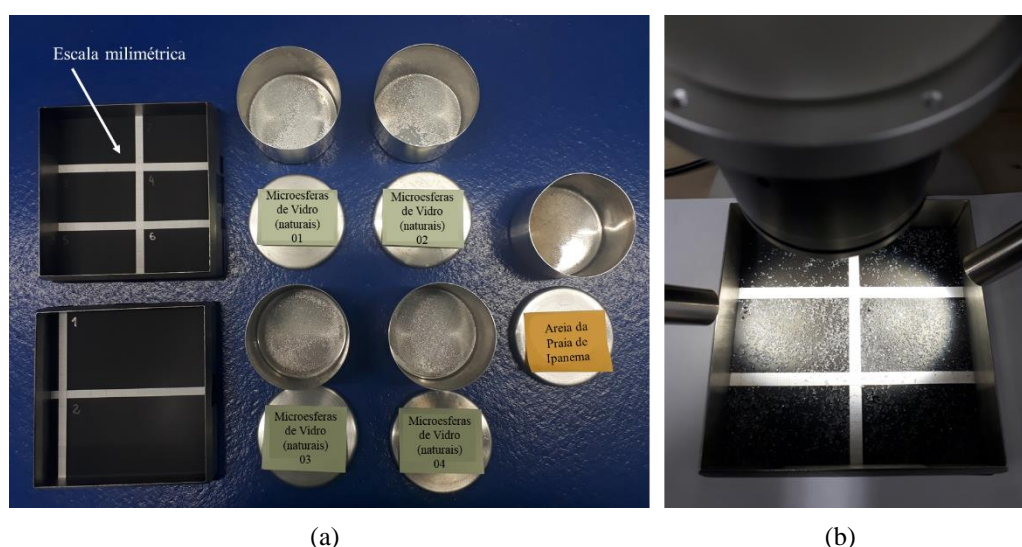


Figura 32 - Utensílios e amostras utilizadas no microscópio M1.

Na Figura 33, apresenta-se uma das imagens microscópicas obtidas para a amostra da areia da Praia de Ipanema, na qual se observa a forte presença de grãos quartzo, comparado aos demais minerais, com ampla variedade de formas de grãos.

Na Figura 34, são observadas imagens microscópicas da amostra de microesferas de vidro, as quais revelam a presença de alguns grãos não esféricos, com a forma ovoide, às vezes geminados. Ainda nesta figura, podem ser observadas a presença de grãos angulares, sendo esses os “pontos pretos” vistos à olho nu, os quais consistem em partículas de vidro não fundidas no processo de fabricação das microesferas. Segundo a norma ABNT (2021), no máximo 3 % do volume de microesferas de vidro fornecidas podem ser de partículas de vidro quebradas ou não fundidas e elementos estranhos; para os grãos ovóides e geminados, o limite é de 20 %. Com isso, a autora desconsidera os defeitos (angulares) no formato de grãos

na avaliação dos aspectos de forma dos grãos da amostra de microesferas de vidro, visto que há uma predominância de grãos esféricos.

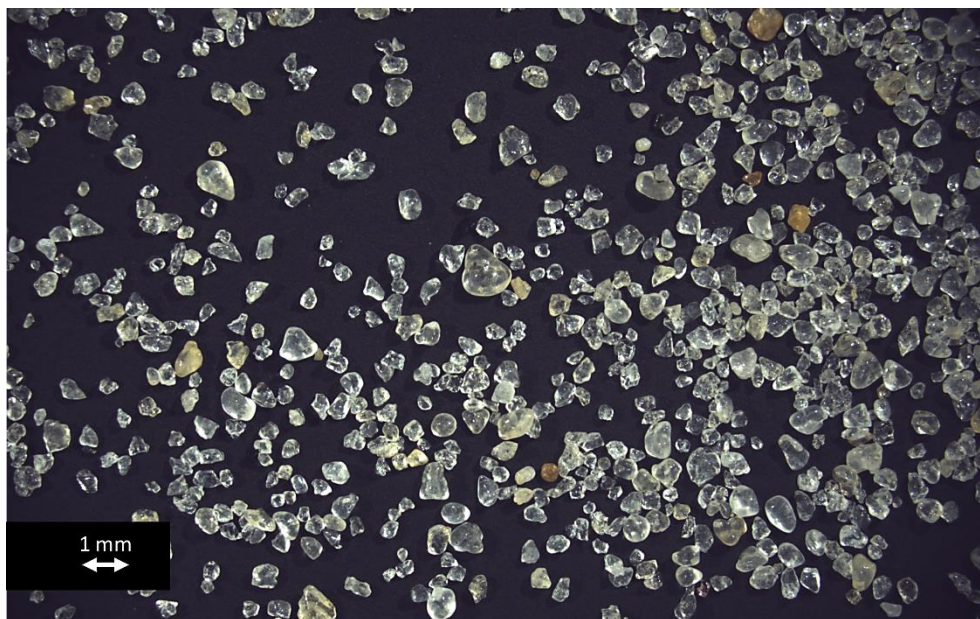


Figura 33 - Microscopia da areia da Praia de Ipanema.

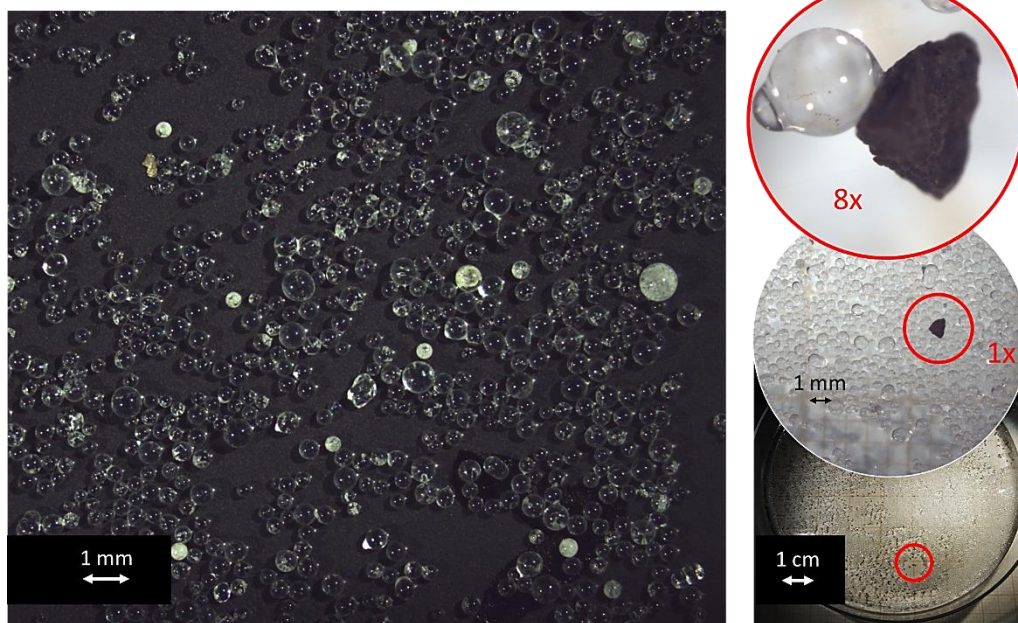


Figura 34 – Microscopia da amostra de microesferas de vidro.

Com intuito de obter os aspectos relacionados à forma dos grãos, duas imagens obtidas pelo microscópio “M1” foram analisadas em um *software* de domínio público, sendo: uma da amostra da areia da Praia de Ipanema e uma da amostra de microesferas de vidro. O ImageJ é um *software* de processamento de

imagens científicas, incluído no pacote Fiji, por meio do qual pode-se determinou-se as seguintes características relacionados à forma dos grãos: “circularity”, cuja definição é semelhante ao arredondamento (R), apresentado na seção 2.1.2; e “roundness”, cuja definição é semelhante à esfericidade (S) (Rodriguez, 2013; Ferreira & Rasband, 2012). Os resultados dessa análise são apresentados na seção 4.1.2.

Com intuito de verificar eventuais corrosões nas superfícies das microesferas de vidro devidas ao tratamento em solução defloculante, no microscópio “M2” foram feitas comparações entre as microesferas de vidro sem tratamento e pós-tratamento. Conforme apresentado na Figura 35, os defeitos encontrados nas superfícies das microesferas de vidro pós-tratamento foram similares aos verificados nas superfícies das microesferas sem tratamento, não tendo sido constatada, portanto, nenhuma corrosão significativa das superfícies das mesmas devida ao tratamento.

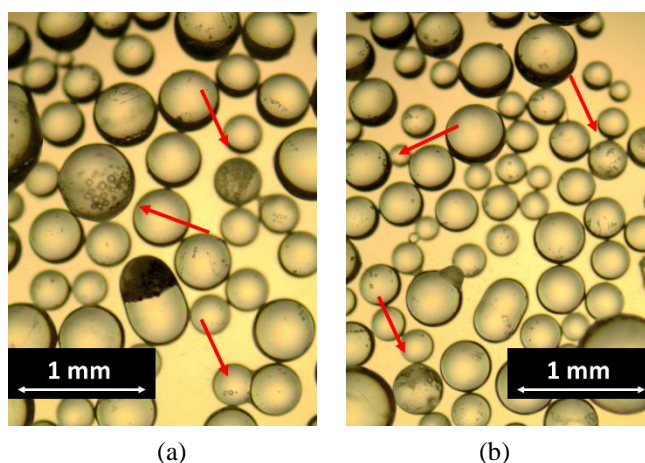


Figura 35 - Avaliação das superfícies das microesferas de vidro, sendo em (a) sem tratamento e em (b) pós-tratamento.

3.4 Granulometria

Os ensaios de granulometria foram realizados com base nas diretrizes da ABNT (2018), tendo sido utilizado apenas o método por peneiramento, pois, conforme mencionado na seção 3.2.1, a amostra da areia da Praia de Ipanema não continha grãos com diâmetros equivalentes menores de 0,075 mm.

Cada amostra ensaiada, sendo essas a areia da Praia de Ipanema lavada e as microesferas de vidro sem tratamento, foi previamente quarteada (Figura 36), do

seguinte modo: (a) pesava-se 2 kgf da amostra e com esta formava-se uma pirâmide; (b) a pirâmide era então dividida em quadrantes praticamente iguais, logo, com aproximadamente 500 gf cada; e (c) dois quadrantes diametralmente opostos eram “descartados”, enquanto que os outros dois quadrantes eram juntados, formando-se uma nova pirâmide. Essa sequência era repetida até obter um quadrante com aproximadamente 125 gf. De cada quadrante final obtido, pesou-se cerca de 120 gf para determinação da curva granulométrica; do material “descartado”, determinou-se o teor de umidade higroscópica.

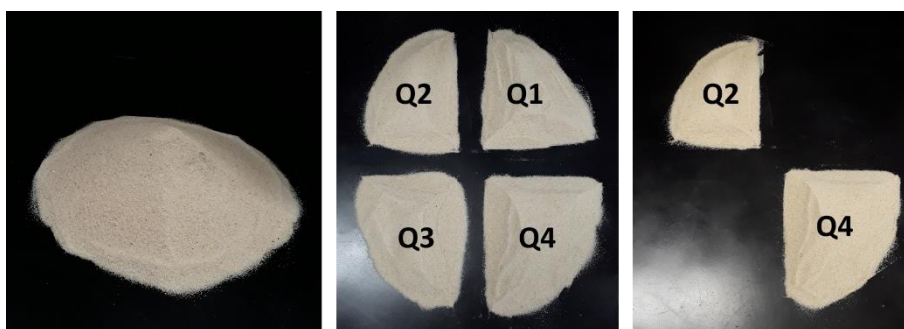


Figura 36 – Quarteamento das amostras, sendo em (a) pirâmide formada com a amostra; (b) quadrantes nas quais a amostra era dividida; e (c) quadrantes diametralmente opostos para a formação de uma nova pirâmide.

A série de peneiras utilizadas, em ordem decrescente, foi a seguinte: nº 16 (1,200 mm); nº 20 (0,840 mm); nº 30 (0,600 mm); nº 40 (0,420 mm); nº 50 (0,300 mm); nº 60 (0,250 mm); nº 70 (0,210 mm); nº 100 (0,149 mm) e nº 200 (0,075 mm); por fim, o fundo de peneira. Destas, as peneiras de nº 20, nº 50 e nº 70 são intermediárias. Antes de inserir os 120 gf de amostra no conjunto de peneiras, o peso de cada peneira era registrado em uma balança digital (Figura 37). Todos os peneiramentos foram realizados com o uso de um agitador de peneiras eletromecânico, com controlador eletrônico de tempo e frequência de vibração, da marca Solotest. Cada peneiramento durava 20 minutos, sob uma frequência de 4 Hz.

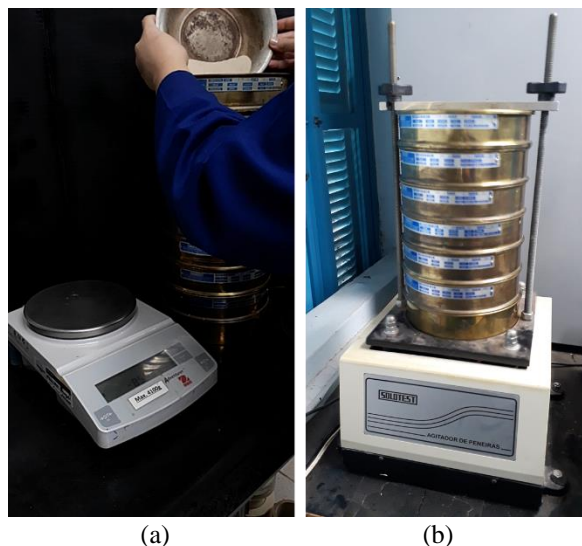


Figura 37 - Peneiramento das amostras, sendo em (a) a amostra sendo colocada nas peneiras e (b) peneiramento no agitador eletromecânico.

Ao fim do peneiramento, cada peneira era novamente pesada na mesma balança digital, de modo que pela diferença de peso no início e no final do ensaio, obtinha-se o peso de amostra retida em cada peneira. Assim, com base no peso da amostra que passava em cada peneira, expressa em porcentagem em relação ao peso total da amostra, foi determinada a distribuição em peso do tamanho das partículas presentes nas amostras, obtendo-se as curvas de distribuição granulométrica, apresentadas no capítulo de resultados obtidos, seção 4.1.4.

3.5

Reconstituição granulométrica da amostra de microesferas de vidro

Além do fato das amostras utilizadas possuírem grãos de formato diferentes, a investigação da influência da forma dos grãos nos índices de vazios mínimo e máximo e na condutividade hidráulica dos solos de granulometria grossa requer que as amostras tenham a mesma distribuição granulométrica. Ademais, é importante que as amostras tenham granulometria uniforme. Conforme ressaltado na seção 2.1.3, solos de granulometria uniforme não possuem vazios entre grãos de maiores diâmetros equivalentes preenchidos por grãos de menores diâmetros. Assim, a premissa de que grãos mais angulares tendem a formar arranjos com menor compacidade (maior índice de vazios) pode ser melhor investigada. Mais importante ainda, possuindo as amostras a mesma granulometria, pode-se relacionar as diferenças entre os resultados de ensaios obtidos de tais amostras,

realizados sob as mesmas condições de contorno e de operação, exclusivamente à diferença entre as formas dos grãos das amostras.

Tendo tais objetivos em vista, a curva granulométrica da amostra de microesferas de vidro foi reconstituída com base nos valores de D_{10} , D_{30} , D_{50} e D_{60} – logo, mesmo C_{NU} e C_C — apresentados pela curva granulométrica da areia da Praia de Ipanema.

Da curva granulométrica tem-se as porcentagens de um peso total que passa por cada peneira de um determinado conjunto de peneiras; com isso, tem-se também a porcentagem retida em cada peneira. Conhecido o valor do peso total e da porcentagem retida em cada peneira, sabe-se o peso retido em cada peneira. Com base nisso, para produção de 1 kgf de uma amostra de microesferas de vidro com a mesma granulometria da areia da Praia de Ipanema, o primeiro passo foi determinar os pesos que deveriam ficar retidos em cada peneira do conjunto utilizado, sendo essas: n° 20 (0,840 mm), n° 30 (0,600 mm); n° 40 (0,420 mm), n° 50 (0,300 mm); n° 60 (0,250 mm), n° 70 (0,210 mm), n° 100 (0,149 mm) e n° 200 (0,075 mm); de forma que:

$$\begin{array}{lcl} \text{Peso da amostra de} & & \% \text{ Retida na peneira n° "Y" na} \\ \text{microesferas de vidro a ser} & = 1.000 \text{ gf} \times & \text{curva granulométrica da areia} \\ \text{retido na peneira n° "Y"} & & \text{da Praia de Ipanema} \end{array} \quad (18)$$

Em um segundo passo, de posse dos pesos a serem retidos em cada peneira, separou-se todos os grãos da amostra nas faixas de diâmetro correspondente às peneiras utilizadas, de modo que, por fim, como uma “receita”, de cada faixa de diâmetro seria tirada uma porção de peso igual ao ser retido por determinada peneira.

Para tanto, ao final do procedimento de tratamento das microesferas de vidro, apresentado na seção 3.2.2, a amostra seca armazenada no recipiente acrílico era peneirada, no conjunto de peneiras estabelecido, de 150 em 150 gf, por 15 min e em uma frequência de 4 Hz. Após o peneiramento, as porções retidas nas peneiras eram transferidas para seus respectivos recipientes plásticos (potes), identificados, conforme mostra a Figura 38a.



(a) (b)
 Figura 38 - Processos da reconstituição granulométrica da amostra de microesferas de vidro, sendo em (a) o armazenamento da amostra por n° de peneira e em (b) as porções pesadas para homogeneização.

Ao passo que se tinha nos potes os pesos necessários para a produção de 1 kgf da amostra, os pesos das porções eram separados e, em seguida, depositados em um prato metálico para homogeneização de toda a amostra produzida, de 1 kgf (Figura 38b). Para certificar que a amostra homogeneizada estava com a curva granulométrica desejada, ao fim da homogeneização, coletava-se cerca de 120 gf do material para realização de um ensaio por peneiramento.

Para toda a pesquisa, foram produzidos 17 kgf de amostra de microesferas de vidro reconstituída com a granulometria igual à da areia da Praia de Ipanema, cujas curvas granulométricas de certificação são apresentadas na seção 4.1.4. Nos demais ensaios a serem apresentados, a saber: densidade relativa dos grãos, índice de vazios mínimo e intermediários, índice de vazios máximo e permeabilidade; a amostra de microesferas de vidro utilizada foi a obtida desse procedimento, ou seja, as microesferas de vidro tratadas e com granulometria reconstituída igual à da areia da Praia de Ipanema.

3.6

Densidade relativa dos grãos (G_s)

Os ensaios para determinação da densidade relativa dos grãos (G_s) foram realizados apenas na amostra de microesferas de vidro tratadas e com granulometria reconstituída, visto que os valores de densidade relativa dos grãos (G_s) da amostra da areia da Praia de Ipanema obtidos por Simões (2015) e, mais recentemente, por Costa (2020) — cujo desenvolvimento da pesquisa foi acompanhado pela autora — foram muito semelhantes. Para a areia da Praia de Ipanema, o valor de G_s determinado por Costa (2020), igual a 2,656, é plausível, visto que essa areia é formada majoritariamente por grãos de quartzo, cujo peso específico (γ) é 2,65 gf/cm³, conforme apresentado na seção 2.1.2.

A densidade relativa das microesferas de vidro foi determinada por duas metodologias, sendo essas: (a) o método da proveta, cujas diretrizes são apresentadas pela norma ABNT (2021); e (b) o método do picnômetro, preconizado pela norma ABNT (1984).

Para o método da proveta, com base nas diretrizes da norma ABNT (2021), uma porção de 300 gf da amostra de microesferas de vidro tratadas e com granulometria reconstituída foi previamente seca em estufa a 110 °C, durante 2 horas, sendo, posteriormente, resfriada em dessecador por mais 2 horas (Figura 39a). Para cada proveta de 100 ml, colocou-se 50 ml de álcool isopropílico; e, logo em seguida, inseriu-se 60 gf de microesferas de vidro resfriadas (P_{ME}), pesadas previamente em cápsulas metálicas. As provetas foram, então, cuidadosamente agitadas para eliminar o ar preso entre as microesferas de vidro.

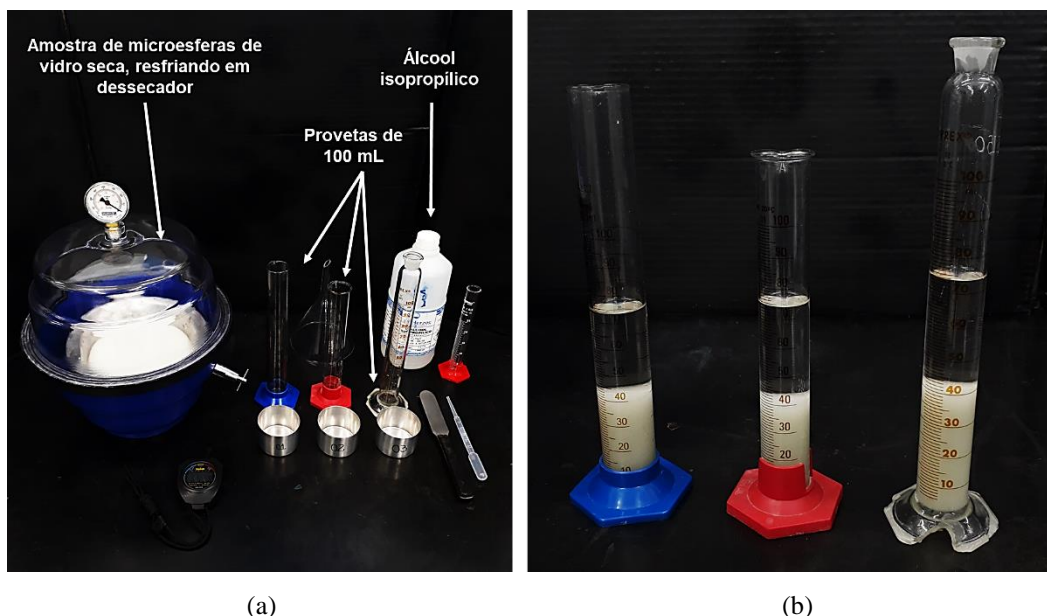


Figura 39 - Determinação do peso específico das microesferas de vidro pelo método da proveta, sendo em (a) os materiais utilizados no ensaio e em (b) a amostra em álcool isopropílico.

O volume total lido na proveta ao final dos procedimentos (Figura 39b) menos o volume lido quando a proveta continha somente álcool isopropílico representava o volume das microesferas (V_{ME}), de modo que, o peso específico (γ_{ME}) das microesferas de vidro era:

$$\gamma_{ME} = \frac{P_{ME}}{V_{ME}} \quad (19)$$

onde, γ_{ME} = peso específico das microesferas de vidro;

P_{ME} = peso das microesferas inseridas na proveta;

V_{ME} = volume das microesferas.

Calculou-se, então, a densidade relativa das microesferas de vidro como:

$$G_s = \frac{\gamma_{ME}}{\gamma_{w4^\circ C}} \quad (20)$$

onde, $\gamma_{w4^\circ C}$ = peso específico da água na temperatura de 4 °C, equivalente a 1,000 gf/cm³;

Antes de realizar o ensaio pelo método do picnômetro de acordo com as diretrizes da norma ABNT (1984), os cinco picnômetros utilizados, de 500 cm³ cada, foram calibrados. O procedimento de calibração consistiu em determinar o peso do picnômetro cheio de água destilada (picnômetro + água destilada) em

função da temperatura. A calibração dos picnômetros foi realizada para uma faixa de temperatura de 20 °C a 30 °C, utilizando um banho termorregulador (banho maria).

Para cada temperatura de leitura regulada no banho maria, o ar condicionado da sala era regulado para a mesma temperatura. As medições das temperaturas da água destilada no banho maria foram realizadas não apenas por meio do painel digital do mesmo, mas também por meio de dois termômetros, sendo um digital e um de mercúrio, que ficavam em contato com a água do banho maria durante todo o ensaio. Quando a temperatura desejada atingia um valor constante, esta era registrada e determinavam-se os pesos dos picnômetros com água destilada para aquela temperatura. Os pesos dos picnômetros foram determinados para cada acréscimo de 1 °C na temperatura.

Para a calibração, cada picnômetro foi preparado seguindo o seguinte procedimento: (a) preenchimento do picnômetro com um volume de água destilada correspondente a cerca da metade do volume do picnômetro; (b) aplicação de vácuo de, no mínimo 88 kPa (66 cm de coluna de Hg), durante 15 minutos; (c) adição de mais água destilada, até um nível que correspondia à cerca de 1 cm abaixo da base do gargalo do picnômetro; (d) aplicação de vácuo novamente por mais 15 minutos; (e) complemento do picnômetro com água destilada até o topo do gargalo, seguido de (f) inserção da tampa do picnômetro e, quando necessário, adição de água destilada para completar o tubo capilar da tampa com uma seringa.

Durante a calibração, os picnômetros eram mantidos no banho maria até o equilíbrio da temperatura. Após o equilíbrio, os picnômetros eram retirados do banho maria, um de cada vez, para os seguintes processos: (a) complemento, com auxílio de uma seringa, do nível da água no tubo capilar da tampa do picnômetro, utilizando a água do próprio banho maria; (b) secagem da superfície externa do picnômetro com papel toalha; (c) determinação do peso do picnômetro com água, em balança digital com capacidade de 4.100 gf e resolução de 0,01 gf; e (d) retirada da tampa para medição da temperatura da água destilada dentro do picnômetro.

Por fim, de posse dos valores dos pesos picnômetros mais água destilada para cada temperatura, traçou-se as curvas de calibração dos picnômetros, apresentadas na sessão 4.1.5.

Os procedimentos para a determinação da densidade relativa das microesferas de vidro tratadas e com granulometria reconstituída foram semelhantes ao

apresentado para a calibração dos picnômetros, de modo que, para cada picnômetro, procedeu-se da seguinte forma (Figura 40a): (a) pesou-se 60 gf da amostra de microesferas de vidro, sendo esse o peso seco (P_{ME}); (b) com o auxílio de um funil de vidro, o peso seco foi transferido para o picnômetro; (c) adicionou-se água destilada até metade do volume do picnômetro (Figura 40b), sendo, em seguida, aplicado o vácuo de 88 kPa por 15 minutos por intermédio da bomba de vácuo, para eliminação das bolhas de ar presentes entre os grãos (Figura 40c e Figura 40d); (d) completou-se o picnômetro com água destilada até cerca de 1 cm abaixo do gargalo e, novamente, aplicou-se o vácuo por mais 15 minutos; (e) por fim, completou-se o picnômetro com água destilada até o gargalo e inseriu-se a tampa, preenchendo o tubo capilar da tampa com água destilada por meio de uma seringa.

Os conjuntos picnômetro + microesferas de vidro + água destilada foram, então, colocados no banho termorregulador (Figura 40e) a uma temperatura de 22,7 °C, registrada em termômetro de mercúrio, permanecendo neste até o equilíbrio de temperatura. Atingido o equilíbrio térmico, cada picnômetro era retirado do banho termorregulador, sendo o tubo capilar da tampa preenchido com água destilada do próprio banho (Figura 40f) e a superfície externa enxugada com papel toalha (Figura 40g). Determinava-se então o peso do picnômetro preenchido com microesferas de vidro e água destilada, sendo esse registrado como " P_{P+ME+A} " (Figura 40h). Das curvas de calibração dos picnômetros, apresentadas na sessão 4.1.5, obtinha-se o peso do picnômetro + água destilada para a temperatura do ensaio ($T = 22,7$ °C), registrado como " P_{P+A} ".

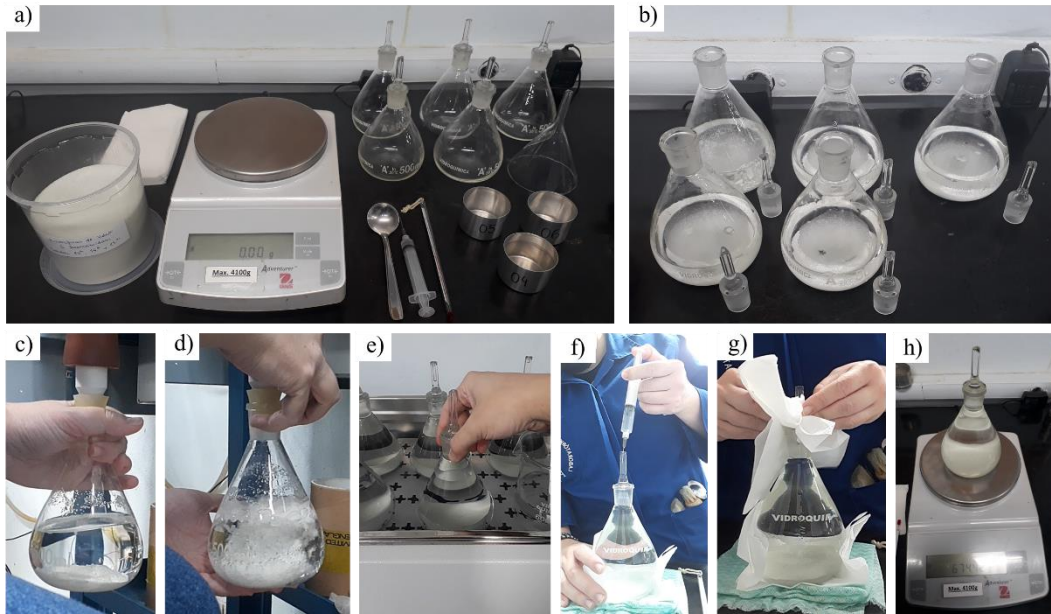


Figura 40 - Procedimentos de ensaio de densidade relativa das microesferas de vidro pelo método do picnômetro.

Desse modo, tinha-se que o volume das microesferas de vidro (V_{ME}) colocadas no picnômetro correspondia ao volume de água deslocada (V_{AD}) pela inserção das microesferas no picnômetro, determinado com base no peso de água deslocada (P_{AD}). Assim, tinha-se que:

$$P_{AD} = P_{P+A} - (P_{P+ME+A} - P_{ME}) \quad (21)$$

$$V_{AD} = \frac{P_{AD}}{\gamma_{WT^{\circ}C}} = V_{ME} \quad (22)$$

$$\gamma_{ME} = \frac{P_{ME}}{V_{ME}} \quad (23)$$

onde, $\gamma_{WT^{\circ}C}$ é o peso específico da água na temperatura do ensaio.

Finalmente, a densidade relativa (G_s) das microesferas de vidro era calculada conforme a equação 20.

3.7

Índices de vazios máximo, intermediários e mínimo

As metodologias de ensaios para determinação dos valores de índice de vazios máximo, intermediários e mínimo da amostra da areia da Praia de Ipanema e da amostra de microesferas de vidro reconstituídas foram escolhidas com base

nos resultados obtidos por Simões (2015) e Costa (2020). Assim, para determinação do índice de vazios máximo foi utilizado método B da ABNT (2020), ao passo que, para a determinação dos índices de vazios intermediários e mínimo, foi aplicada a metodologia de Miura & Toki (1982).

3.7.1 Índices de vazios máximo

O método B descrito pela norma ABNT (2020), baseado na norma ASTM (2016), é aplicado a solos de granulometria grossa, com 100 % de material passante (em peso) na peneira de abertura de 19 mm, contendo, no máximo, 12 % de material passante na peneira nº 200 (abertura de 0,075 mm) e 10 % de material retido na peneira de abertura de 9,5 mm. Nesta metodologia, a amostra de solo é depositada de forma instantânea dentro de um molde cilíndrico de dimensões conhecidas, resultante da rápida extração de um tubo preenchido com a mesma e posicionado dentro do molde. A Figura 41 apresenta o esquema de um dos arranjos deste ensaio, conforme realizado nesta pesquisa.

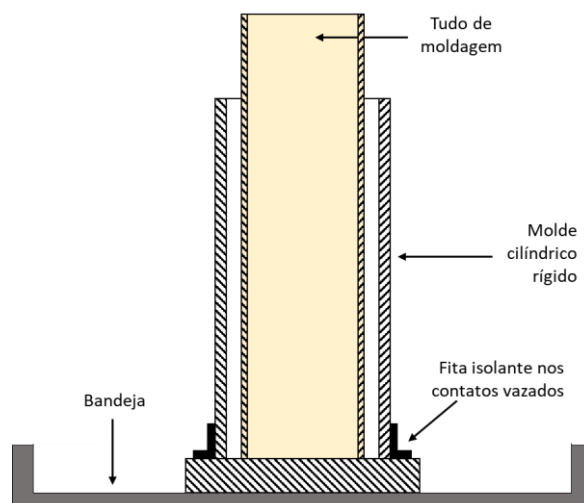


Figura 41 – Esquema do método B, apresentado pela ABNT (2020), para esta pesquisa.

Tanto a ABNT (2020) quanto a ASTM (2016) recomendam a utilização de cilindros Proctor Normal como molde; contudo, neste trabalho, foram utilizados moldes com dimensões semelhantes às dos corpos de prova a serem ensaiados nos ensaios de permeabilidade. Assim, foram utilizados dois moldes; um com dimensões semelhantes às do cilindro rígido mais colarinho, do ensaio de

permeabilidade em permeâmetro de parede rígida, denominado molde PPR; e, outro com dimensões semelhantes às do molde tripartido mais colarinho do ensaio em permeâmetro de parede flexível, denominado molde PPF. O molde PPR possuía as seguintes características geométricas médias: altura de 25,00 cm, diâmetro interno de 10,07 cm, área interna de 79,64 cm² e volume interno de 1991,00 cm³. Por sua vez, as dimensões médias molde de PPF eram: altura de 11,15 cm, diâmetro interno de 3,91 cm, área interna de 12,01 cm² e volume de 133,91 cm³.

Para cada molde foi confeccionado um tubo cujo diâmetro interno correspondia a 70 % do diâmetro interno do molde, e com um volume interno entre 1,25 a 1,30 o volume interno do molde, em conformidade com as recomendações das normas supracitadas.

Inicialmente, todas as medidas (altura, diâmetro interno, área da seção transversal e volume) do tubo e do molde eram determinadas, e procedimentos para determinação do teor de umidade higroscópica da amostra eram executados (método de secagem em estufa). Em seguida, de forma semelhante ao apresentado na Figura 41, posicionava-se no centro de uma bandeja metálica, revestida com papel *craft*, o molde, cujo o peso era pré-determinado, e dentro desse, o tubo (Figura 42a). A amostra era então inserida no tubo por meio de um funil de vidro, até um pouco abaixo do topo do tubo, isto é, com uma altura correspondente a 1,25 a 1,30 o volume do molde (Figura 42b e Figura 42c). Em um movimento vertical para cima, único e rápido, o tubo era extraído de dentro do molde, possibilitando que o solo ocupasse todo esse de forma instantânea (Figura 42d e Figura 42e). Posteriormente, arrasava-se o topo do corpo de prova junto ao topo do molde com uma régua e limpava-se as laterais do molde (Figura 42f). Por fim, determinava-se o peso do conjunto molde mais amostra úmida (com teor de umidade hidros cópica).

Sabendo-se o peso específico da amostra dentro do molde, o índice de vazios era calculado da seguinte forma:

$$P_A = P_{M+A} - P_M \quad (24)$$

$$P_{AS} = \frac{P_A}{(1 + w)} \quad (25)$$

$$V_S = \frac{P_{AS}}{\gamma_S} \quad (26)$$

$$e = \frac{V_V}{V_S} = \frac{(V_T - V_S)}{V_S} \quad (27)$$

onde, P_A = peso da amostra úmida (com teor de umidade higroscópica);

P_{M+A} = peso do molde mais amostra;

P_M = peso do molde;

P_{AS} = peso da amostra seca;

w = teor de umidade higroscópica da amostra, em decimal;

V_S = volume de sólidos;

γ_s = peso específico dos grãos;

V_V = volume de vazios;

V_T = volume total da amostra, igual ao volume interno do molde;

e = índice de vazios.

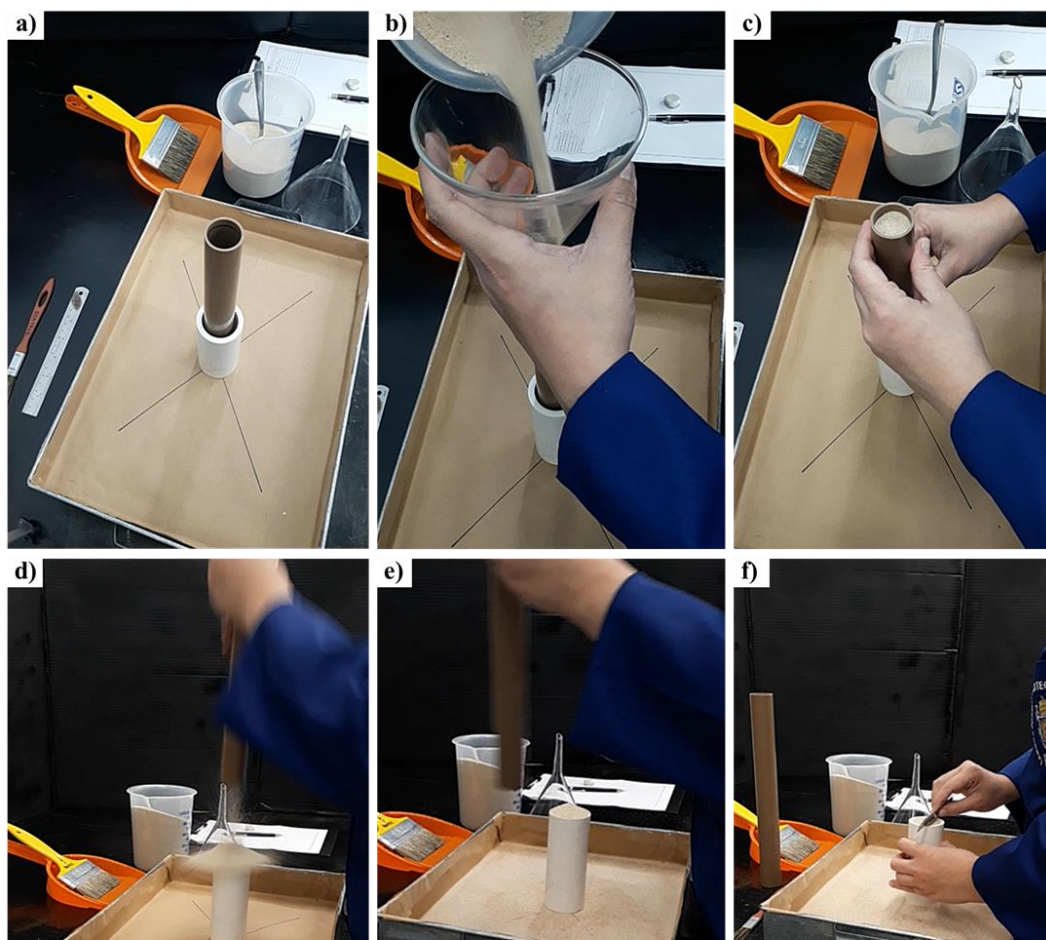


Figura 42 – Procedimentos do método B para determinação do índice de vazios máximo no molde do permeâmetro de parede flexível, sendo: (a) posicionamento do molde mais tubo no centro da bandeja; (b) inserção da amostra no tubo com auxílio de funil; (c) tubo mais amostra no nível correspondente a 1,3 o volume do molde; (d) extração do tubo; (e) molde mais amostra pós extração do tubo; (f) arrasamento do corpo de prova.

3.7.2 Índices de vazios mínimo e intermediários

A metodologia de Miura & Toki (1982) para determinação de índices de vazios mínimo e intermediários de areias é apresentada pelos referidos autores como método MSP, do inglês “*multiple sieving pluviation*”, cuja tradução livre poderia ser “pluviação com peneiramento múltiplo”. Segundo esta metodologia, corpos de prova de areia com diferentes valores de índice de vazios (e) — logo, diferentes valores de compactidade relativa (CR) — são obtidos por pluviações de uma amostra que parte de um funil, passa por um conjunto de peneiras empilhadas de aberturas pré-especificadas, e cai dentro de um molde. O índice de vazios do corpo de prova dentro do molde é função da vazão de pluviação da amostra, que, por sua vez, é controlada pelo diâmetro do bocal do funil. Assim, diversas pluviações são realizadas com funis de bocais de diferentes diâmetros e, como resultado, obtêm-se uma curva “índice de vazios *versus* diâmetro do bocal do funil”. A Figura 43a apresenta um esquema do aparelho MSP apresentado em Miura & Toki (1982), ao passo que a Figura 43b apresenta um esquema modificado do mesmo aparelho, o qual foi utilizado nesta pesquisa.

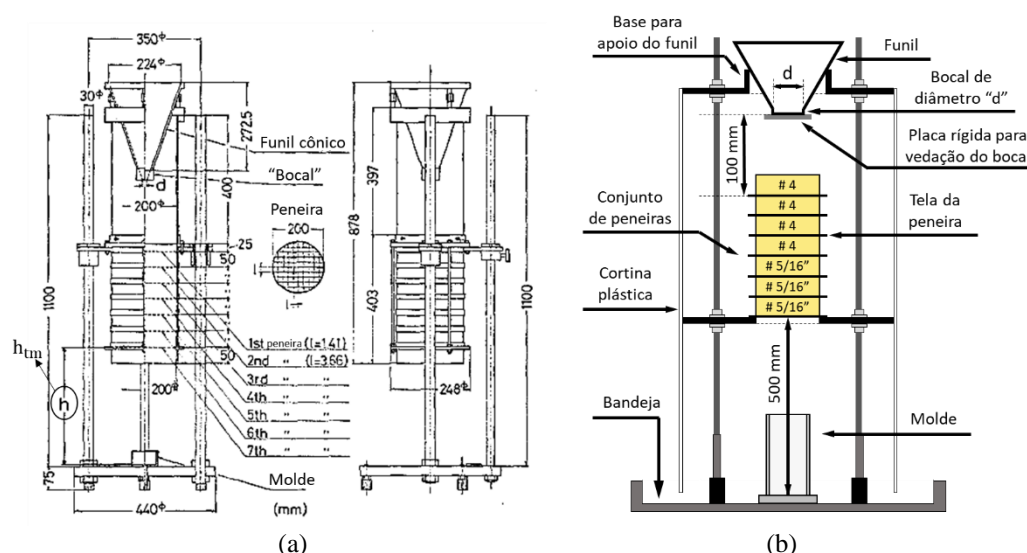


Figura 43 – Esquemas do aparelho de pluviação com peneiramento múltiplo (MSP), sendo em (a) o original, Miura & Toki (1982); e (b) o desenvolvido para esta pesquisa.

O arranjo do aparelho utilizado nesta pesquisa (Figura 43b) foi inspirado, também, nos arranjos utilizados por Simões (2015) e Costa (2020), porém três considerações merecem ser aqui registradas. A primeira diz respeito à distância da

tela da última peneira (mais inferior) até o fundo do molde, designada por “ h_{tm} ” na Figura 43a. Em Miura e Toki (1982), essa distância foi variada em cinco valores, a saber: 300, 400, 500, 600 e 700 mm; contudo, a influência do valor de h_{tm} na compactidade relativa (CR) obtida foi muito pequena, visto que, para um funil de diâmetro (d) igual a 20 mm, foi obtido $CR = 85\%$ para $h_{tm} = 300$ mm, e $CR = 88\%$ para $h_{tm} = 700$ mm (Miura e Toki, 1982, p. 64). Diante disso, assim como nas pesquisas de Simões (2015) e Costa (2020), a distância “ h_{tm} ” escolhida para esta pesquisa foi de 500 mm, correspondente à média das utilizadas por Miura e Toki (1982).

A segunda consideração tem a ver com a distância do bocal do funil ao topo da primeira peneira (mais superior). Em Miura & Toki (1982), Figura 43a, essa distância não é informada; contudo, ela pode ser estimada a partir das demais cotas apresentadas na figura, sendo o seu valor igual a 202,50 mm. Nos trabalhos de Simões (2015) e Costa (2020), tal distância foi estipulada em 100 mm. Assim sendo, antes de serem iniciados os ensaios para determinação dos índices de vazios mínimo e intermediários, foi realizado um teste para definição da distância a ser utilizada. Contudo, ao contrário dos demais trabalhos, considerou-se tal distância como a altura entre o bocal do funil e a tela da primeira peneira, visto que o topo da peneira pode variar. O teste para as duas distâncias, 100 mm e 200 mm, foi realizado em um conjunto de sete peneiras, cujas aberturas crescentes no sentido do fluxo do material (de cima para baixo) foram de: uma peneira nº 8 (abertura de 2,36 mm), três peneiras nº 4 (abertura de 4,75 mm) e três peneiras 5/16’’ (abertura de 8,00 mm); e em seis funis, com bocais de diâmetros de: 5, 10, 20, 30, 40, 50 e 60 mm. A Figura 44 apresenta as médias dos resultados obtidos para cada altura, 100 mm e 200 mm.

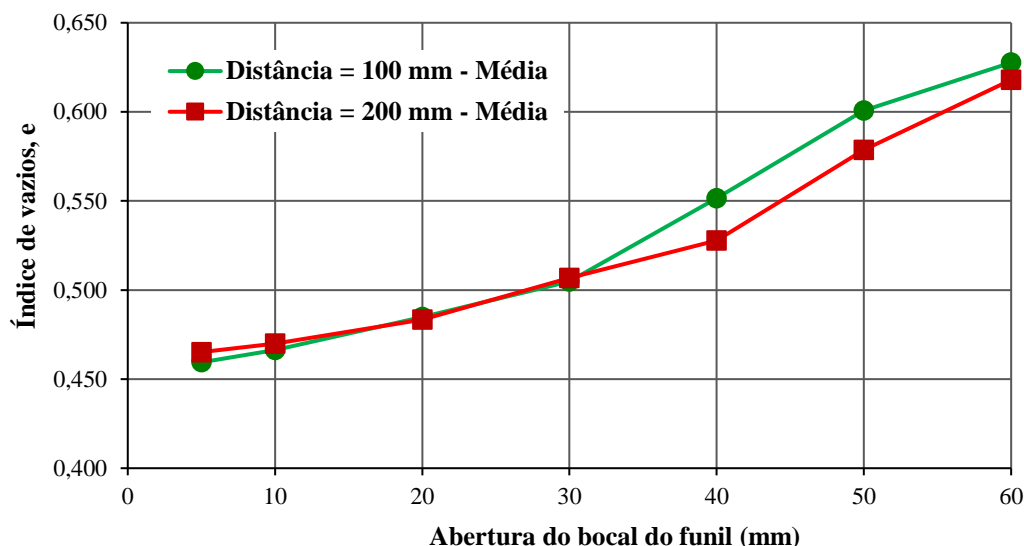


Figura 44 – Resultado do teste de comparação das alturas entre o funil e a tela da primeira peneira (mais superior).

De acordo com os resultados obtidos, a distância de 100 mm apresentou valores de índice de vazios ligeiramente menores para os funis de bocais de 5 mm e 10 mm; logo, sendo o objetivo do método determinar o índice de vazios mínimo, para esta pesquisa a distância entre o bocal e a tela da primeira peneira foi definida em 100 mm, conforme apresentado no esquema da Figura 43b.

A terceira consideração diz respeito à abertura da malha da peneira superior ($\#_{ps}$), sendo essa a primeira peneira, e da peneira inferior ($\#_{pi}$), a última peneira. Na Tabela 7 é apresentada uma comparação das relações: (a) entre a abertura da peneira superior ($\#_{ps}$) e o diâmetro D_{50} da amostra; (b) entre a abertura da peneira inferior ($\#_{pi}$) e o diâmetro D_{50} da amostra; e (c) das quantidades de peneiras adotadas e a sequência dessas; para as pesquisas de Miura & Toki (1982) e para os três trabalhos realizados com a areia da Praia de Ipanema: Simões (2015), Costa (2020) e esta pesquisa.

Tabela 7 - Razões entre os diâmetros das peneiras utilizadas no método MSP e o D_{50} da amostra e a quantidade de peneiras utilizadas e sua sequência, por diferentes autores.

Autores	Miura e Toki (1982)	Simões (2015)	Costa (2020)	Esta pesquisa
Amostra	Areia de Toyoura, Japão	Areia da Praia de Ipanema, RJ	Areia da Praia de Ipanema, RJ	Areia da Praia de Ipanema, RJ
D_{50} (mm)	0,18	0,38	0,39	0,41
Abertura da peneira superior ($\#_{ps}$)	1,41	4,75	4,75	4,75
$\#_{ps}/D_{50}$	7,83	12,5	12,2	11,6
Abertura da peneira inferior ($\#_{pi}$)	3,66	12,5	9,25	8,00
$\#_{pi}/D_{50}$	20,3	32,9	23,7	19,5
Nº de peneiras utilizadas: sequência de aberturas	7 peneiras: # de 1,41 mm # de 3,66 mm # de 3,66 mm # de 3,66 mm # de 3,66 mm # de 3,66 mm # de 3,66 mm	6 peneiras: # n° 4 # 3/8'' # 3/8'' # 1/2'' # 1/2'' # 1/2''	6 peneiras: # n° 4 # 5/16'' # 5/16'' # 3/8'' # 3/8'' # 3/8''	7 peneiras: # n° 4 # n° 4 # n° 4 # n° 4 # 5/16'' # 5/16'' # 5/16''

Como mostra a Tabela 7, a razão entre a abertura da peneira superior e o D_{50} da amostra adotada para esta pesquisa foi consideravelmente maior que a apresentada em Miura e Toki (1982). Um teste para avaliar a influência desta razão nos resultados foi realizado, no qual se substituiu a primeira peneira n° 4 (abertura de 4,75 mm) do conjunto de sete peneiras apresentadas na Figura 43b por uma peneira de n° 7 (abertura de 2,80 mm), visto que com a peneira n° 7, a razão " $\#_{ps}/D_{50}$ " seria de 6,83, portanto mais próxima à apresentada em Miura e Toki (1982). Contudo, observou-se que para os funis de maior bocal (100, 90 e 80 mm) a peneira de n° 7 retinha a amostra, controlando a vazão (Figura 45). Por esta razão, optou-se por utilizar o conjunto já apresentado na Figura 43b e na Tabela 7, sendo quatro peneiras de n° 4 (abertura de 4,75 mm), seguidas de três peneiras de 5/16'' (abertura de 8,00 mm).

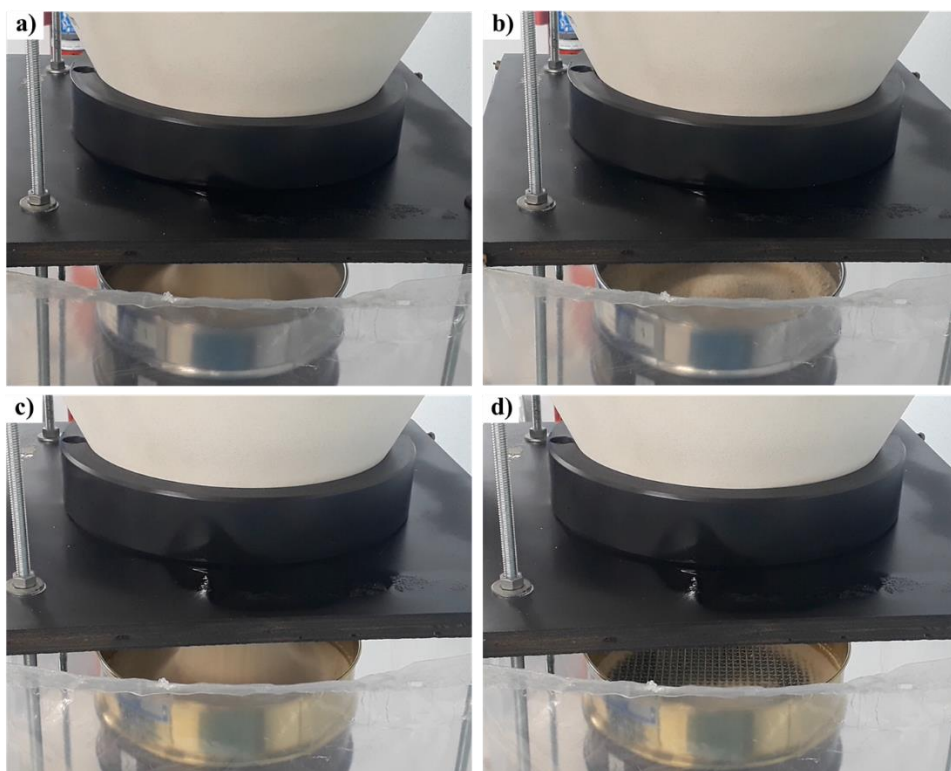


Figura 45 – Comparação entre as peneiras superiores durante a vazão da amostra por um funil de bocal de 100 mm, sendo em: (a) peneira de nº 7 durante a vazão; (b) peneira de nº 7 logo após o encerramento da vazão; (c) peneira de nº 4 durante a vazão; e (d) peneira de nº 4 logo após o encerramento da vazão.

Após determinar todas as medidas do molde (altura, diâmetro interno, área da seção transversal e volume) e o teor de umidade higroscópica da amostra (pelo método de secagem em estufa), o aparelho de pluviação (MSP) era montado sobre o centro de uma bandeja metálica coberta com papel craft (Figura 46a). Com o aparelho sobre a bandeja, regulava-se a altura da madeira inferior, sobre a qual o conjunto de peneiras era apoiado, de modo que a tela da última peneira (mais inferior) ficasse a uma distância de 500 mm do fundo do molde; em seguida, montava-se o conjunto de peneiras, com as quatro peneiras nº 4 sobre as três peneiras 5/16”. Posteriormente, movia-se a madeira superior, sobre o qual o funil era apoiado, até que o bocal do funil ficasse a uma distância de 100 mm da tela da peneira superior. Por fim, o aparelho era envolvido por uma cortina plástica.

Entre as hastes do aparelho MSP era feito um “X”, para marcar o ponto no qual o molde deveria ser posicionado, centralizando-o com as peneiras (Figura 46b). Antes de posicioná-lo, o peso do molde (P_M) era determinado. Fazia-se ainda um aterramento, por meio de um fio que conectava as hastes do aparelho MPS ao chão do laboratório, para evitar “choques” nas hastes e eletrização das partículas

(Figura 46b). Esse “choque” ocorria devido ao atrito entre os grãos das amostras em movimento e as peneiras, o que gerava uma eletricidade nas hastes, principalmente para os funis de bocal com menor diâmetro.

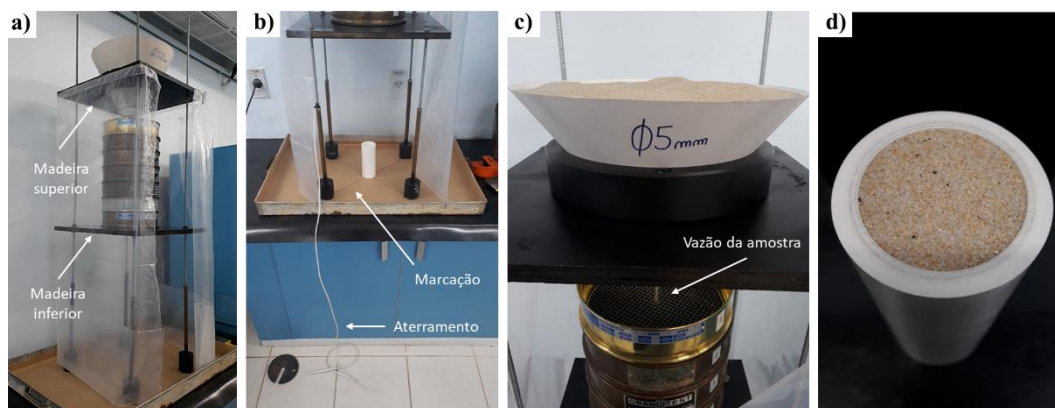


Figura 46 – Procedimentos para execução do ensaio MSP, sendo em: (a) posicionamento do aparelho MSP; (b) marcação para centralização do molde e aterramento do aparelho; (c) vazão da amostra pelo funil; e (d) molde com amostra após o arrasamento do topo.

Após todo o arranjo do aparelho montado, fechava-se uma parte da cortina e com uma placa rígida vedava-se o bocal do funil. Em seguida, inseria-se a amostra no funil até completá-lo (Figura 46c); a placa rígida era então retirada, em um movimento horizontal e rápido, liberando a pluviação da amostra. O fluxo não era interrompido até o enchimento do molde. Após o preenchimento do molde e a completa finalização da pluviação, o topo do corpo de prova era arrasado junto ao topo do molde com uma régua metálica e, posteriormente, a superfície lateral, a base e as bordas do topo do molde eram cuidadosamente limpas. Por fim, determinava-se o peso do molde mais amostra úmida, com teor de umidade higroscópica (P_{MA}), em uma balança digital.

Os cálculos dos índices de vazios mínimo e intermediários são iguais ao cálculo do índice de vazios máximo, equações 24 a 27. Foram realizadas cinco determinações de índice de vazios para cada diâmetro do bocal do funil, sendo os diâmetros iguais a 5, 10, 20, 30, 40, 50, 60, 70, 80, 90 e 100 mm. Os resultados destes ensaios são apresentados na seção 4.2.2.

3.8 Ensaio de permeabilidade

3.8.1 Ensaio de permeabilidade em permeâmetro de parede rígida

Os ensaios de permeabilidade em permeâmetro de parede rígida sob carga hidráulica constante (PPR) foram realizados com base nas diretrizes da norma ABNT (2020). Neste tipo de ensaio, a condutividade hidráulica (k) é determinada medindo-se o volume de água (ΔV) que percola um corpo de prova de área de seção transversal (A), moldado em um cilindro rígido, durante um intervalo de tempo (Δt); bem como a perda de carga hidráulica (Δh) entre dois pontos na direção do fluxo dentro do meio percolado (o solo).

Os permeâmetros podem possuir diferentes arranjos. O permeâmetro utilizado nesta pesquisa foi projetado a partir dos modelos apresentados na norma supracitada, cujo o esquema é ilustrado na Figura 47a. O permeâmetro utilizado (Figura 47b) foi confeccionado no Laboratório de Geotecnia e Meio Ambiente (LGMA) da PUC-Rio e os detalhes de seu projeto são apresentados no Apêndice A. As dimensões do cilindro rígido em acrílico são: diâmetro interno de 9,95 cm; altura de 20,00 cm; área interna de 77,76 cm² e volume interno de 1555,20 cm³. A distância entre as saídas para os tubos piezométricos era de 10,00 cm, distanciados em 5,00 cm das extremidades do cilindro rígido.

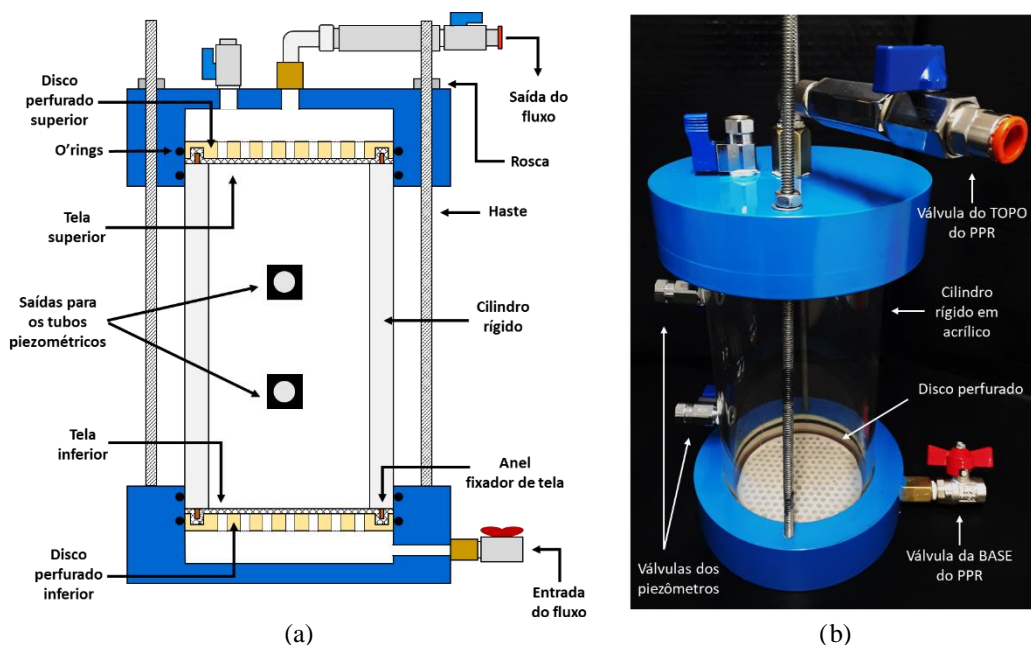


Figura 47 - Permeâmetro de parede rígida utilizado na pesquisa, sendo em (a) o desenho esquemático e (b) a fotografia do equipamento confeccionado.

Nos ensaios executados nesta pesquisa, o fluxo era do tipo ascendente, ou seja, com entrada pela base do permeâmetro e saída pelo seu topo, de modo que a água atravessava os seguintes materiais no permeâmetro: (a) válvula e conexão da base; (b) disco perfurado inferior; (c) tela inferior; (d) corpo de prova; (e) tela superior; (f) disco perfurado superior; e (h) conexões e válvula do topo. Os tubos piezométricos foram instalados para medição da perda de carga no interior do corpo de prova. O esquema de montagem do ensaio, com o permeâmetro de parede rígida e os demais utensílios para fornecimento da água destilada para o fluxo, é apresentado na Figura 48.

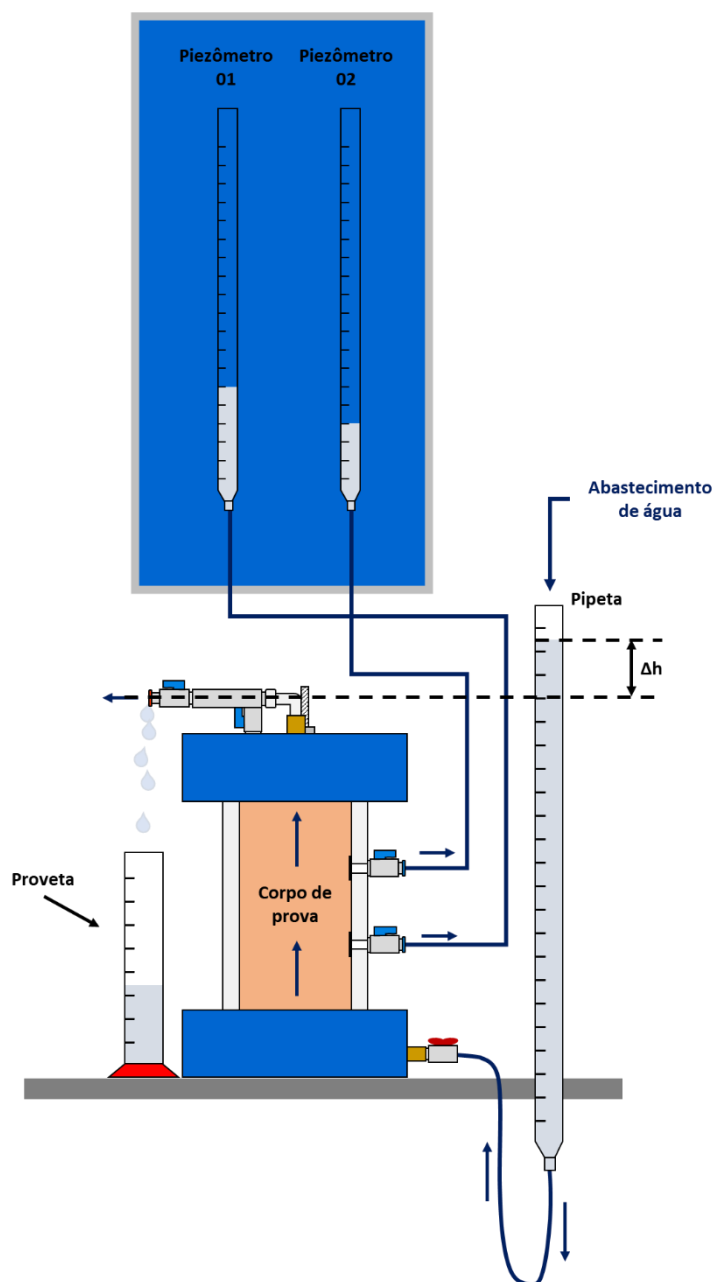


Figura 48 - Esquema do ensaio de permeabilidade em permeâmetro de parede rígida.

Na preparação de cada ensaio, montava-se o arranjo do ensaio (Figura 48) em uma posição “fixa” em relação aos demais equipamentos utilizados (reservatório elevado de água, bureta graduada, entre outros); em seguida, marcava-se na pipeta graduada os níveis referentes: à entrada da água no permeâmetro, à base do corpo de prova, ao topo do corpo de prova sem colarinho, ao topo do corpo de prova com colarinho e à saída de água pelo topo do permeâmetro.

Para moldagem do corpo de prova, primeiramente montava-se o conjunto: base do permeâmetro, disco perfurado inferior, tela inferior, cilindro rígido e colarinho. Um anel de fixação da tela no disco perfurado garantia a boa aderência e o bom acabamento entre as peças (Figura 49a). A junção entre a base do permeâmetro e o cilindro rígido, assim como todas as válvulas (a da base do permeâmetro e as dos dois piezômetros) eram revestidas com fita veda rosca (Figura 49b) a fim de evitar retenção dos grãos em reentrâncias fora do cilindro rígido durante a moldagem do corpo de prova. Nesta fase de preparação, todas as válvulas encontravam-se fechadas. Em seguida, todo esse conjunto era pesado (P_1) em uma balança digital.

Sobre uma bandeja metálica revestida com papel *craft*, o corpo de prova era então moldado dentro do cilindro rígido, de acordo com o índice de vazios desejado, seguindo os procedimentos descritos na seção 3.7.1 para o índice de vazios máximo, e na seção 3.7.2 para os índices de vazios mínimo e intermediários. Finalizado o processo de moldagem do corpo de prova, com um pincel, limpava-se toda a superfície externa do conjunto, retirando todos os grãos. Em seguida, pesava-se o conjunto com a amostra (P_2) em mesma balança digital; obtendo-se o peso do corpo de prova (P_{CP1}) pela diferença: $P_2 - P_1$. Ressalta-se que P_{CP1} é o peso do corpo de prova moldado com a amostra seco ao ar, ou seja, com teor de umidade higroscópica, no cilindro rígido com colarinho. Os valores de umidade higroscópica da areia da Praia de Ipanema e da amostra de microesferas de vidro foram inferiores a 0,03 %. Para “saturação” do corpo de prova, após a moldagem, o conjunto era posicionado sobre uma bandeja metálica (Figura 49c). Retirava-se, então, a fita veda rosca de proteção da válvula da base do permeâmetro e conectava-se a mangueira da pipeta graduada à mesma, conforme indica a seta na Figura 49c. Ressalta-se a importância da pré-saturação dessa mangueira da pipeta graduada, uma vez que a presença de bolhas de ar nas mangueiras e conexões dificultam a “saturação” do corpo de prova. Em seguida, abria-se a válvula da base do

permeâmetro, e liberava-se a entrada de água destilada na pipeta graduada, que vinha de uma bureta graduada posicionada sobre a pipeta, indicadas pelas setas da Figura 49d, de modo que o volume de água que entrava no corpo de prova podia ser quantificado.

A ascensão do nível da água no corpo de prova era observada pela elevação do nível da água na pipeta graduada, com base no princípio dos vasos comunicantes. Quando o nível d'água atingia o topo do colarinho, o volume de água que entrara no corpo de prova era registrado e, em seguida, deixava-se percolar, adicionalmente, um volume de água correspondente a duas vezes o volume de vazios do corpo de prova (V_v), calculado como:

$$V_v = n \cdot V_{MC} = \frac{e}{(1 + e)} \cdot V_{MC} \quad (28)$$

onde, n = porosidade do corpo de prova;

V_{MC} = volume interno do cilindro rígido (molde) mais colarinho;

e = índice de vazios do corpo de prova.

A água que chegava ao topo do colarinho passava por um extravasor e era coletada em um béquer (Figura 49e). Ao final do processo de “saturação” do corpo de prova, registrava-se o volume total de água percolado e o abatimento do corpo de prova. Em seguida, retirava-se cuidadosamente o colarinho (Figura 49f) e arrasava-se o topo do corpo de prova junto ao topo do cilindro rígido com o auxílio de uma régua metálica (Figura 49g). As bordas do cilindro rígido eram limpas com as pontas dos dedos e com o auxílio de uma pisseta com água destilada, até a eliminação de todos os grãos. Posteriormente, posicionava-se o disco perfurado com a tela superior sobre o topo do corpo de prova e encaixava-se o topo do permeâmetro (Figura 49h e Figura 49i, respectivamente). Todo o material arrasado era colocado em um prato metálico, de peso pré-determinado, para secagem em estufa; inclusive o material que caíra sobre a bandeja metálica e nas laterais do cilindro rígido na retirada do colarinho e no arrasamento do corpo de prova, sendo esse material coletado com auxílio de uma pisseta com água destilada e peneira de nº 200 (Figura 49j e Figura 49k). O peso do material arrasado depositado no prato metálico, após secagem em estufa, era registrado como (P_A).

Na pipeta graduada, eram demarcados os níveis correspondentes aos gradientes hidráulicos a serem impostos para estabelecimento de fluxo pelo corpo

de prova (seta da Figura 49l), tendo como referência o nível correspondente à saída de água pelo topo do permeâmetro, marcado nos procedimentos iniciais. Após a limpeza e o posicionamento do permeâmetro em local pré-fixado, retiravam-se as fitas veda rosca das válvulas dos piezômetros, abrindo-as e conectando-as às mangueiras dos piezômetros pré-saturadas (Figura 49m). Em seguida, abria-se a válvula do topo do permeâmetro e liberava-se o fluxo ascendente de água destilada pelo corpo de prova, com a pipeta graduada sendo abastecida com água destilada por uma mangueira conectada ao reservatório superior de água destilada (Figura 49n). Durante o fluxo, o nível d'água na pipeta graduada era mantido constante, no nível da demarcação realizada correspondente ao gradiente hidráulico imposto, sendo este nível d'água controlado por leves ajustes feitos na válvula conectada ao reservatório superior que alimentava a pipeta.

Em cada ensaio de permeabilidade, foram estabelecidos fluxos pelo corpo de prova impondo gradientes hidráulicos “externos” de: 0,2; 0,4; 0,6 e 0,8. Para cada gradiente hidráulico “externo” imposto, deixava-se percolar água até que os níveis d'água nos piezômetros ficassem constantes. Após a estabilização, iniciava-se a tomada das leituras do volume de água percolado (ΔV) em um intervalo de tempo (Δt). Para isso, sob a válvula do topo, era posicionada uma proveta graduada com um funil de vidro, para registro do volume de água percolado (Figura 49o). O intervalo de tempo era registrado em um cronômetro. Para cada gradiente hidráulico imposto, foram realizadas cinco medições de ΔV e Δt . As medições de temperatura da água percolada e as leituras dos níveis d'água nos piezômetros eram realizadas a partir da terceira medição.

Após todas as medições para todos os gradientes hidráulicos impostos, fechavam-se as válvulas da base do permeâmetro e dos piezômetros, e desconectavam-se todas as mangueiras. Em seguida, retirava-se cuidadosamente o topo do permeâmetro e registrava-se o eventual abatimento do corpo de prova. Abatimentos no corpo de prova ao final do ensaio só foram observados nos corpos de prova moldados com índice de vazios máximo. Em três cápsulas metálicas e em um prato metálico, cujos pesos haviam sido previamente determinados em uma balança digital, colocava-se todo corpo de prova, com extremo cuidado para não perder nenhum grão. Assim, para cada cápsula, era tomada uma pequena porção do corpo de prova (no topo, no meio e na base) para determinação do teor de umidade. As cápsulas com as amostras úmidas eram então pesadas na mesma balança digital.

No prato metálico, era colocado todo o restante do corpo de prova e levado para secagem em estufa de 105-110 °C, juntamente com as cápsulas. Todo o material do corpo de prova ficava na estufa por no mínimo 24 horas. Por fim, com o material do corpo de prova seco, pesavam-se o prato e as cápsulas. O peso seco, em estufa, do corpo de prova pós ensaio (P_{CP2}) era dado pela soma das amostras secas nas cápsulas mais a amostra seca no prato.



Figura 49 - Procedimentos do ensaio de permeabilidade em permeâmetro de parede rígida.

A soma do peso “ P_{CP2} ” com o peso do material arrasado antes da realização do ensaio (P_A) era então comparada com o peso do corpo de prova após a moldagem (P_{CP1}), sendo sempre muito semelhantes.

A compacidade relativa (CR_0) do corpo de prova no início do ensaio (ou seja, antes do estabelecimento do fluxo) era calculada pelas equações:

$$V_s = \frac{P_{CP2}}{\gamma_s} \quad (29)$$

$$V_{v0} = V_{CP0} - V_s \quad (30)$$

$$e_0 = \frac{V_{v0}}{V_s} \quad (31)$$

$$CR_0 (\%) = \frac{e_{m\acute{a}x} - e_0}{e_{m\acute{a}x} - e_{m\acute{i}n}} \cdot 100 \quad (32)$$

onde, V_s = volume de sólidos do corpo de prova;

P_{CP2} = peso do corpo de prova seco em estufa;

γ_s = peso específico dos sólidos;

V_{v0} = volume de vazios inicial do corpo de prova;

V_{CP0} = volume total inicial do corpo de prova, igual ao volume interno do cilindro rígido;

e_0 = índice de vazios inicial do corpo de prova;

$e_{m\acute{a}x}$ = índice de vazios máximo da amostra;

$e_{m\acute{i}n}$ = índice de vazios mínimo da amostra.

Para cada fluxo estabelecido pelo corpo de prova, o volume de água percolado pelo corpo de prova (ΔV) em um intervalo de tempo (Δt) correspondia à vazão (Q), sendo que:

$$Q = \frac{\Delta V}{\Delta t} \quad (33)$$

Sendo a vazão (Q) o produto da velocidade aparente de fluxo (v) vezes a área da seção transversal do corpo de prova (A_{CP}), a velocidade aparente do fluxo (v) era calculada como:

$$v = \frac{Q}{A_{CP}} \quad (34)$$

Para cada fluxo estabelecido pelo corpo de prova, o gradiente hidráulico (i) era calculado a partir da diferença de carga hidráulica medida nos piezômetros (Δh) dividida pela distância (l) entre as saídas para os piezômetros no cilindro rígido, isto é:

$$i = \frac{\Delta h}{l} \quad (35)$$

Assim, para cada ensaio de ensaio de permeabilidade, de posse dos valores de velocidade (v) e gradiente hidráulico (i), plotavam-se os pares ordenados (gradiente hidráulico; velocidade), com o gradiente hidráulico no eixo das abscissas e a velocidade no eixo das ordenadas. No programa *Excel*, pelo método dos mínimos quadrados, interpolava-se uma reta aos pontos plotados, cujo coeficiente angular correspondia à condutividade hidráulica (k_T) do corpo de prova na temperatura do ensaio (T).

Contudo, conforme já observado na seção 2.2.3.2, a condutividade hidráulica deve ser referida à temperatura de referência de 20 °C. Assim, a condutividade hidráulica para a temperatura de 20 °C ($k_{20\text{ °C}}$) era calculada como:

$$k_{20\text{ °C}} = \frac{\mu_T}{\mu_{20\text{ °C}}} \cdot k_T$$

onde, μ_T = viscosidade da água na temperatura do ensaio;

$\mu_{20\text{ °C}}$ = viscosidade da água a 20 °C.

Os resultados dos ensaios de permeabilidade em permeâmetro de parede rígida (PPR) realizados tanto em corpos de prova moldados com a amostra da areia da Praia de Ipanema como em corpos de prova moldados com a amostra de microesferas de vidro de granulometria reconstituída, com diferentes índices de vazios entre o mínimo e o máximo, são apresentados na seção 4.3.

Ensaio de permeabilidade também foram executados em permeâmetro de parede flexível, uma vez que, nesse equipamento é possível promover a saturação do corpo de prova pela técnica de contrapressão, sendo essa uma desvantagem do permeâmetro de parede rígida. A seção 3.8.2, a seguir, apresenta os procedimentos do ensaio de permeabilidade em permeâmetro de parede flexível.

3.8.2

Ensaio de permeabilidade em permeâmetro de parede flexível

Os ensaios de permeabilidade em permeâmetro de parede flexível sob carga constante foram realizados de forma semelhante ao apresentado em Costa (2020), com algumas modificações no sistema de aplicação de contrapressão, justificadas no Apêndice B. Na Figura 50 são apresentados os sistemas que compõem o

permeâmetro de parede flexível utilizado nesta pesquisa, a saber: (a) sistema de aplicação de pressão; (b) sistema externo da câmara; (c) sistema interno da câmara; e (d) sistema de aquisição de dados.

No sistema de aplicação de pressão (Figura 50), a “árvore” era responsável por receber e distribuir água destilada, que provinha de um reservatório superior, e ar comprimido, fornecido por um compressor externo ao laboratório. A água destilada entrava na árvore pela válvula “AA”, saindo dessa para o sistema externo pela válvula “AC”. Essa água era utilizada para a saturação das mangueiras, válvulas e conexões dos sistemas externo e interno da câmara, além de abastecer as interfaces ar-água. Por sua vez, o ar comprimido entrava na árvore pela válvula “AG” e saía dessa pelas válvulas reguladoras de pressão: “confinante” (confin), “base” e “topo”. A válvula “confinante” regulava o ar comprimido que entrava na parte superior da câmara (sistema interno) e pressurizava a água que confinava o corpo de prova. A válvula da “base” controlava o ar comprimido que passava por uma mangueira dotada de uma conexão “T”, conectada à primeira interface de ar-água e ao medidor de variação volumétrica (MVV). Por fim, a válvula do “topo” regulava o ar comprimido que alimentava a segunda interface ar-água.

Cada interface ar-água era constituída por: um disco metálico superior, no qual entrava o ar comprimido que vinha da árvore; um cilindro de acrílico, envolto por uma tela metálica, que armazenava o ar e a água; e, um disco metálico inferior, pelo qual saía a água pressurizada para o sistema externo da câmara. A primeira interface ar-água estava conectada ao sistema externo pela válvula “10”, sendo utilizada apenas na etapa do ensaio de estabelecimento do fluxo de água pelo corpo de prova (sétima etapa do ensaio). A segunda interface ar-água era conectada ao sistema externo da câmara pela válvula “14”, passando por um rotâmetro; sendo utilizada tanto na etapa de estabelecimento de fluxo de água pelo corpo de prova, quanto nas etapas de saturação do sistema externo por percolação.

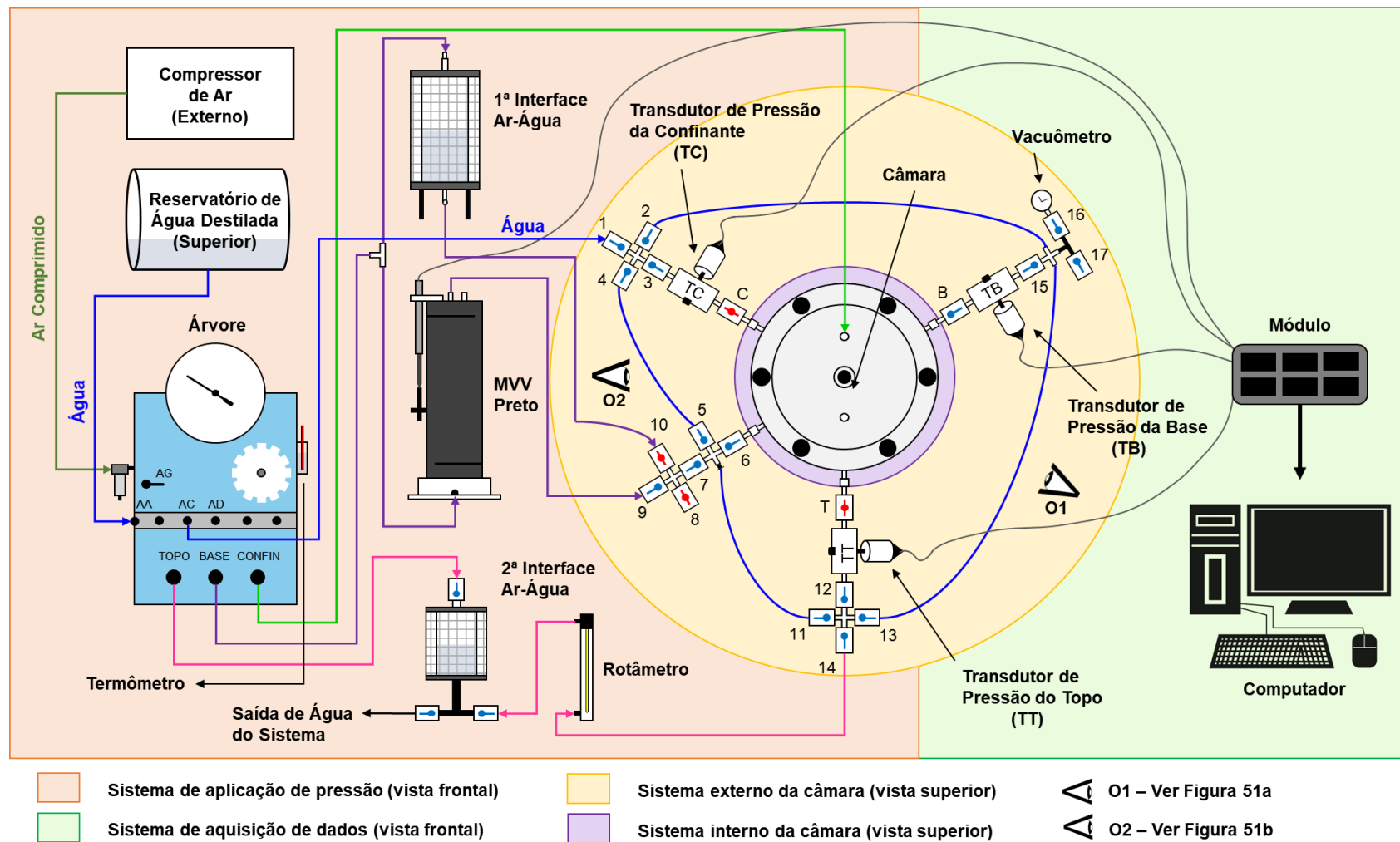


Figura 50 - Sistemas do permeâmetro de parede flexível.

O rotâmetro, da marca Ômega, modelo FLDW3409G, com capacidade de 50 ml/min, era utilizado apenas para medir a vazão (Q) de percolação na etapa de estabelecimento de fluxo de água pelo corpo de prova.

O medidor de variação volumétrica (MVV) também funcionava como uma interface ar comprimido-água; contudo, nesse, os fluidos não ficavam em contato direto, mas confinados em diferentes reservatórios revestidos por um diafragma (*Bellofran*). Entre os reservatórios havia um êmbolo, que deslocava mediante a aplicação de pressão, de modo que: o ar comprimido, regulado pela válvula “base” na árvore, entrava no reservatório inferior do MVV deslocando o êmbolo para cima, pressurizando a água no reservatório superior, que, por sua vez, entrava no sistema externo da câmara por meio da válvula “9”.

O MVV era utilizado para medir o volume de água que entrava no corpo de prova na etapa de saturação do mesmo por contrapressão (sexta etapa do ensaio), bem como para medir o volume de água que saía do corpo de prova na etapa de adensamento (oitava etapa do ensaio). Essa medição do volume de água que entrava/saía do corpo de prova era determinada pelo deslocamento do êmbolo do MVV, registrado por um transdutor de deslocamento acoplado ao mesmo. As leituras do transdutor de deslocamento eram registradas no sistema de aquisição de dados, composto por: um módulo, da marca HBM, no qual estava conectado o transdutor; e um microcomputador, no qual estava instalado o *software* Catman AP V5.02, responsável por converter as leituras eletrônicas do transdutor de deslocamento em leituras de volume, com base nos coeficientes da reta de calibração do transdutor inseridas nesse. Os detalhes do MVV utilizado nesta pesquisa são apresentados em Borges (1996). As características do transdutor de deslocamento do MVV e os procedimentos seguidos para a calibração desse, realizada para esta pesquisa, são apresentados no Apêndice C.

No sistema externo da câmara, um conjunto de mangueiras, conexões e válvulas governava o percurso da água em cada fase do ensaio (saturação, adensamento e fluxo); de modo que, por meio de um “jogo de válvulas”, conectava-se o sistema externo ao sistema interno da câmara (Figura 51). No sistema externo, estavam instalados ainda três transdutores de pressão, sendo um para medir a poropressão na base do corpo de prova, outro para medir a poropressão no topo do corpo de prova e outro para registrar a pressão confinante, imposta à água de confinamento na câmara.

Todos os transdutores de pressão ficavam conectados há um respectivo canal interno na base da câmara (Figura 50 e 51). Assim, o transdutor da pressão confinante (TC), instalado entre as válvulas “3” (mantida sempre fechada durante o ensaio) e “C” (mantida sempre aberta), registrava a pressão sob a qual a água no interior da câmara, que confinava o corpo de prova, se encontrava. O transdutor da base (TB), instalado entre as válvulas “15” e “B”, registrava a poropressão na base do corpo de prova, junto ao pedestal da câmara. Por fim, o transdutor do topo (TT), instalado entre as válvulas “12” e “T”, registrava a poropressão no topo do corpo de prova, por meio de um tubo de drenagem dentro da câmara que conectava a base dessa, em contato com o transdutor TT, ao *top-cap*. A Figura 51 apresenta o esquema do corpo de prova dentro da câmara, ou seja, dentro do sistema interno, mostrando os canais dos transdutores da confinante (TC), do topo (TT) e da base (TB).

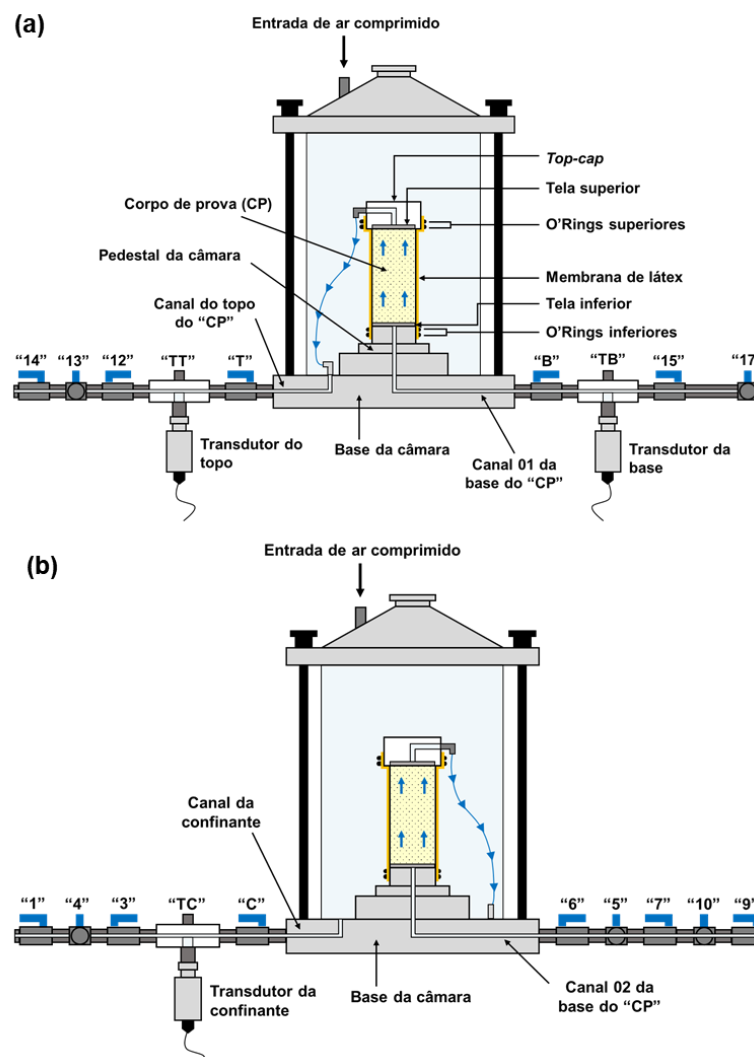


Figura 51 - Esquema do corpo de prova no interior da câmara, sendo em (a) a vista de O1 da Figura 50 e em (b) a vista de O2 da Figura 50.

Assim como para o transdutor de deslocamento, as leituras dos transdutores de pressão também eram realizadas pelo sistema de aquisição de dados, sendo as leituras eletrônicas dos transdutores convertidas em leituras de pressão, com base nos coeficientes das retas de calibração desses inseridas no *software* Catman AP V5.02. As características dos três transdutores de pressão e os procedimentos seguidos em suas calibrações, realizadas para esta pesquisa, encontram-se descritos no Apêndice D.

No sistema interno (Figura 51), a câmara que confinava o corpo de prova cilíndrico era constituída de acrílico e duralumínio, possuindo 32,5 cm de altura interna e 16,7 cm de diâmetro interno, sendo bastante similar às câmaras utilizadas em ensaios triaxiais. A base da câmara, também feita em duralumínio, era dotada de um pedestal de 38,2 mm de diâmetro sobre o qual se moldava o corpo de prova. O corpo de prova, com discos de tela de peneira nº 150 (# 0,106 mm) em suas extremidades (topo e base), era envolvido por uma membrana de látex. Sobre o corpo de prova, posicionava-se o *top-cap*.

Na primeira etapa do ensaio era saturado os sistemas externo e interno da câmara. Para tanto, abria-se as válvulas “AA” e “AC” da árvore (Figura 50) para a passagem da água para o sistema externo, com entrada pela válvula “1”, com encaminhamento da água tanto no sentido da válvula “2” quanto no sentido da válvula “4”, e saída pela válvula “17”, de modo que era saturado todos os canais do sistema externo e interno da câmara, eliminando todas as bolhas de ar nas mangueiras pela percolação de água. Leves batidas com a mão eram dadas nas conexões, com intuito de liberar possíveis bolhas de ar aprisionadas. Percolava-se água, também, para as interfaces ar-água, enchendo a primeira interface e saturando o caminho para a segunda interface (Figura 50). A primeira interface era enchida até uma altura de 5 cm do disco metálico superior, enquanto que a segunda interface era mantida com apenas uma lâmina d’água, de aproximadamente 2 cm do disco metálico inferior. O reservatório superior do MVV também era enchido com água. Saturava-se ainda a seringa de sucção, a ser utilizada na etapa de moldagem do corpo de prova.

Em uma pipeta graduada, posicionada sobre a bancada do permeâmetro ao lado da câmara desse e conectada à válvula “17”, marcavam-se os níveis referentes ao corpo de prova (CP) a ser moldado, sendo esses: base, meio, topo e topo mais colarinho. Em seguida, para saturação da mesma, liberava-se a percolação de água

vinda da árvore pela válvula “17”, preenchendo a mangueira conectada à pipeta graduada e a própria pipeta até o nível referente à base do corpo de prova. Por fim, sobre a pipeta graduada, posicionava-se uma bureta graduada preenchida com água.

Na segunda etapa do ensaio, eram preparados os equipamentos para moldagem do corpo de prova. De início, verificava-se a presença de furos na membrana de látex, mediante vedação de suas extremidades em torno de um tubo com furos, seguida de injeção de ar e mergulho em água (Figuras 52a, 52b e 52c). Em seguida, cobria-se com fita isolante as aberturas e reentrâncias da base da câmara do permeâmetro, a fim de evitar entrada de grãos da amostra nas mesmas durante a moldagem do corpo de prova. Fixava-se então a extremidade inferior da membrana de látex junto à superfície lateral do pedestal da câmara com dois *o’rings* (Figura 52d). Por recomendação de Domingos (2020), a fim de evitar o acúmulo de grãos entre a membrana de látex e a superfície lateral do pedestal na região acima dos *o’rings*, sobre os *o’rings* era ainda instalado um elástico de borracha de secção quadricular, bem próximo ao topo do pedestal (Figura 52e).

Também por recomendação de Domingos (2020), antes de posicionar o molde tripartido sobre o pedestal, cuja as dimensões aproximadas eram de 40,19 mm e 89,17 mm, respectivamente, para o diâmetro e a altura interna útil, colava-se com goma uma tela de tecido em algodão nas paredes internas do molde (tripartido), com intuito de melhorar a distribuição do vácuo a ser aplicado nesse, resultando em uma melhor aderência da membrana de látex às paredes internas do molde. Após a secagem da cola, uniam-se as três partes do molde tripartido com um anel, passando fita isolante sobre suas junções (Figura 52f). As partes do molde tripartido eram ainda fixadas com duas braçadeiras plásticas, sendo uma na região superior e outra na região inferior do tripartido. Na região superior, eram ainda instalados dois *o’rings* acima da braçadeira plástica. Finalmente, posicionava-se o molde tripartido sobre o pedestal da câmara, no entorno da membrana de látex. O contato molde tripartido – pedestal era vedado com fita isolante.

Em seguida, a borda superior do molde tripartido era revestida com fita veda rosca a fim de evitar furos na membrana ao posicionar o colarinho sobre o molde; dobrava-se então o excesso superior livre da membrana de látex sobre o tripartido. O colarinho fabricado no laboratório era de PVC, com diâmetro interno de 40,19 mm e altura útil de 20,00 mm. Após a acoplagem dos tubos da bomba de vácuo às conexões do tripartido, ligava-se a bomba, aplicando a sucção para a aderência da

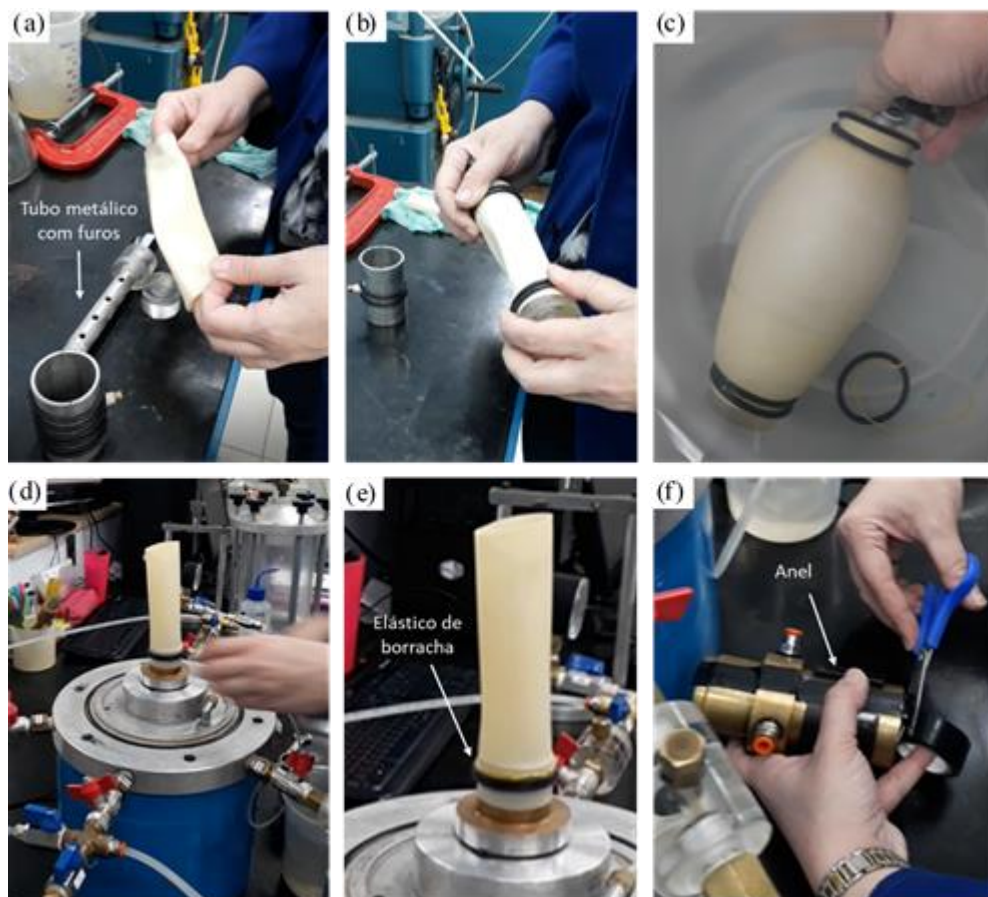


Figura 52 – Etapas de preparação para moldagem do corpo de prova.

membrana de látex à parede interna do molde, de cerca de 20 kPa. Uma inspeção tátil-visual era realizada para verificação da completa aderência e ausência de vibrações causadas pela bomba. Em seguida, posicionava-se o disco de tela inferior (de peneira nº 150) sobre o pedestal da câmara. Novamente, passava-se uma fita veda rosca junto à borda superior do molde tripartido, sobre a membrana de látex. Por fim, aplicava-se graxa de silicone na borda inferior do colarinho e posicionava-o sobre o topo do molde tripartido, fixando-o com fita isolante (Figura 53).

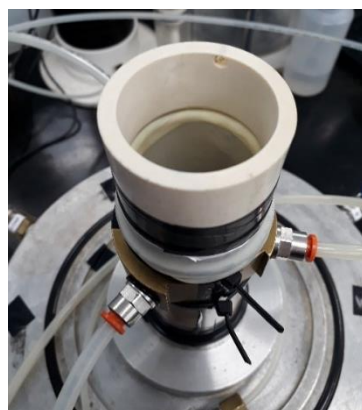


Figura 53 - Arranjo final do molde tripartido para moldagem do corpo de prova.

Na terceira etapa do ensaio era moldado o corpo de prova. Para tanto, primeiramente, um aparato de escape feito com folha de acetato e plástico era posicionado sobre o colarinho do molde tripartido para evitar o espalhamento de grãos no entorno da câmara durante a moldagem dos corpos de prova. O aparato de escape era dotado de mangueiras, para encaminhamento dos grãos da amostra a béqueres limpos posicionados sob as mangueiras (Figura 54). O corpo de prova era então moldado de acordo com o índice de vazios desejado (Figura 54), seguindo os procedimentos descritos na seção 3.7.1 para o índice de vazios máximo, e na seção 3.7.2 para os índices de vazios mínimo e intermediários. Finalizado o processo de moldagem do corpo de prova, limpava-se com um pincel o excesso de grãos no aparato de escape, evitando perturbar o corpo de prova. Por fim, removia-se cuidadosamente o aparato de escape, para dar início ao processo de saturação do corpo de prova por percolação.

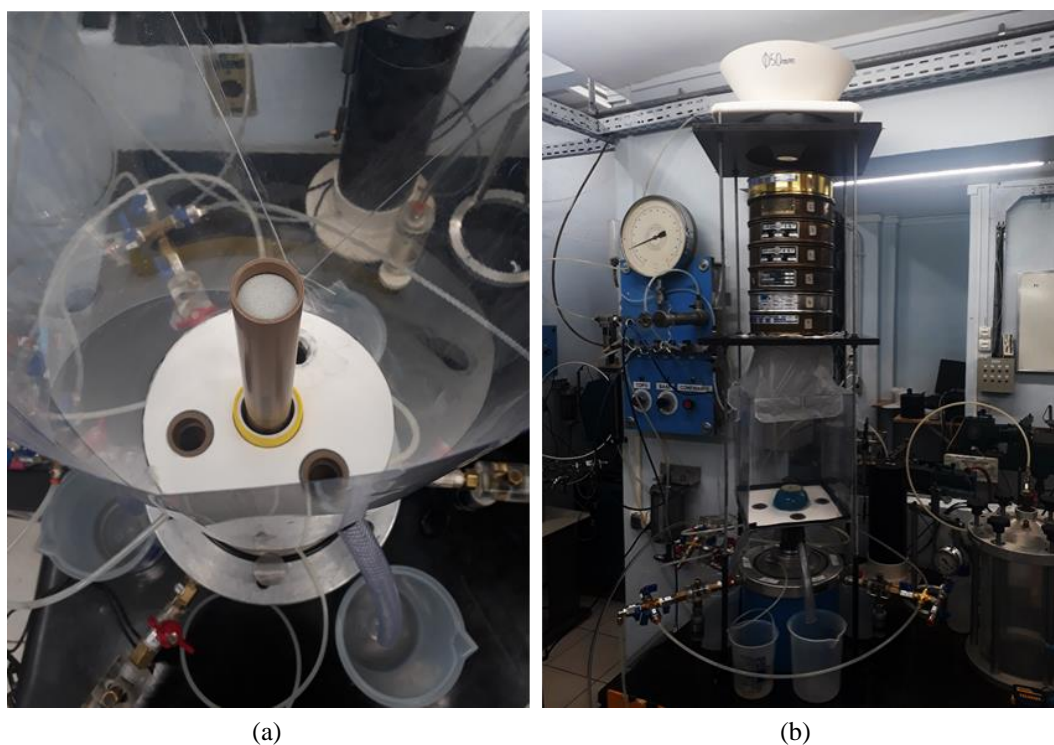


Figura 54 - Arranjo das moldagens do corpo de prova, sendo em (a) aparato de escape em formato de cone para moldagem com índice de vazios máximo e em (b) aparato de escape retangular para moldagem com índice de vazios intermediário e mínimo

Na quarta etapa eram realizados o processo de “saturação” do corpo de prova por percolação e a fixação do *top-cap*. Inicialmente, verificava-se o nível d’água na pipeta graduada, observando se o mesmo estava na marca correspondente à base do corpo de prova. Em seguida, abria-se a torneira da bureta graduada para

gotejamento de água (Figura 55), de modo que quando a água saísse da bureta essa percorreria o seguinte caminho: pipeta graduada e válvulas “17”, “15” e “B” (Figura 50). Com o uso da bureta graduada sabia-se o volume de água percolado no corpo de prova. Nesse momento, as demais válvulas do sistema externo encontravam-se fechadas. Pelo princípio dos vasos comunicantes, à medida que o nível d’água era elevado na pipeta graduada, devido ao gotejamento da bureta graduada nesse, o nível d’água também era elevado no corpo de prova. Após a chegada do nível d’água no topo do colarinho, retirava-se o aparato de escape e deixava-se percolar um volume de água equivalente a duas vezes o volume de vazios do corpo de prova, conforme já apresentado na seção 3.8.1 para o permeâmetro de parede rígida, sendo o volume de vazios calculado pela equação 28. Durante o processo de saturação por percolação, que durava cerca de três horas, a água que chegava ao topo do corpo de prova saía do colarinho por um extravasor, sob o qual havia um béquer que armazenava a água percolada. Ao fim da “saturação” por percolação, registrava-se um eventual abatimento do corpo de prova.

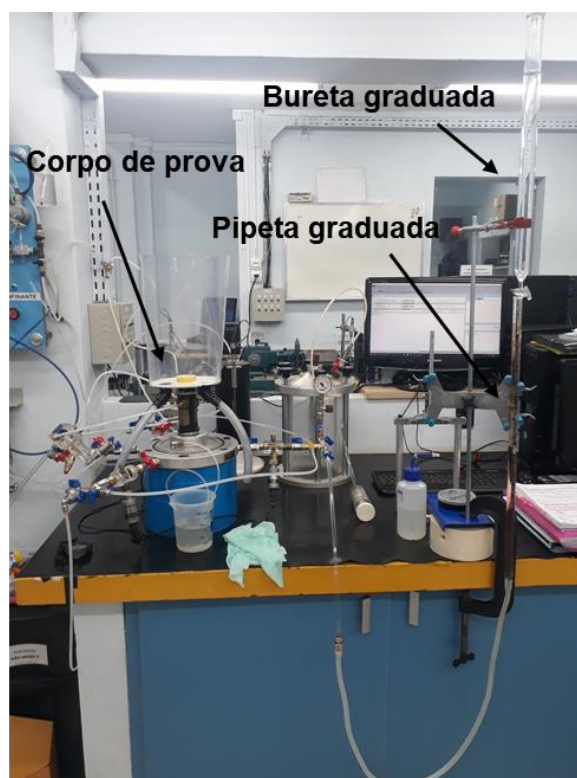


Figura 55 – “Saturação” por percolação do corpo de prova.

Para fixação do *top-cap*, inicialmente, fechavam-se as válvulas “17”, “15” e “B” e retirava-se a fita isolante do contato molde tripartido-colarinho. Em seguida,

removia-se o colarinho (Figura 56a) e arrasava-se o topo do corpo de prova junto ao topo do molde tripartido com uma espátula. Com o dedo e o auxílio de uma pisseta com água destilada, limpava-se as laterais da membrana, com bastante cuidado, para não haver grãos que pudessem perfurar a membrana durante o posicionamento do *top-cap*. Posteriormente, era inserido o disco de tela superior (de peneira nº 150) sobre o topo do corpo de prova e, logo em seguida, era fixado o *top-cap* sobre a tela e o molde tripartido, fazendo uso de uma barra de fixação (Figura 56b). O *top-cap* era posicionado já com a mangueira que o conectava à base da câmara saturada. Novamente, limpava-se as laterais da membrana para, então, puxar a membrana de modo a “vestir” o *top-cap*. Por fim, prendia-se a membrana à superfície lateral do *top-cap* com os dois o’rings que se encontravam na região superior do molde tripartido, sobre as braçadeiras plásticas, retirando, em seguida, a barra de fixação (Figura 56c). Os excessos de solo que se encontravam na base da câmara eram limpos e as fitas que tampavam as aberturas da base da câmara eram retiradas.

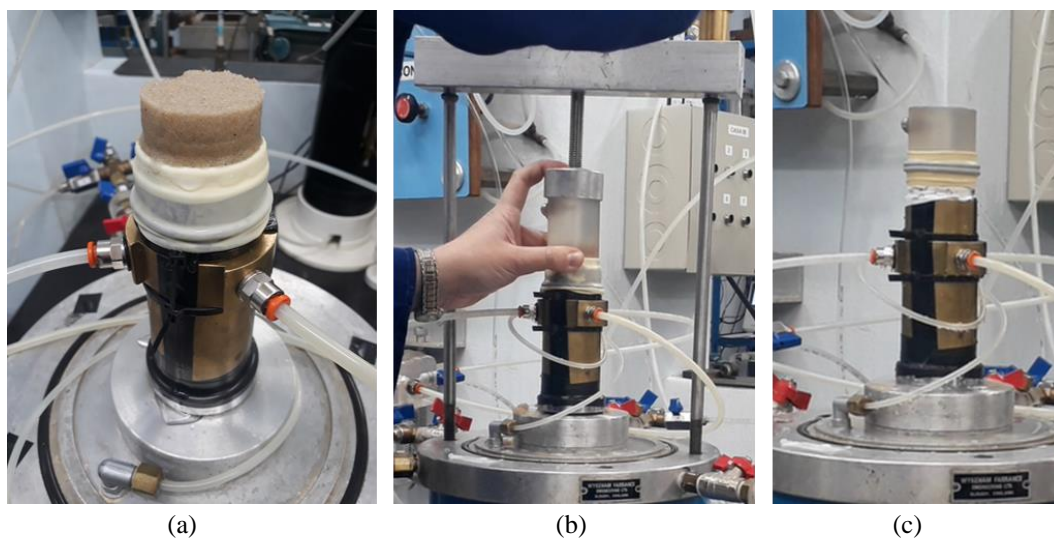


Figura 56 – Procedimentos para fixação do *top-cap*, sendo em (a) pós retirada do colarinho, (b) posicionamento do *top cap* com auxílio da barra de fixação e (c) pós posicionamento do *top-cap*.

Na quinta etapa do ensaio, era realizada a aplicação da sucção no corpo de prova e o enchimento da câmara com água. Assim, com a seringa já saturada (Figura 57a), essa era inserida na válvula “17”. A sucção era aplicada ao corpo de prova pelo caminho de válvulas: “17”, “13”, “11” e “6” (Figura 50). Para verificação da sucção aplicada, abria-se ainda a válvula “16”, na qual estava conectado um vacuômetro; a sucção era aplicada até um registro de 10 kPa (75 mm Hg) na leitura

do vacuômetro. Aplicada a sucção e verificada a constância da leitura de 10 kPa no vacuômetro (Figura 57b), realizava-se os seguintes procedimentos: (a) desligamento da bomba de vácuo; (b) corte das braçadeiras de plástico que prendiam as partes do molde tripartido; (c) retirada das fitas isolantes do molde tripartido; (d) retirada das partes do molde tripartido; (e) determinação da altura do corpo de prova de forma indireta, por meio de uma medida efetuada com um paquímetro de profundidade no corpo de prova (Figura 57c); e (f) medições das circunferências do corpo de prova envolvido pela membrana de látex, sendo uma medição no topo, uma no meio e uma na base (Figura 57d). A determinação da altura do corpo de prova era dita indireta pois o valor medido com o paquímetro de profundidade no corpo de prova era comparado a uma medida realizada antes da montagem do ensaio, exatamente com todos elementos em contato com o corpo de prova (telas e *top cap*), porém com um cilindro de aço de altura conhecida sobre o pedestal no lugar do corpo de prova; assim, comparando as medições, obtinha-se a altura real do corpo de prova.

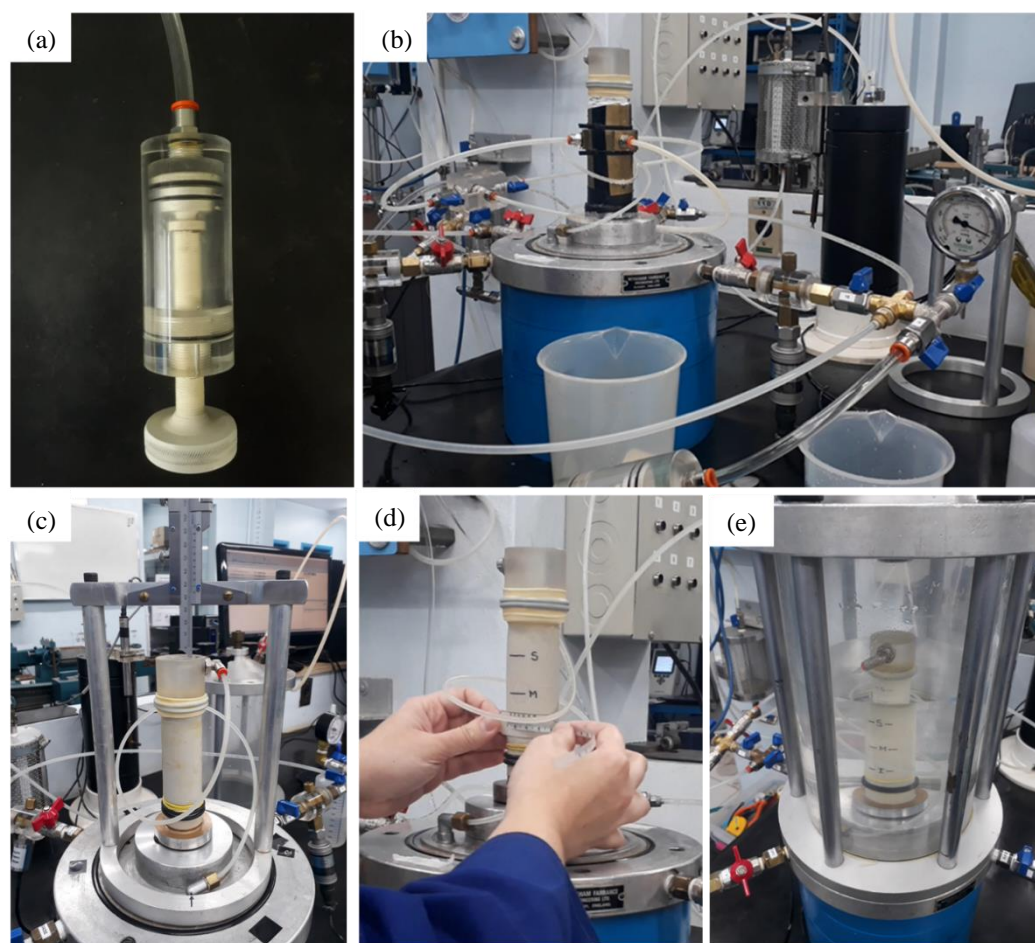


Figura 57 – Procedimentos da quinta etapa do ensaio, onde em: (a) a seringa de sucção; (b) sucção aplicada ao corpo de prova; (c) determinação da altura do corpo de prova; (d) medição das circunferências do corpo de prova; e (e) enchimento da câmara com água.

Na Figura 57d, o corpo de encontrava-se com uma sucção aplicada de 10 kPa e tensão total (σ) igual a zero, logo, a poropressão (u) era igual a - 10 kPa e, portanto, pelo Princípio das Tensões Efetivas (Terzaghi, 1936), cuja equação é $\sigma' = \sigma - u$, a tensão efetiva inicial (σ'_0) do corpo de prova era de 10 kPa.

Verificando, novamente, que a leitura da sucção no vacuômetro continuava estabilizada, ou seja, não tinha sido “zerada” (o que indicaria um furo na membrana), fechava-se a válvula “6” e, em seguida, as válvulas “11”, “13”, “17” e “16” (Figura 50). Retirava-se a seringa de sucção e, então, fechava-se a câmara para enchimento dessa com água (Figura 57e). A câmara era enchida pelo caminho de válvulas: “AA”, “AC”, “1”, “3” e “C” (Figura 50); permanecendo as demais válvulas fechadas. Após o enchimento da câmara, fechavam-se as válvulas “AA”, “AC”, “1” e “3” (Figura 50).

Na sexta etapa do ensaio era realizada a saturação do corpo de prova mediante acréscimos de contrapressão, com iguais a acréscimos de tensão total. Esse procedimento, comumente realizado em ensaios triaxiais, consiste em aumentar a poropressão (contrapressão) do corpo de prova em estágios, para que as bolhas de ar presentes nos vazios do corpo de prova dissolvam-se na água. Assim, para cada estágio, primeiramente aplicava-se, pelo topo da câmara (Figura 51a), um incremento de tensão total ($\Delta\sigma$). Em seguida, passando pelo MVV, era aplicada uma contrapressão (u_b) de modo que a tensão efetiva (σ') igual a 10 kPa, calculada como $\sigma' = \sigma - u$, não fosse alterada. A contrapressão era aplicada no topo e na base do corpo de prova pelo caminho de válvulas (Figura 50): “base” (da árvore), “9”, “7”, “11”, “12”, “13”, “15”, “T” e “B”, estando as demais válvulas do sistema, com exceção da válvula “C”, fechadas. As válvulas “T” e “B” eram as últimas a serem abertas, pois eram abertas de forma simultânea, após a estabilização do valor de contrapressão a ser aplicada no corpo de prova e registro do volume inicial do MVV e da hora inicial do estágio. Desse modo, quando aberta a drenagem do corpo de prova (pelas válvulas “T” e “B”) para aplicação do incremento de poropressão, a tensão efetiva inicial do corpo de prova (de 10 kPa) era mantida, sem que houvesse deformação volumétrica do mesmo.

Nesta pesquisa, foram realizados seis estágios de contrapressão. No primeiro, após o enchimento da câmara, com a válvula “6” aberta e as demais fechadas, aplicava-se, no topo da câmara, um incremento de tensão total ($\Delta\sigma$) de 50 kPa, seguido de uma aplicação de contrapressão (u_{b0}) de 40 kPa, sendo mantida assim a

tensão efetiva (σ') de 10 kPa. No segundo estágio, o incremento de tensão total também foi de 50 kPa, logo, o valor da tensão total (σ) era de 100 kPa e a contrapressão de 90 kPa. Do terceiro estágio em diante, os incrementos de tensão total e de contrapressão foram de 100 kPa, de modo que, no sexto estágio o valor da tensão total (σ) era de 500 kPa e da contrapressão (u_b) de 490 kPa.

Cada estágio de aplicação de contrapressão teve uma duração mínima de uma hora e meia (90 min). Durante esse tempo, no qual a drenagem permanecia aberta, a variação volume de água que saía do MVV para o corpo de prova era monitorada. O volume de água que entrava no corpo de prova deveria corresponder exclusivamente à variação do volume das bolhas de ar presentes nos vazios do corpo de prova, que eram comprimidas e dissolvidas na água. Sem variação da tensão efetiva no corpo de prova, de acordo com o Princípio das Tensões Efetivas (Terzaghi, 1936), ao menos em teoria, não havia variação de volume do corpo de prova, embora tal fato não tenha sido monitorado durante o ensaio.

Ao final de cada estágio de aplicação de contrapressão, a saturação do corpo de prova era avaliada por meio da medição do parâmetro B de Skempton (1954), de modo que: $B = \frac{\Delta u}{\Delta \sigma}$. Foram realizadas seis medições do parâmetro B, sendo o primeiro B determinado após o primeiro estágio de aplicação de contrapressão, isso porque, como os transdutores não mediam pressões relativas negativas, o valor de B do estágio 0 não era medido, sendo esse correspondente à poropressão inicial de -10 kPa e a um incremento de tensão total ($\Delta \sigma$) de 50 kPa, com a drenagem do corpo de prova fechada, logo, com as válvulas “T” e “B” abertas, porém com as válvulas “12” e “15” fechadas (Figura 50).

Para a medição do parâmetro B, após finalizado um estágio de aplicação de contrapressão, fechavam-se simultaneamente as válvulas “12” e “15” (Figura 50). Em seguida, aplicava-se o incremento de tensão total correspondente ao próximo estágio ($\Delta \sigma$), registrando as decorrentes variações de poropressão (Δu) acusadas pelas leituras dos transdutores de poropressão “TT” e “TB”. Esperava-se cerca de 60 s para registro das leituras dos transdutores. Após a determinação do parâmetro B, fechavam-se as válvulas “T” e “B”, e abriam-se as válvulas “12” e “15” para o ajuste da contrapressão a ser aplicada no próximo estágio.

Na sétima etapa do ensaio era realizado o estabelecimento de fluxo de água pelo corpo de prova, para cálculo da condutividade hidráulica (k), cujo esquema é

apresentado na Figura 58. Assim, observando a Figura 58, tinha-se que: (a) pela válvula de “base” da árvore ajustava-se a pressão de ar comprimido, que pressurizava a água destilada da primeira interface ar-água até a base do corpo de prova; (b) a água sob a pressão ajustada percolava pelo caminho de válvulas: “10”, “7”, “5”, “4”, “2” e “15”, passando ainda pelo transdutor de poropressão da base (TB) e pela válvula “B” (ver também Figura 50); (c) no corpo de prova, o fluxo ocorria de forma ascendente, ou seja, no sentido da base para o topo; (d) passando pelo *top-cap*, a água percolava pelo tubo de drenagem interna, que conectava o *top-cap* à base da câmara, passando, em seguida, pelas válvulas “T” e pelo transdutor de poropressão do topo (TT); (e) saindo do transdutor de poropressão do topo “TT”, o fluxo continuava pelas válvulas “12” e “14”, entrando, então, no rotâmetro; (f) no rotâmetro, registrava-se a vazão do fluxo; (g) por fim, o fluxo continuava até entrar na segunda interface ar-água, cuja pressão de ar comprimido era ajustada pelo válvula de “topo” da árvore, fechando-se o ciclo.

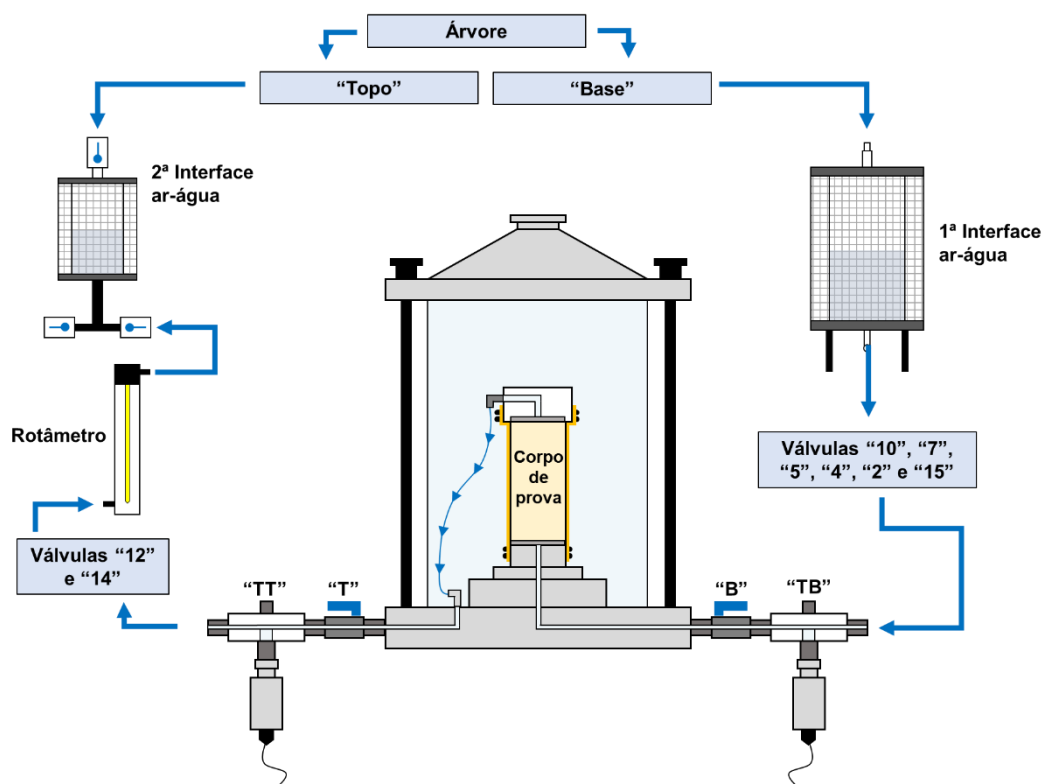


Figura 58 - Esquema do estabelecimento de fluxo no corpo de prova.

Apresenta-se, a seguir, o cálculo das diferenças de carga hidráulica (Δh) aplicadas entre a base e o topo do corpo de prova para a imposição dos gradientes hidráulicos (i) nas fases de estabelecimento de fluxo (Figura 59).

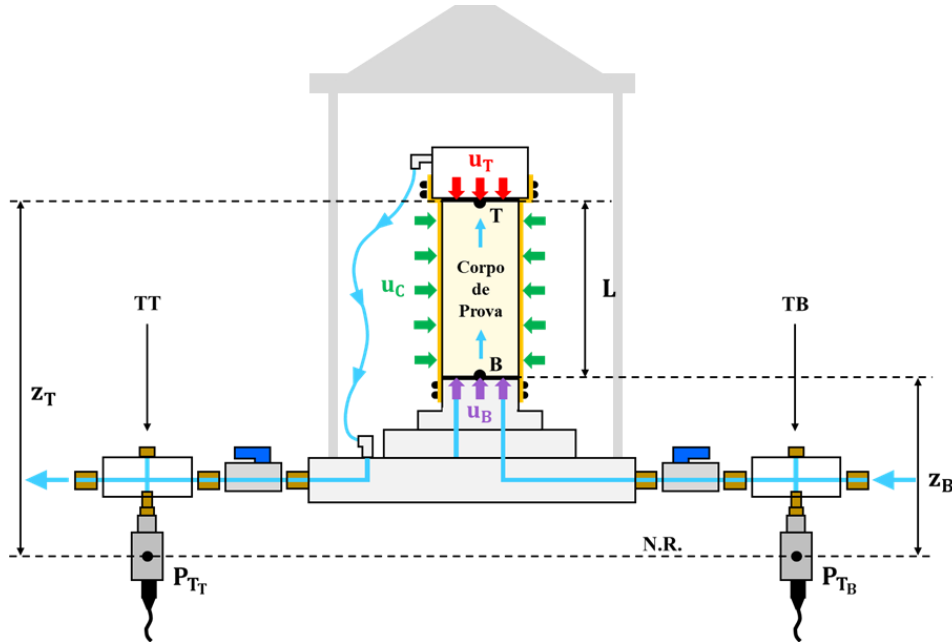


Figura 59 - Esquema de apresentação das pressões aplicadas no corpo de prova.

Fixando o nível de referência (NR) passando pelos transdutores de pressão do topo e da base (Figura 59), tinha-se que, pela equação de Bernoulli, as cargas hidráulicas na base (h_B) e no topo (h_T) do corpo de prova eram:

$$h_B = z_B + \frac{u_B}{\gamma_w} \quad (36)$$

$$h_T = z_T + \frac{u_T}{\gamma_w} \quad (37)$$

onde, h_B = carga hidráulica total na base do corpo de prova;

h_T = carga hidráulica total no topo do corpo de prova;

z_B = altura da base do corpo de prova em relação ao nível de referência;

z_T = altura do topo do corpo de prova em relação ao nível de referência;

u_B = poropressão na base do corpo de prova;

u_T = poropressão no topo do corpo de prova;

γ_w = peso específico da água.

Como o fluxo era estabelecido da base para o topo do corpo de prova, logo, $h_B > h_T$; assim, sendo L a altura do corpo de prova ($L = z_T - z_B$), a diferença entre as cargas hidráulicas na base (h_B) e no topo (h_T) era, portanto:

$$h_B - h_T = \left(z_B + \frac{u_B}{\gamma_w} \right) - \left(z_T + \frac{u_T}{\gamma_w} \right) \quad (38)$$

$$h_B - h_T = (z_B - z_T) + \frac{(u_B - u_T)}{\gamma_w} \quad (39)$$

$$h_B - h_T = \frac{(u_B - u_T)}{\gamma_w} - L \quad (40)$$

Sendo o gradiente hidráulico (i) a razão entre a diferença de carga hidráulica (Δh) e a altura do corpo de prova (L), tem-se que o gradiente hidráulico (i) imposto entre a base e o topo do corpo de prova era:

$$i = \frac{\Delta h}{L} = \frac{h_B - h_T}{L} \quad (41)$$

$$i = \frac{(u_B - u_T)}{\gamma_w L} - 1 \quad (42)$$

Portanto, a diferença entre as poropressões na base (u_B) e no topo (u_T) em função do gradiente hidráulico (i) imposto era:

$$u_B - u_T = \gamma_w L (i + 1) \quad (43)$$

As pressões de água lidas nos transdutores de pressão da base (P_{TB}) e do topo (P_{TT}) em função das respectivas poropressões eram dadas por:

$$P_{TB} = u_B + z_B \gamma_w \quad (44)$$

$$P_{TT} = u_T + z_T \gamma_w \quad (45)$$

Portanto, pode-se escrever que:

$$u_B = P_{TB} - z_B \gamma_w \quad (46)$$

$$u_T = P_{TT} - z_T \gamma_w \quad (47)$$

Substituindo as equações 46 e 47 acima na equação 43, tem-se que a diferença imposta entre as leituras dos transdutores de pressão da base (P_{TB}) e do topo (P_{TT}) para um dado gradiente hidráulico (i) a ser imposto era dada por:

$$(P_{TB} - z_B \gamma_w) - (P_{TT} - z_T \gamma_w) = \gamma_w L (i + 1) \quad (48)$$

$$P_{TB} - P_{TT} = \gamma_w L i \quad (49)$$

Por outro lado, a média entre a poropressão do topo (u_T) e a poropressão da base (u_B) deveria ser equivalente à contrapressão (u_b) imposta ao corpo de prova no estágio anterior ao estabelecimento do fluxo, de modo que:

$$u_T + u_B = 2 u_b \quad (50)$$

Substituindo na equação 50, acima, as equações 46 e 47, tem-se que:

$$P_{TB} + P_{TT} = 2 u_b + \gamma_w (z_T + z_B) \quad (51)$$

Assim, resolvendo o sistema dado pela equação 49 e pela equação 51, onde as incógnitas a serem descobertas são P_{TB} e P_{TT} , tinha-se que as leituras de pressão nos transdutores de poropressão (P_{TT} e P_{TB}) para estabelecer um fluxo pelo corpo de prova com um gradiente hidráulico (i) deveriam ser:

$$P_{TB} = u_b + \frac{\gamma_w}{2} (z_B + z_T + L i) \quad (52)$$

$$P_{TT} = u_b + \frac{\gamma_w}{2} (z_B + z_T - L i) \quad (53)$$

Desse modo, após a última determinação do parâmetro B , fechavam-se as válvulas “T” e “B” e abriam-se as válvulas “12” e “15” (Figura 50). Em seguida, fechava-se a válvula “9”, conectada ao MVV, e abria-se a válvula “10”, conectada à primeira interface ar-água (Figura 50). Em seguida, abriam-se as válvulas “5”, “4” e “2” e fechavam-se as válvulas “11” e “13”. Estabelecia-se a poropressão da base do corpo de prova (u_B), impondo ao transdutor de pressão da base (TB) a leitura de pressão P_{TB} , pela válvula da “base” na árvore. Posteriormente, abria-se a válvula “14” e, pela válvula de “topo” da árvore, aplicava-se a poropressão do topo

do corpo de prova (u_T), impondo ao transdutor de pressão do topo (TT) a leitura de pressão P_{TT} . Com a diferença de carga hidráulica a ser aplicada entre a base e o topo do corpo de prova ajustada, abriam-se, de forma simultânea, as válvulas “T” e “B”, impondo o gradiente hidráulico (i) e liberando o fluxo de água pelo corpo de prova.

Conforme apresentado na Figura 58, antes da água percolada pelo corpo de prova ser armazenada na segunda interface ar-água, essa passava por um rotâmetro, que registrava a vazão do fluxo em ml/min. Assim, a cada um minuto, era registrado um valor de leitura da vazão no rotâmetro. Ainda, durante todo o período de fluxo, por meio do software *CatmanAP*, eram registradas as leituras dos três transdutores de pressão (confinante, base e topo).

Finalizado o fluxo, fechavam-se as válvulas “T” e “B”, e em seguida, a válvula “14” (Figura 50). Abriam-se, então, as válvulas “11” e “13” e diminuía-se a pressão aplicada à primeira interface ar-água, para o seu enchimento de água para o próximo fluxo. Esgotava-se ainda a água da segunda interface ar-água abrindo-se a válvula de sua base para a atmosfera (Figura 58).

Em cada ensaio de permeabilidade no permeâmetro de parede flexível, eram realizadas três fases de estabelecimento de fluxo sob diferentes tensões efetivas, sendo que, em cada fase, eram impostos três gradientes hidráulicos (i), cujos valores eram de: 1, 2 e 3. Ainda, para cada gradiente hidráulico imposto, eram realizados três estabelecimentos de fluxo. A primeira fase de fluxo era realizada logo após a leitura do último parâmetro B, estando corpo de prova sob uma tensão total (σ) de 500 kPa e uma contrapressão (u_b) de 490 kPa, ou seja, com uma tensão efetiva de 10 kPa. A segunda fase era realizada após o primeiro estágio de adensamento, no qual o corpo de prova encontrava-se sob uma tensão total (σ) de 590 kPa e uma contrapressão (u_b) de 490 kPa, logo, com uma tensão efetiva de 100 kPa. A terceira e última fase era realizada após o segundo estágio de adensamento, sob uma tensão total (σ) de 790 kPa e uma contrapressão (u_b) de 490 kPa, ou seja, com uma tensão efetiva de 300 kPa.

Os estágios de adensamento representavam a oitava etapa do ensaio. Após a finalização da primeira fase de estabelecimento do fluxo para determinação da condutividade hidráulica (k) sob tensão efetiva (σ') de 10 kPa, executava-se o primeiro estágio de adensamento hidrostático do corpo de prova para a tensão efetiva (σ') de 100 kPa.

Para tanto, uma vez finalizada a etapa de estabelecimento do fluxo, eram fechadas as válvulas “T”, “B” e “14” e abertas as válvulas “11” e “13” (Figura 50). Após o enchimento da primeira interface ar-água, fechavam-se as válvulas “10”, “5”, “4” e “2” e abria-se a válvula “9”. Pelo topo da câmara, aplicava-se o valor de tensão total (σ), que correspondia à soma do valor da contrapressão (u_b) de 490 kPa e o valor da tensão efetiva (σ') a ser aplicada ao corpo de prova no fim do estágio de adensamento. Em seguida, pela válvula “base” da árvore, ajustava-se a contrapressão de 490 kPa a ser aplicada na base e no topo do corpo de prova, seguindo o caminho passando pelo MVV (que também funcionava como interface ar comprimido-água) e pelas válvulas abertas “9”, “7”, “11”, “12”, “13” e “15”, mantendo as válvulas “T” e “B” fechadas. Registrado o valor inicial de volume do MVV e a hora do início de abertura da drenagem, abriam-se simultaneamente as válvulas “T” e “B”, dando início ao adensamento do corpo de prova. Durante o adensamento, as leituras do MVV, assim como as dos três transdutores de pressão, eram registradas no microcomputador. Deixava-se, no mínimo, 30 minutos a drenagem aberta. Por fim, fechavam-se as válvulas “T” e “B” e repetia-se a sétima etapa do ensaio (estabelecimento de fluxo para determinação de k) com o corpo de prova sob o novo valor de tensão efetiva aplicado.

Eram realizados dois estágios de adensamento hidrostático, sendo: (a) o primeiro para uma tensão efetiva (σ') de 100 kPa, ou seja, com a tensão total (confinante) de 590 kPa e contrapressão de 490 kPa; e (b) o segundo para uma tensão efetiva (σ') de 300 kPa, isto é, com a tensão total (confinante) de 790 kPa e a contrapressão de 490 kPa.

Após a última fase de estabelecimento de fluxo, sob a tensão efetiva (σ') de 300 kPa, realizava-se a nona (e última) etapa do ensaio, que consistia na retirada do corpo de prova da câmara para determinação do seu peso seco, isto é, do peso dos grãos. Assim, aliviada as pressões nas interfaces ar-água e a imposta à água de confinamento pelo topo da câmara, fechavam-se todas as válvulas do sistema, com exceção da válvula “C”. Abrindo-se as válvulas “3” e “1” do sistema externo e “AC” e “AD” da árvore, estando “AA” fechada, a água da câmara era esgotada, saindo por uma mangueira conectada à válvula “AD”. Com a câmara despressurizada, esta era aberta e o corpo de prova desmoldado. O procedimento de desmoldagem do corpo de prova era realizado da seguinte forma: (a) ainda com o

top-cap conectado à membrana de látex e ao corpo de prova, puxava-se esse conjunto em um movimento vertical, fechando a base da membrana desprendida do pedestal com a mão; (b) depositava-se o conjunto em um prato metálico limpo, de peso previamente determinado; (c) sobre o prato, com auxílio de uma pisseta, injetava-se água na parte interna da membrana de modo que os grãos do corpo de prova fluíssem caindo sobre o prato; (d) lavava-se o disco de tela superior; (e) observado que o *top-cap* mais membrana estavam praticamente sem grãos, retiravam-se a membrana e os *o' rings* superiores do *top-cap*, e lavavam-se o *top-cap*, a membrana e os *o' rings* sobre o prato, evitando qualquer perda de grão; (f) por fim, os eventuais grãos que permaneciam sobre o pedestal da câmara eram também colocados no prato, junto com o disco de tela inferior, o qual era lavado no prato. Com todos os grãos do corpo de prova transferidos para o prato metálico, esse era colocado para secar em estufa por 24 horas, para, finalmente, ser determinado o peso seco do corpo de prova.

4. Resultados obtidos e análises

4.1 Caracterização das amostras

4.1.1 Salinidade da areia da Praia de Ipanema

A determinação da salinidade da água em contato com a amostra da areia da Praia de Ipanema após os procedimentos de limpeza teve o intuito de descartar possíveis influências do teor de sal na condutividade hidráulica. Desse modo, compreendendo que a salinidade da água não possui influência significativa (em termos de dispersão) nos grãos das areias, a salinidade poderia alterar as características do fluido (água) percolante, aumentando o seu peso específico e, por conseguinte, alterando o valor da condutividade hidráulica.

Conforme apresentado na seção 3.2.1, as salinidades das amostras foram calculadas com base em seus valores de condutividade elétrica (CE), pela equação 17, novamente indicada:

$$\text{Salinidade (g/L)} = 0,4665 \cdot (\text{CE em mS/cm})^{1,0878}$$

Desse modo, como pode ser observado na Figura 60, a condutividade elétrica da areia da Praia de Ipanema ensaiada por Costa (2020), areia da Praia de Ipanema natural (sem lavagem) e areia da Praia de Ipanema pós-lavagem foi de: 30 $\mu\text{S/cm}$, 293 $\mu\text{S/cm}$ e 15 $\mu\text{S/cm}$, respectivamente.

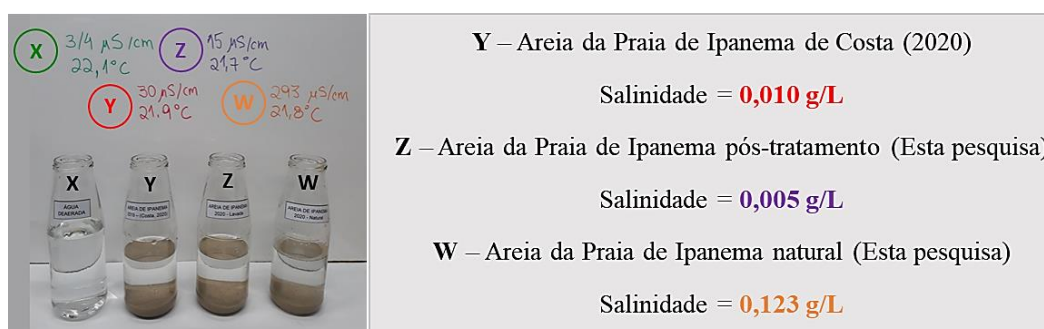


Figura 60 - Salinidades da areia da Praia de Ipanema.

De posse dos valores medidos de condutividade elétrica, obteve-se a salinidade da areia da Praia de Ipanema ensaiada por Costa (2020) igual a 0,010 g/L; da areia da Praia de Ipanema natural (sem lavagem) igual a 0,123 g/L; e, da areia da Praia de Ipanema pós-lavagem igual a 0,005 g/L.

Conforme a Resolução CONAMA N° 357/2005, classificam-se as águas como:

- água doce: para salinidade igual ou inferior a 0,05 % ($\leq 0,50$ g/L);
- água salobra: para salinidade entre 0,05 % e 3,0 % (0,50 a 30 g/L);
- água salina: para salinidade igual ou superior a 3,0 % (≥ 30 g/L).

Conclui-se, portanto, que todas as soluções analisadas são classificadas como “água doce”, ou seja, sem teor significativo de sal dissolvido. Ademais, observa-se que o processo de limpeza da amostra da areia da Praia de Ipanema realizado nesta pesquisa reduziu pela metade a salinidade da amostra quando comparada à de Costa (2020). A Tabela 8 apresenta um resumo dos procedimentos de cada pesquisa.

Tabela 8 - Procedimentos de limpeza da areia da Praia de Ipanema por Costa (2020) e presente pesquisa

Procedimento	Costa (2020)	Presente pesquisa
01	Passada na peneira de nº 10 (# 2,00 mm), não havendo retenção de grãos, somente sujeiras.	Deixada imersa em água destilada por 36 horas (com sete trocas de água).
02	Seca em estufa a 60° C por 42 horas.	Lavada sobre a peneira nº 200 (# 0,075 mm), não havendo passagem de grãos.
03	Lavada sobre a peneira nº 200 (# 0,075 mm), não havendo passagem de grãos.	Seca em estufa a 60° C por 42 horas.
04	Deixada imersa em água destilada por 24 horas (com duas trocas de água).	-
05	Seca em estufa a 60° C.	-

4.1.2 Microscopia

Conforme referido na seção 3.3, duas imagens obtidas em microscópio foram analisadas no *software* de processamento de imagens *ImageJ* para a determinação

do arredondamento (R) e da esfericidade (S) dos grãos da amostra da areia da Praia de Ipanema e da amostra de microesferas de vidro. Na Figura 61, as imagens da Figura 61a e da Figura 61c foram obtidas pelo microscópio “M1”, apresentando, respectivamente, os grãos da areia da praia de Ipanema e as microesferas de vidro; à direita dessas imagens, nas Figuras 61b e 61d, são apresentadas as imagens do microscópio processadas no *software*.

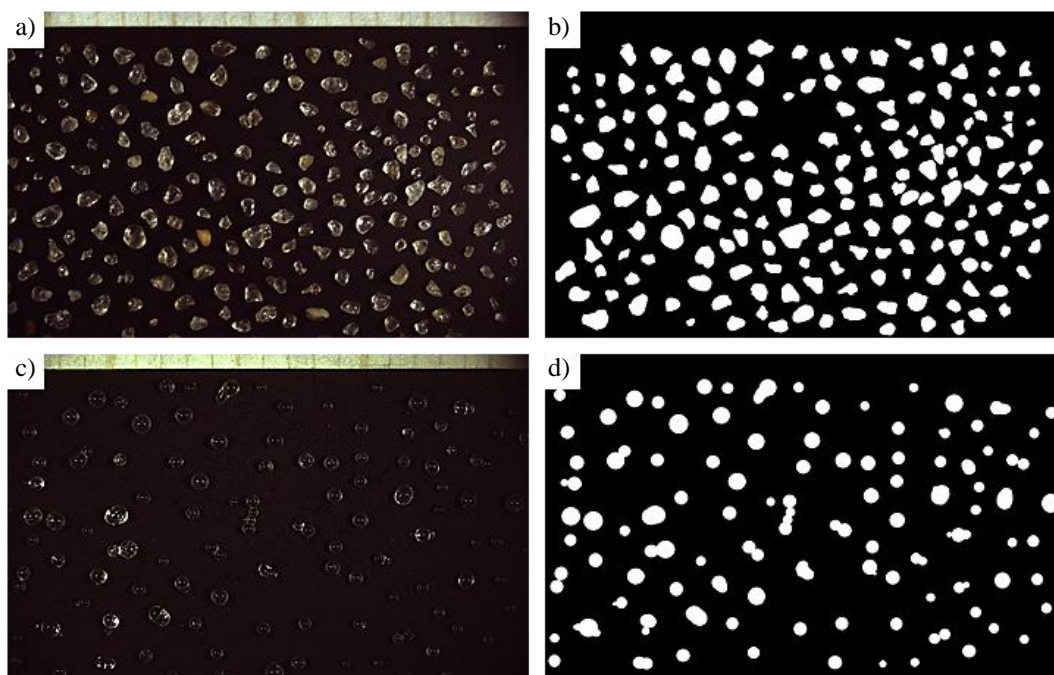


Figura 61 - Imagens analisadas para a determinação do arredondamento e da esfericidade dos grãos da amostra da areia da Praia de Ipanema e das microesferas de vidro.

Comparando a Figura 61a com a Figura 61b e a Figura 61c com a Figura 61d observa-se que, além da escala, alguns grãos foram excluídos. Essa exclusão ocorreu devido a um dos seguintes motivos: o formato incompleto do grão, devido ao corte limite da imagem; ou, a baixa nitidez da forma do grão. Ressalta-se que todos os grãos apresentados foram separados individualmente, para que um contato entre esses não resultasse em um erro no processamento da imagem no *software*, o qual poderia considerar os grãos em contato como um único grão.

Os resultados dos processamentos das imagens são apresentados em histogramas, nos quais se pode observar a quantidade dos grãos por classes, as quais variam de 0,00 a 1,00, em intervalos de 0,10 (logo, totalizando dez classes). As Figuras 62 e 63 apresentam o histograma e a curva de distribuição normal do conjunto de 117 grãos da areia da Praia de Ipanema analisados quanto ao

arredondamento (R) e à esfericidade (S), respectivamente. Para o arredondamento (R), a faixa de maior frequência de grãos foi a da classe de 0,70 a 0,80; para a esfericidade (S), a faixa de maior frequência foi a da classe de 0,60 a 0,70. As curvas de distribuição normal apresentaram um valor médio de $R = 0,78$ e $S = 0,73$.

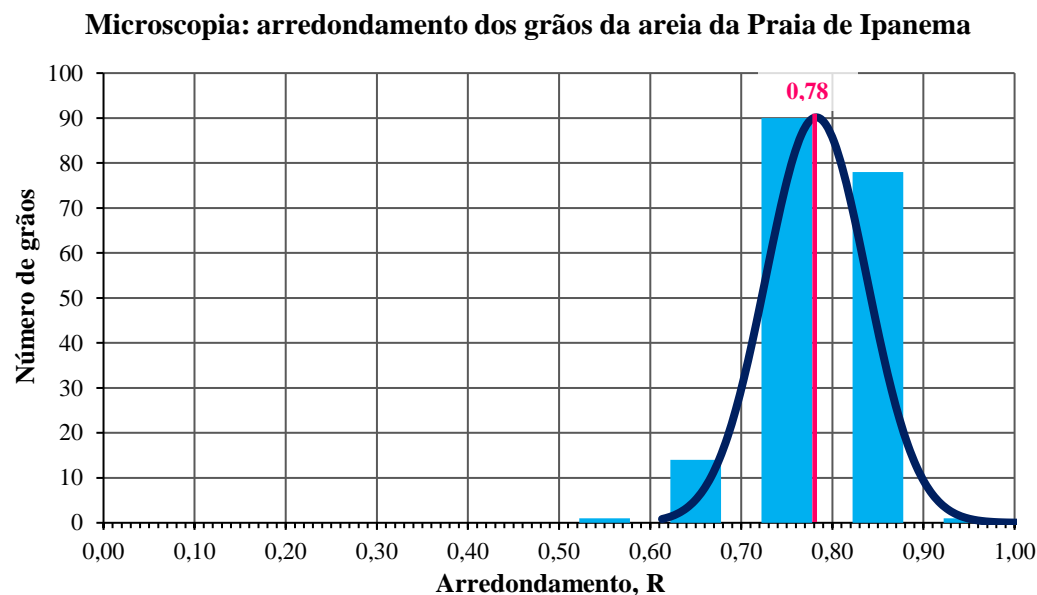


Figura 62 - Histograma e curva de distribuição normal do arredondamento dos grãos da areia da Praia de Ipanema.

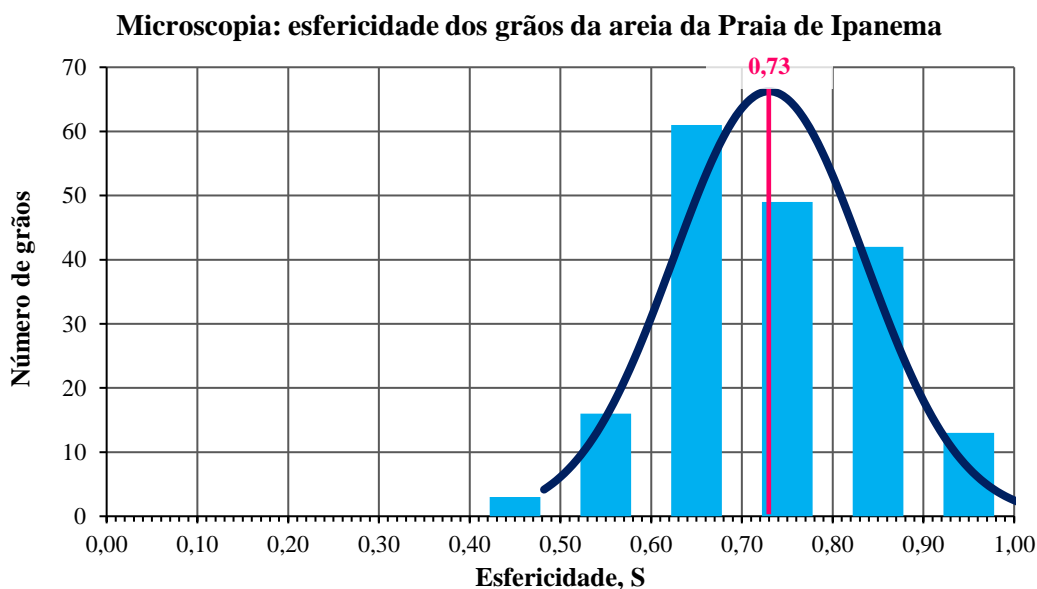


Figura 63 - Histograma e curva de distribuição normal da esfericidade dos grãos da areia da Praia de Ipanema.

O histograma e a curva de distribuição normal do arredondamento (R) e da esfericidade (S) do conjunto de 98 microesferas de vidro analisadas são

apresentados, respectivamente, nas Figuras 64 e 65. Nessas figuras, observa-se que a classe de 0,90 a 1,00 foi a de maior frequência de grãos tanto para o arredondamento (R) quanto para a esfericidade (S). Das curvas de distribuição normal obteve-se um valor médio de $R = 0,87$ e $S = 0,88$.

Microscopia: arredondamento das microesferas de vidro

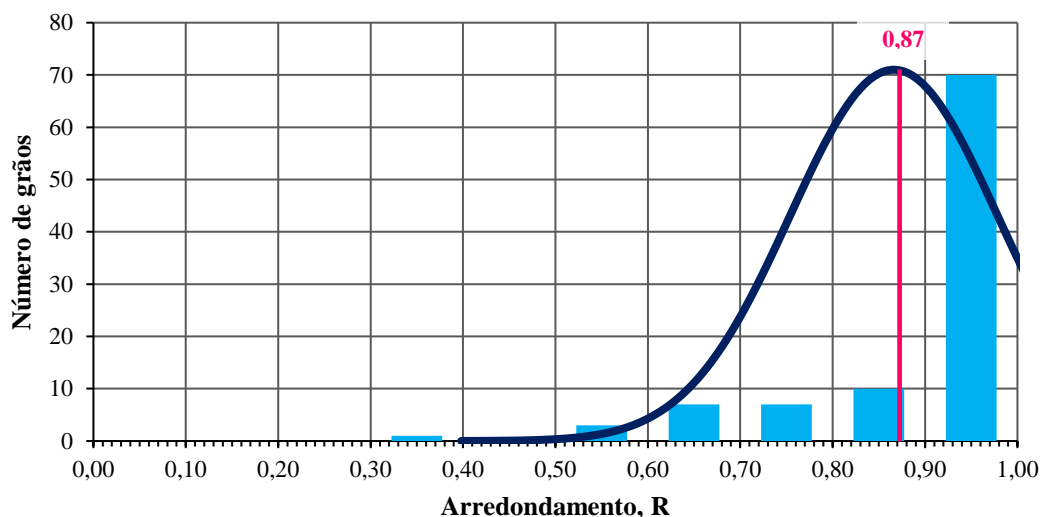


Figura 64 - Histograma e curva de distribuição normal do arredondamento das microesferas de vidro.

Microscopia: esfericidade das microesferas de vidro

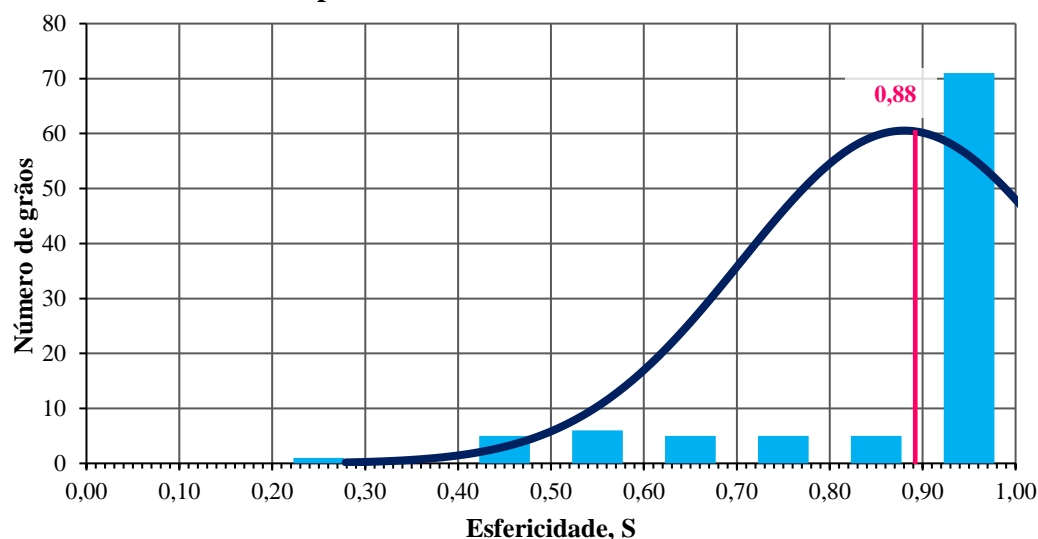


Figura 65 - Histograma e curva de distribuição normal da esfericidade das microesferas de vidro.

Das curvas de distribuição normal verifica-se que o conjunto de microesferas de vidro apresentou curvas de “base” mais largas que as obtidas para o conjunto de grãos da areia da Praia de Ipanema, ou seja, as microesferas de vidro apresentaram uma maior dispersão. Logo, os valores do desvio padrão do arredondamento e da

esfericidade para o conjunto de grãos da areia da Praia de Ipanema foram menores que os do conjunto de microesferas de vidro. Para o conjunto de grãos analisados da areia da Praia de Ipanema, o desvio padrão foi de 0,06 e 0,11, respectivamente, para o arredondamento e para a esfericidade. Para o conjunto de microesferas de vidro, os valores de desvio padrão foram de 0,11 e 0,18 para o arredondamento e para a esfericidade, respectivamente.

Além disso, uma classificação dos aspectos da forma dos grãos das Figuras 61a e 61c foi realizada com base nas escalas gráficas de Powers (1953) e Cho *et al.* (2006), apresentadas na seção 2.1.2. Dessa forma, os grãos da areia da Praia de Ipanema (Figura 66) foram classificados como subarredondados a arredondados, com base em Powers (1953), possuindo um valor tanto para o arredondamento quanto para a esfericidade entre 0,5 e 0,7, pela escala de Cho *et al.* (2006).

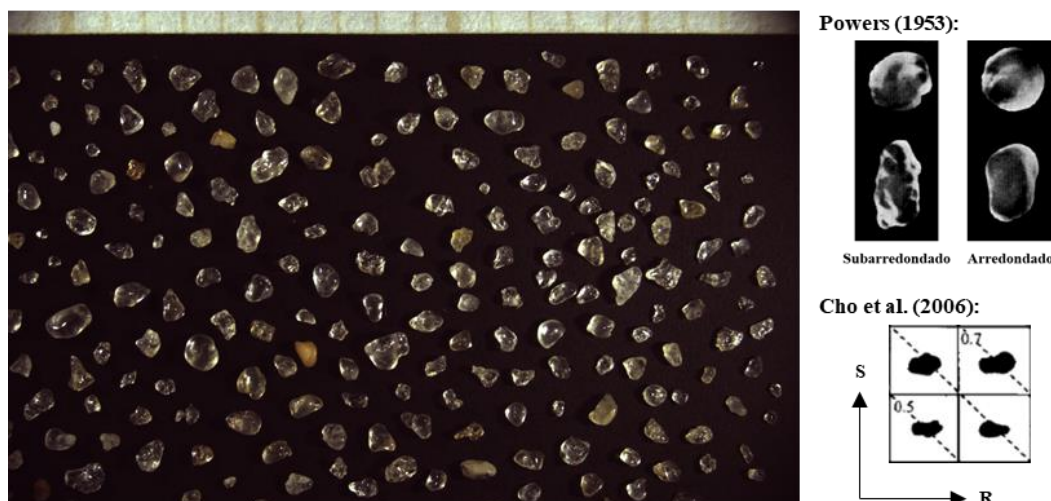


Figura 66 – Classificação dos grãos da areia da Praia de Ipanema por meio das escalas gráficas de Powers (1953) e Cho *et al.* (2006).

Conforme mencionado na seção 3.3, esta autora desconsiderou os defeitos (angulares) na análise da forma dos grãos da amostra de microesferas de vidro, visto que há uma predominância de grãos esféricos. Sendo assim, os grãos da amostra de microesferas de vidro foram classificados como bem arredondados, com base na escala de Powers (1953), com valor 0,9 tanto para o arredondamento quanto para a esfericidade, pela escala de Cho *et al.* (2006).

Por fim, considerando os resultados apresentados nas análises da forma dos grãos em *software* e por escalas gráficas, nesta pesquisa, os grãos da amostra da areia da Praia de Ipanema são classificados como subarredondados a arredondados,

com valor de arredondamento igual a 0,70 e esfericidade igual a 0,65. Por sua vez, as microesferas de vidro foram classificadas como bem arredondadas, sendo tanto o arredondamento quanto a esfericidade iguais a 0,95.

4.1.3

Granulometria da amostra da areia da Praia de Ipanema

Conforme detalhado na sessão 3.4, os ensaios de granulometria foram realizados por peneiramento. Foi determinada uma curva granulométrica para cada quadrante obtido por processo de quarteamento. Para a amostra da areia da Praia de Ipanema, o procedimento de quarteamento foi realizado duas vezes. No primeiro quarteamento, para cada quadrante de 125 gf, pesou-se 120 gf de material para peneiramento na seguinte sequência de peneiras: nº 16 (# 1,200 mm); nº 30 (# 0,600 mm); nº 40 (# 0,420 mm); nº 60 (# 0,250 mm); nº 100 (# 0,149 mm) e nº 200 (# 0,075 mm); denominada de série 1. Essa sequência de peneiras da série 1 é apresentada na ABNT (2016). No segundo quarteamento, as 120 gf obtidas de cada quadrante foram peneiradas na seguinte sequência de peneiras: nº 16 (# 1,200 mm); nº 20 (# 0,840 mm); nº 30 (# 0,600 mm); nº 40 (# 0,420 mm); nº 50 (# 0,300 mm); nº 60 (# 0,250 mm); nº 70 (# 0,210 mm); nº 100 (# 0,149 mm) e nº 200 (# 0,075 mm); denominada série 2.

Portanto, ao todo foram determinadas oito curvas granulométricas para a amostra da areia da Praia de Ipanema, apresentadas na Figura 67, sendo quatro referentes à série 1 e quatro à série 2. Em conjunto, ainda na Figura 67, são apresentadas as 20 curvas granulométricas apresentadas em Costa (2020) e as três de Simões (2015), visto que ambas são provenientes de amostras da areia da Praia de Ipanema coletadas no mesmo local da utilizada nesta pesquisa (vide seção 3.1.1). Observa-se uma proximidade entre as curvas dos referidos autores e as obtidas nesta pesquisa, havendo uma leve discrepância no trecho inferior, em torno da peneira de nº 50 (0,300 mm), principalmente em relação às apresentadas por Simões. Ainda no que diz respeito às discrepâncias, observa-se uma influência das peneiras intermediárias (nº 20, nº 50 e nº 70) nos trechos superiores e inferiores das curvas granulométricas desta pesquisa.

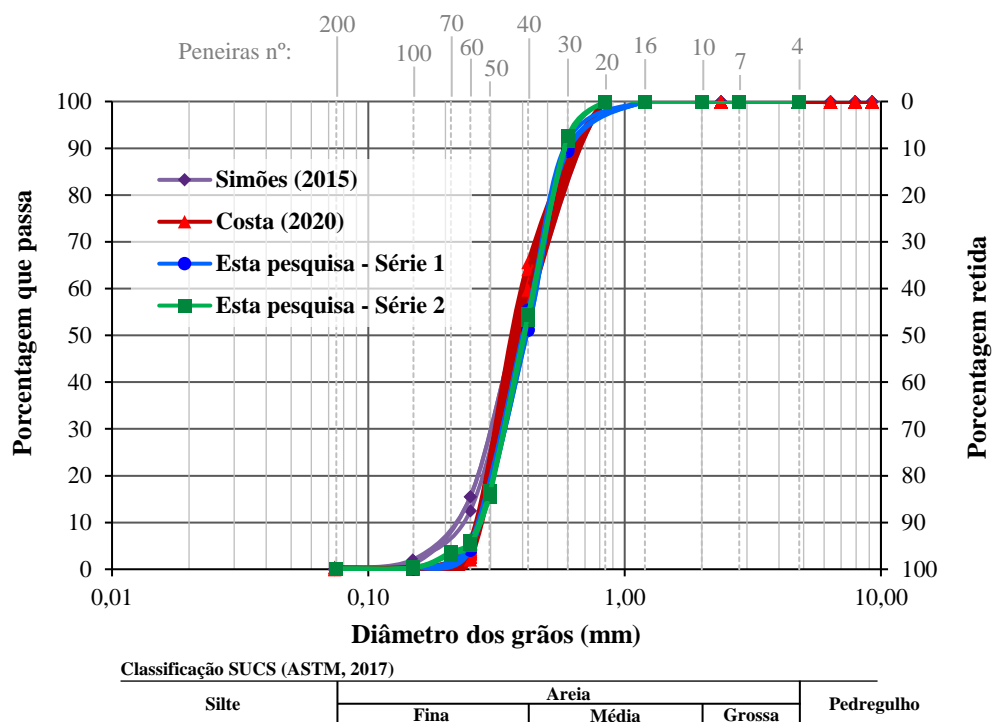


Figura 67 - Curvas granulométricas da areia da Praia de Ipanema obtidas nesta pesquisa e pelos demais autores Simões (2015) e Costa (2020).

Conforme mencionado na seção 2.1.3, as normas ASTM (2017) e ABNT (1995) classificam os solos com base nos valores de D_{10} , D_{30} , e D_{60} determinados na curva granulométrica, sendo esses os diâmetros abaixo dos quais se situam 10 %, 30 %, e 60 % dos grãos da amostra em peso, respectivamente. A Figura 68 apresenta as curvas granulométricas obtidas usando a série 2 de peneiras, das quais determinou-se: $D_{10} = 0,28$ mm; $D_{30} = 0,34$ mm; $D_{50} = 0,41$ mm e $D_{60} = 0,45$ mm.

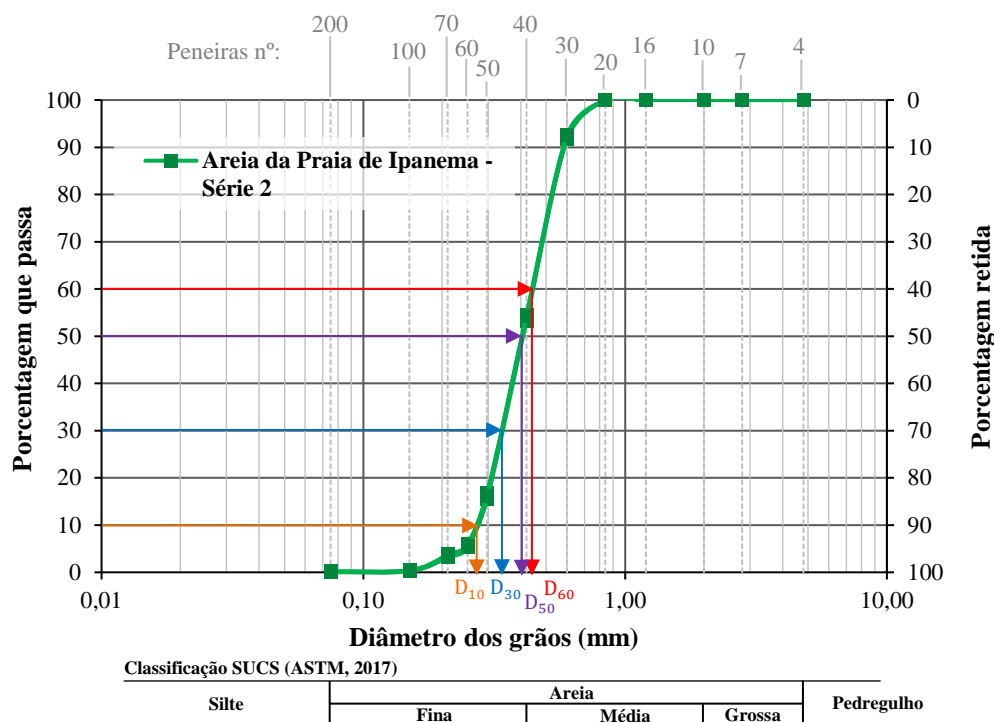


Figura 68 – Determinação dos diâmetros D_{10} , D_{30} , D_{50} e D_{60} da areia da Praia de Ipanema.

Sendo o coeficiente de não uniformidade (C_{NU}) definido por D_{60}/D_{10} e o coeficiente de curvatura (C_C) definido por $D_{30}^2/(D_{10} \cdot D_{60})$, tem-se que a areia da Praia de Ipanema possui um $C_{NU} = 1,61$ e $C_C = 0,92$. Logo, de acordo com as normas ASTM (2017) e ABNT (1995), vide seção 2.1.3, a areia da Praia de Ipanema é mal graduada e uniforme. Observando ainda a Figura 68, cerca de 54 % dos grãos da amostra da areia da Praia de Ipanema passam na peneira de nº 40 (# 0,420 mm); considerando a faixa de classificação SUCS apresentada na norma ASTM (2017), a amostra da areia da Praia de Ipanema é composta por 54 % de areia fina e 46 % de areia média.

Na Figura 69, são apresentadas as quatro curvas granulométricas da série 2 da areia da Praia de Ipanema e as quatro curvas obtidas, com essa mesma série de peneiras, para a amostra das microesferas de vidro com sua granulometria original. Observa-se que, apesar de próximas, as curvas possuem características diferentes, principalmente no trecho entre as peneiras de nº 50 e nº 20. Conforme justificado na seção 3.5, para a investigação da influência da forma dos grãos nos índices de vazios mínimo e máximo e na condutividade hidráulica, as amostras utilizadas devem possuir mesma distribuição granulométrica. Para tanto, a curva

granulométrica das microesferas de vidro foi reconstituída, sendo os resultados apresentados na seção 4.1.4, a seguir.

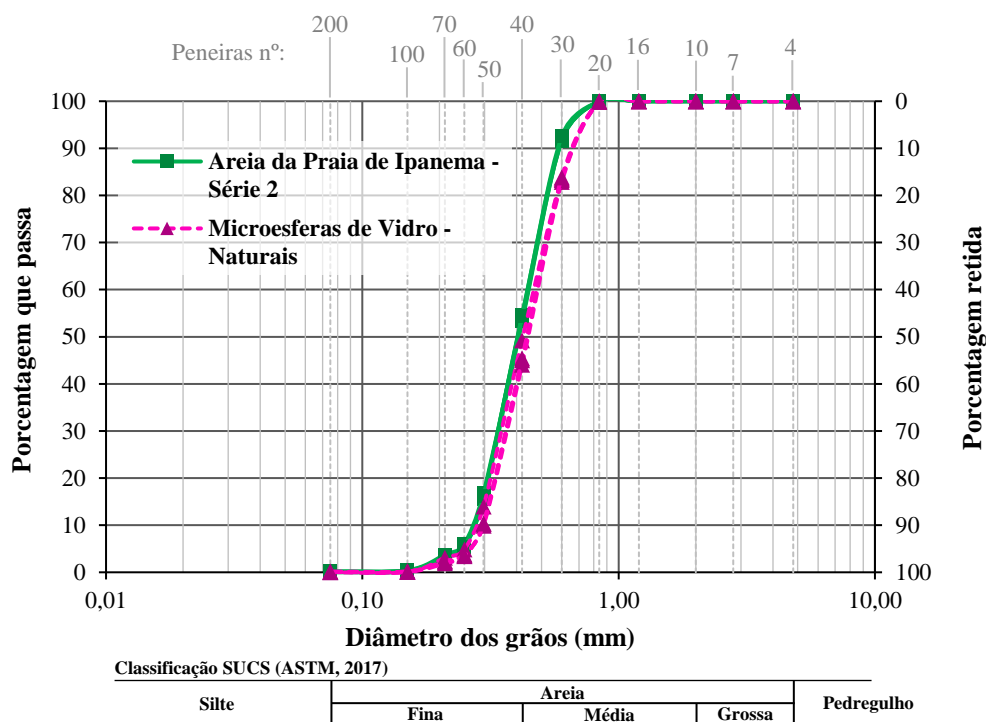


Figura 69 - Granulometria da amostra da areia da Praia de Ipanema *versus* granulometria original da amostra de microesferas de vidro.

4.1.4 Reconstituição granulométrica da amostra de microesferas de vidro

Os procedimentos para a reconstituição granulométrica da amostra de microesferas de vidro em função das características granulométricas da amostra da areia da Praia de Ipanema foram apresentados na seção 3.5. Conforme mencionado, para cada 1 kgf de amostra de microesferas de vidro com granulometria reconstituída obteve-se uma curva granulométrica, totalizando, assim, 17 curvas granulométricas. A Figura 70 apresenta essas 17 curvas granulométricas e as quatro curvas granulométricas da série 2 da areia da Praia de Ipanema.

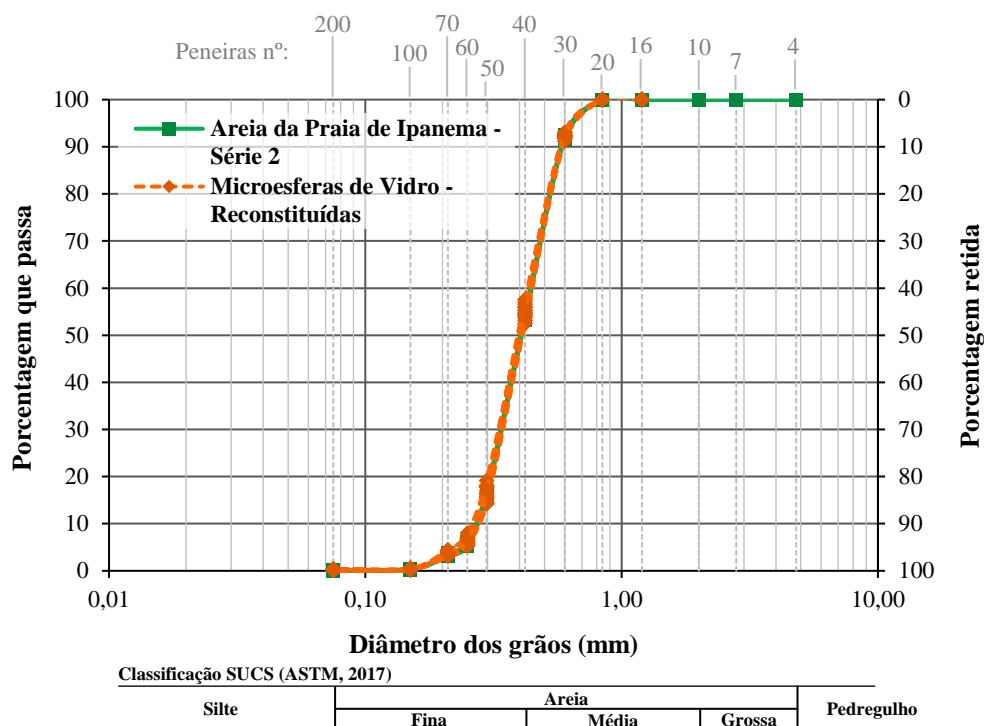


Figura 70 - Granulometria da amostra da areia da Praia de Ipanema *versus* granulometria reconstituída da amostra de microesferas de vidro.

Estando as curvas granulométricas da amostra de microesferas de vidro reconstituída sobrepostas às da amostra da areia da Praia de Ipanema, pode-se afirmar que as características granulométricas (D_{10} , D_{30} , D_{50} , D_{60} , C_{NU} e C_C) de ambas as amostras são iguais.

4.1.5 Densidade relativa dos grãos

Conforme justificado na seção 3.6, os ensaios para determinação da densidade relativa dos grãos (G_s) foram realizados apenas na amostra de microesferas de vidro tratadas e com granulometria reconstituída, sendo o valor de G_s utilizado para a areia da Praia de Ipanema igual a 2,656, determinado por Costa (2020) — cujo desenvolvimento da pesquisa foi acompanhado por esta autora. Sendo assim, a densidade relativa das microesferas de vidro (G_s) foi determinada por duas metodologias, apresentadas na seção 3.6, sendo essas: (a) o método da proveta, cujas diretrizes são apresentadas pela norma ABNT (2021); e (b) o método do picnômetro, preconizado pela norma ABNT (1984).

A Tabela 9 apresenta os resultados obtidos pelo método da proveta, dos quais se obteve um valor médio de densidade relativa das microesferas (G_s) de 2,555.

Ressalta-se, todavia, a grande dispersão, ou baixa repetibilidade, dos três valores obtidos.

Tabela 9 - Resultados do ensaio de densidade relativa das microesferas de vidro (G_s) pelo método da proveta, norma ABNT (2021).

Determinação	Proveta		
	01	02	03
Peso das microesferas de vidro resfriadas, P_{ME} (gf)	60,00	60,03	60,01
Volume de álcool isopropílico = Volume inicial (mL)	50,00	50,00	50,00
Volume de álcool isopropílico e microesferas de vidro = Volume final (mL)	73,00	74,00	73,50
Volume das microesferas de vidro, V_{ME} (mL)	23,00	24,00	23,50
Peso específico das microesferas de vidro, γ_{ME} (gf/cm ³)	2,609	2,501	2,554
Densidade relativa das microesferas de vidro, G_s	2,609	2,501	2,554
Densidade relativa média das microesferas de vidro, G_s méd.	2,555		

As Figuras 71 a 75 apresentam os gráficos resultantes da calibração de cada um dos cinco picnômetros de 500 mL utilizados na determinação da densidade relativa das microesferas de vidro (G_s), com base na norma ABNT (1984).

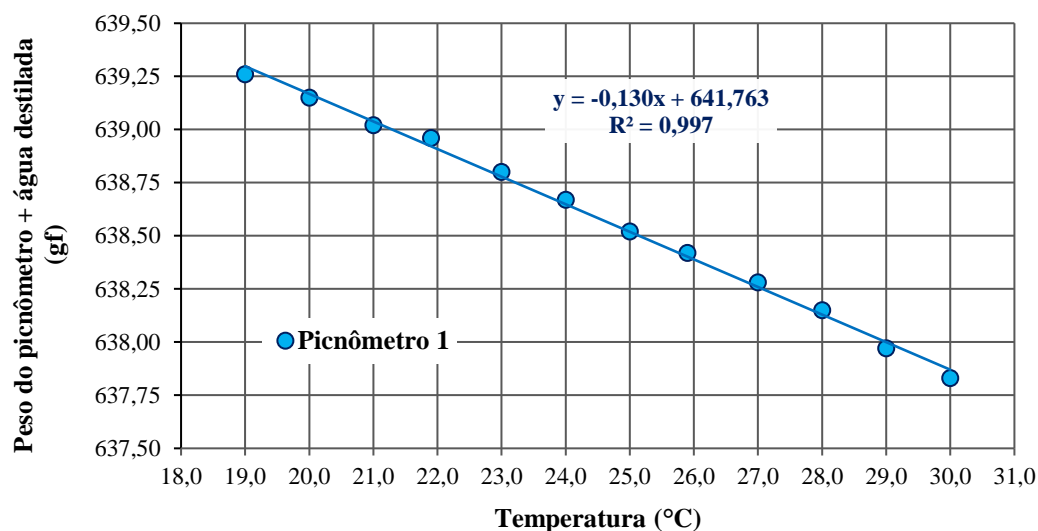


Figura 71 - Curva de calibração do picnômetro 1.

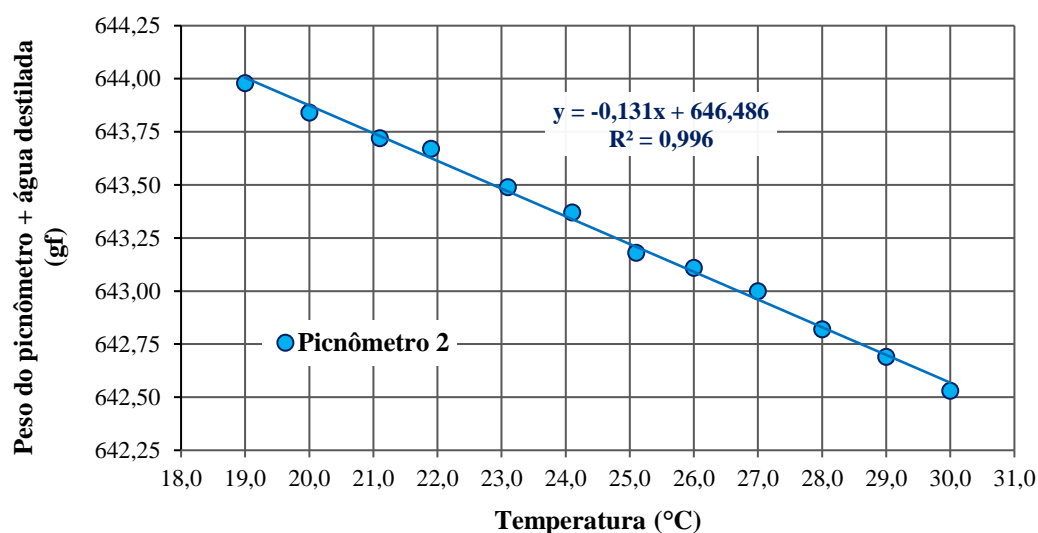


Figura 72 - Curva de calibração do picnômetro 2.

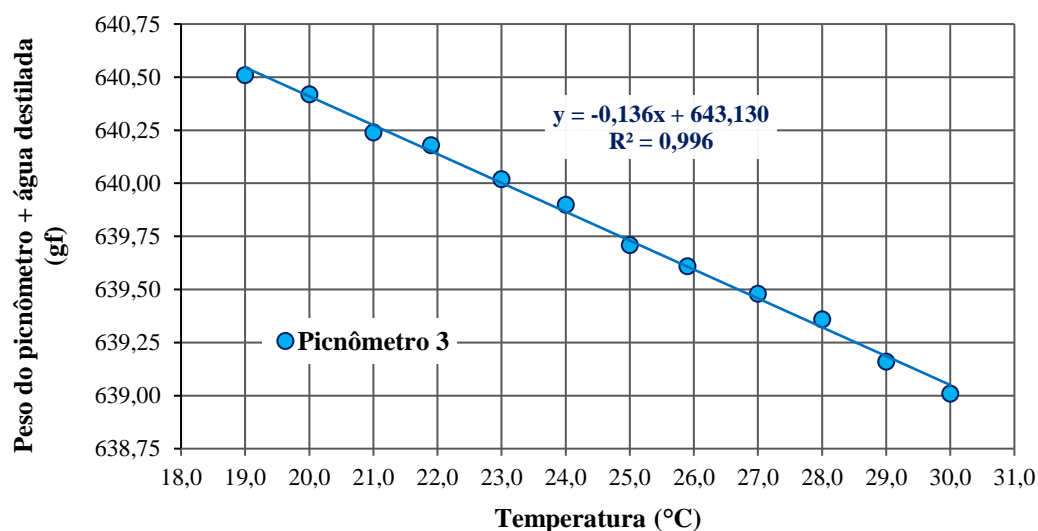


Figura 73 - Curva de calibração do picnômetro 3.

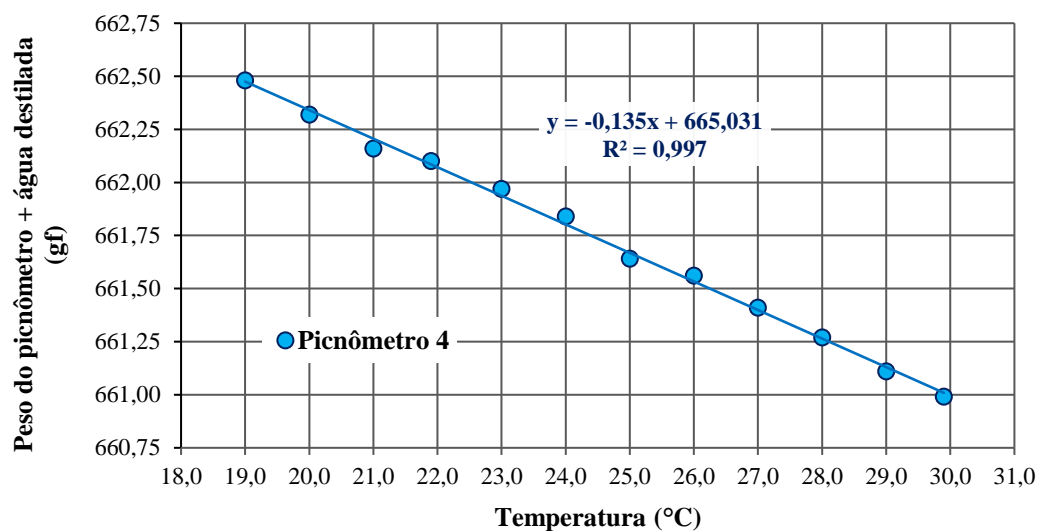


Figura 74 - Curva de calibração do picnômetro 4.

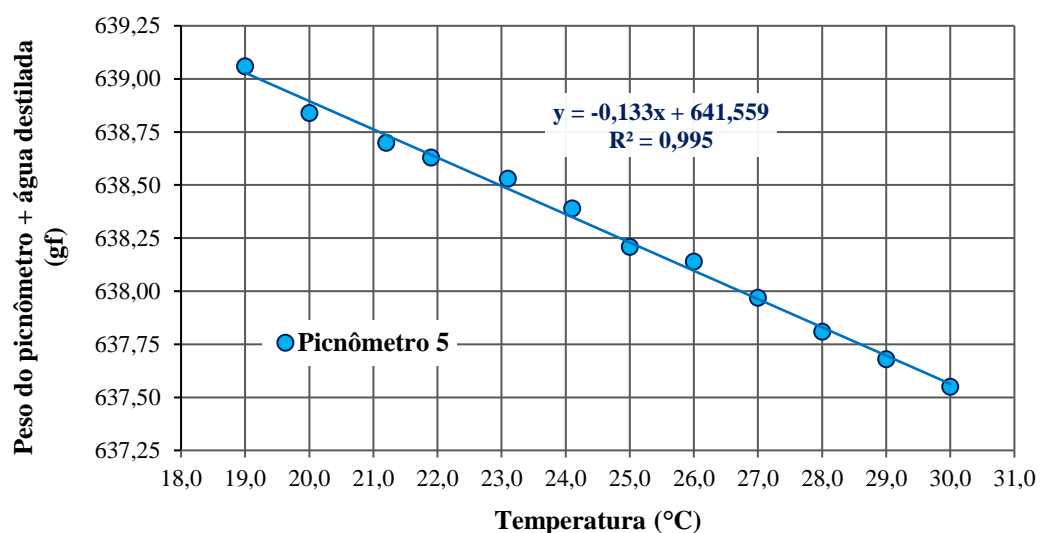


Figura 75 - Curva de calibração do picnômetro 5.

Os resultados obtidos dos cinco picnômetros ensaiados, bem como os cálculos efetuados para a obtenção da densidade relativa das microesferas de vidro são apresentados na Tabela 10.

Tabela 10 - Resultados do ensaio de densidade relativa dos grãos (G_s) pelo método do picnômetro, norma ABNT (1984).

Picnômetro n°	1	2	3	4	5
Volume nominal do frasco (mL)	500,00	500,00	500,00	500,00	500,00
Temperatura, T (°C)	22,8	22,8	22,8	22,8	22,8
Peso específico da água na temperatura do ensaio (gf/cm ³)	0,9976	0,9976	0,9976	0,9976	0,9976
Peso da amostra seca, P_{ME} (gf)	60,04	60,07	60,01	60,01	60,03
Peso do picnômetro + água, P_{P+A} (gf)	638,80	643,50	640,03	661,95	638,53
Peso do picnômetro + água + amostra, P_{P+ME+A} (gf)	674,76	679,45	675,92	697,85	674,44
Peso de água deslocada, P_{AD} (gf)	24,08	24,12	24,12	24,11	24,12
Volume de água deslocada, V_{AD} (cm ³)	24,14	24,18	24,18	24,17	24,17
Volume de microesferas, V_{ME} (cm ³)	24,14	24,18	24,18	24,17	24,17
Peso específico das microesferas, γ_{ME} (gf/cm ³)	2,487	2,485	2,482	2,483	2,483
Densidade relativa das microesferas, G_s	2,487	2,485	2,482	2,483	2,483
Média da densidade relativa das microesferas, G_s méd.	2,484				

Comparando os resultados obtidos pelos dois métodos, constata-se uma diferença de 0,071 entre os valores de densidade relativa das microesferas de vidro, sendo $G_s = 2,555$ o obtido pelo método da proveta e $G_s = 2,484$ o obtido pelo método do picnômetro. Embora ambos os valores se encontrem na faixa admissível de 2,40 a 2,60 para densidade relativa das microesferas de vidro especificada pela norma ABNT (2021), esta diferença é muito grande para o uso que é feito deste parâmetro nesta pesquisa, que é o cálculo dos índices de vazios de corpos de prova de microesferas de vidro submetidos a ensaios de permeabilidade, os quais serão relacionados com os valores de condutividade hidráulica medidos nestes ensaios.

Um eventual erro no valor de G_s determinado pelo método do picnômetro pode estar associado às seguintes observações feitas durante o ensaio: (a) incerteza da completa remoção de ar de dentro do picnômetro com a aplicação do vácuo, devido à formação de pequenos “grumos” de microesferas de vidro, com ar possivelmente ocluso entre elas, mesmo utilizando as microesferas de vidro pós-tratamento; e (b) eventuais pequenas perdas de microesferas de vidro no processo de inserção da tampa no picnômetro, devido ao eventual escapamento de algumas microesferas que “boiavam” na superfície da água. Estas duas possíveis ocorrências teriam levado a uma diminuição do peso determinado de “picnômetro + microesferas + água, P_{P+ME+A} ” (Tabela 10), acarretando em aumento: do valor

calculado de “peso de água deslocada, P_{P+A} ”; do valor calculado de “volume de água deslocada, V_{AD} ”; do valor calculado de “volume das microesferas, V_{ME} ”; e, finalmente, em contrapartida, na diminuição dos valores calculados de “peso específico das microesferas, g_{ME} ” e de “densidade relativa das microesferas, G_s ”, em relação aos valores que teriam sido obtidos, sem tais ocorrências observadas.

Por outro lado, no método da proveta, não se tem tanta acurácia na determinação do volume de álcool deslocado pela inserção das microesferas de vidro na proveta, lido diretamente na escala graduada da proveta. Isto explicaria, ao menos em parte, a grande dispersão dos valores obtidos de G_s , o que diminui a confiabilidade desses resultados.

Assim, diante da excelente repetibilidade dos valores de G_s obtidos pelo método do picnômetro, decidiu-se fazer uso destes valores, porém fazendo a seguinte correção. No procedimento do ensaio, após a determinação dos pesos de “picnômetro + microesferas + água, P_{P+ME+A} ”, os valores de peso seco de microesferas de vidro contidas nos cinco picnômetros foram determinados. Com isso, foram calculadas as perdas de microesferas de vidro durante o ensaio, subtraindo o peso seco final do peso seco inicial (colocado no picnômetro), obtendo-se 0,05 gf, 0,09 gf, 0,01 gf, 0,02 gf e 0,11 gf, para os picnômetros 1, 2, 3, 4 e 5, respectivamente. Assim, os valores de “picnômetro + microesferas + água, P_{P+ME+A} ” que teriam sido determinados caso as perdas não tivessem ocorrido puderam ser calculados assumindo que o peso do volume de microesferas de vidro que foram perdidas foi substituído no picnômetro por peso de água de mesmo volume. Desta forma, para cada um dos cinco picnômetros, foi realizado um cálculo iterativo, obtendo-se o valor corrigido de “densidade relativa das microesferas, G_s ”, o qual teria sido obtido caso as perdas não tivessem ocorrido. O valor médio de G_s corrigido foi de 2,487, isto é, ligeiramente superior ao valor médio de G_s sem correção, apresentado na Tabela 10, igual a 2,484.

Por fim, cabe dizer que, no Laboratório de Geotecnia da COPPE/UFRJ, Domingos (2019) realizou estes mesmos ensaios de picnômetro em um outro lote de microesferas de vidro provenientes do mesmo fornecedor e com as mesmas especificações das utilizadas nesta pesquisa, obtendo-se um valor médio de G_s igual a 2,491, sem relato de perdas de microesferas durante o processo. Tal resultado mostra a excelente reprodutibilidade entre as duas campanhas de ensaios. A certificação do fornecedor indica que a massa específica das microesferas de vidro

é de $2,40 \text{ g/cm}^3$ (valor indicado com três algarismos significativos), conforme mencionado na seção 3.1.2, determinado pelo método da proveta.

Diante de tudo o que foi exposto, nesta pesquisa, o valor adotado para a densidade relativa das microesferas de vidro (G_s) é de 2,487.

4.2

Índices de vazios máximo, intermediários e mínimo

4.2.1

Índice de vazios máximo

Conforme descrito na seção 3.7.1, os valores de índice de vazios máximo da areia da Praia de Ipanema e da amostra de microesferas de vidro com granulometria reconstituída foram determinados conforme o método B da norma ABNT (2020). Para tanto, em cada amostra, foram realizadas cinco determinações de índice de vazios, utilizando os dois moldes apresentados na seção 3.7.1.

Os resultados dos ensaios com a amostra da areia da Praia de Ipanema e com a amostra de microesferas de vidro (reconstituída) são apresentados nas Tabelas 11 e 12, respectivamente. Observa-se que, para ambos os moldes (PPR e PPF), a amostra da areia da Praia de Ipanema apresentou valores índice de vazios maiores que os da amostra de microesferas de vidro. Em ambas as amostras, o molde PPR apresentou valores de índice de vazios maiores que os obtidos no molde PPF.

Tabela 11 - Índice de vazios máximo obtido pelo método B (ABNT, 2020) na amostra da areia da Praia de Ipanema.

Ensaio	Índice de vazios máximo: areia da Praia de Ipanema	
	Molde PPR	Molde PPF
01	0,688	0,655
02	0,683	0,662
03	0,686	0,658
04	0,685	0,651
05	0,698	0,650
Média	0,688	0,655

Tabela 12 - Índice de vazios máximo obtido pelo método B (ABNT, 2020) na amostra de microesferas de vidro.

Ensaio	Índice de vazios máximo: amostra de microesferas de vidro	
	Molde PPR	Molde PPF
01	0,667	0,627
02	0,668	0,626
03	0,669	0,552
04	<u>0,670</u>	0,546
05	0,670	0,545
Média	0,669	0,579

Sendo assim, os valores de índice de vazios máximo obtidos nesta pesquisa para a amostra da areia da Praia de Ipanema e para a amostra de microesferas de vidro foram de 0,698 e 0,670, respectivamente, ambos obtidos em molde PPR. Esses valores são os utilizados nesta pesquisa como $e_{\text{máx.}}$ nos cálculos das compacidades relativas (CR) dos corpos de prova dos ensaios de permeabilidade. Entretanto, cabe ressaltar que o valor de $e_{\text{máx.}}$ da areia da Praia de Ipanema obtido nesta pesquisa foi consideravelmente menor do que aquele obtido por Costa (2020) para um molde cilíndrico de Proctor Normal, com volume de 1000,08 cm³, igual a 0,760 (vide resumo na Tabela 6).

4.2.2 Índice de vazios mínimo e intermediários

Na seção 3.7.2 foi apresentado o arranjo e os procedimentos de ensaio para determinação dos índices de vazios mínimo e intermediários da areia da Praia de Ipanema e da amostra de microesferas de vidro de granulometria reconstituída, com base na metodologia desenvolvida por Miura & Toki (1982). Para cada diâmetro de bocal dos funis foram realizadas cinco determinações de índice de vazios.

As Tabelas 13 e 14 apresentam os resultados dos índices de vazios da areia da Praia de Ipanema obtidos para cada diâmetro de bocal dos funis utilizando, respectivamente, moldes do permeâmetro de parede rígida (PPR) e do permeâmetro de parede flexível (PPF).

Tabela 13 - Índices de vazios mínimo e intermediários da areia da Praia de Ipanema obtidos pelo método de Miura & Toki (1982), utilizando o molde PPR

Índice de vazios mínimo e intermediários: areia da Praia de Ipanema em molde PPR						
Ø bocal do funil (mm)	Ensaio 1	Ensaio 2	Ensaio 3	Ensaio 4	Ensaio 5	Média
100	0,679	0,677	0,679	0,678	0,679	0,678
90	0,675	0,678	0,671	0,674	0,675	0,675
80	0,675	0,685	0,684	0,679	0,681	0,681
70	0,668	0,662	0,664	0,659	0,674	0,665
60	0,632	0,627	0,652	0,650	0,654	0,643
50	0,609	0,627	0,595	0,621	0,609	0,612
40	0,566	0,570	0,582	0,578	0,561	0,571
30	0,519	0,518	0,518	0,515	0,514	0,517
20	0,494	0,493	0,493	0,493	0,493	0,493
10	0,484	0,483	0,483	0,483	0,482	0,483
5	0,483	0,484	0,480	-	-	0,482

Tabela 14 - Índices de vazios mínimo e intermediários da areia da Praia de Ipanema obtidos pelo método de Miura & Toki (1982), utilizando o molde PPF

Índice de vazios mínimo e intermediários: areia da Praia de Ipanema em molde PPF						
Ø bocal do funil (mm)	Ensaio 1	Ensaio 2	Ensaio 3	Ensaio 4	Ensaio 5	Média
100	0,636	0,633	0,634	0,636	0,633	0,634
90	0,630	0,627	0,629	0,630	0,631	0,629
80	0,627	0,622	0,625	0,624	0,620	0,624
70	0,613	0,612	0,614	0,612	0,611	0,612
60	0,601	0,605	0,598	0,598	0,601	0,601
50	0,564	0,568	0,566	0,562	0,573	0,567
40	0,509	0,512	0,515	0,512	0,510	0,512
30	0,472	0,471	0,471	0,471	0,468	0,471
20	0,453	0,452	0,451	0,452	0,452	0,452
10	0,439	0,438	0,435	0,437	0,440	0,438
5	0,435	0,436	0,436	0,434	0,433	0,435

Observa-se que o molde PPF apresentou os menores valores de índice de vazios; de modo que, o índice de vazios mínimo obtido para a areia da Praia de Ipanema foi de 0,433. Costa (2020) obteve um índice de vazios mínimo para a areia da praia de Ipanema igual a 0,435, isto é, praticamente igual ao obtido nesta pesquisa.

Na Figura 76 são apresentados todos os pontos das Tabelas 13 e 14 plotados em um gráfico “índice de vazios *versus* diâmetro do bocal do funil”; ainda, sendo a areia da Praia de Ipanema material de estudo em Simões (2015) e Costa (2020), os valores de índice de vazios mínimo e intermediários obtidos nessas pesquisas também são apresentados. As características dos moldes utilizados pelos referidos autores são: (a) Proctor Normal de Simões (2015), volume de 946,93 cm³; (b) Proctor Normal de Costa (2020), volume de 1000,08 cm³; e (c) molde PVC de Costa (2020), altura de 10,83 cm e diâmetro interno de 3,83 cm (volume de 124,77 cm³), cujas dimensões são próximas ao molde PPF desta pesquisa.

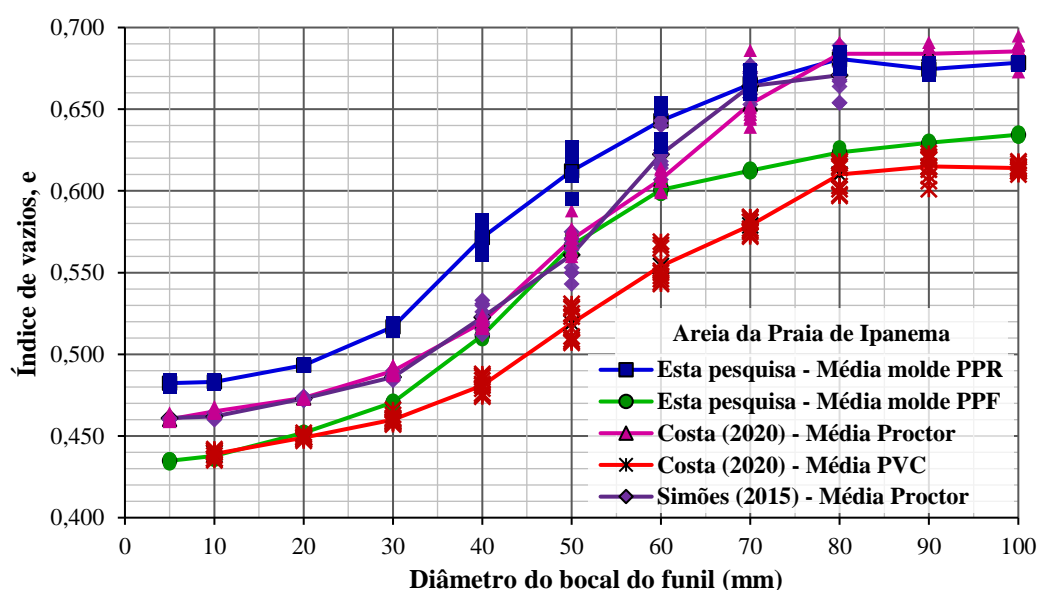


Figura 76 - Curvas de “índice de vazios *versus* diâmetro do bocal do funil” obtidas nesta pesquisa, em Simões (2015) e Costa (2020).

Sendo o valor do índice de vazios máximo obtido para a areia da Praia de Ipanema nesta pesquisa igual a 0,698, e o valor do índice de vazios mínimo igual a 0,433, foram calculadas as compacidades relativas (CR) correspondentes a cada diâmetro de bocal de funil utilizando como base os valores médios de índice de vazios obtidos em cada um desses, para a amostra da areia da Praia de Ipanema. O

resultado da “compacidade relativa *versus* diâmetro do bocal do funil” é apresentado na Figura 77, sendo esses dados referências para a definição dos funis que foram utilizados nas moldagens dos corpos de prova com índice de vazios intermediários nos ensaios de permeabilidade.

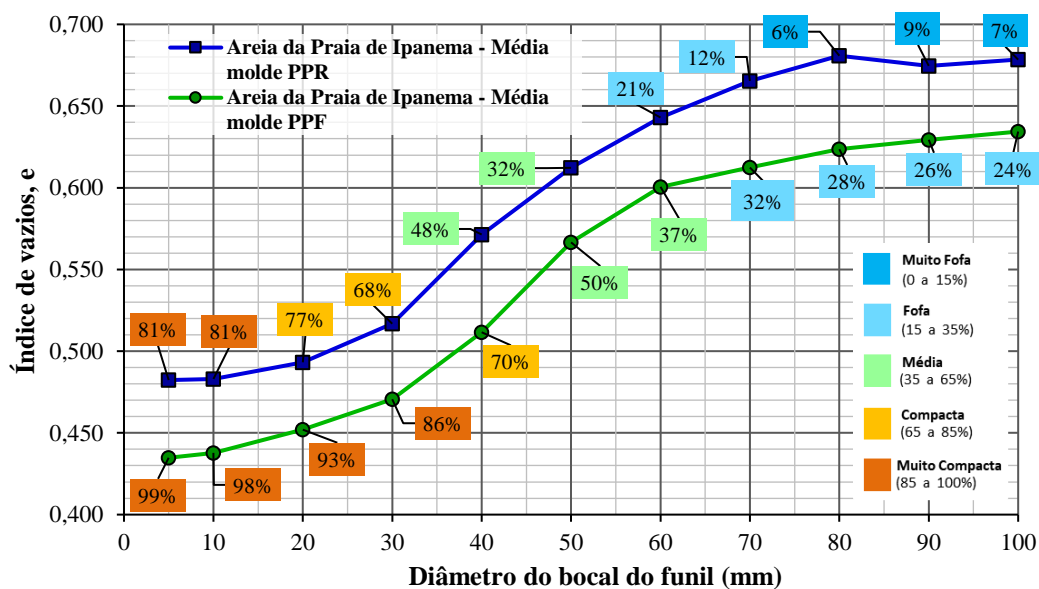


Figura 77 - Índice de vazios médio e compactação relativa *versus* diâmetro do bocal do funil para a areia da Praia de Ipanema.

A Tabela 15 apresenta os valores de índice de vazios obtidos, em molde PPF, para cada diâmetro de bocal de funil utilizando como amostra as microesferas de vidro de granulometria reconstituída. O índice de vazios mínimo obtido foi de 0,471.

Tabela 15 - Índices de vazios mínimo e intermediários da amostra de microesferas de vidro obtidos para diferentes diâmetros de bocal dos funis, utilizando molde PPF

Índice de vazios intermediários e mínimo: amostra de microesferas de vidro em molde PPF						
Ø bocal do funil (mm)	Ensaio 1	Ensaio 2	Ensaio 3	Ensaio 4	Ensaio 5	Média
100	0,605	0,608	0,605	0,605	0,608	0,606
90	0,604	0,609	0,606	0,608	0,604	0,606
80	0,604	0,603	0,606	0,606	0,606	0,605
70	0,595	0,597	0,596	0,601	0,599	0,598
60	0,597	0,595	0,595	0,595	0,594	0,595
50	0,582	0,585	0,583	0,583	0,580	0,583
40	0,532	0,530	0,530	0,533	0,533	0,532
30	0,501	0,503	0,504	0,502	0,504	0,503
20	0,502	0,499	0,500	0,501	0,502	0,501
10	0,480	0,482	0,483	0,483	0,482	0,482
5	0,472	0,472	<u>0,471</u>	0,475	0,472	0,472

A Figura 78 apresenta a comparação entre os valores de índice de vazios mínimo e intermediários para cada diâmetro de bocal de funil, em molde PPF, obtidos nesta pesquisa para a areia da Praia de Ipanema e para a amostra de microesferas de vidro com granulometria reconstituída. Observa-se que a amostra de microesferas de vidro apresentou valor de índice de vazios mínimo superior ao da areia da Praia de Ipanema, em mesmo molde (PPF) e para o mesmo diâmetro de bocal do funil (de 5 mm). Ainda, a diferença entre os valores médios de índice de vazios obtidos para os funis de bocal com diâmetro de 5 mm e de 100 mm na amostra da areia da Praia de Ipanema foi maior que a diferença entre esses mesmos diâmetros de bocais de funis para a amostra de microesferas de vidro.

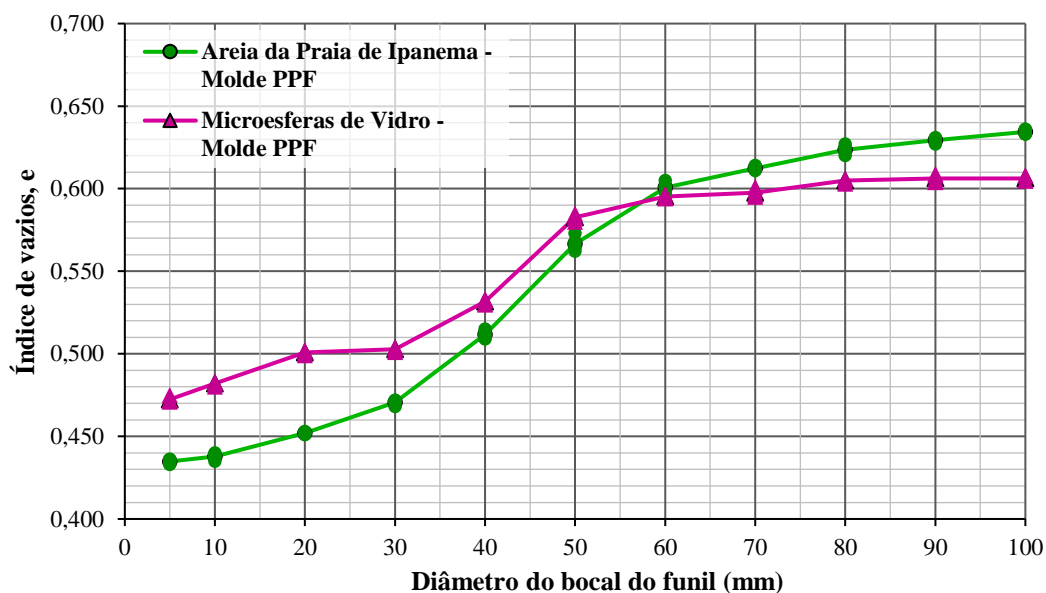


Figura 78 - Curvas de “índice de vazios *versus* diâmetro do bocal do funil” obtidas para a areia da Praia de Ipanema e para a amostra de microesferas de vidro com granulometria reconstituída.

4.2.3

Comparação entre os valores de índices de vazios máximo e mínimo da areia da Praia de Ipanema e da amostra de microesferas de vidro

Diante do apresentado nas seções 4.2.1 e 4.2.2, tem-se que: (a) para a amostra da areia da Praia de Ipanema, o índice de vazios máximo obtido foi de 0,698 e o índice de vazios mínimo obtido foi de 0,433; e (b) para a amostra de microesferas de vidro, o índice de vazios máximo obtido foi de 0,670, e o índice de vazios mínimo obtido de 0,471. Isto é, nesta pesquisa, foi obtido um valor de índice de vazios máximo maior para a amostra da areia da Praia de Ipanema do que o obtido para a amostra de microesferas de vidro, e um índice de vazios mínimo menor para a amostra da areia da Praia de Ipanema do que o obtido para a amostra de microesferas de vidro.

A Figura 79 apresenta esses pontos de índice de vazios máximo e mínimo plotados em função da esfericidade dos grãos das amostras, apresentadas na seção 4.1.2.

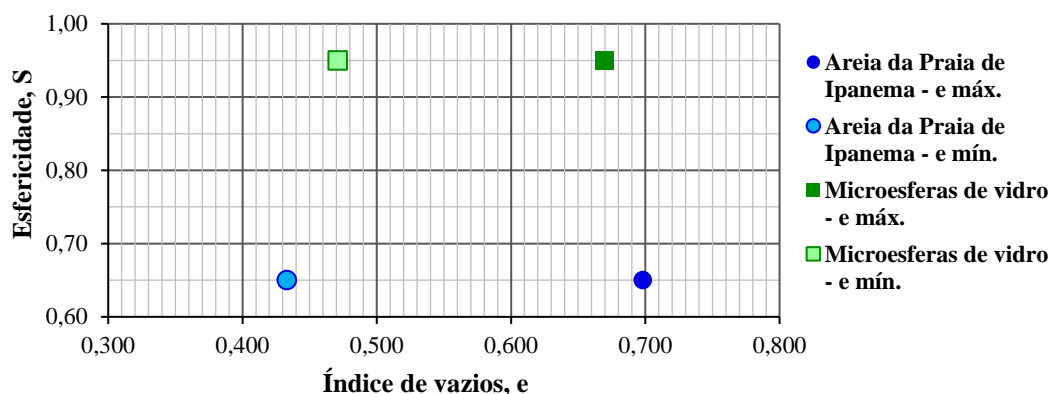


Figura 79 - Comparação entre os valores de índices de vazios máximo e mínimo da areia da Praia de Ipanema e da amostra de microesferas de vidro, desta pesquisa

A diferença entre os valores de índice de vazios máximo e de índice de vazios mínimo da amostra da areia da Praia de Ipanema é maior do que a da amostra de microesferas de vidro, em consonância com o mencionado na seção 2.1.4, que a diferença entre os valores dos índices de vazios máximo e mínimo são tão maiores quanto mais angulares os grãos (modificado de Pinto, 2006; Holubec & D'Appolonia, 1973).

4.3

Determinação da condutividade hidráulica no permeâmetro de parede rígida

4.3.1

Amostra da areia da Praia de Ipanema

Os ensaios de permeabilidade em permeâmetro de parede rígida (PPR) sob carga constante foram realizados conforme descrição apresentada na seção 3.8.1. Para a amostra da areia da Praia de Ipanema, foram moldados quatro corpos de prova com diferentes índices de vazios, sendo: um com índice de vazios próximo ao máximo (CP-A1); dois com índices de vazios intermediários (CP-A2 e CP-A3); e um com índice de vazios próximo ao mínimo (CP-A4). A Tabela 16 apresenta os métodos de moldagem de cada corpo de prova. Os procedimentos de moldagem seguiram as descrições apresentadas na seção 3.7.1, para o método B da norma ABNT (2020), e na seção 3.7.2, para o método MSP de Miura & Toki (1982).

Tabela 16 – Métodos de moldagem dos corpos de prova com a areia da Praia de Ipanema, em PPR

Corpo de Prova	Método de Moldagem
CP-A1	Método B da norma ABNT (2020)
CP-A2	MSP de Miura & Toki (1982) - Funil de Ø 40 mm
CP-A3	MSP de Miura & Toki (1982) - Funil de Ø 30 mm
CP-A4	MSP de Miura & Toki (1982) - Funil de Ø 5 mm

Como os corpos de prova eram moldados diretamente no cilindro rígido em acrílico do permeâmetro, as dimensões iniciais de todos esses eram iguais às dimensões do cilindro, assim sendo, tinha-se: altura total do corpo de prova (L) igual a 20,00 cm; área do corpo de prova (A_{CP}) igual a 77,76 cm²; e, volume do corpo de prova (V_{CP}) igual a 1555,20 cm³. Conhecendo-se o valor do peso de sólidos do corpo de prova (peso seco) ao final do ensaio (P_{CP2}) e a densidade relativa dos grãos da areia da Praia de Ipanema ($G_s = 2,656$), determinavam-se as características iniciais dos corpos de prova, apresentadas na Tabela 17, sendo essas: o volume de sólidos (V_s); o volume de vazios (V_v); o índice de vazios (e) e a compactidade relativa (CR). A classificação quanto à compactidade relativa utilizada é a apresentada em Lambe & Whitman (1969), conforme mencionado na seção 2.1.4.

Tabela 17 – Características iniciais dos corpos de prova moldados com a areia da Praia de Ipanema em PPR

Corpo de Prova	L (cm)	A_{CP} (cm ²)	V_{CP} (cm ³)	P_{CP2} (gf)	V_s (cm ³)	V_v (cm ³)	e	CR	
								%	Classificação
CP-A1	20,00	77,76	1555,20	2547,49	959,15	596,05	0,621	29	Fofo
CP-A2	20,00	77,76	1555,20	2675,82	1007,46	547,74	0,544	58	Média
CP-A3	20,00	77,76	1555,20	2811,12	1058,40	496,80	0,469	86	Muito compacta
CP-A4	20,00	77,76	1555,20	2870,72	1080,84	474,36	0,439	98	Muito compacta

Conforme mencionado na seção 3.8.1, o estabelecimento de fluxo ocorreu sob quatro gradientes hidráulicos impostos (i_{EXT}), sendo esses: 0,2; 0,4; 0,6 e 0,8. Para cada gradiente hidráulico imposto (externo ao equipamento), foram realizadas cinco determinações do volume de água percolado pelo corpo de prova (ΔV) em um intervalo de tempo (Δt), possibilitando determinar os valores da vazão de água

percolada (Q), sendo $Q = \Delta V / \Delta t$. A velocidade aparente de fluxo (v) foi determinada como $v = Q / A_{CP}$.

A condutividade hidráulica (k_T) para a temperatura (T) do ensaio foi determinada em função da velocidade aparente de fluxo (v) e do gradiente hidráulico medido (i_{INT}) no interior do corpo de prova. Para medição do gradiente hidráulico interno, durante o fluxo, eram registradas as leituras dos piezômetros “P1” e “P2”, conectados ao corpo de prova (vide esquema da Figura 48). A diferença entre as leituras de “P1” e “P2” representava a diferença de carga hidráulica (Δh), entre os mesmos, no interior do corpo de prova. Assim, sendo a distância (l) entre os piezômetros de 10,00 cm, o gradiente hidráulico medido (i_{INT}) era dado por $i_{INT} = (P1 - P2) / l$.

As Tabelas 18, 19, 20 e 21 apresentam os registros de ensaio dos corpos de prova CP-A1, CP-A2, CP-A3 e CP-A4, respectivamente. Os resultados apresentados nessas tabelas foram utilizados para a determinação da condutividade hidráulica na temperatura de ensaio (k_T) em cada corpo de prova.

Observando os valores dos gradientes hidráulicos impostos (i_{EXT}) e dos gradientes hidráulicos medidos (i_{INT}) apresentados nas Tabelas 18 a 21 verifica-se que em todos os corpos de prova o valor do gradiente hidráulico medido (i_{INT}) foi menor que o gradiente hidráulico imposto (i_{EXT}). Tal observação reafirma as observações apresentadas na seção 2.2.4.2 e por Daniel (2014), de que: durante a percolação ocorrem perdas de carga hidráulica fora do corpo de prova, sendo essas perdas principalmente “localizadas” em válvulas, conexões, discos perfurados, telas, mudanças de seções de condutos, etc. Com isso, ressalta-se a importância da medição da perda de carga hidráulica entre dois pontos do interior do corpo de prova, por meio de piezômetros.

Tabela 18 - Resultados obtidos nos estabelecimentos de fluxo para cálculo do valor da condutividade hidráulica do CP-A1.

Gradiente imposto (externo), i_{EXT}	Leitura P1 (cm)	Leitura P2 (cm)	Δh (cm)	Gradiente medido (interno), i_{INT}	Estabelecimento de fluxo	Volume de água na proveta (mL)		ΔV (mL)	Δt (s)	T (°C)	Q (cm³/s)	v (cm/s)
						Início	Final					
0,20	37,43	36,48	0,95	0,10	01	20,0	30,0	10,0	11,22	23,0	0,890	0,011
					02	20,0	40,0	20,0	22,87		0,870	0,011
					03	20,0	50,0	30,0	34,16		0,880	0,011
					04	20,0	60,0	40,0	45,38		0,880	0,011
					05	20,0	70,0	50,0	56,97		0,880	0,011
0,40	36,67	34,58	2,09	0,21	01	20,0	30,0	10,0	5,78	23,0	1,730	0,022
					02	20,0	40,0	20,0	11,66		1,720	0,022
					03	20,0	50,0	30,0	17,69		1,700	0,022
					04	20,0	60,0	40,0	23,41		1,710	0,022
					05	20,0	70,0	50,0	30,19		1,660	0,021
0,60	35,91	33,06	2,85	0,29	01	20,0	60,0	40,0	12,22	23,0	3,270	0,042
					02	20,0	60,0	40,0	12,60		3,170	0,041
					03	20,0	60,0	40,0	12,75		3,140	0,040
					04	20,0	70,0	50,0	16,72		2,990	0,038
					05	20,0	70,0	50,0	16,75		2,990	0,038
0,80	35,15	31,16	3,99	0,40	01	20,0	60,0	40,0	9,38	23,0	4,260	0,055
					02	20,0	60,0	40,0	9,41		4,250	0,055
					03	20,0	60,0	40,0	9,72		4,120	0,053
					04	20,0	70,0	50,0	12,66		3,950	0,051
					05	20,0	70,0	50,0	12,60		3,970	0,051

Tabela 19 - Resultados obtidos nos estabelecimentos de fluxo para cálculo do valor da condutividade hidráulica do CP-A2.

Gradiente imposto (externo), i_{EXT}	Leitura P1 (cm)	Leitura P2 (cm)	Δh (cm)	Gradiente medido (interno), i_{INT}	Estabelecimento de fluxo	Volume de água na proveta (mL)		ΔV (mL)	Δt (s)	T (°C)	Q (cm³/s)	v (cm/s)
						Início	Final					
0,20	37,81	37,05	0,76	0,08	01	20,0	30,0	10,0	31,28	22,0	0,320	0,004
					02	20,0	40,0	20,0	61,44		0,330	0,004
					03	20,0	50,0	30,0	92,69		0,320	0,004
					04	20,0	60,0	40,0	113,91		0,350	0,005
					05	20,0	70,0	50,0	153,50		0,330	0,004
0,40	37,62	36,29	1,33	0,13	01	20,0	30,0	10,0	14,65	22,0	0,680	0,009
					02	20,0	40,0	20,0	28,68		0,700	0,009
					03	20,0	50,0	30,0	42,97		0,700	0,009
					04	20,0	60,0	40,0	57,15		0,700	0,009
					05	20,0	70,0	50,0	71,91		0,700	0,009
0,60	37,05	35,34	1,71	0,17	01	20,0	60,0	40,0	39,22	22,0	1,020	0,013
					02	20,0	60,0	40,0	39,41		1,010	0,013
					03	20,0	60,0	40,0	39,22		1,020	0,013
					04	20,0	70,0	50,0	49,22		1,020	0,013
					05	20,0	70,0	50,0	49,32		1,010	0,013
0,80	36,86	34,58	2,28	0,23	01	20,0	60,0	40,0	29,90	22,0	1,340	0,017
					02	20,0	60,0	40,0	29,56		1,350	0,017
					03	20,0	60,0	40,0	29,87		1,340	0,017
					04	20,0	70,0	50,0	37,28		1,340	0,017
					05	20,0	70,0	50,0	37,07		1,350	0,017

Tabela 20 - Resultados obtidos nos estabelecimentos de fluxo para cálculo do valor da condutividade hidráulica do CP-A3.

Gradiente imposto (externo), i_{EXT}	Leitura P1 (cm)	Leitura P2 (cm)	Δh (cm)	Gradiente medido (interno), i_{INT}	Estabelecimento de fluxo	Volume de água na proveta (mL)		ΔV (mL)	Δt (s)	T (°C)	Q (cm³/s)	v (cm/s)
						Início	Final					
0,20	37,81	37,43	0,38	0,04	01	20,0	30,0	10,0	49,56	22,0	0,200	0,003
					02	20,0	40,0	20,0	100,47		0,200	0,003
					03	20,0	50,0	30,0	149,28		0,200	0,003
					04	20,0	60,0	40,0	199,59		0,200	0,003
					05	20,0	70,0	50,0	248,41		0,200	0,003
0,40	37,62	36,67	0,95	0,10	01	20,0	30,0	10,0	25,47	22,0	0,390	0,005
					02	20,0	40,0	20,0	50,03		0,400	0,005
					03	20,0	50,0	30,0	74,72		0,400	0,005
					04	20,0	60,0	40,0	99,43		0,400	0,005
					05	20,0	70,0	50,0	125,15		0,400	0,005
0,60	37,43	35,91	1,52	0,15	01	20,0	60,0	40,0	67,69	22,0	0,590	0,008
					02	20,0	60,0	40,0	67,12		0,600	0,008
					03	20,0	60,0	40,0	67,38		0,590	0,008
					04	20,0	70,0	50,0	84,31		0,590	0,008
					05	20,0	70,0	50,0	84,69		0,590	0,008
0,80	37,05	35,15	1,90	0,19	01	20,0	60,0	40,0	50,75	22,0	0,790	0,010
					02	20,0	60,0	40,0	51,00		0,780	0,010
					03	20,0	60,0	40,0	50,81		0,790	0,010
					04	20,0	70,0	50,0	63,53		0,790	0,010
					05	20,0	70,0	50,0	63,56		0,790	0,010

Tabela 21 - Resultados obtidos nos estabelecimentos de fluxo para cálculo do valor da condutividade hidráulica do CP-A4.

Gradiente imposto (externo), i_{EXT}	Leitura P1 (cm)	Leitura P2 (cm)	Δh (cm)	Gradiente medido (interno), i_{INT}	Estabelecimento de fluxo	Volume de água na proveta (mL)		ΔV (mL)	Δt (s)	T (°C)	Q (cm³/s)	v (cm/s)
						Início	Final					
0,20	37,24	36,10	1,14	0,11	01	20,0	30,0	10,0	24,22	21,2	0,410	0,005
					02	20,0	40,0	20,0	49,00		0,410	0,005
					03	20,0	50,0	30,0	72,10		0,420	0,005
					04	20,0	60,0	40,0	96,91		0,410	0,005
					05	20,0	70,0	50,0	121,56		0,410	0,005
0,40	36,86	34,39	2,47	0,25	01	20,0	30,0	10,0	11,53	21,2	0,870	0,011
					02	20,0	40,0	20,0	24,09		0,830	0,011
					03	20,0	50,0	30,0	36,16		0,830	0,011
					04	20,0	60,0	40,0	48,68		0,820	0,011
					05	20,0	70,0	50,0	60,85		0,820	0,011
0,60	36,10	32,30	3,80	0,38	01	20,0	60,0	40,0	32,28	21,2	1,240	0,016
					02	20,0	60,0	40,0	32,34		1,240	0,016
					03	20,0	60,0	40,0	32,34		1,240	0,016
					04	20,0	70,0	50,0	40,41		1,240	0,016
					05	20,0	70,0	50,0	39,79		1,260	0,016
0,80	35,34	30,40	4,94	0,49	01	20,0	60,0	40,0	24,37	21,2	1,640	0,021
					02	20,0	60,0	40,0	24,47		1,630	0,021
					03	20,0	60,0	40,0	24,22		1,650	0,021
					04	20,0	70,0	50,0	30,72		1,630	0,021
					05	20,0	70,0	50,0	30,56		1,640	0,021

De posse dos valores da velocidade aparente na temperatura do ensaio (v) e do gradiente hidráulico medido (i_{INT}), apresentados nas Tabelas 18, 19, 20 e 21, anteriores, para cada corpo de prova, usando o programa *Excel*, traçou-se um gráfico “gradiente hidráulico medido *versus* velocidade aparente”. Com os pontos plotados, sendo esses os pares ordenados (gradiente hidráulico; velocidade), foram interpoladas duas retas entre os mesmos, sendo uma forçando a interseção na origem, isto é, incluindo o par ordenado (0; 0) e a outra sem forçar a interseção na origem. A condutividade hidráulica (k_T) de cada corpo de prova na temperatura do ensaio (T) foi determinada pelo coeficiente angular da reta com interseção na origem. As Figuras 80, 81, 82 e 83 apresentam esses gráficos para os corpos de prova CP-A1, CP-A2, CP-A3 e CP-A4, respectivamente.

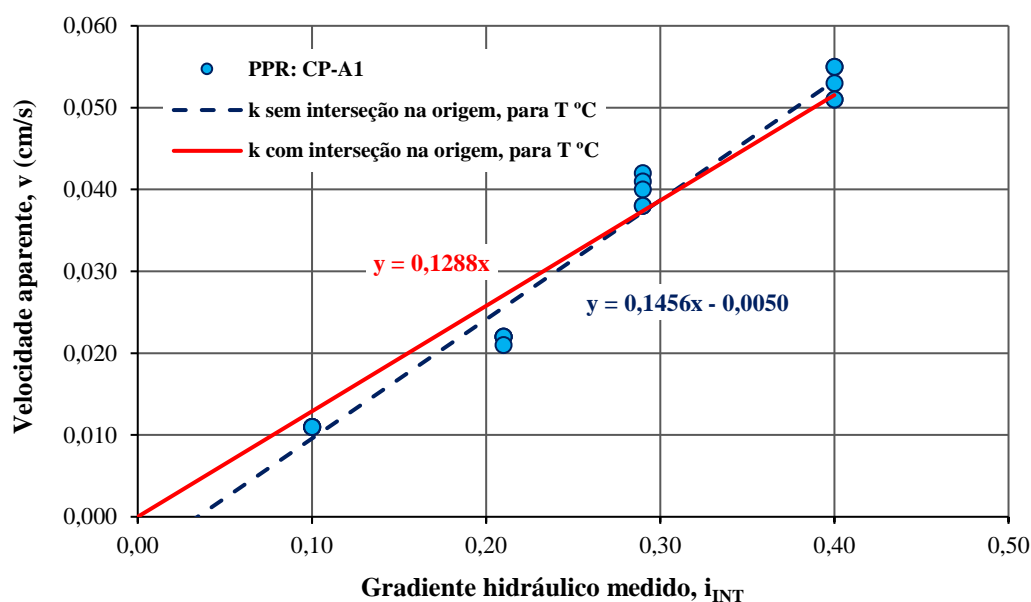


Figura 80 – Velocidade aparente *versus* gradiente hidráulico medido, para o CP-A1.

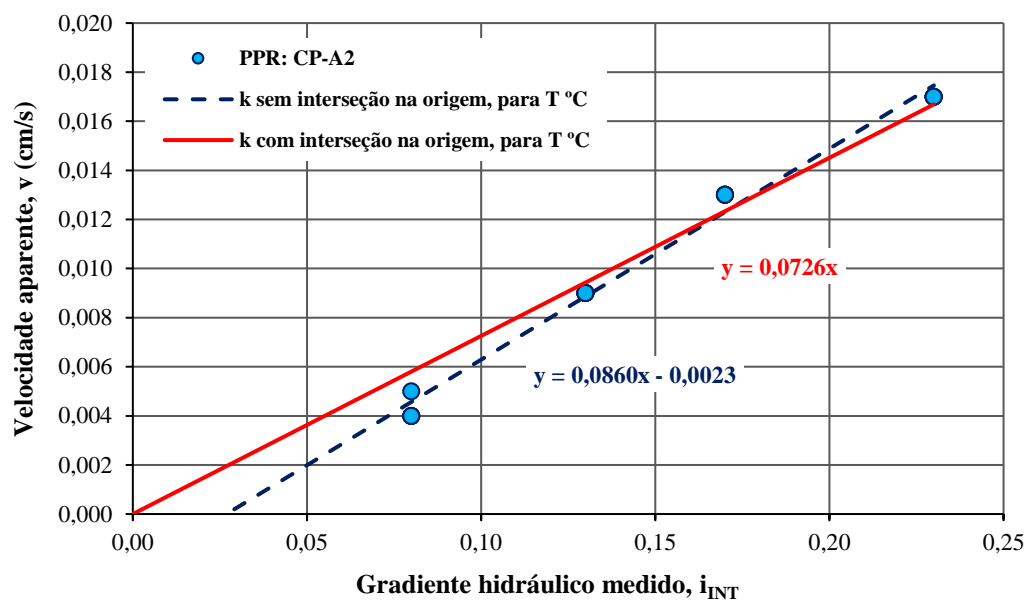


Figura 81 - Velocidade aparente *versus* gradiente hidráulico medido, para o CP-A2.

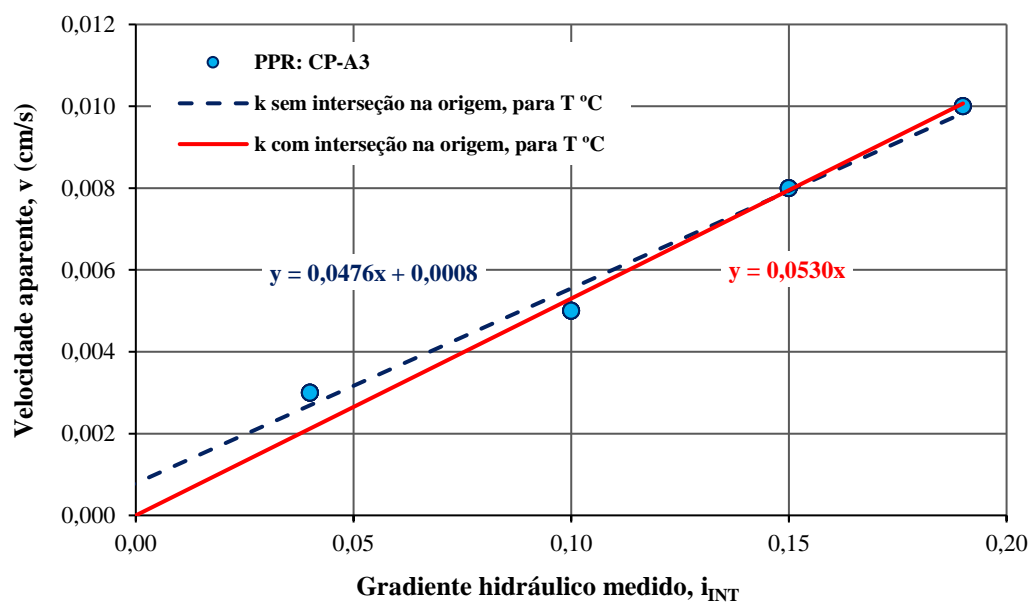


Figura 82 - Velocidade aparente *versus* gradiente hidráulico medido, para o CP-A3.

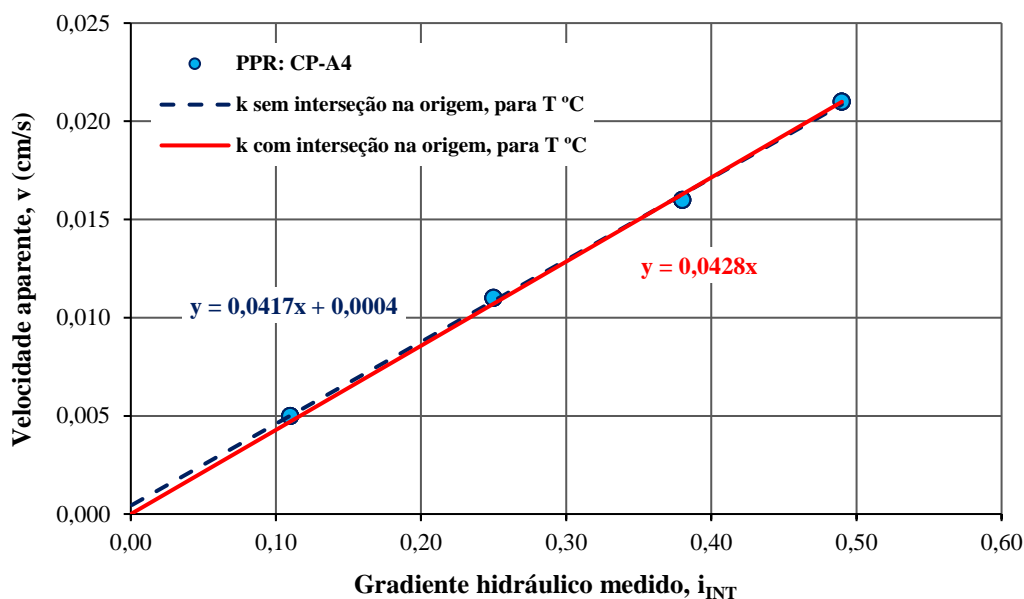


Figura 83 - Velocidade aparente *versus* gradiente hidráulico medido, para o CP-A4.

Conforme mencionado nas seções 2.2.3.2 e 3.8.1, os valores de condutividade hidráulica devem ser apresentados para uma temperatura de referência para que possam ser comparados; assim sendo, os valores de condutividade hidráulica na temperatura do ensaio (k_T) dos corpos de prova foram calculados para a temperatura de referência de 20 °C. A Tabela 22 apresenta os valores de condutividade hidráulica para a temperatura de 20 °C ($k_{20\text{ °C}}$) para cada um dos corpos de prova, moldados com diferentes índices de vazios, utilizando a amostra da areia da Praia de Ipanema.

Tabela 22 – Valores da condutividade hidráulica a 20 °C para os corpos de prova moldados com a areia da Praia de Ipanema com diferentes índices de vazios

Corpo de prova	Índice de vazios, e	k_T ($\times 10^{-2}$ cm/s)	T (°C)	$\frac{\mu_T}{\mu_{20\text{ °C}}}$	$k_{20\text{ °C}}$ ($\times 10^{-2}$ cm/s)
CP-A1	0,621	12,90	23,0	0,930	12,00
CP-A2	0,544	7,26	22,0	0,952	6,91
CP-A3	0,469	5,30	22,0	0,952	5,05
CP-A4	0,439	4,28	21,2	0,971	4,16

4.3.2 Amostra de microesferas de vidro

Assim como para a amostra da areia da Praia de Ipanema, foram moldados corpos de prova com diferentes índices de vazios utilizando a amostra de

microesferas de vidro de granulometria reconstituída. A Tabela 23 apresenta os métodos de moldagem de cada corpo de prova, sendo: o CP-E1, moldado um com índice de vazios próximo ao máximo; o CP-E2, moldado com um índice de vazios intermediário; e o CP-E3, moldado com um índice de vazios próximo ao mínimo.

Tabela 23 - Métodos de moldagem dos corpos de prova com a amostra de microesferas de vidro de granulometria reconstituída, em PPR

Corpo de Prova	Método de Moldagem
CP-E1	Método B da norma ABNT (2020)
CP-E2	MSP de Miura & Toki (1982) - Funil de Ø 40 mm
CP-E3	MSP de Miura & Toki (1982) - Funil de Ø 5 mm

Como os corpos de prova da amostra de microesferas de vidro eram moldados também diretamente no cilindro rígido em acrílico do permeâmetro, as dimensões iniciais de todos esses eram iguais às dimensões do cilindro rígido. Logo, determinados os pesos secos dos corpos de prova ao final dos ensaios (P_{CP2}) e sendo a densidade relativa das microesferas de vidro igual a 2,487, foram obtidas as características de cada corpo de prova, sendo essas apresentadas na Tabela 24.

Tabela 24 – Características iniciais dos corpos de prova moldados com a amostra de microesferas de vidro em PPR

Corpo de Prova	L (cm)	A _{CP} (cm ²)	V _{CP} (cm ³)	P _{CP2} (gf)	V _s (cm ³)	V _v (cm ³)	e	CR	
								%	Classificação
CP-E1	20,00	77,76	1555,20	2420,80	973,38	581,82	0,598	36	Média
CP-E2	20,00	77,76	1555,20	2529,59	1017,13	538,07	0,529	71	Compacta
CP-E3	20,00	77,76	1555,20	2636,43	1060,08	495,12	0,467	100,00*	Muito compacta

Na Tabela 24, o corpo de prova CP-E3 apresenta um índice de vazios menor que o índice de vazios mínimo obtido para a amostra de microesferas de vidro referido na seção 4.2.2, igual a 0,471, obtido pelo método de Miura e Toki (1982) em funil com bocal de diâmetro de 5 mm e para o molde PPF. Contudo, ressalta-se que o valor de 0,467 foi obtido após a “saturação” do corpo de prova, ou seja, após uma percolação de água destilada.

As Tabelas 25, 26 e 27 apresentam, respectivamente, os registros de ensaio dos corpos de prova CP-E1, CP-E2 e CP-E3, sendo esses os valores utilizados para

a determinação da condutividade hidráulica na temperatura de ensaio (k_T) de cada corpo de prova. Ainda, assim como observando na seção anterior (4.3.2), os valores dos gradientes hidráulicos medidos (i_{INT}) nos corpos de prova moldados com a amostra de microesferas de vidro foram menores que os valores dos gradientes hidráulicos impostos (i_{EXT}).

Tabela 25 - Resultados obtidos nos estabelecimentos de fluxo para cálculo do valor da condutividade hidráulica na temperatura do ensaio (k_T) do CP-E1.

Gradiente imposto (externo), i_{EXT}	Leitura P1 (cm)	Leitura P2 (cm)	Δh (cm)	Gradiente medido (interno), i_{INT}	Estabelecimento de fluxo	Volume de água na proveta (mL)		ΔV (mL)	Δt (s)	T (°C)	Q (cm³/s)	v (cm/s)
						Início	Final					
0,2	37,24	35,72	1,52	0,15	01	20,0	30,0	10,0	6,53	21,5	1,530	0,020
					02	20,0	40,0	20,0	13,90		1,440	0,019
					03	20,0	50,0	30,0	20,32		1,480	0,019
					04	20,0	60,0	40,0	27,35		1,460	0,019
					05	20,0	70,0	50,0	34,25		1,460	0,019
0,4	36,48	33,82	2,66	0,27	01	20,0	30,0	10,0	3,69	21,5	2,710	0,035
					02	20,0	40,0	20,0	7,44		2,690	0,035
					03	20,0	50,0	30,0	10,94		2,740	0,035
					04	20,0	60,0	40,0	14,35		2,790	0,036
					05	20,0	70,0	50,0	18,07		2,770	0,036
0,6	35,53	31,92	3,61	0,36	01	20,0	60,0	40,0	9,78	21,5	4,090	0,053
					02	20,0	60,0	40,0	9,84		4,070	0,052
					03	20,0	60,0	40,0	10,03		3,990	0,051
					04	20,0	70,0	50,0	12,25		4,080	0,052
					05	20,0	70,0	50,0	12,35		4,050	0,052
0,8	34,58	30,21	4,37	0,44	01	20,0	60,0	40,0	7,53	21,5	5,310	0,068
					02	20,0	60,0	40,0	7,47		5,350	0,069
					03	20,0	60,0	40,0	7,47		5,350	0,069
					04	20,0	70,0	50,0	9,50		5,260	0,068
					05	20,0	70,0	50,0	9,50		5,260	0,068

Tabela 26 - Resultados obtidos nos estabelecimentos de fluxo para cálculo do valor da condutividade hidráulica na temperatura do ensaio (k_T) do CP-E2.

Gradiente imposto (externo), i_{EXT}	Leitura P1 (cm)	Leitura P2 (cm)	Δh (cm)	Gradiente medido (interno), i_{INT}	Estabelecimento de fluxo	Volume de água na proveta (mL)		ΔV (mL)	Δt (s)	T (°C)	Q (cm³/s)	v (cm/s)
						Início	Final					
0,2	37,24	35,72	1,52	0,15	01	20,0	30,0	10,0	9,82	21,5	1,020	0,013
					02	20,0	40,0	20,0	19,72		1,010	0,013
					03	20,0	50,0	30,0	29,66		1,010	0,013
					04	20,0	60,0	40,0	39,50		1,010	0,013
					05	20,0	70,0	50,0	50,00		1,000	0,013
0,4	36,10	33,25	2,85	0,29	01	20,0	30,0	10,0	4,63	21,5	2,160	0,028
					02	20,0	40,0	20,0	9,53		2,100	0,027
					03	20,0	50,0	30,0	13,91		2,160	0,028
					04	20,0	60,0	40,0	18,56		2,160	0,028
					05	20,0	70,0	50,0	23,56		2,120	0,027
0,6	35,34	30,97	4,37	0,44	01	20,0	60,0	40,0	12,59	21,5	3,180	0,041
					02	20,0	60,0	40,0	12,72		3,140	0,040
					03	20,0	60,0	40,0	12,50		3,200	0,041
					04	20,0	70,0	50,0	15,94		3,140	0,040
					05	20,0	70,0	50,0	16,03		3,120	0,040
0,8	34,39	29,07	5,32	0,53	01	20,0	60,0	40,0	9,78	21,5	4,090	0,053
					02	20,0	60,0	40,0	9,60		4,170	0,054
					03	20,0	60,0	40,0	9,93		4,030	0,052
					04	20,0	70,0	50,0	12,28		4,070	0,052
					05	20,0	70,0	50,0	12,34		4,050	0,052

Tabela 27 - Resultados obtidos nos estabelecimentos de fluxo para cálculo do valor da condutividade hidráulica na temperatura do ensaio (k_T) do CP-E3.

Gradiente imposto (externo), i_{EXT}	Leitura P1 (cm)	Leitura P2 (cm)	Δh (cm)	Gradiente medido (interno), i_{INT}	Estabelecimento de fluxo	Volume de água na proveta (mL)		ΔV (mL)	Δt (s)	T (°C)	Q (cm ³ /s)	v (cm/s)
						Início	Final					
0,2	37,05	35,53	1,52	0,15	01	20,0	30,0	10,0	16,62	21,8	0,600	0,008
					02	20,0	40,0	20,0	27,25		0,730	0,009
					03	20,0	50,0	30,0	39,91		0,750	0,010
					04	20,0	60,0	40,0	53,12		0,750	0,010
					05	20,0	70,0	50,0	66,56		0,750	0,010
0,4	36,29	33,06	3,23	0,32	01	20,0	30,0	10,0	6,10	21,8	1,640	0,021
					02	20,0	40,0	20,0	12,25		1,630	0,021
					03	20,0	50,0	30,0	18,50		1,620	0,021
					04	20,0	60,0	40,0	24,88		1,610	0,021
					05	20,0	70,0	50,0	31,16		1,600	0,021
0,6	35,15	30,59	4,56	0,46	01	20,0	60,0	40,0	16,81	21,8	2,380	0,031
					02	20,0	60,0	40,0	16,72		2,390	0,031
					03	20,0	60,0	40,0	16,65		2,400	0,031
					04	20,0	70,0	50,0	21,03		2,380	0,031
					05	20,0	70,0	50,0	21,10		2,370	0,030
0,8	34,58	28,50	6,08	0,61	01	20,0	60,0	40,0	12,88	21,8	3,110	0,040
					02	20,0	60,0	40,0	12,69		3,150	0,041
					03	20,0	60,0	40,0	12,69		3,150	0,041
					04	20,0	70,0	50,0	15,82		3,160	0,041
					05	20,0	70,0	50,0	15,97		3,130	0,040

As Figuras 84, 85 e 86 apresentam os gráficos “gradiente hidráulico medido *versus* velocidade aparente” para determinação da condutividade hidráulica temperatura do ensaio (k_T) dos corpos de prova CP-E1, CP-E2 e CP-E3, respectivamente.

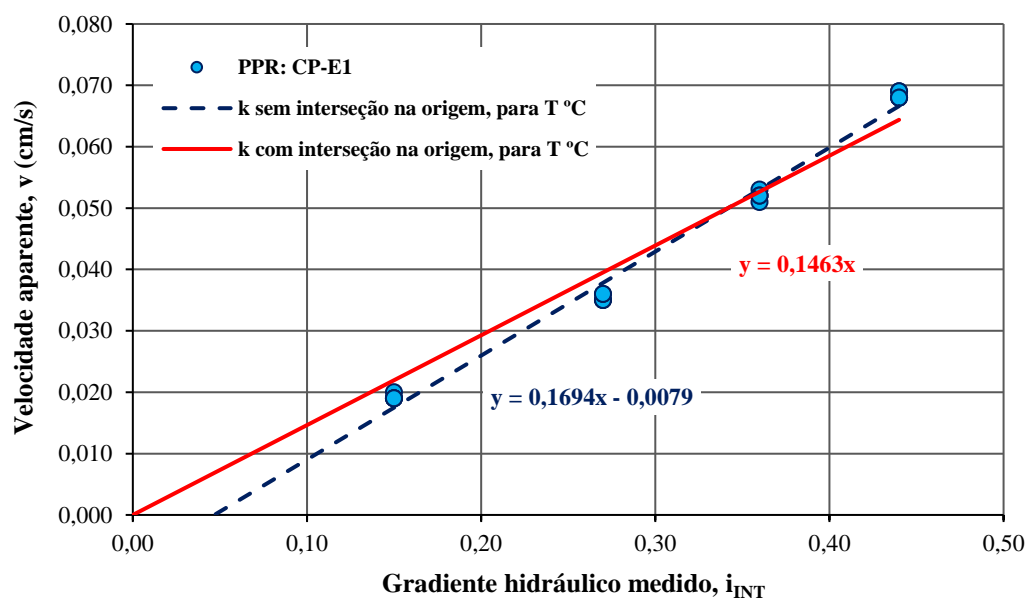


Figura 84 - Velocidade aparente *versus* gradiente hidráulico medido, para o CP-E1.

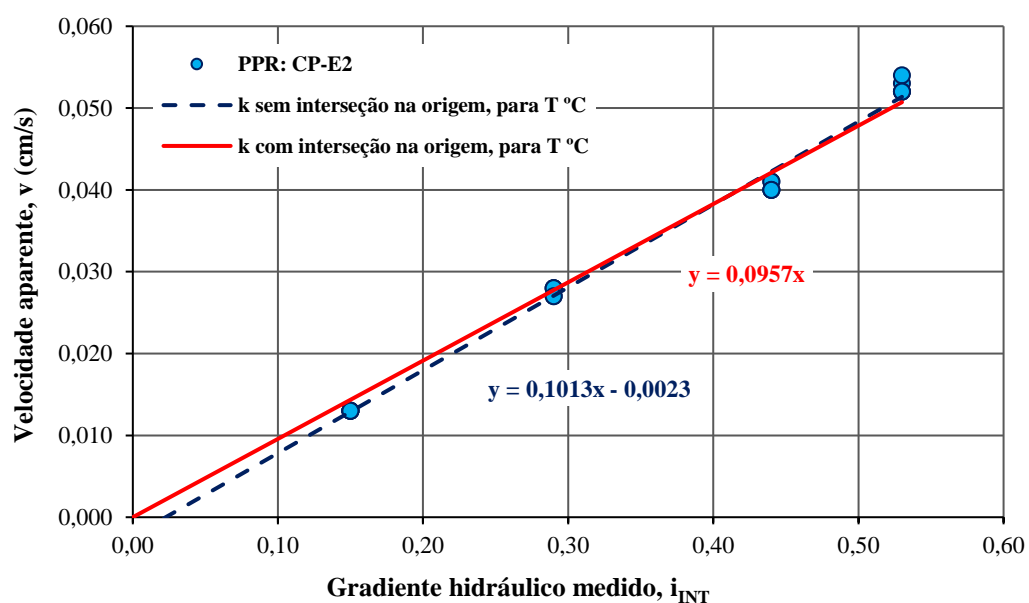


Figura 85 - Velocidade aparente *versus* gradiente hidráulico medido, para o CP-E2.

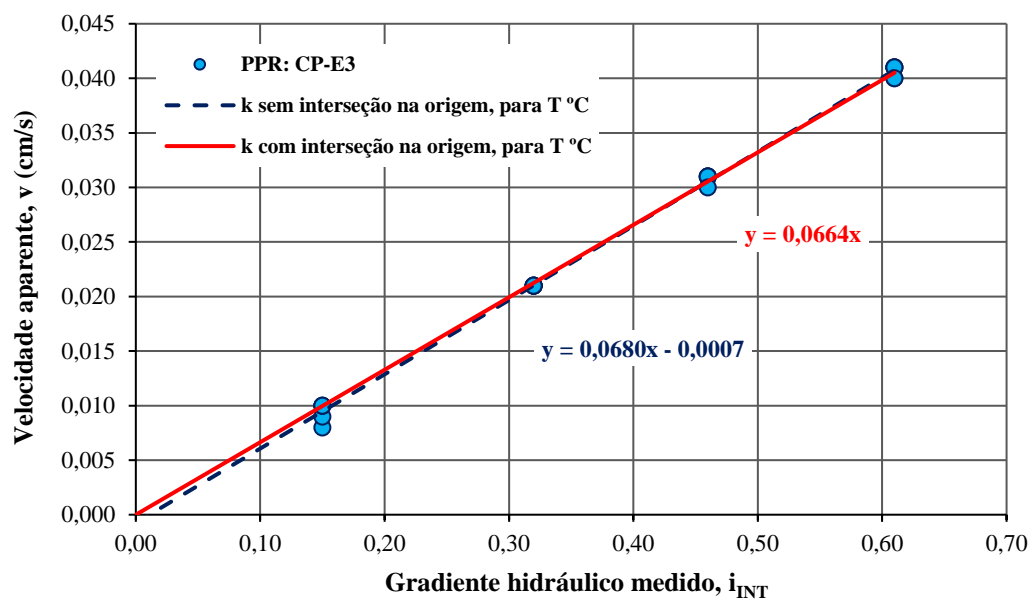


Figura 86 - Velocidade aparente *versus* gradiente hidráulico medido, para o CP-E3.

Na Tabela 28 são apresentados os valores da condutividade hidráulica corrigida para a temperatura de 20 °C ($k_{20\text{ °C}}$) para cada corpo de prova, moldados com diferentes índices de vazios, utilizando a amostra de microesferas de vidro.

Tabela 28 – Valores da condutividade hidráulica a 20 °C para os corpos de prova moldados com a amostra de microesferas de vidro com diferentes índices de vazios

Corpo de prova	Índice de vazios, e	k_T ($\times 10^{-2}$ cm/s)	T (°C)	$\frac{\mu_T}{\mu_{20\text{ °C}}}$	$k_{20\text{ °C}}$ ($\times 10^{-2}$ cm/s)
CP-E1	0,598	14,60	21,5	0,964	14,10
CP-E2	0,529	9,57	20,5	0,989	9,47
CP-E3	0,467	6,64	21,8	0,957	6,35

4.4

Determinação da condutividade hidráulica em permeâmetro de parede flexível

4.4.1

Considerações iniciais

Os resultados dos ensaios realizados no permeâmetro de parede flexível (PPF) sob carga constante, cujos procedimentos foram descritos na seção 3.8.2, serão apresentados de forma conjunta para a amostra da areia da Praia de Ipanema e para a amostra de microesferas de vidro com granulometria reconstituída.

4.4.2

Características dos corpos de prova

No permeâmetro de parede flexível foram realizados quatro ensaios de permeabilidade, sendo: dois em corpos de prova moldados com a areia da Praia de Ipanema e dois em corpos de prova moldados com a amostra de microesferas de vidro. Para cada amostra, um corpo de prova foi moldado com o valor de índice de vazios próximo ao índice de vazios máximo ($e_{\text{máx}}$) e outro com um valor de índice de vazios próximo ao índice de vazios mínimo ($e_{\text{mín}}$). A Tabela 29 apresenta as denominações dos corpos de prova ensaiados, assim como, as respectivas amostras e os métodos de moldagem utilizados. Os procedimentos de moldagem seguiram as descrições apresentadas na seção 3.7.1, para o método B da norma ABNT (2020), e na seção 3.7.2, para o método MSP de Miura & Toki (1982).

Tabela 29 – Métodos de moldagem dos corpos de prova ensaiados no PPF

Corpo de Prova	Amostra	Método de Moldagem
CP-A1	Areia da Praia de Ipanema	Método B da norma ABNT (2020)
CP-A2	Areia da Praia de Ipanema	MSP de Miura & Toki (1982) - Funil de Ø 5 mm
CP-E1	Microesferas de vidro	Método B da norma ABNT (2020)
CP-E2	Microesferas de vidro	MSP de Miura & Toki (1982) - Funil de Ø 5 mm

As características iniciais dos corpos de prova são apresentadas na Tabela 30, sendo essas: altura (L_0); diâmetro (D_0); área da seção transversal (A_0); volume total (V_{TOT0}); peso seco (P_s), determinado após a finalização do ensaio; volume dos sólidos (V_s); volume de vazios (V_{v0}); índice de vazios (e_0) e compacidade relativa

(CR₀). Ressalta-se que, para a determinação do volume de sólidos (V_s) a partir do peso seco do corpo de prova (P_s), utilizou-se a densidade relativa dos grãos (G_s) igual a 2,656, para a amostra da areia da Praia de Ipanema, e igual a 2,487, para a amostra de microesferas de vidro.

As dimensões dos corpos de prova foram determinadas logo após a moldagem, quando os mesmos se encontravam sob uma tensão efetiva (σ') de 10 kPa, ou seja, com tensão total igual a zero e sucção de 10 kPa. A classificação quanto à compactidade relativa (CR) utilizada na Tabela 20 é a apresentada em Lambe & Whitman (1969), conforme mencionado na seção 2.1.4.

Tabela 30 - Características iniciais dos corpos de prova ensaiados no PPF

Corpo de prova	L ₀ (cm)	D ₀ (cm)	A ₀ (cm ²)	V _{T0} (cm ³)	P _s (gf)	V _s (cm ³)	V _{v0} (cm ³)	e ₀	CR ₀	
									%	Classificação
CP-A1	8,83	3,88	11,82	104,40	167,19	62,95	41,45	0,659	15	Fofa
CP-A2	8,84	3,89	11,88	105,06	189,07	71,19	33,87	0,476	84	Compacta
CP-E1	8,77	3,89	11,88	104,23	161,97	65,13	39,10	0,600	35	Fofa
CP-E2	8,80	3,92	12,07	106,20	176,54	70,99	35,21	0,496	87	Muito compacta

4.4.3

Saturação por contrapressão e medições do parâmetro B

Tanto os procedimentos de saturação do corpo de prova por contrapressão quanto os de determinação do parâmetro B de Skempton (1954) foram realizados em seis estágios. Conforme descrito na seção 3.8.2, os estágios de medição do parâmetro B eram intercalados com os estágios de saturação do corpo de prova por contrapressão, nos quais eram aplicados sucessivos incrementos de tensão de confinamento e de contrapressão.

Dessa forma, as Tabelas 31 a 34, a seguir, resumem os resultados dos processos de saturação por contrapressão e de medição do parâmetro B, para cada corpo de prova ensaiado. As Tabelas X, X, X e X, correspondem, respectivamente, aos corpos de prova CP-A1, CP-A2, CP-E1 e CP-E2, apresentando as seguintes informações de cada um dos seis estágios de medição do parâmetro B:

- O valor da contrapressão aplicada no estágio anterior (u_{b0});
- O valor da tensão total no corpo de prova antes da aplicação do incremento de tensão total do estágio (σ_0);

- c) O valor do incremento de tensão total aplicado no estágio ($\Delta\sigma$);
- d) O valor da tensão total aplicada no estágio (σ);
- e) O valor da poropressão (u) no corpo de prova decorrente da aplicação de $\Delta\sigma$, calculado como o valor da leitura do transdutor de poropressão conectado à base do corpo de prova (P_{TB}) menos o produto entre a distância do transdutor de poropressão da base “TB” à base do corpo de prova ($z_B = 0,18$ m) e o peso específico da água ($\gamma_w = 9,81$ kN/m³) — vide Figura X. Ou seja, $u = P_{TB} - (z_B \cdot \gamma_w) = P_{TB} - 1,77$ kPa;
- f) O valor do incremento de poropressão (Δu), sendo $\Delta u = u - u_{b0}$;
- g) O valor do parâmetro B de Skempton (1954), calculado como: $B = \Delta u / \Delta\sigma$.

Tabela 31 - Resultados da medição do parâmetro B do CP-A1

Estágio	u_{b0} (kPa)	σ_0 (kPa)	$\Delta\sigma$ (kPa)	σ (kPa)	u (kPa)	Δu (kPa)	B
1	40	50	50	100	65,70	25,70	0,51
2	90	100	100	200	159,63	69,63	0,70
3	190	200	100	300	279,20	89,20	0,89
4	290	300	100	400	385,56	95,56	0,96
5	390	400	100	500	487,36	97,36	0,97
6	490	500	100	600	588,41	98,41	0,98

Tabela 32 - Resultados da medição do parâmetro B do CP-A2

Estágio	u_{b0} (kPa)	σ_0 (kPa)	$\Delta\sigma$ (kPa)	σ (kPa)	u (kPa)	Δu (kPa)	B
1	40	50	50	100	67,19	27,19	0,54
2	90	100	100	200	149,53	59,53	0,60
3	190	200	100	300	270,83	80,83	0,81
4	290	300	100	400	381,02	91,02	0,91
5	390	400	100	500	483,62	93,62	0,94
6	490	500	100	600	587,50	97,50	0,98

Tabela 33 - Resultados da medição do parâmetro B do CP-E1

Estágio	u_{b0} (kPa)	σ_0 (kPa)	$\Delta\sigma$ (kPa)	σ (kPa)	u (kPa)	Δu (kPa)	B
1	40	50	50	100	62,99	22,99	0,46
2	90	100	100	200	154,82	64,82	0,65
3	190	200	100	300	274,16	84,16	0,84
4	290	300	100	400	380,93	90,93	0,91
5	390	400	100	500	484,67	94,67	0,95
6	490	500	100	600	588,08	98,08	0,98

Tabela 34 - Resultados da medição do parâmetro B do CP-E2

Estágio	u_{b0} (kPa)	σ_0 (kPa)	$\Delta\sigma$ (kPa)	σ (kPa)	u (kPa)	Δu (kPa)	B
1	40	50	50	100	55,23	15,23	0,30
2	90	100	100	200	157,55	67,55	0,68
3	190	200	100	300	273,13	83,13	0,83
4	290	300	100	400	381,87	91,87	0,92
5	390	400	100	500	483,35	93,35	0,93
6	490	500	100	600	586,67	96,67	0,97

Das Tabelas 31 a 34, observa-se que o menor valor de parâmetro B final obtido foi igual a 0,97, para o CP-E2. A Figura 87 mostra a relação entre o parâmetro B medido e a contrapressão aplicada para os quatro corpos de prova ensaiados (CP-A1, CP-A2, CP-E1 e CP-E2).

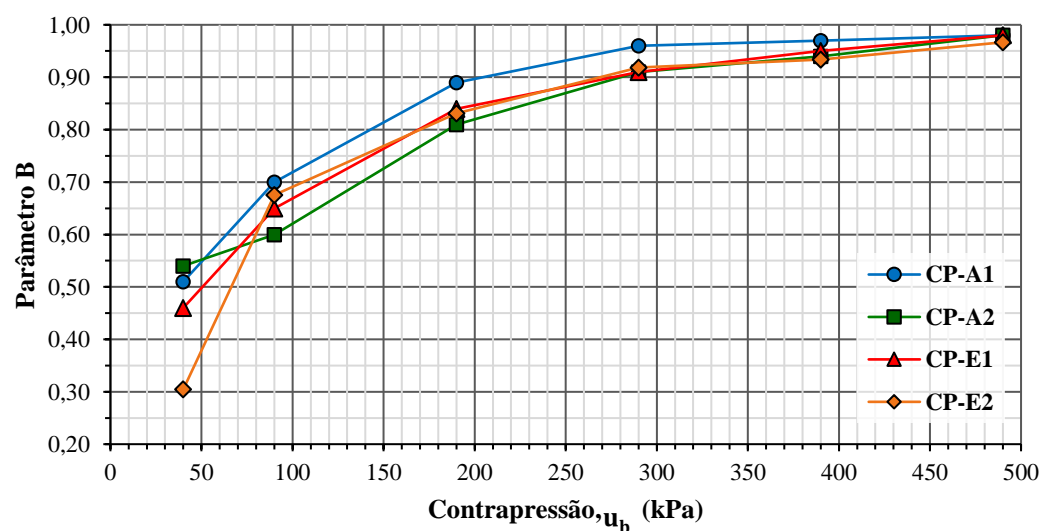


Figura 87 - Relação entre o parâmetro B e a contrapressão aplicada.

Nas Tabelas 35, 36, 37 e 38 são apresentadas as seguintes informações de cada um dos seis estágios de saturação por contrapressão dos corpos de prova CP-A1, CP-A2, CP-E1 e CP-E2, respectivamente:

- O valor da contrapressão (u_b) aplicada no estágio;
- O valor da tensão total (σ) aplicada no estágio;
- O período de tempo (Δt) em que a drenagem permaneceu aberta com a contrapressão aplicada;
- O volume de água (ΔV_{we}) que entrou no corpo de prova durante o estágio;
- O volume de água total (V_{we}) que entrou no corpo de prova desde o início do processo de saturação até o fim do estágio.

Tabela 35 - Resultados do processo de saturação do CP-A1

Estágio	u_b (kPa)	σ (kPa)	Δt (min)	ΔV_{we} (ml)	V_{we} (ml)
1	40	50	788	3,21	3,21
2	90	100	130	0,84	4,05
3	190	200	130	0,87	4,92
4	290	300	127	0,51	5,43
5	390	400	120	0,32	5,75
6	490	500	740	1,52	7,27

Tabela 36 - Resultados do processo de saturação do CP-A2

Estágio	u_b (kPa)	σ (kPa)	Δt (min)	ΔV_{we} (ml)	V_{we} (ml)
1	40	50	180	2,94	2,94
2	90	100	923	2,01	4,95
3	190	200	180	0,67	5,62
4	290	300	180	0,41	6,03
5	390	400	186	0,37	6,40
6	490	500	980	1,37	7,77

Tabela 37 - Resultados do processo de saturação do CP-E1

Estágio	u_b (kPa)	σ (kPa)	Δt (min)	ΔV_{we} (ml)	V_{we} (ml)
1	40	50	908	3,02	3,02
2	90	100	90	0,85	3,87
3	190	200	90	0,96	4,83
4	290	300	90	0,47	5,30
5	390	400	90	0,38	5,68
6	490	500	860	1,55	7,23

Tabela 38 - Resultados do processo de saturação do CP-E2

Estágio	u_b (kPa)	σ (kPa)	Δt (min)	ΔV_{we} (ml)	V_{we} (ml)
1	40	50	120	0,99	0,99
2	90	100	900	1,37	2,36
3	190	200	180	0,57	2,93
4	290	300	180	0,41	3,34
5	390	400	180	0,43	3,77
6	490	500	780	1,22	4,99

Na Tabela 39 apresenta-se um resumo dos volumes totais de água que entraram nos corpos de prova (V_{we}) ao longo de todo o processo de saturação. Conforme o esperado, para os corpos de prova de amostra de microesferas de vidro (CP-E1 e CP-E2), observou-se que quanto menor o índice de vazios, menor o volume de água que entrou no corpo de prova. Em contrapartida, para os corpos de prova da areia da Praia de Ipanema (CP-A1 e CP-A2), isto não foi observado, tendo os dois corpos de prova apresentado valores praticamente iguais para o volume de água que entrou.

Tabela 39 - Volumes totais de água que entraram nos corpos de prova ao longo do processo de saturação

Corpo de prova	e_0	CR %	V_{we} (ml)
CP-A1	0,659	15	7,27
CP-A2	0,476	84	7,77
CP-E1	0,600	35	7,23
CP-E2	0,496	87	4,99

Apenas à título de exercício, foram feitos os seguintes cálculos com a finalidade de estimar os valores de grau de saturação (S_r) que os corpos de prova apresentavam antes do processo de saturação por contrapressão; bem como, de relacionar o parâmetro B medido com o grau de saturação (S_r) dos corpos de prova, assim: assumindo-se que, durante o processo de saturação, não houve variação dos volumes de vazios (V_v) dos corpos de prova, e que no fim do processo de saturação os corpos de prova encontravam-se com o grau de saturação (S_r) igual a 100 % (o que é uma aproximação feita apenas para considerar que o volume final de água era igual ao volume de vazios do corpo de prova), conhecendo os volumes de água que

entraram nos corpos de prova durante cada estágio de saturação, os valores de grau de saturação (S_r) dos corpos de prova para cada estágio foram retrocalculados.

As Tabelas 40, 41, 42 e 43 mostram os resultados dos retrocálculos efetuados para os corpos de prova CP-A1, CP-A2, CP-E1 e CP-E2, respectivamente, onde V_w é o volume de água que preenchia os vazios do corpo de prova. Os valores do parâmetro B correspondentes ao estágio 0 não foram apresentados, visto que, nesse estágio, os corpos de prova encontravam-se sob valores de poropressão negativos (sucção), para os quais os transdutores de pressão não eram adequados; assim, o primeiro valor de “B” só foi determinado após o primeiro estágio de contrapressão.

Tabela 40 - Relação entre o grau de saturação (S_r) estimado e o parâmetro B para o CP-A1

Estágio	V_v (cm³)	V_w (cm³)	S_r (%)	B
0	41,45	34,18	82,5	-
1	41,45	37,39	90,2	0,51
2	41,45	38,23	92,2	0,70
3	41,45	39,10	94,3	0,89
4	41,45	39,61	95,6	0,96
5	41,45	39,93	96,3	0,97
6	41,45	41,45	100,0	0,98

Tabela 41 - Relação entre o grau de saturação (S_r) estimado e o parâmetro B para o CP-A2

Estágio	V_v (cm³)	V_w (cm³)	S_r (%)	B
0	33,87	26,10	77,1	-
1	33,87	29,04	85,7	0,54
2	33,87	31,05	91,7	0,60
3	33,87	31,72	93,7	0,81
4	33,87	32,13	94,9	0,91
5	33,87	32,50	96,0	0,94
6	33,87	33,87	100,0	0,98

Tabela 42 - Relação entre o grau de saturação (S_r) estimado e o parâmetro B para o CP-E1

Estágio	V_v (cm^3)	V_w (cm^3)	S_r (%)	B
0	39,10	31,87	81,5	-
1	39,10	34,89	89,2	0,46
2	39,10	35,74	91,4	0,65
3	39,10	36,70	93,9	0,84
4	39,10	37,17	95,1	0,91
5	39,10	37,55	96,0	0,95
6	39,10	39,10	100,0	0,98

Tabela 43 - Relação entre o grau de saturação (S_r) estimado e o parâmetro B para o CP-E2

Estágio	V_v (cm^3)	V_w (cm^3)	S_r (%)	B
0	35,21	30,22	85,8	-
1	35,21	31,21	88,6	0,30
2	35,21	32,58	92,5	0,68
3	35,21	33,15	94,2	0,83
4	35,21	33,56	95,3	0,92
5	35,21	33,99	96,5	0,93
6	35,21	35,21	100,0	0,97

A Figura 88, a seguir, apresenta as curvas “parâmetro B *versus* grau de saturação (S_r) estimado” para os corpos de prova CP-A1, CP-A2, CP-E1 e CP-E2.

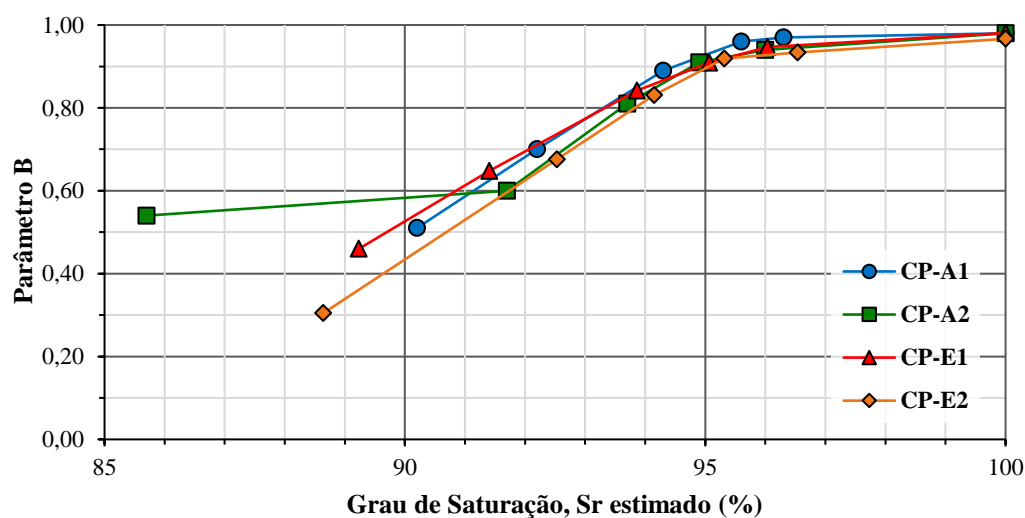


Figura 88 - Curvas “parâmetro B *versus* grau de saturação (S_r) estimado” dos quatro corpos de prova ensaiados.

Nas Tabelas 40 a 43, observa-se que, assumindo que o grau de saturação (S_r) dos corpos de prova era de 100 % no fim dos estágios de saturação por contrapressão, os valores de S_r de todos os quatro corpos de prova estariam entre 77 % e 86 % no início do processo de saturação por contrapressão, ou seja, após a etapa de saturação por percolação de água em fluxo ascendente. Como o coeficiente de permeabilidade (k) é tanto menor quanto menor o grau de saturação (S_r), disto depreende-se a importância da saturação por contrapressão, o que é uma das vantagens do permeâmetro de parede flexível em relação ao permeâmetro de parede rígida, conforme ressaltado na seção 2.2.4.5. Somente mediante a medição do parâmetro B é possível ter a certeza da saturação do corpo de prova.

4.4.4 Compressão hidrostática

Conforme descrito na seção 3.8.2, foram realizados dois estágios de adensamento hidrostático, a saber: estágio 1, de $\sigma' = 10$ kPa para $\sigma' = 100$ kPa; e estágio 2, de $\sigma' = 100$ kPa para $\sigma' = 300$ kPa. Nas Tabelas 44, 45, 46 e 47, são apresentadas as seguintes informações de cada um dos dois estágios de adensamento hidrostático dos corpos de prova CP-A1, CP-A2, CP-E1 e CP-E2, respectivamente:

- a) O valor da tensão efetiva (σ') aplicada no corpo de prova no fim do estágio;
- b) O volume de água (ΔV_w) expelido do corpo de prova durante o estágio, que corresponde à variação de volume (ΔV) do corpo de prova no estágio;
- c) A variação de volume total do corpo de prova (ΔV_t) no fim do estágio, calculado pela soma do ΔV da etapa em questão e dos estágios anteriores;
- d) A deformação específica volumétrica (ε_{vol}) do corpo de prova no fim do estágio, calculada como: $\varepsilon_{vol} = \Delta V_t / V_0$, onde V_0 é o volume inicial do corpo de prova (na ocasião da moldagem). O valor é apresentado em porcentagem;
- e) A deformação específica axial (ε_a) do corpo de prova no fim do estágio, estimada como: $\varepsilon_a = 1/3 \varepsilon_{vol}$. O valor é apresentado em porcentagem;

- f) A variação de altura total (ΔL_t) do corpo de prova no fim do estágio, calculada como: $\Delta L_t = \epsilon_a L_0$, onde L_0 é a altura inicial do corpo de prova (na ocasião da moldagem);
- g) O volume do corpo de prova (V) no fim do estágio, calculado como:
 $V = V_0 - \Delta V_t$;
- h) A altura do corpo de prova (L) no fim do estágio, calculada como:
 $L = L_0 - \Delta L_t$;
- i) A área da seção transversal do corpo de prova (A) no fim do estágio, calculada como: $A = V / L$;
- j) O volume de vazios do corpo de prova (V_v) no fim do estágio, calculado como: $V_v = V_{V0} - \Delta V_t$;
- k) O índice de vazios do corpo de prova (e) no fim do estágio, calculado como: $e = V_v / V_s$, onde V_s é o volume de sólidos do corpo de prova.

Tabela 44 - Resultados obtidos das etapas de adensamento hidrostático do CP-A1

Estágio	σ' (kPa)	ΔV (cm ³)	ΔV_t (cm ³)	ϵ_{vol} (%)	ϵ_a (%)	ΔL_t (cm)	V (cm ³)	L (cm)	A (cm ²)	V_v (cm ³)	e	CR (%)
0	10	0,00	0,00	0,00	0,00	0,000	104,40	8,83	11,82	41,45	0,659	15
1	100	0,65	0,65	0,62	0,21	0,02	103,75	8,81	11,77	40,80	0,648	19
2	300	0,42	1,07	1,02	0,34	0,03	102,68	8,78	11,69	39,73	0,631	25

Tabela 45 - Resultados obtidos das etapas de adensamento hidrostático do CP-A2

Estágio	σ' (kPa)	ΔV (cm ³)	ΔV_t (cm ³)	ϵ_{vol} (%)	ϵ_a (%)	ΔL_t (cm)	V (cm ³)	L (cm)	A (cm ²)	V_v (cm ³)	e	CR (%)
0	10	0,00	0,00	0,00	0,00	0,000	105,06	8,840	11,88	33,87	0,476	84
1	100	0,28	0,28	0,27	0,09	0,008	104,78	8,832	11,86	33,59	0,472	85
2	300	0,15	0,43	0,41	0,14	0,012	104,35	8,820	11,83	33,16	0,466	88

Tabela 46 - Resultados obtidos das etapas de adensamento hidrostático do CP-E1

Estágio	σ' (kPa)	ΔV (cm ³)	ΔV_t (cm ³)	ϵ_{vol} (%)	ϵ_a (%)	ΔL_t (cm)	V (cm ³)	L (cm)	A (cm ²)	V_v (cm ³)	e	CR (%)
0	10	0,00	0,00	0,00	0,00	0,000	104,23	8,77	11,88	39,10	0,600	35
1	100	0,64	0,64	0,61	0,20	0,02	103,59	8,75	11,84	38,46	0,590	40
2	300	0,44	1,08	1,04	0,35	0,03	102,51	8,72	11,75	37,38	0,574	48

Tabela 47 - Resultados obtidos das etapas de adensamento hidrostático do CP-E2

Estágio	σ' (kPa)	ΔV (cm ³)	ΔV_t (cm ³)	ϵ_{vol} (%)	ϵ_a (%)	ΔL_t (cm)	V (cm ³)	L (cm)	A (cm ²)	V _v (cm ³)	e	CR (%)
0	10	0,00	0,00	0,00	0,00	0,000	106,20	8,80	12,07	35,21	0,496	87
1	100	0,57	0,57	0,54	0,18	0,02	105,63	8,78	12,03	34,64	0,488	91
2	300	0,42	0,99	0,93	0,31	0,03	104,64	8,76	11,95	33,65	0,474	98

A Figura 89 apresenta as curvas de compressibilidade “deformação específica volumétrica *versus* tensão efetiva (hidrostática)”, com a tensão efetiva em escala aritmética, dos corpos de prova CP-A1, CP-A2, CP-E1 e CP-E2.

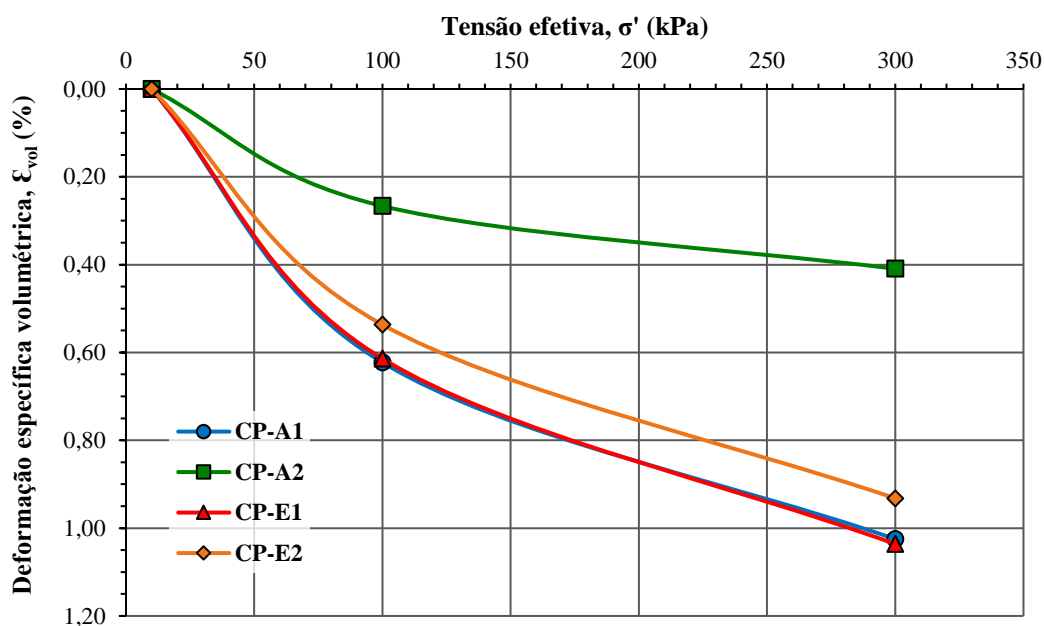


Figura 89 - Curvas “deformação específica volumétrica *versus* tensão efetiva (hidroestática)” (escala aritmética) dos quatro corpos de prova

Da Figura 89, nota-se que as deformações volumétricas foram maiores para os corpos de prova fofos, CP-A1 e CP-E1; sendo o comportamento desses praticamente iguais. As deformações específicas volumétricas dos corpos de prova moldados com maior compacidade relativa foram bem distintas entre si. O CP-A2 apresentou deformações volumétricas bem menores que o CP-E2, estando a curva desse último ligeiramente acima das curvas dos corpos de prova fofos (CP-A1 e CP-E1).

As Figuras 90, 91, 92 e 93 apresentam as curvas de compressibilidade “índice de vazios *versus* tensão efetiva (hidrostática)”, com a tensão efetiva em escala aritmética, para os corpos de prova CP-A1, CP-A2, CP-E1 e CP-E2, respectivamente.

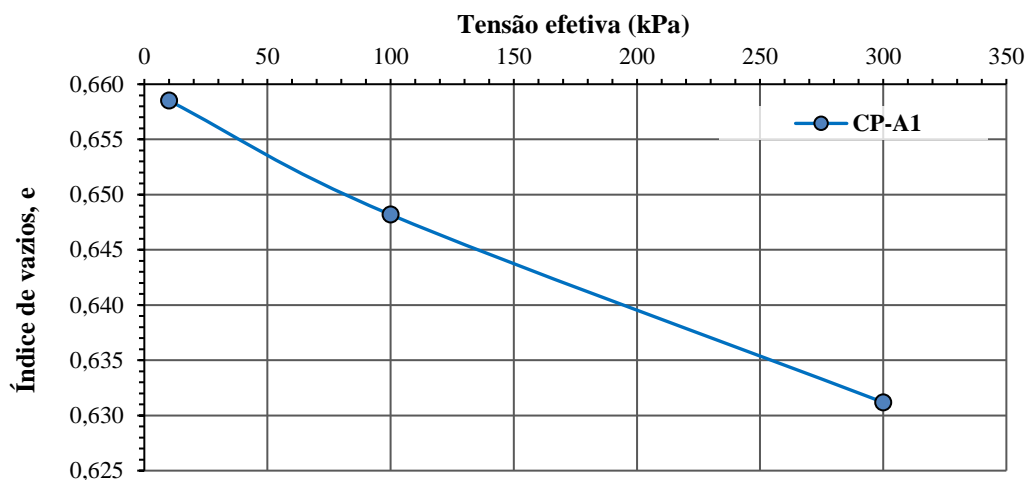


Figura 90 - Curva “índice de vazios *versus* tensão efetiva (hidrostática), em escala aritmética” do corpo de prova CP-A1.

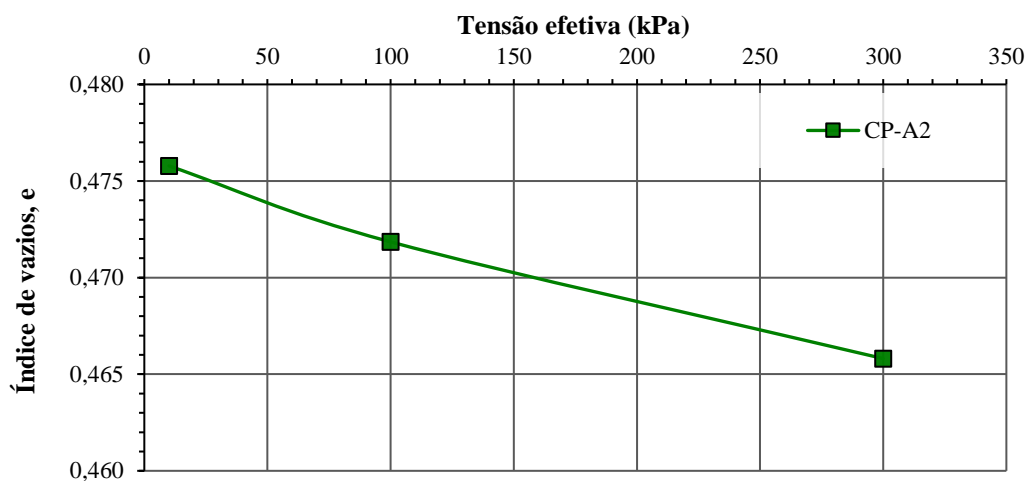


Figura 91 - Curva “índice de vazios *versus* tensão efetiva (hidrostática), em escala aritmética” do corpo de prova CP-A2.

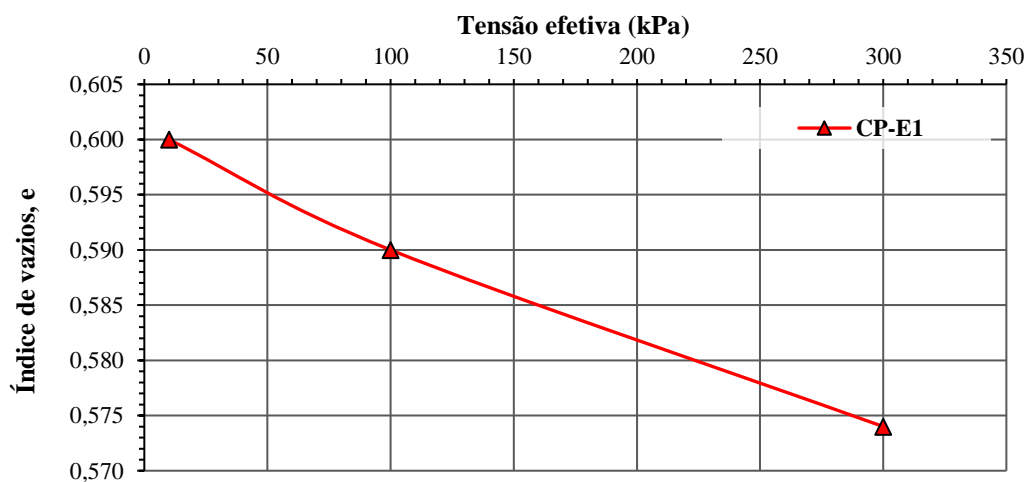


Figura 92 - Curva “índice de vazios *versus* tensão efetiva (hidrostática), em escala aritmética” do corpo de prova CP-E1.

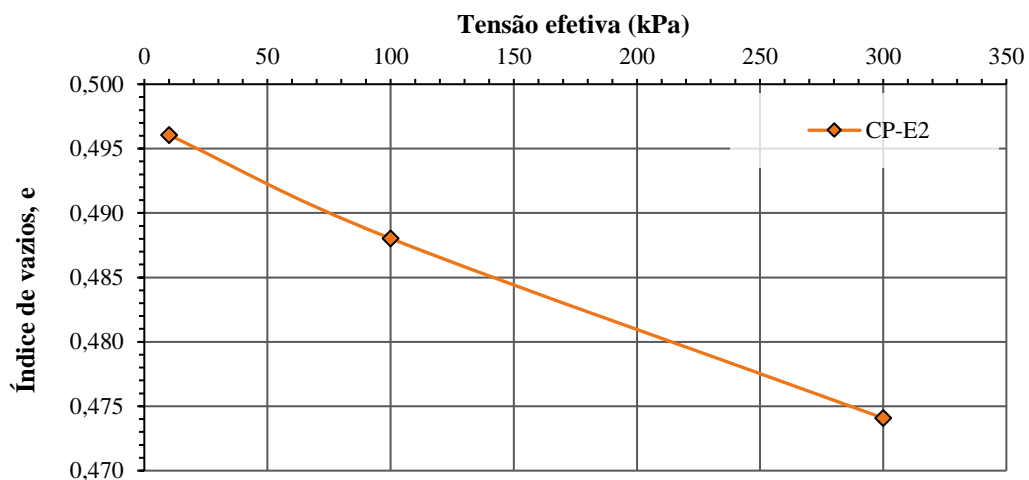


Figura 93 - Curva “índice de vazios *versus* tensão efetiva (hidrostática), em escala aritmética” do corpo de prova CP-E2.

Das Figuras 90 a 93, nota-se que as inclinações das curvas de compressibilidade diminuem em módulo, ou seja, as compressibilidades das amostras diminuem (ou as rigidezes aumentam) à medida que as tensões efetivas hidrostáticas (σ') aplicadas aumentam.

As Figuras 94 a 97 apresentam as curvas de compressibilidade “índice de vazios *versus* tensão efetiva (hidrostática)”, com a tensão efetiva em escala logarítmica.

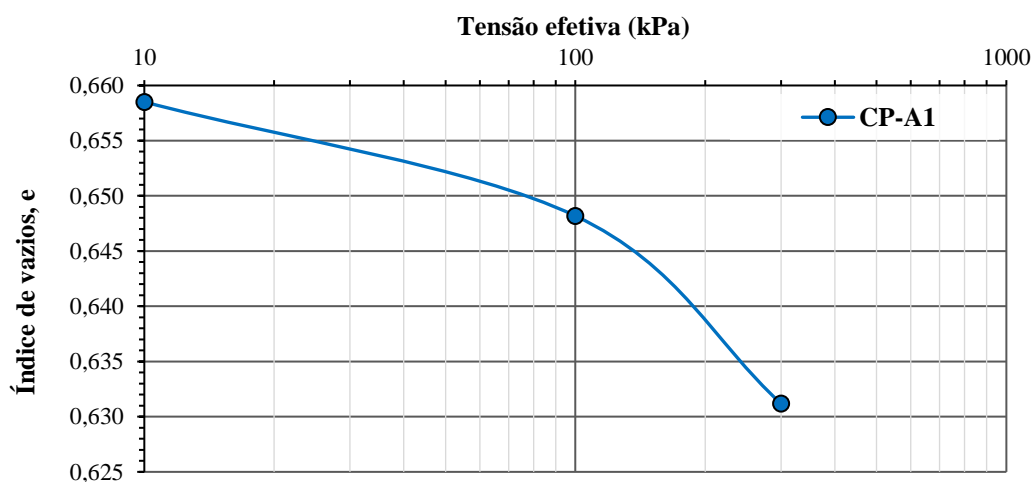


Figura 94 - Curva “índice de vazios *versus* tensão efetiva (hidrostática), em escala logarítmica” do corpo de prova CP-A1.

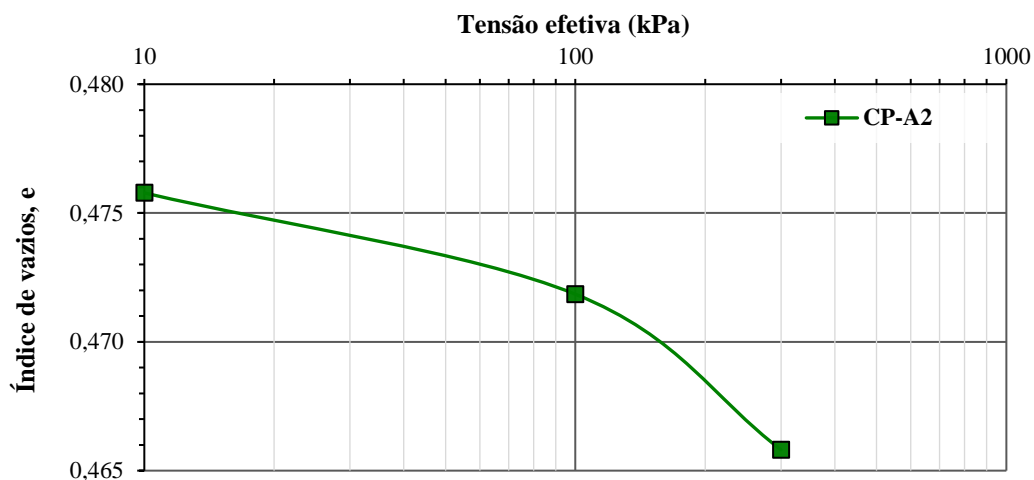


Figura 95 - Curva “índice de vazios *versus* tensão efetiva (hidrostática), em escala logarítmica” do corpo de prova CP-A2.

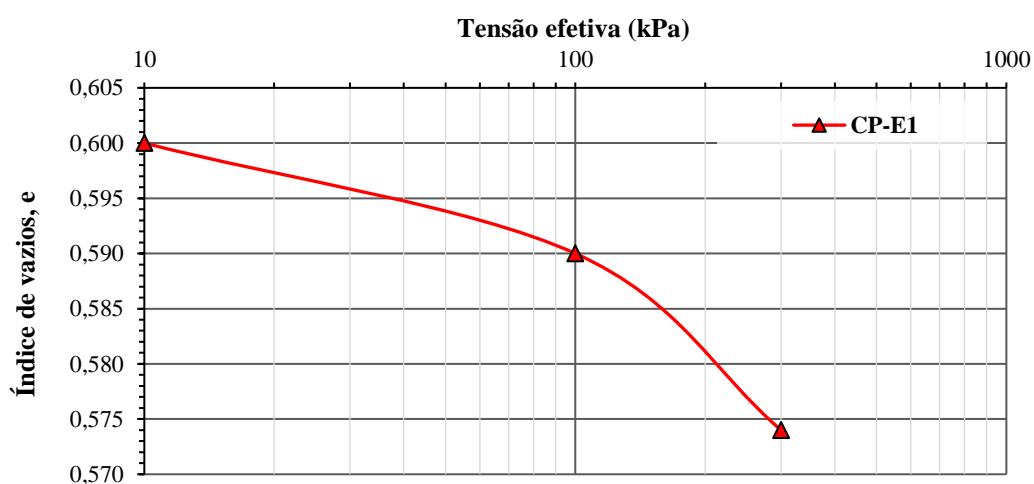


Figura 96 - Curva “índice de vazios *versus* tensão efetiva (hidrostática), em escala logarítmica” do corpo de prova CP-E1.

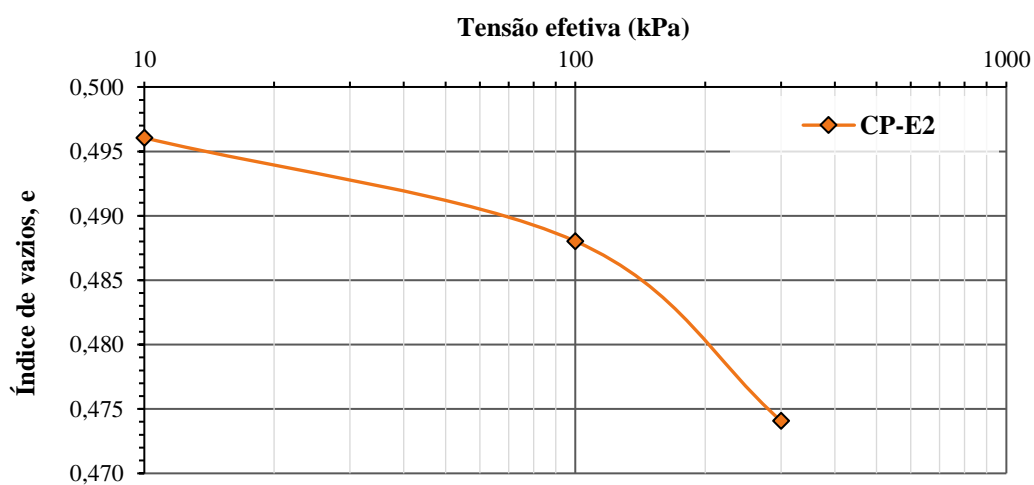


Figura 97 - Curva “índice de vazios *versus* tensão efetiva (hidrostática), em escala logarítmica” do corpo de prova CP-E2.

4.4.5

Estabelecimento de fluxo para determinação da condutividade hidráulica

Conforme apresentado na seção 3.8.2, para cada um dos quatro ensaios, foram realizadas três fases de estabelecimento de fluxo, sob diferentes tensões efetivas (σ'), sendo que, em cada fase, foram impostos três gradientes hidráulicos (i), cujos valores eram de: 1,0; 2,0 e 3,0. Para cada gradiente hidráulico imposto, realizavam-se três percolações, sendo a primeira sempre descartada para cálculo da condutividade hidráulica.

As Tabelas 48, 49, 50 e 51 apresentam, respectivamente, para os corpos de prova CP-A1, CP-A2, CP-E1 e CP-E2, os seguintes dados obtidos nas fases de estabelecimento de fluxo utilizados para cálculo dos valores da condutividade hidráulica (k):

- a) A tensão efetiva (σ') aplicada na etapa de adensamento hidrostático precedente;
- b) O gradiente hidráulico planejado para a percolação (i);
- c) O valor do índice de vazios (e) do corpo de prova na fase;
- d) A altura (L) do corpo de prova;
- e) A área da seção transversal (A) do corpo de prova;
- f) A temperatura (T) do ensaio;
- g) O peso específico da água na temperatura do ensaio (γ_w);
- h) A poropressão “média” aplicada/lida na base do corpo de prova ($u_{B\text{méd}}$) ao longo de cada percolação; “média” porque a leitura oscilava durante a percolação, em geral com baixa amplitude (vide Apêndice C);
- i) A poropressão “média” aplicada/lida no topo do corpo de prova ($u_{T\text{méd}}$) ao longo de cada percolação;
- j) O gradiente hidráulico “médio” ($i_{\text{méd}}$) imposto durante cada percolação; lembrando que era um gradiente imposto “externamente”, uma vez que era ajustado com base nas leituras dos transdutores instalados fora da câmara;
- k) A vazão (Q) determinada diretamente no rotâmetro;
- l) A velocidade aparente da percolação (v), calculada como: $v = Q / A$;

- m) O valor da condutividade hidráulica na temperatura do ensaio (k_T),
calculados como: $k_T = v / i_{méd}$;
- n) A relação entre as viscosidades da água ($\mu_T/\mu_{20^\circ C}$);
- o) A condutividade hidráulica na temperatura de 20 °C ($k_{20^\circ C}$).

Tabela 48 - Resultados obtidos nas percolações para cálculo dos valores da condutividade hidráulica do CP-A1.

Fase	σ' (kPa)	i	Perc.	e	L (cm)	A (cm ²)	T (°C)	γ_w (kN/m ³)	uB méd. (kPa)	uT méd. (kPa)	i méd.	Q méd. (mL/min)	(cm ³ /s)	v (cm/s)	k _T (x 10 ⁻² cm/s)	$\mu/\mu_{20^\circ\text{C}}$	k 20°C (x 10 ⁻² cm/s)
1	10	1,0	02	0,659	8,83	11,82	21,9	9,79	490,89	489,15	1,01	9,97	0,17	0,01405	1,39	0,95	1,32
	10	1,0	03				21,3	9,79	490,87	489,12	1,02	14,06	0,23	0,01982	1,93	0,97	1,87
	10	2,0	02				21,2	9,79	491,39	488,75	2,05	32,47	0,54	0,04577	2,23	0,97	2,16
	10	2,0	03				21,8	9,79	491,40	488,71	2,12	29,92	0,50	0,04218	1,99	0,96	1,90
	10	3,0	02				22,0	9,79	491,87	488,31	3,12	42,92	0,72	0,06050	1,94	0,95	1,85
	10	3,0	03				22,0	9,79	491,79	488,25	3,10	41,96	0,70	0,05915	1,91	0,95	1,82
2	100	1,0	02	0,648	8,81	11,77	21,0	9,79	490,90	489,16	1,02	8,78	0,15	0,01243	1,22	0,98	1,19
	100	1,0	03				21,0	9,79	490,95	489,14	1,10	14,49	0,24	0,02051	1,87	0,98	1,82
	100	2,0	02				21,0	9,79	491,37	488,69	2,11	25,77	0,43	0,03648	1,73	0,98	1,69
	100	2,0	03				21,0	9,79	491,37	488,71	2,08	28,67	0,48	0,04058	1,95	0,98	1,90
	100	3,0	02				21,0	9,79	491,80	488,30	3,06	45,41	0,76	0,06428	2,10	0,98	2,05
	100	3,0	03				21,0	9,79	491,81	488,32	3,05	44,19	0,74	0,06255	2,05	0,98	2,00
3	300	1,0	02	0,631	8,78	11,69	21,1	9,79	490,92	489,14	1,07	17,68	0,29	0,02520	2,35	0,97	2,29
	300	1,0	03				21,2	9,79	490,97	489,12	1,15	13,43	0,22	0,01914	1,66	0,97	1,61
	300	2,0	02				21,0	9,79	491,35	488,73	2,05	26,30	0,44	0,03749	1,83	0,98	1,79
	300	2,0	03				21,1	9,79	491,41	488,70	2,15	29,20	0,49	0,04162	1,93	0,97	1,88
	300	3,0	02				21,0	9,79	491,76	488,25	3,08	37,44	0,62	0,05336	1,73	0,98	1,69
	300	3,0	03				21,0	9,79	491,77	488,28	3,06	41,94	0,70	0,05978	1,95	0,98	1,91

Tabela 49 - Resultados obtidos nas percolações para cálculo dos valores da condutividade hidráulica do CP-A2

Fase	σ' (kPa)	i	Perc.	e	L (cm)	A (cm ²)	T (°C)	γ_w (kN/m ³)	uB méd. (kPa)	uT méd. (kPa)	i méd.	Q méd. (mL/min)	(cm ³ /s)	v (cm/s)	k _T (x 10 ⁻² cm/s)	$\mu/\mu_{20^\circ\text{C}}$	k 20°C (x 10 ⁻² cm/s)
1	10	1,0	02	0,476	8,84	11,88	21,5	9,79	490,86	489,15	0,98	14,71	0,25	0,02063	2,11	0,96	2,04
	10	1,0	03				21,7	9,79	490,86	489,14	0,99	14,13	0,24	0,01982	2,01	0,96	1,92
	10	2,0	02				21,8	9,79	491,27	488,73	1,94	23,44	0,39	0,03287	1,70	0,96	1,63
	10	2,0	03				21,9	9,79	491,29	488,72	1,97	20,52	0,34	0,02878	1,46	0,95	1,39
	10	3,0	02				21,9	9,79	491,71	488,30	2,94	35,33	0,59	0,04955	1,68	0,95	1,61
	10	3,0	03				21,8	9,79	491,70	488,31	2,92	35,58	0,59	0,04990	1,71	0,96	1,64
2	100	1,0	02	0,472	8,83	11,86	21,8	9,79	490,85	489,15	0,97	12,08	0,20	0,01697	1,76	0,96	1,68
	100	1,0	03				21,8	9,79	490,86	489,14	0,99	11,14	0,19	0,01565	1,58	0,96	1,51
	100	2,0	02				21,8	9,79	491,27	488,71	1,96	19,03	0,32	0,02673	1,36	0,96	1,30
	100	2,0	03				21,8	9,79	491,28	488,72	1,96	23,32	0,39	0,03276	1,67	0,96	1,60
	100	3,0	02				21,5	9,79	491,72	488,26	3,00	29,05	0,48	0,04081	1,36	0,96	1,31
	100	3,0	03				21,5	9,79	491,69	488,29	2,93	34,89	0,58	0,04902	1,67	0,96	1,61
3	300	1,0	02	0,466	8,82	11,83	21,5	9,79	490,84	489,14	0,97	12,78	0,21	0,01800	1,86	0,96	1,79
	300	1,0	03				21,5	9,79	490,86	489,14	0,99	11,96	0,20	0,01685	1,70	0,96	1,64
	300	2,0	02				21,8	9,79	491,27	488,70	1,98	21,93	0,37	0,03089	1,56	0,96	1,50
	300	2,0	03				21,8	9,79	491,27	488,71	1,97	21,89	0,36	0,03084	1,57	0,96	1,50
	300	3,0	02				21,8	9,79	491,70	488,30	2,94	30,75	0,51	0,04332	1,47	0,96	1,41
	300	3,0	03				21,8	9,79	491,71	488,29	2,96	30,61	0,51	0,04312	1,46	0,96	1,39
	300	4,0	02				22,0	9,79	492,12	487,88	3,91	42,34	0,71	0,05965	1,53	0,95	1,45
	300	4,0	03				22,0	9,79	492,15	487,88	3,95	38,78	0,65	0,05463	1,38	0,95	1,32

Tabela 50 - Resultados obtidos nas percolações para cálculo dos valores da condutividade hidráulica do CP-E1.

Fase	σ' (kPa)	i	Perc.	e	L (cm)	A (cm ²)	T (°C)	γ_w (kN/m ³)	uB méd. (kPa)	uT méd. (kPa)	i méd.	Q méd.		v (cm/s)	k _T (x 10 ⁻² cm/s)	$\mu/\mu_{20^\circ\text{C}}$	k 20°C (x 10 ⁻² cm/s)
1	10	1,0	02	0,600	8,77	11,88	21,0	9,79	490,83	489,16	0,95	19,10	0,32	0,02679	2,82	0,98	2,75
	10	1,0	03				21,0	9,79	490,81	489,14	0,94	18,14	0,30	0,02544	2,70	0,98	2,63
	10	2,0	02				21,0	9,79	491,25	488,75	1,91	36,97	0,62	0,05185	2,71	0,98	2,65
	10	2,0	03				21,0	9,79	491,27	488,74	1,95	36,14	0,60	0,05068	2,60	0,98	2,54
	10	3,0	02				21,0	9,79	491,65	488,32	2,88	48,75	0,81	0,06837	2,38	0,98	2,32
	10	3,0	03				21,0	9,79	491,65	488,36	2,83	48,14	0,80	0,06751	2,38	0,98	2,33
2	100	1,0	02	0,590	8,75	11,84	21,0	9,79	490,85	489,16	0,97	19,46	0,32	0,02740	2,82	0,98	2,75
	100	1,0	03				21,0	9,79	490,84	489,15	0,97	18,26	0,30	0,02571	2,64	0,98	2,58
	100	2,0	02				21,0	9,79	491,26	488,73	1,95	32,39	0,54	0,04561	2,34	0,98	2,28
	100	2,0	03				21,0	9,79	491,27	488,72	1,98	31,83	0,53	0,04482	2,27	0,98	2,21
	100	3,0	02				21,0	9,79	491,69	488,32	2,93	43,64	0,73	0,06145	2,10	0,98	2,04
	100	3,0	03				21,0	9,79	491,69	488,33	2,92	43,89	0,73	0,06180	2,12	0,98	2,06
3	300	1,0	02	0,574	8,72	11,75	21,0	9,79	490,87	489,16	1,00	16,46	0,27	0,02334	2,33	0,98	2,27
	300	1,0	03				21,0	9,79	490,85	489,15	0,99	16,12	0,27	0,02286	2,31	0,98	2,25
	300	2,0	02				21,0	9,79	491,27	488,75	1,95	34,67	0,58	0,04916	2,52	0,98	2,46
	300	2,0	03				21,0	9,79	491,27	488,73	1,97	32,89	0,55	0,04664	2,36	0,98	2,31
	300	3,0	02				21,0	9,79	491,69	488,33	2,93	43,39	0,72	0,06153	2,10	0,98	2,05
	300	3,0	03				21,0	9,79	491,71	488,33	2,96	48,21	0,80	0,06836	2,31	0,98	2,26

Tabela 11 - Resultados obtidos nas percolações para cálculo dos valores da condutividade hidráulica do CP-E2.

Fase	σ' (kPa)	i	Perc.	e	L (cm)	A (cm ²)	T (°C)	γ_w (kN/m ³)	uB méd. (kPa)	uT méd. (kPa)	i méd.	Q méd. (mL/min)	(cm ³ /s)	v (cm/s)	k _T (x 10 ⁻² cm/s)	$\mu/\mu_{20^\circ\text{C}}$	k 20°C (x 10 ⁻² cm/s)
1	10	1,0	02	0,496	8,80	12,07	23,0	9,79	490,86	489,13	1,00	2,16	0,04	0,00298	0,30	0,93	0,28
	10	1,0	03				22,8	9,79	490,83	489,14	0,97	3,54	0,06	0,00489	0,50	0,93	0,47
	10	2,0	02				22,8	9,79	491,27	488,71	1,97	5,97	0,10	0,00824	0,42	0,93	0,39
	10	2,0	03				22,8	9,79	491,29	488,70	2,00	6,11	0,10	0,00844	0,42	0,93	0,39
	10	3,0	02				23,0	9,79	491,71	488,27	2,99	8,21	0,14	0,01134	0,38	0,93	0,35
	10	3,0	03				23,0	9,79	491,71	488,27	2,99	8,11	0,14	0,01120	0,37	0,93	0,35
2	100	1,0	02	0,488	8,78	12,03	23,0	9,79	490,84	489,16	0,95	2,93	0,05	0,00406	0,43	0,93	0,40
	100	1,0	03				23,0	9,79	490,86	489,17	0,97	3,87	0,06	0,00536	0,56	0,93	0,52
	100	2,0	02				23,0	9,79	491,29	488,71	2,00	6,31	0,11	0,00875	0,44	0,93	0,41
	100	2,0	03				23,0	9,79	491,28	488,70	2,00	5,53	0,09	0,00766	0,38	0,93	0,36
	100	3,0	02				23,0	9,79	491,75	488,26	3,06	5,64	0,09	0,00782	0,26	0,93	0,24
	100	3,0	03				23,0	9,79	491,72	488,29	2,99	8,36	0,14	0,01159	0,39	0,93	0,36
3	300	1,0	02	0,474	8,76	11,95	23,0	9,79	490,86	489,15	1,00	4,07	0,07	0,00568	0,57	0,93	0,53
	300	1,0	03				23,0	9,79	490,86	489,15	1,00	5,22	0,09	0,00728	0,73	0,93	0,68
	300	2,0	02				23,0	9,79	491,27	488,71	1,99	6,50	0,11	0,00907	0,46	0,93	0,42
	300	2,0	03				23,0	9,79	491,28	488,71	2,00	6,50	0,11	0,00907	0,45	0,93	0,42
	300	3,0	02				23,0	9,79	491,72	488,28	3,01	8,89	0,15	0,01240	0,41	0,93	0,38
	300	3,0	03				23,00	9,79	491,73	488,27	3,04	8,96	0,15	0,01250	0,41	0,93	0,38

As Tabelas 52, 53, 54 e 55 apresentam os valores médios de condutividade hidráulica (k) obtidos para cada índice de vazios correspondente a cada estágio de tensão efetiva (σ') aplicada, para os corpos CP-A1, CP-A2, CP-E1 e CP-E2, respectivamente.

Tabela 52 – Valores médios de condutividade hidráulica obtidos em cada estágio de tensão efetiva para o CP-A1

Estágio	Tensão efetiva, σ' (kPa)	e	k_T (x 10^{-2} cm/s)	$k_{20^\circ C}$ (x 10^{-2} cm/s)
0	10	0,659	1,90	1,82
1	100	0,648	1,82	1,78
2	300	0,631	1,91	1,86

Tabela 53 – Valores médios de condutividade hidráulica obtidos em cada estágio de tensão efetiva para o CP-A2

Estágio	Tensão efetiva, σ' (kPa)	e	k_T (x 10^{-2} cm/s)	$k_{20^\circ C}$ (x 10^{-2} cm/s)
0	10	0,476	1,78	1,70
1	100	0,472	1,57	1,50
2	300	0,466	1,57	1,50

Tabela 54 – Valores médios de condutividade hidráulica obtidos em cada estágio de tensão efetiva para o CP-E1

Estágio	Tensão efetiva, σ' (kPa)	e	k_T (x 10^{-2} cm/s)	$k_{20^\circ C}$ (x 10^{-2} cm/s)
0	10	0,600	2,60	2,54
1	100	0,590	2,38	2,32
2	300	0,574	2,32	2,26

Tabela 55 – Valores médios de condutividade hidráulica obtidos em cada estágio de tensão efetiva para o CP-E2

Estágio	Tensão efetiva, σ' (kPa)	e	k_T (x 10^{-2} cm/s)	$k_{20^\circ C}$ (x 10^{-2} cm/s)
0	10	0,496	0,40	0,37
1	100	0,488	0,41	0,38
2	300	0,474	0,51	0,47

Analizando somente os valores de condutividade hidráulica (k) obtidos dos ensaios realizados no permeâmetro flexível (PPF), resumidos nas Tabelas 52, 53, 54 e 55, à princípio, foi surpreendente e, de certo modo, frustrante não ter sido observada diferenças mais expressivas entre os valores obtidos para o CP-A1 (fofo) e CP-A2 (compacto), moldados para a amostra da Areia da Praia de Ipanema, diferentemente do que foi observado nos ensaios de permeâmetro de parede rígida (PPR). Ademais, tanto para a amostra da areia da Praia de Ipanema quanto para a amostra de microesferas de vidro, os valores de condutividade hidráulica (k) medidos no permeâmetro de parede flexível (PPF) foram bem inferiores aos medidos no permeâmetro de parede rígida (PPR). Essa questão é discutida na seção 4.5, a seguir.

4.5

Condutividade hidráulica da amostra da areia da Praia de Ipanema versus da amostra de microesferas de vidro

Conforme já justificado nesta dissertação, os ensaios de permeabilidade foram executados também no permeâmetro de parede flexível, uma vez que, neste equipamento, é possível promover a saturação do corpo de prova pela técnica da contrapressão, o que não é possível no permeâmetro de parede rígida. Todavia, ao comparar os valores de condutividade hidráulica na temperatura de referência de 20 °C ($k_{20\text{ °C}}$) obtidos no permeâmetro de parede rígida (PPR) com os obtidos no permeâmetro de parede flexível (PPF), tanto para a amostra da areia da Praia de Ipanema quanto para a amostra de microesferas de vidro, verificou-se uma discrepância significativa, sendo os valores obtidos no PPF muito inferiores aos determinados no PPR.

Após essa comparação e com base na observação das expressivas diferenças entre os gradientes hidráulicos impostos (externos) e os gradientes hidráulicos medidos (internos) nos ensaios de permeabilidade em permeâmetro de parede rígida (PPR) (ver Tabelas 18, 19, 20, 21, 25, 26 e 27), chegou-se à conclusão de que os baixos valores calculados de condutividade hidráulica (k) nos ensaios realizados no permeâmetro de parede flexível (PPF) decorreram das perdas de carga hidráulica, não levadas em consideração nos cálculos, ocorridas fora do corpo de prova, principalmente “localizadas” nas válvulas, conexões e mudanças de seção de condutos, entre o transdutor de pressão da base e a base do corpo de prova assim

como entre o topo do corpo de prova e o transdutor de pressão de topo. Desta forma, a perda de carga hidráulica que de fato ocorria entre a base e o topo do corpo de prova era bem inferior à perda de carga hidráulica calculada com base nos valores de pressão impostos aos transdutores de pressão de base e de topo para o estabelecimento do fluxo. Assim, em cada percolação, o gradiente hidráulico (i) considerado para o cálculo da condutividade hidráulica (nas Tabelas 48, 49, 50 e 51) era bastante superior ao gradiente hidráulico real no corpo de prova. Com isso, como $k = v/i$, para uma dada velocidade aparente de fluxo (v) medida ($v = Q/A$), calculou-se um valor de condutividade hidráulica (k) bastante inferior ao valor real.

Dito isto, a comparação entre os valores de condutividade hidráulica na temperatura de referência ($k_{20\text{ °C}}$) obtidos para a amostra da areia da Praia de Ipanema e para a amostra de microesferas de vidro de granulometria reconstituída foi realizada somente com os resultados obtidos nos ensaios de permeabilidade em permeâmetro de parede rígida (PPR).

A Tabela 56 apresenta os valores de índice de vazios (e), os respectivos valores calculados de “ $e^3/(1+e)$ ” e os valores de condutividade hidráulica à 20 °C ($k_{20\text{ °C}}$) dos corpos de prova da amostra da areia da Praia de Ipanema submetidos aos ensaios de permeabilidade em permeâmetro de parede rígida (PPR).

Tabela 56 - Valores de $k_{20\text{ °C}}$ determinados em PPR, para cada corpo de prova da areia da Praia de Ipanema

Corpo de prova	e	$e^3/(1+e)$	$k_{20\text{ °C}}$ (x 10^{-2} cm/s)
CP-A1	0,621	0,148	12,00
CP-A2	0,544	0,104	6,91
CP-A3	0,469	0,070	5,05
CP-A4	0,439	0,059	4,16

A Figura 98 apresenta os conjuntos de pontos da Tabela 56 isto é, para os corpos de prova da amostra da areia da Praia de Ipanema (CP-A1, CP-A2, CP-A3 e CP-A4), plotados em um gráfico de $k_{20\text{ °C}}$ em função de “ $e^3/(1+e)$ ”. Nessa figura, ainda, são apresentadas duas retas que interpolam os pontos (k ; $e^3/(1+e)$), determinadas por regressão linear efetuada no programa Excel, sendo: uma forçada a passar pela origem e outra sem interseção na origem.

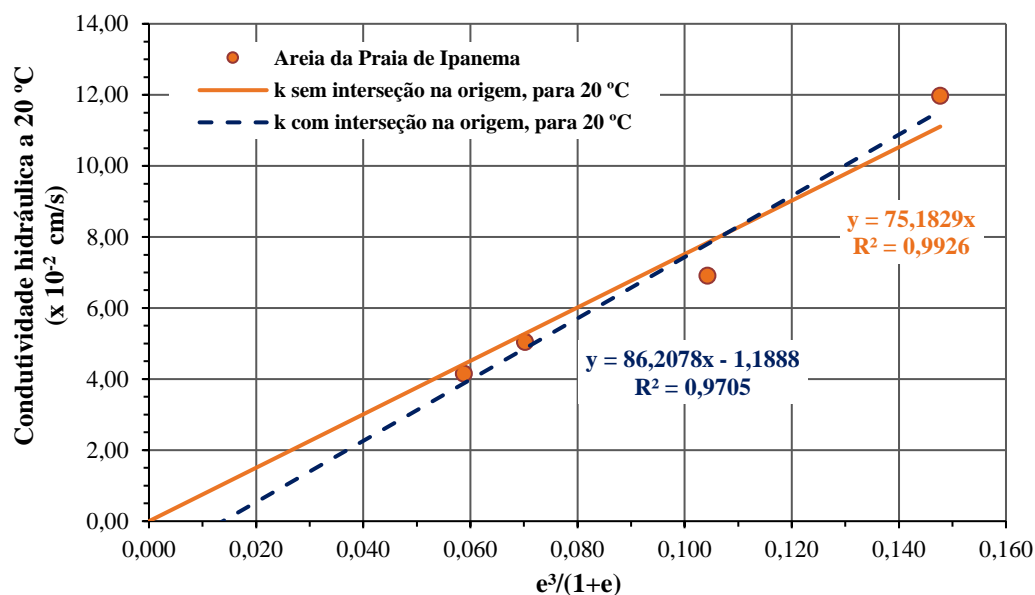


Figura 98 – Valores de $k_{20^\circ\text{C}}$ em função de “ $e^3/(1+e)$ ” para os corpos de prova da amostra da areia da Praia de Ipanema ensaiados no PPR.

A Tabela 57 apresenta os valores de índice de vazios (e), os respectivos valores calculados de “ $e^3/(1+e)$ ” e os valores de condutividade hidráulica à 20 °C ($k_{20^\circ\text{C}}$) dos corpos de prova da amostra de microesferas de vidro submetidos aos ensaios de permeabilidade em permeâmetro de parede rígida (PPR).

Tabela 57 - Valores de $k_{20^\circ\text{C}}$ determinados em PPR, para cada corpo de prova da amostra de microesferas de vidro

Corpo de prova	e	$e^3/(1+e)$	$k_{20^\circ\text{C}}$ (x 10 ⁻² cm/s)
CP-E1	0,598	0,134	14,10
CP-E2	0,529	0,097	9,47
CP-E3	0,467	0,069	6,35

A Figura 99 apresenta os conjuntos de pontos apresentados na Tabela 57 para a amostra de microesferas de vidro de granulometria reconstituída (CP-E1, CP-E2 e CP-E3), plotados em um gráfico de $k_{20^\circ\text{C}}$ em função de “ $e^3/(1+e)$ ”; sendo esses, também, interpolados por duas retas: uma forçada a passar pela origem e outra sem interseção na origem.

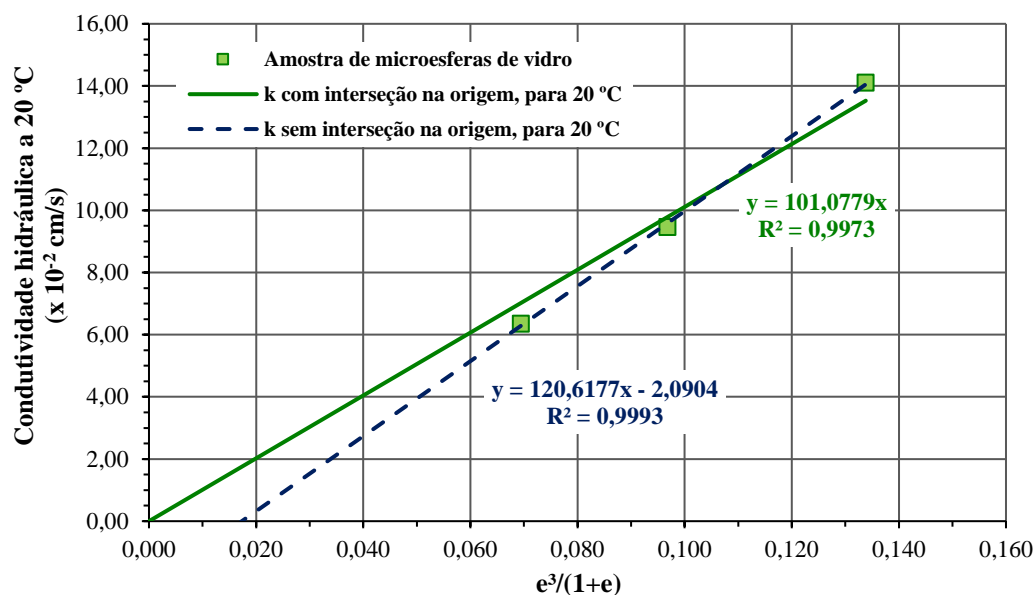


Figura 99 - Valores de $k_{20^\circ\text{C}}$ em função de “ $e^3/(1+e)$ ” para os corpos de prova da amostra de microesferas de vidro ensaiados no PPR.

Das Figuras 98 e 99, depreende-se que os baixos valores de coeficiente linear (b) obtidos nas equações das retas interpoladas sem forçar a interseção pela origem e os bons ajustes aos pontos das retas interpoladas com interseção pela origem indicam a validade da relação linear entre a condutividade hidráulica (k) e “ $e^3/(1+e)$ ” utilizada nas formulações apresentadas na seção 2.2.3.1 para determinação indireta da condutividade hidráulica, dentre elas a proposta de Kozeny-Carman (1927) e Taylor (1948).

A Figura 100 apresenta uma comparação das retas interpoladas, com interseção na origem, obtidas para a areia da Praia de Ipanema e para a amostra de microesferas de vidro. Da Figura 100, observa-se que, para um dado valor de índice de vazios fixado, tem-se que a condutividade hidráulica na amostra de microesferas de vidro é superior à da amostra da areia da Praia de Ipanema. Tal observação está em consonância com as assertivas da seção 2.2.3.2, que dizem que quanto mais angulares forem os grãos, menor a condutividade hidráulica, visto que, partículas mais angulares e alongadas criam caminhos de fluxo mais tortuosos (Head, 1994).

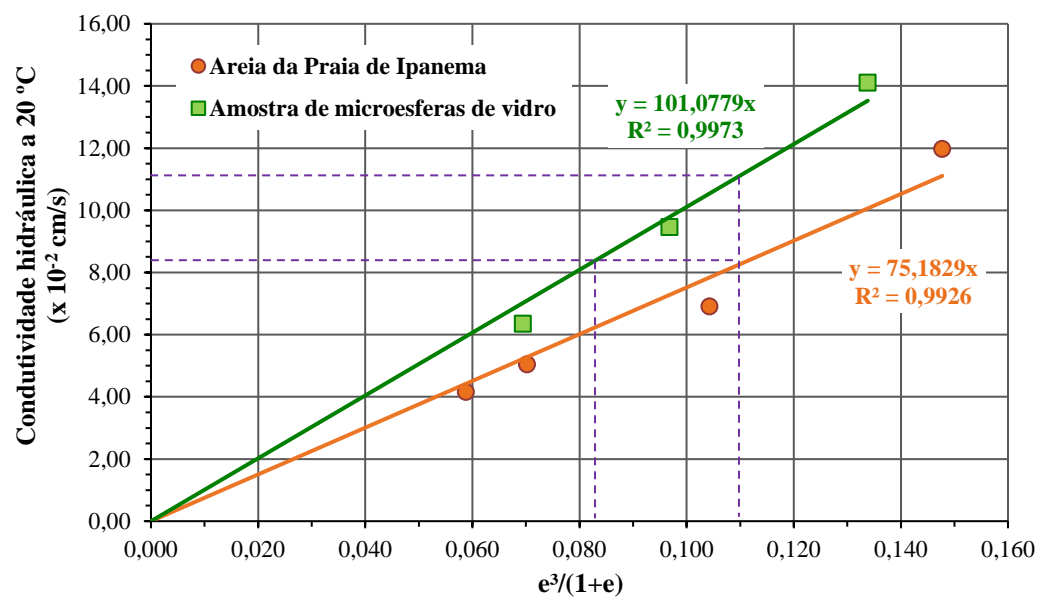


Figura 100 – Comparação da relação $k_{20^\circ\text{C}}$ versus “ $e^3/(1+e)$ ” para as amostras da areia da Praia de Ipanema de microesferas de vidro.

5. Conclusões e sugestões para pesquisas futuras

5.1 Conclusões

Desta pesquisa destacam-se as seguintes conclusões:

a) Quanto à caracterização da amostra da areia da Praia de Ipanema

- Os grãos da amostra da areia da Praia de Ipanema foram classificados como subarredondados a arredondados, com valor de arredondamento (R) igual a 0,70 e esfericidade (S) igual a 0,65, com base em imagens microscópicas dos grãos processadas no *software ImageJ* e comparadas com as escalas gráficas de Powers (1953) e Cho *et al.* (2006).
- A amostra da areia da Praia de Ipanema possuía as seguintes características granulométricas: $D_{10} = 0,28$ mm; $D_{30} = 0,34$ mm; $D_{50} = 0,41$ mm e $D_{60} = 0,45$ mm; logo, o coeficiente de não uniformidade (C_{NU}) era igual 1,61 e o coeficiente de curvatura (C_c) igual a 0,92. Assim, de acordo com a norma ASTM (2017), a amostra da areia era composta por 54 % de areia fina e 46 % de areia média e, de acordo com a norma ASTM (2017) em conjunto com a norma ABNT (1995), a areia foi classificada como mal graduada e uniforme.

b) Quanto à caracterização e reconstituição granulométrica da amostra de microesferas de vidro

- As microesferas de vidro foram classificadas como bem arredondadas, com valores de arredondamento (R) e esfericidade (S) ambos iguais a 0,95, com base nas imagens microscópicas processadas no *software ImageJ* e comparadas com as escalas gráficas de Powers (1953) e Cho *et al.* (2006).

- Foi possível reconstituir, com bastante exatidão, a curva granulométrica (original) da amostra de microesferas de vidro para que ficasse igual à curva granulométrica da amostra da areia da Praia de Ipanema. A amostra de microesferas de vidro com a granulometria reconstituída foi, então, utilizada nos ensaios de índice de vazios máximo, mínimo e intermediários e nos ensaios de permeabilidade.
- O valor da densidade relativa das microesferas de vidro (G_s) foi assumido como igual a 2,487, valor obtido pelo método do picnômetro, visto que esse método apresentou resultados com excelente repetibilidade, além de ter se mostrado mais rigoroso quanto ao procedimento quando comparado ao método da proveta.

c) Quanto aos índices de vazios máximos das amostras

- Tanto para a amostra da areia da Praia de Ipanema quanto para a amostra de microesferas de vidro, os valores de índice de vazios máximo determinados segundo o método B da norma ABNT (2020) para o molde cilíndrico PPR (altura = 25,00 cm; diâmetro interno = 10,07 cm; volume interno = 1991,00 cm³) foram maiores do que os obtidos para o molde cilíndrico PPF (altura = 11,15 cm; diâmetro interno = 3,91 cm; volume interno = 133,91 cm³).
- O valor de índice de vazios máximo obtido para a amostra da areia da Praia de Ipanema foi de 0,698; ao passo que, para a amostra de microesferas de vidro, o índice de vazios máximo obtido foi de 0,670, ambos determinados pelo método B da norma ABNT (2020) no molde PPR. Assim, a areia da Praia de Ipanema apresentou um valor de índice de vazios máximo maior do que o obtido para a amostra de microesferas de vidro.

d) Quanto aos índices de vazios mínimo e intermediários das amostras

- Tanto para a amostra da areia da Praia de Ipanema quanto para a amostra de microesferas de vidro, o método MSP de Miura & Toki (1982) permitiu a obtenção dos índices de vazios mínimo e

intermediários com boa repetibilidade, sendo a repetibilidade tanto maior quanto menor o diâmetro do bocal do funil.

- Para a amostra da areia da Praia de Ipanema, as curvas “índice de vazios *versus* diâmetro do bocal do funil” obtidas pelo método MSP de Miura & Toki (1982) com os moldes PPR e PPF ficaram paralelas; sendo, em todo o domínio de diâmetro do bocal do funil, os valores de índice de vazios obtidos com o molde PPF menores que os obtidos com o molde PPR, revelando, mais uma vez, a influência do tamanho do molde nos valores de índice de vazios obtidos pelo método.
- O valor de índice de vazios mínimo obtido para a amostra da areia da Praia de Ipanema foi de 0,433; ao passo que, para a amostra de microesferas de vidro, o índice de vazios mínimo obtido foi de 0,471, ambos determinados pelo método MSP de Miura & Toki (1982) em molde PPF, com o funil de bocal de 5 mm de diâmetro. Logo, a amostra da areia da Praia de Ipanema apresentou um valor de índice de vazios mínimo menor que o obtido para a amostra de microesferas de vidro.

e) Quanto à diferença entre os valores de índice de vazios máximo e de índice de vazios mínimo de ambas as amostras

- A diferença entre os valores obtidos de índice de vazios máximo e de índice de vazios mínimo da amostra da areia da Praia de Ipanema, igual a 0,265, foi maior do que a da amostra de microesferas de vidro, igual a 0,199. Com isso, constatou-se que a diferença entre os valores dos índices de vazios máximo e mínimo é tão maior quanto mais angulares os grãos, corroborando Pinto (2006) e Holubec & D'Appolonia (1973).

f) Quanto aos ensaios de permeabilidade no permeâmetro de parede rígida

- Nos ensaios de permeabilidade no permeâmetro de parede rígida (PPR), os gradientes hidráulicos medidos internamente no corpo de prova pelos piezômetros foram significativamente inferiores aos gradientes hidráulicos impostos externamente, em decorrência das

perdas de carga hidráulica localizadas em válvulas, conexões, mudanças de seções de condutos, telas e discos perfurados. Disto, depreende-se a importância da medição da diferença de carga hidráulica entre dois pontos no interior do corpo de prova por piezômetros para a determinação do valor correto da condutividade hidráulica.

- Tanto para a amostra da areia da Praia de Ipanema, quanto para a amostra de microesferas de vidro, constatou-se a validade da relação linear entre a condutividade hidráulica (k) e “ $e^3/(1+e)$ ”, sendo “ e ” é o índice de vazios, utilizada nas formulações apresentadas por Kozeny-Carman (1927) e Taylor (1948) para determinação indireta da condutividade hidráulica.
- Comparando as retas “ k versus $e^3/(1+e)$ ” das duas amostras, constatou-se que a reta da amostra de microesferas de vidro ficou situada acima da reta da amostra da areia da Praia de Ipanema. Assim, para um dado índice de vazios, a condutividade hidráulica da amostra de microesferas de vidro é superior à da amostra da areia da Praia de Ipanema.

Para a amostra da areia da Praia de Ipanema, a condutividade hidráulica referida à temperatura de 20 °C ($k_{20\text{ °C}}$) variou de $4,2 \times 10^{-2}$ cm/s para $e = 0,439$ a $1,2 \times 10^{-1}$ cm/s para $e = 0,621$.

Para a amostra de microesferas de vidro, a condutividade hidráulica referida à temperatura de 20 °C ($k_{20\text{ °C}}$) variou de $6,4 \times 10^{-2}$ cm/s para $e = 0,467$ a $1,4 \times 10^{-1}$ cm/s para $e = 0,598$.

g) Quanto aos ensaios de permeabilidade no permeâmetro de parede flexível

Os valores de condutividade hidráulica (k) obtidos dos ensaios de permeabilidade realizados no permeâmetro de parede flexível (PPF) foram consideravelmente menores do que os valores obtidos dos ensaios de permeabilidade realizados no permeâmetro de parede rígida (PPR). Os baixos valores calculados de k nos ensaios realizados no PPF decorreram das perdas de carga hidráulica, não

levadas em consideração nos cálculos, ocorridas fora do corpo de prova, principalmente “localizadas” nas válvulas, conexões e mudanças de seção de condutos, entre o transdutor de pressão da base e a base do corpo de prova assim como entre o topo do corpo de prova e o transdutor de pressão de topo.

5.2

Sugestões para pesquisas futuras

- Determinar a curva “índice de vazios *versus* diâmetro do bocal do funil”, do método MSP de Miura & Toki (1982), para o molde cilíndrico do PPR (altura = 25,00 cm; diâmetro interno = 10,07 cm; volume interno = 1991,00 cm³), comparando-a com a determinada para o molde cilíndrico do PPF (altura = 11,15 cm; diâmetro interno = 3,91 cm; volume interno = 133,91 cm³).
- Realizar ensaios de permeabilidade em permeâmetro de parede rígida com uma amostra de areia de grãos mais angulares que os grãos da areia da Praia de Ipanema e com a granulometria reconstituída igual à granulometria da areia da Praia de Ipanema, e comparar os resultados com os obtidos nesta pesquisa para a areia da Praia de Ipanema.

Referências bibliográficas

ABNT – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **Amostras de solo – Preparação para ensaios de compactação e ensaios de caracterização.** NBR – 6457, 2016.

ABNT – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **Grãos de solos que passam na peneira de 4,8 mm – Determinação da massa específica.** NBR – 6508, 1984.

ABNT – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **Solo – Análise granulométrica.** NBR – 7181, 2018.

ABNT – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **Solo – Determinação do coeficiente de permeabilidade de solos granulares à carga constante.** NBR – 13292, 1995.

ABNT – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **Solo – Determinação do coeficiente de permeabilidade de solos argilosos à carga variável.** NBR – 14545, 2000.

ABNT – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **Solo - Determinação do Índice de Vazios Máximo de Solos Não Coesivos.** NBR 16840, 2020.

ABNT – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **Sinalização horizontal viária - Esferas e microesferas de vidro.** NBR 16184, 2021.

ASTM – AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. *Standard Practice for Classification of Soils for Engineering Purposes (Unified Soil Classification System).* D – 2487, 2017.

ASTM – AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. *Standard test methods for minimum index density and unit weight of soils and calculation of relative density.* D – 4254, 2016.

AKERMAN, M. **Natureza, Estrutura e Propriedades do Vidro.** CENTRO TÉCNICO DE ELABORAÇÃO DO VIDRO – CETEV. Novembro, 2000.

BORGES, A. F. **Avaliação dos mecanismos de transporte de hexaclorociclohexano (HCH) no solo da cidade dos meninos, Duque de Caxias, RJ.** 1996. 236 p. Dissertação (Mestrado em Geotecnia). Departamento de Engenharia Civil. Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 1996.

BRUNETTI, F. **Mecânica dos Fluidos**. São Paulo: Pearson Prentice Hall, 2005.

CABALAR, A. F. & AKBULUT, N. **Effects Of The Particle Shape And Size Of Sands On The Hydraulic Conductivity**. Acta Geotechnica Slovenica, 2016a.

CABALAR, A. F. & AKBULUT, N. **Evaluation of actual and estimated hydraulic conductivity of sands with different gradation and shape**. Springer Open, 2016b.

CAPUTO, H. P. **Mecânica dos Solos e suas Aplicações**. LTC - Livros Técnicos e Científicos Editora S.A. 1967

CARMAN, P. C. **Fluid flow through granular beds**. Institution of Chemical Engineers, Vol 75, December, 1997.

CARRIER, W. D. **Goodbye, Hazen; Hello, Kozeny – Carman**. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering. Vol. 129, N° 11, November, pp. 1054 – 1056, 2003.

CEDERGREN, H. R. **Seepage, drainage and flow nets**. New York: John Wiley and Sons. 489 p. 1967.

CHAPUIS, R. P. **Predicting the saturated hydraulic conductivity of sand and gravel using effective diameter and void ratio**. Canadian Geotechnical Journal (NRC), Vol. 41, N° 5, pp. 787 – 795, 2003.

CHO, G.; DODDS, J.; SANTAMARINA, J. C.; **Particle shape effects on packing density, stiffness, and strenght: Natural and crushed sands**. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, Vol. 132, N° 5, May, 2006, pp. 591 – 602.

COSTA, R. C. **Ensaio de Caracterização e Permeabilidade na Areia da Praia de Ipanema, RJ**. Dissertação (Mestrado em Geotecnia). Departamento de Engenharia Civil. Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2020.

Craig, R. F.; Knappett, J. A. **Craig's Soil Mechanics**. Spon Press; Taylor & Francis; 8th ed. Edição. 2012.

Cushman, J. H.; Tartakovsky, D. M. **The Handbook of Groundwater Engineering**. CRC Press, 2017.

Daniel, D. E. **State-of-the-Art_ Laboratory Hydraulic Conductivity Tests for Saturated Soils**. ASTM International, 1994.

Darcy, H. **Les Fontaines Publiques de la Ville de Dijon**. 1856

DAS, B. M. **Fundamentos de engenharia geotécnica**. São Paulo: Thomson Learning. 6ª Ed, 2007.

Comunicação pessoal de Gustavo Domingos, em setembro de 2021, recebida presencialmente.

FAIR, G; HATCH, L. **Fundamental Factors Governing the Streamline Flow of Water Through Sand**. *Journal* (American Water Works Association), Vol. 25, No. 11. 1933.

Fernandes, M. M. **Mecânica dos solos** – vol. 1. Oficina de Textos, 2016.

Ferreira, T. and Rasband, W. **ImageJ User Guide-IJ1**. 2012.

Frasca, M; Sartori, P. **Geologia de engenharia**. São Paulo: Associação brasileira de geologia de engenharia, 1998. 29, 1998.

Freeze, A. R.; Cherry, J. A. **Groundwater**. Prentice Hall; 1979.

Goktepe, A. B. & Sezer, A. **Effect of particle shape on density and permeability of sands**. *Proceedings of the Institution of Civil Engineers - Geotechnical Engineering*, 2010.

Harr, M. E. **Groundwater and Seepage**. 1991.

Hazen, A. **Some Physical Properties of Sands and Gravels**. 1892.

HEAD, K. H. **Manual of Soil Laboratory Testing**. Volume 2: permeability, shear strength and compressibility tests. Pentech Press, London, cp. 10, Vol. 2, pp. 398 – 468, 1982.

Holubec; E. D'Appolonia. **Effect of Particle Shape on the Engineering Properties of Granular Soils**. 1973.

LAMBE, T. W. e WHITMAN, R. V. **Soil mechanics**, John Wiley and Sons, Inc., New York. 1967.

Maroof, A. M.; Mahboubi, A.; Noorzad, A.; Safi, Y. **A new approach to particle shape classification of granular materials**. 2020.

Martins, I. S. M. (2010). **Notas de aula da disciplina “Tópicos Especiais de Ensaio de Campo e de Laboratório”**, Curso do PROMIMP, COPPE/UFRJ.

MITCHELL, J. K; SOGA, K. **Fundamentals of soil behavior**. Third edition. John Wiley and Sons, Inc. Hoboken, New Jersey, 2005.

MIURA, S. & TOKI, S. **A sample preparation method and its effect on static and cyclic deformation – strenght properties of sand**. Soils and Foundations, Vol. 22, No. 1, pp. 1 – 17, Mar., 1982.

Muskat, M. **The Flow of Fluids Through Porous Media**. 1937.

Pettijohn, F. J. **Sedimentary Rocks**. Harper's Geoscience Series, 1949.

PINTO, C. S. **Curso básico de mecânica dos solos**. 3ª Edi. São Paulo: Oficina de Textos, 2006.

POEHLS, D.; SMITH, G. **Encyclopedic Dictionary of Hydrogeology**. Boston: Academic Press/Elsevier, 258 p, 2009.

Powers, M. C. **A new roundness scale for sedimentary particles**. 1953.

Romanel, C. **Mecânica dos solos: fluxo de água solos saturados**. Ciencia Moderna, 2021.

Rose, H. E. An Investigation into the Laws of Flow of Fluids through Beds of Granular Materials. Proceedings of The Institution of Mechanical Engineers, vol. 153, 1943.

Seelheim, F. **Methoden zur Bestimmung der Durchlässigkeit des Bodens**. 1880.

SIMÕES, F. B. **Caracterização geotécnica da areia da praia de Ipanema**. 2015. 148 p. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharel em Engenharia Civil). Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2015.

SKEMPTON, A. W. **The porepressure coefficients A and B**. *Géotechnique*, v. 4, n. 4, pp. 143 – 147, 1954.

TAYLOR, D. W. **Fundamentals of soil mechanics**, John Wiley and Sons, Inc. New York. 1948.

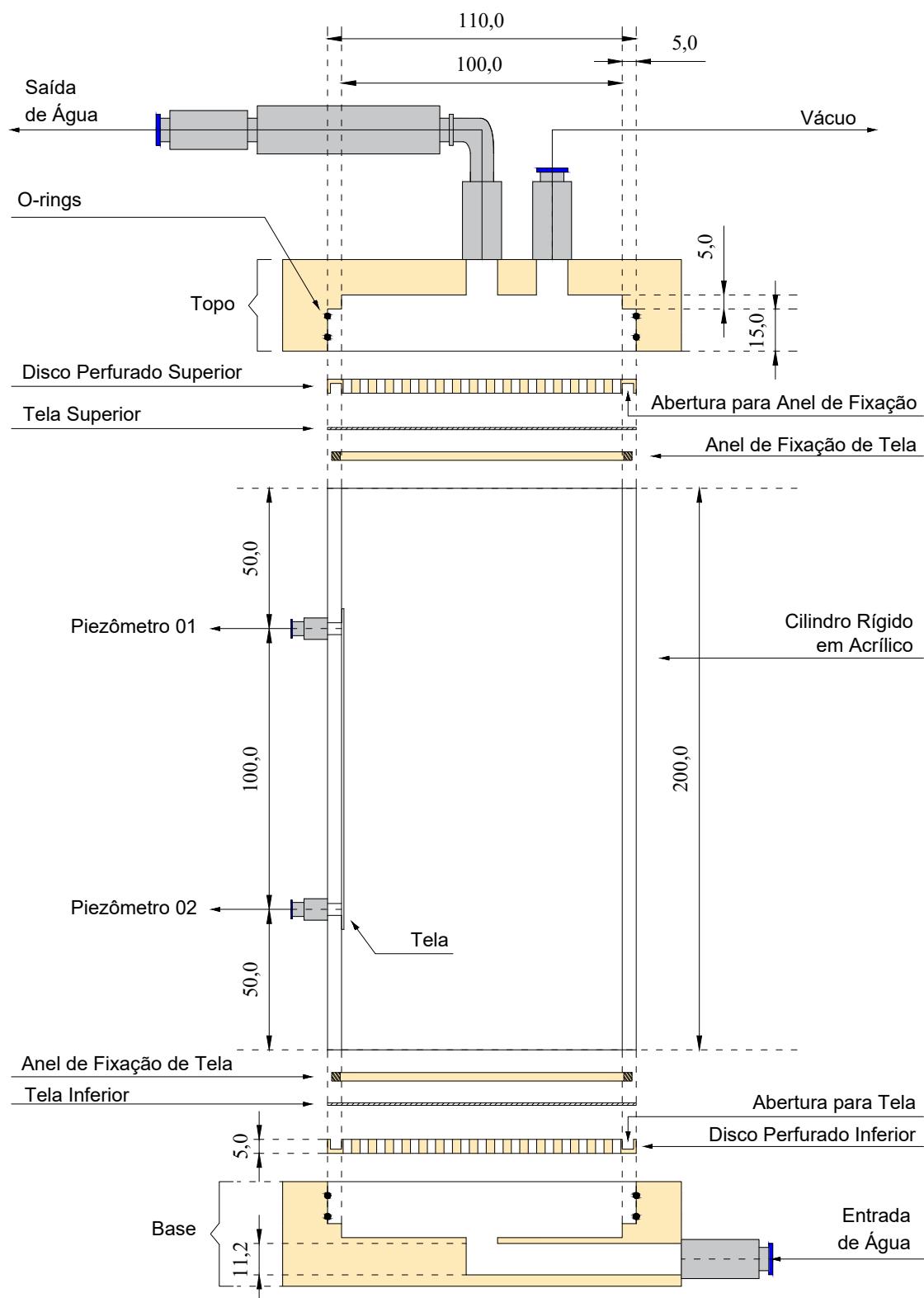
TERZAGHI, K. V. **The shearing resistance of saturated soils and the angle between the planes of shear**. In: International Conference on Soil Mechanics and Foudation Engineering, Cambrigde, 1936. Anais. v.1, n.7, 1936, pp. 356 – 359.

Todd, D. K. **Hidrologia de águas subterrâneas**. Edgard Blücher Ltda. Tradução, 1959.

Wadell, H. **Volume, Shape and Roundness of Rock Particles**. 1935.

Youd, T. L. **Factors controlling maximum and minimum densities of sands**. 1973.

Apêndice A – Projeto do permeâmetro de parede rígida



01

Permeâmetro Parede Rígida - Célula

OBSERVAÇÕES:

- Dimensões em milímetro (mm).
- Diâmetro do Piezômetro = entre 10 e 5 mm.



Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro - PUC-Rio
Laboratório de Geotecnia e Meio Ambiente - LGMA

Projeto: Dissertação - Beatriz Rodrigues Soares

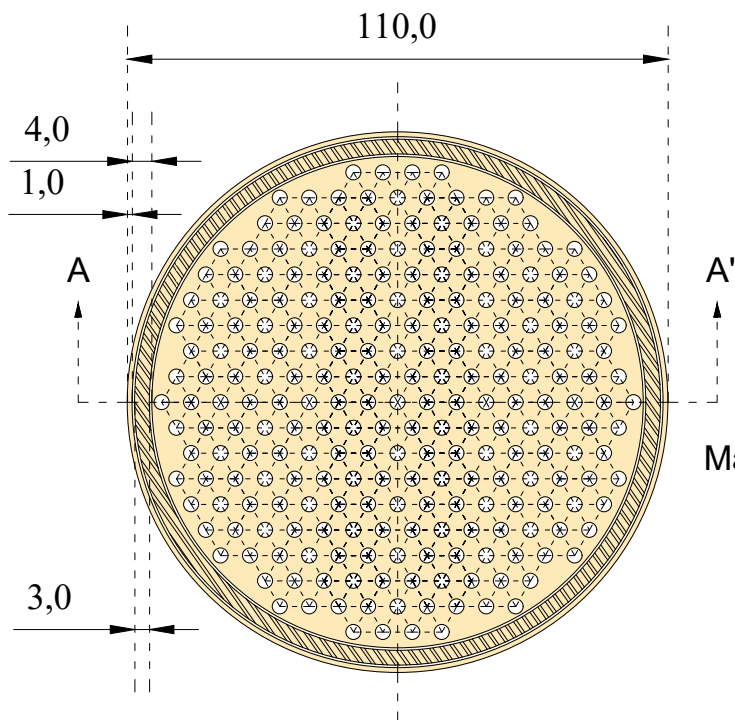
Desenho: Permeâmetro de Parede Rígida para Solos Arenosos

Escala: -

Prancha: 01 / 03

Data: 09 / 2020

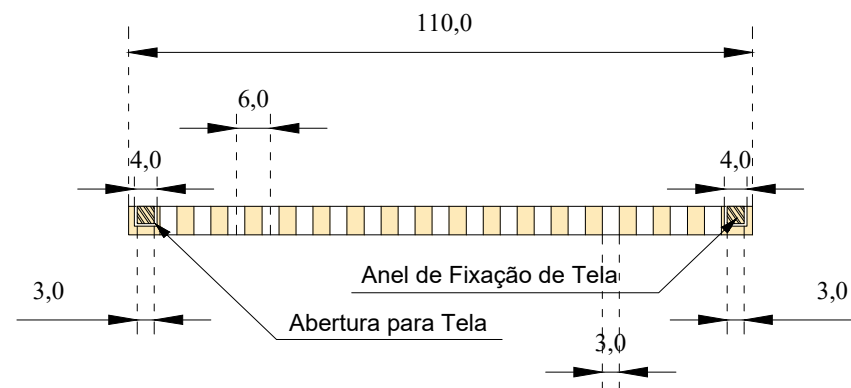
Revisão: 06



01

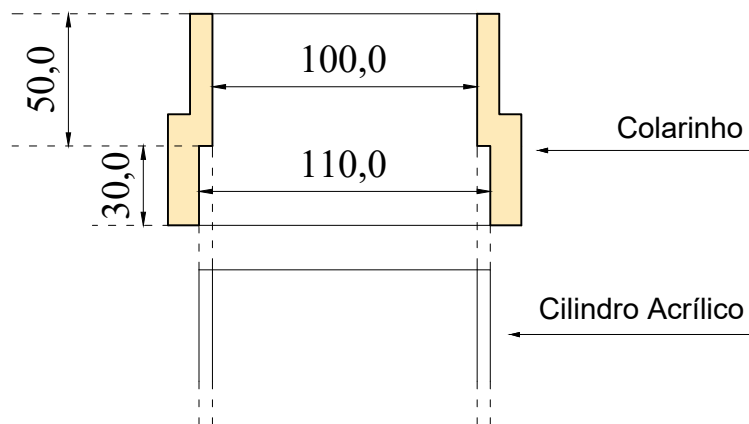
Disco Perfurado

Malha Triangular:



02

Corte A - A'



03

Colarinho

OBSERVAÇÕES:

- Dimensões em milímetro (mm).
- Diâmetro dos furos no disco perfurado = 3 mm.



Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro - PUC-Rio
Laboratório de Geotecnia e Meio Ambiente - LGMA

Projeto: Dissertação - Beatriz Rodrigues Soares

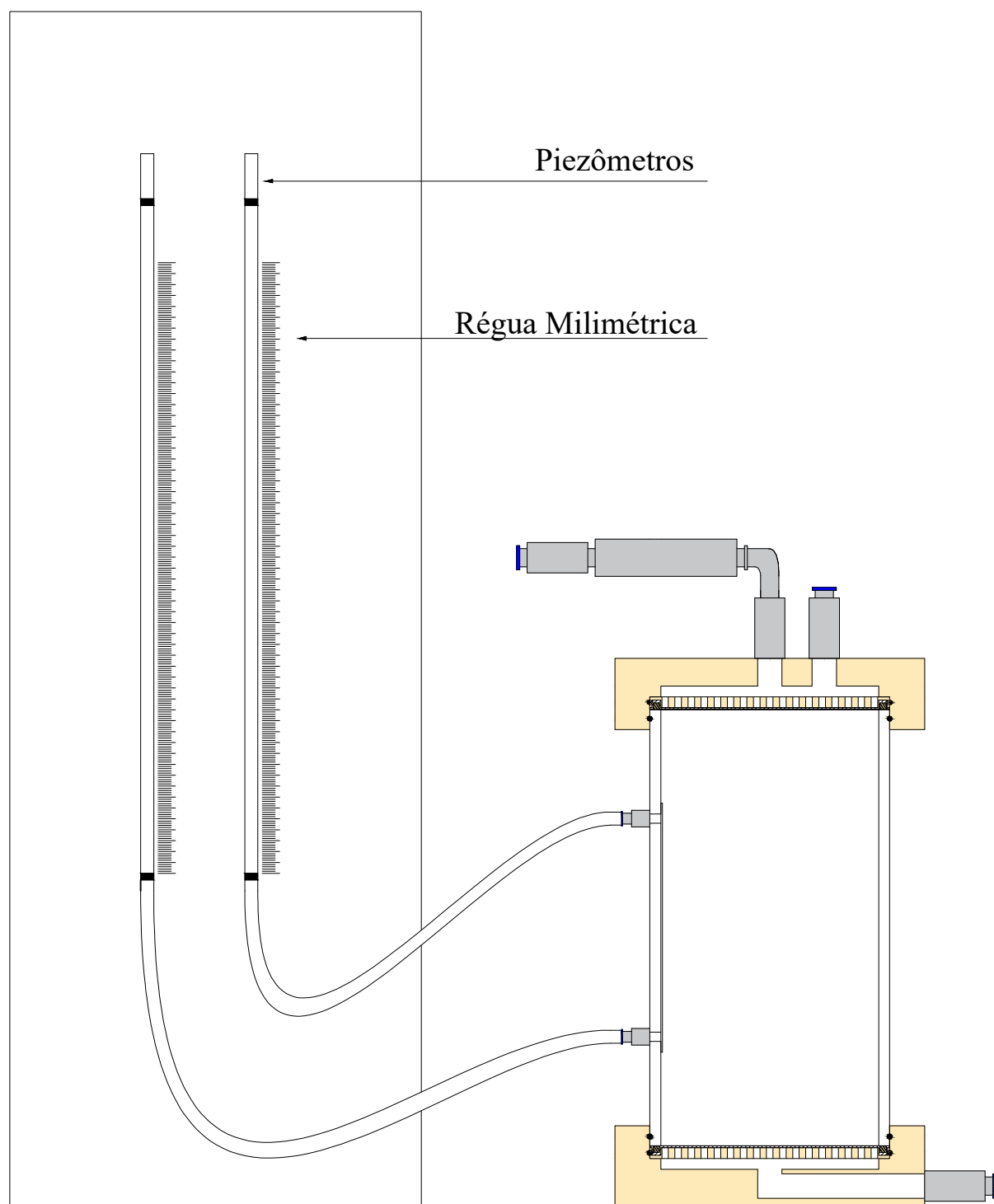
Desenho: Permeâmetro de Parede Rígida para Solos Arenosos

Escala: -

Prancha: 02 / 03

Data: 09 / 2020

Revisão: 06



01

Painel dos Piezômetros



Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro - PUC-Rio
Laboratório de Geotecnia e Meio Ambiente - LGMA

Projeto: Dissertação - Beatriz Rodrigues Soares

Desenho: Permeâmetro de Parede Rígida para Solos Arenosos

Escala: -

Prancha: 03 / 03

Data: 09 / 2020

Revisão: 06

Apêndice B – Modificações no sistema do permeâmetro de parede flexível

Nos ensaios executados para a dissertação de Costa (2020), intitulada “Ensaio de Caracterização e de Permeabilidade na Areia da Praia de Ipanema, RJ”, foram observadas variações, consideradas excessivas, nas leituras das poropressões estabelecidas e medidas no topo e na base do corpo de prova e, por conseguinte, no valor do gradiente hidráulico (i) imposto durante a percolação. Assim, com o intuito de melhorar o controle das poropressões aplicadas foram realizados testes, alterando a configuração do sistema inicial, utilizado em Costa (2020) e apresentado na Figura B1.

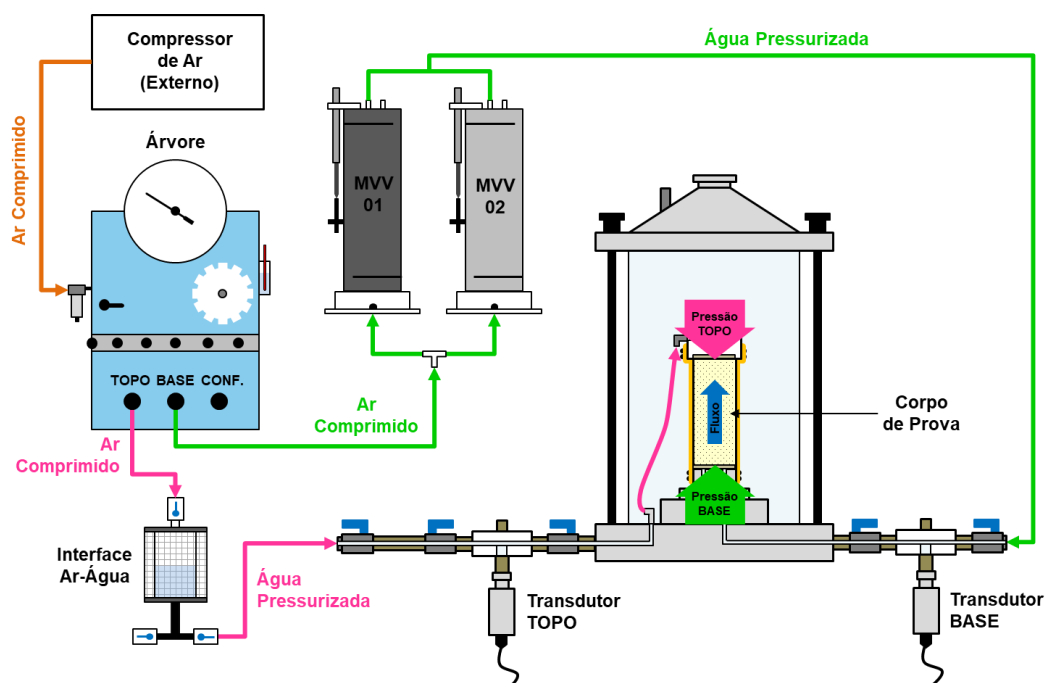


Figura B1 – Configuração do sistema inicial do permeâmetro de parede flexível para aplicação de poropressão no topo e base do corpo de prova.

A seguir, são apresentadas as configurações dos testes realizados:

- *Teste 01 – Alteração do arranjo entre as válvulas do topo e da base*

Para o primeiro teste realizado (Teste 01) foi feita uma troca entre as mangueiras de saída de ar comprimido das válvulas do topo e da base. No sistema inicial, a válvula do topo liberava uma pressão de ar comprimido para interface ar-água que, por sua vez, aplicava uma pressão na água do sistema, registrada pelo transdutor de pressão do topo.

Para o Teste 01 (Figura B2), a válvula da base liberava a pressão para a interface ar-água, com registro pelo transdutor do topo. Sintetizando:

Sistema Inicial

Válvula TOPO → Interface → Transdutor TOPO

Válvula BASE → MVVs → Transdutor BASE

Teste 01

Válvula BASE → Interface → Transdutor TOPO

Válvula TOPO → MVVs → Transdutor BASE

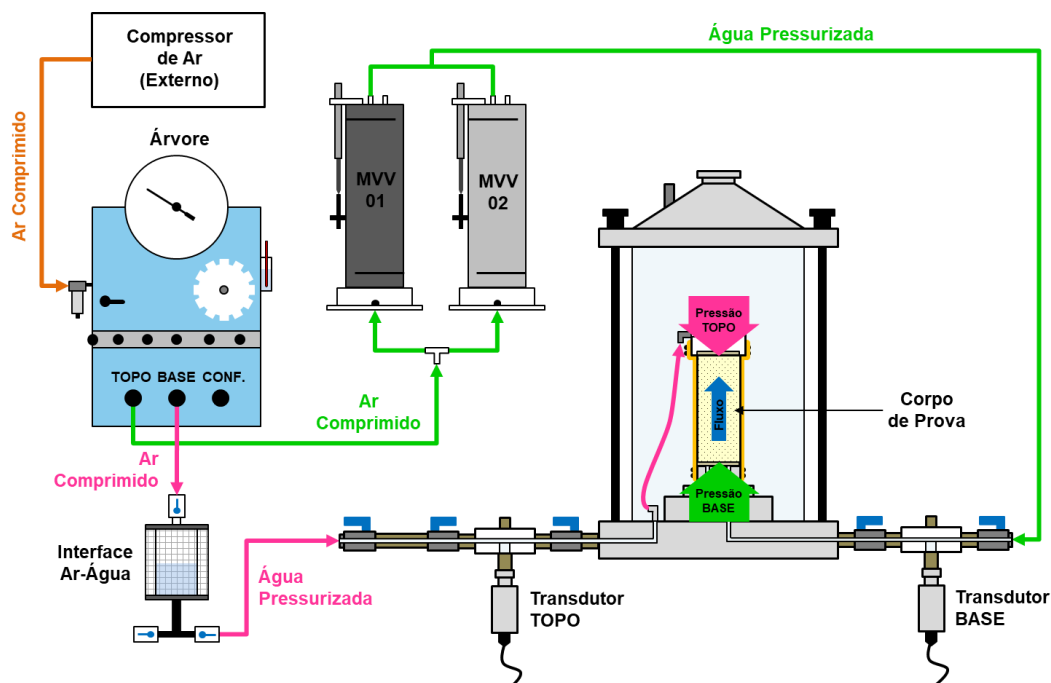


Figura B2 – Arranjo do Teste 01: alteração das mangueiras de saída de ar comprimido das válvulas do topo e da base.

Comparando as variações das leituras de poropressão registradas pelos transdutores do topo e da base, em um intervalo de tempo de 15 minutos, nos arranjos do sistema inicial (Figura B3) e do Teste 01 (Figura B4), observou-se que a variação da poropressão no topo foi menor no arranjo do Teste 01, indicando um problema na válvula de topo.

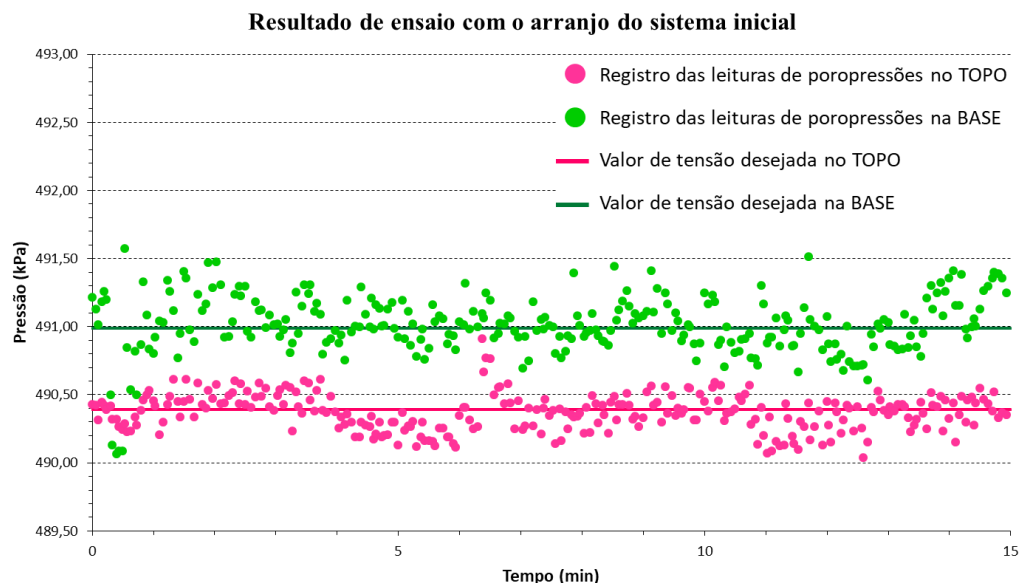


Figura B3 – Registro da variação dos valores de poropressão no topo e na base do corpo de prova, para o arranjo do sistema inicial.

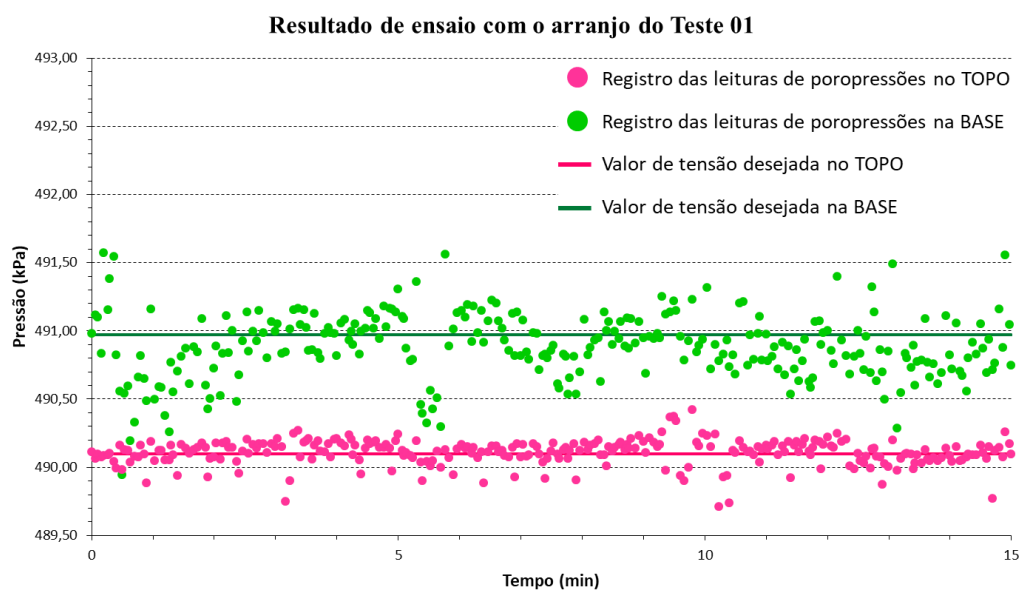


Figura B4 – Registro da variação dos valores de poropressão no topo e na base do corpo de prova, para o arranjo do Teste 01.

- *Teste 02 – Troca dos medidores de variação volumétrica (MVVs) por uma interface ar-água*

Para o segundo teste, as mangueiras de saída de ar comprimido das válvulas do topo e da base retornaram à posição inicial, conforme apresentado no arranjo do sistema inicial da Figura B1. A alteração no arranjo para o Teste 02 ocorreu na troca dos

medidores de variação volumétrica (MVVs) por uma interface ar-água. Assim, tem-se a seguinte comparação entre os arranjos:

Sistema Inicial

Válvula TOPO → Interface → Transdutor TOPO

Válvula BASE → MVVs → Transdutor BASE

Teste 02

Válvula TOPO → Interface 01 → Transdutor TOPO

Válvula BASE → Interface 02 → Transdutor BASE

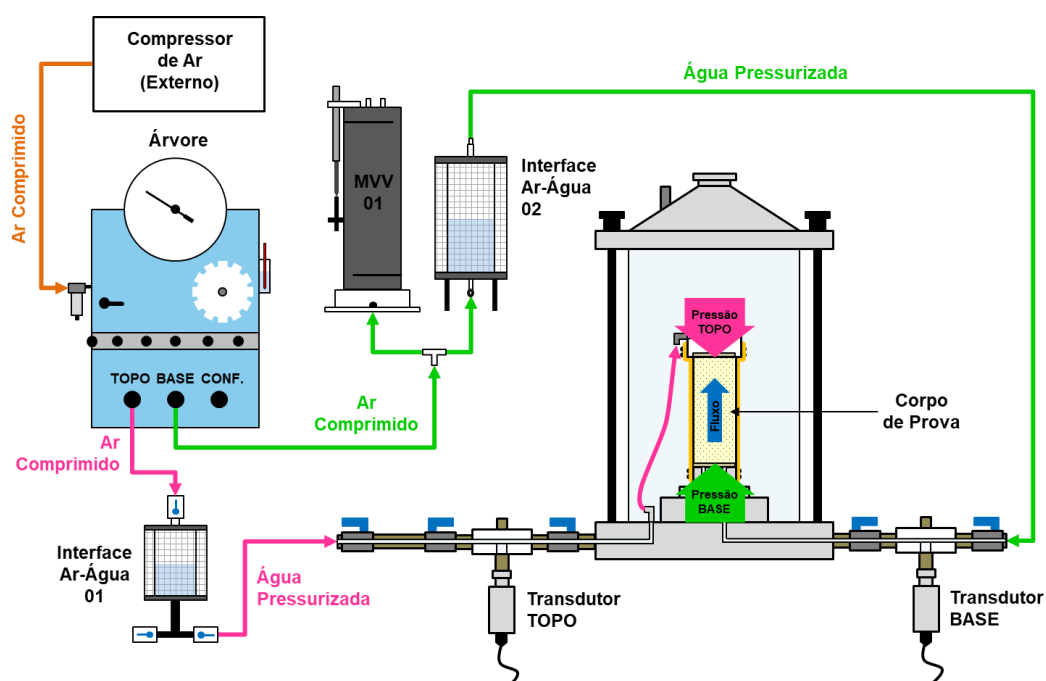


Figura B5 – Arranjo do Teste 02: troca dos medidores de variação volumétrica (MVVs) por uma interface ar-água.

Comparando os resultados do arranjo do sistema inicial (Figura B3) com o arranjo do Teste 02 (Figura B6) observou-se que houve uma melhora na variação das leituras da poropressão atuantes na base do corpo de prova. A interferência dos medidores de variação volumétrica no sistema foi atribuída ao atrito do *Bellofran* com a parede interna do cilindro do medidor.

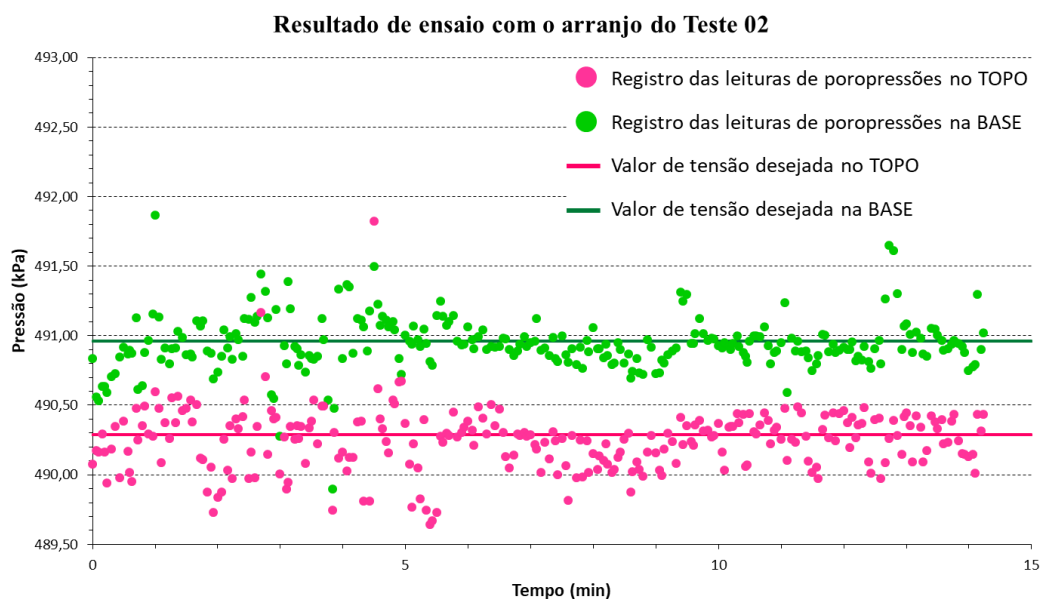


Figura B6 – Registro da variação dos valores de poropressão no topo e na base do corpo de prova, para o arranjo do Teste 02.

- *Teste 03 – Substituição da válvula de topo*

No terceiro teste a troca dos medidores de variação volumétrica por uma interface ar-água (Teste 02) permaneceu e a válvula reguladora da saída de ar comprimido do topo foi substituída por uma nova, com a seguinte configuração do sistema (Figura B7):

Teste 03

Válvula TOPO NOVA → Interface 01 → Transdutor TOPO

Válvula BASE → Interface 02 → Transdutor BASE

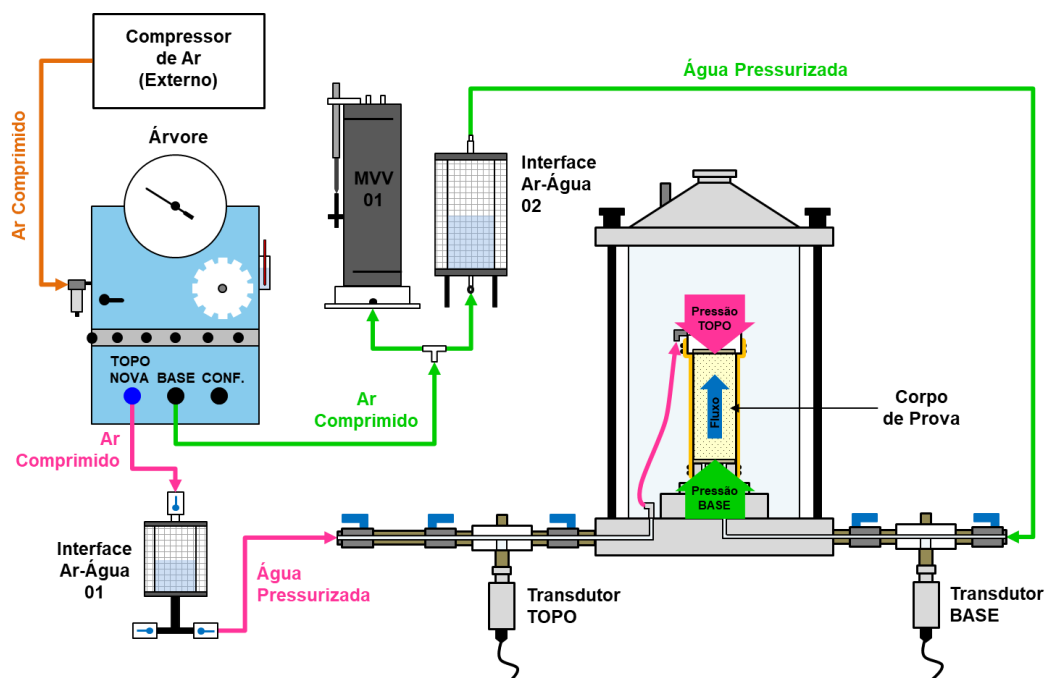


Figura B7 – Arranjo do Teste 03: substituição da válvula do topo.

Os resultados obtidos no Teste 03 apresentaram uma melhora significativa na estabilidade das poropressões aplicadas no topo e na base do corpo de prova, como pode ser observado na Figura B8; sendo essa a configuração do sistema definida para realização dos ensaios desta pesquisa.

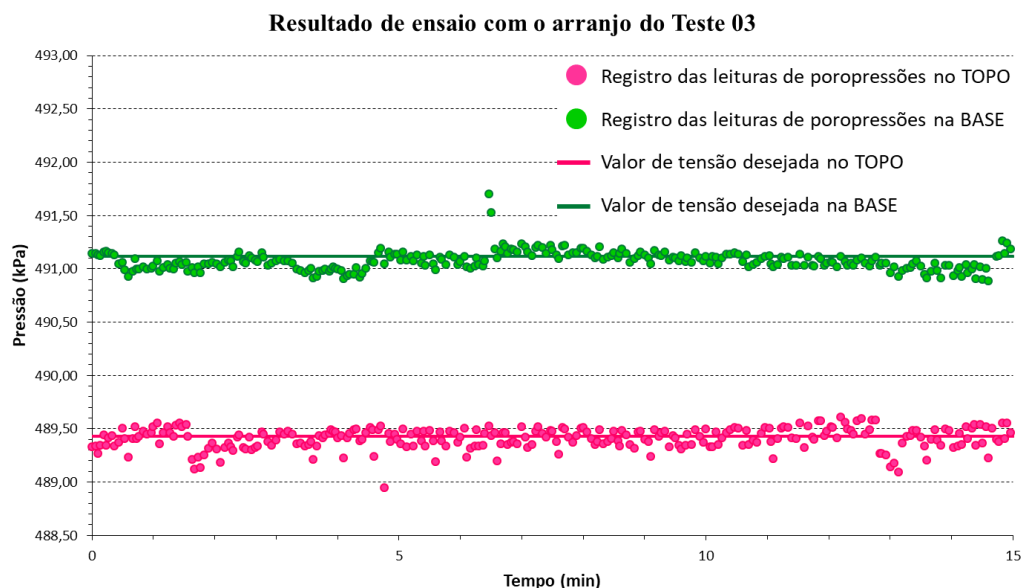


Figura B8 – Registro da variação dos valores de poropressão no topo e na base do corpo de prova, para o arranjo do Teste 03.

Apêndice C – Calibração do transdutor de deslocamento

A calibração do transdutor de deslocamento deu-se de forma semelhante ao apresentado em Costa (2020). Utilizando o sistema de aquisição de dados apresentado na seção 3.8.2, montou-se um esquema semelhante ao apresentado na Figura C1 para calibração do transdutor de deslocamento acoplado ao medidor de variação volumétrica (MVV). O transdutor de deslocamento utilizado era da marca *MPE transducer*, modelo HS50B, e tinha a função de registrar a variação de volume de água que entrava ou saía do corpo de prova nas etapas de saturação por contrapressão e adensamento hidrostático.

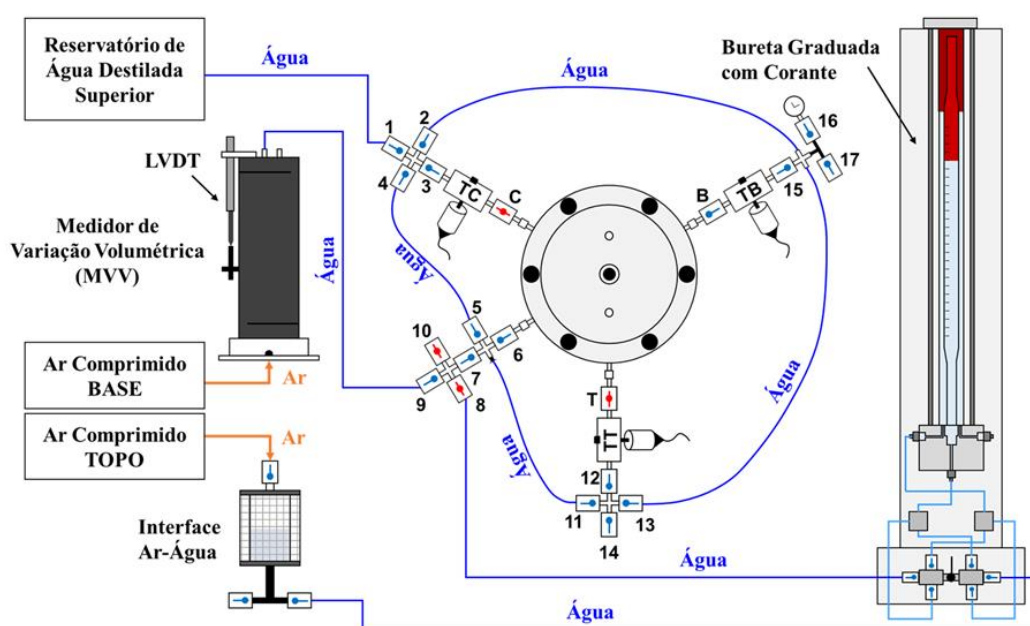


Figura C1 – Arranjo esquemático para calibração do transdutor de deslocamento.

A calibração do transdutor de deslocamento foi efetuada fazendo uma relação direta entre a leitura eletrônica desse e o volume de água que entrava/saía do reservatório superior do medidor, em decorrência ao deslocamento do êmbolo do MVV. Foram realizados 3 ciclos de enchimento e esvaziamento, de modo que: (a) na fase de enchimento, a água saía do MVV em direção a interface ar-água (Figura C1); e (b) na de esvaziamento, da interface ar-água para o MVV. A cada 5 mL (ou 5 cm³) de água passada pela bureta graduada com corante, registrava-se uma leitura eletrônica.

Devido a capacidade da bureta ser de 25 mL, para cada ciclo foram realizadas 8 passagens de água, sendo 4 no sentido de descida (de zero a 25 mL) e 4 no sentido de subida (de 25 mL a zero) do corante na bureta, totalizando 200 mL de água percolada.

Em cada fase, de enchimento ou esvaziamento, foram registradas 41 leituras; dessas, as duas primeiras e as duas últimas eram descartadas levando-se em consideração o comportamento irregular do *Bellofran* nos extremos do deslocamento do êmbolo no MVV, ou seja, quando o MVV completamente cheio/vazio. Assim, para cada fase, teve-se 37 pontos. As curvas de calibração foram traçadas por ciclos (Figura C2, C3 e C4), com os pontos de registro no esvaziamento e no enchimento, de modo que, a curva de calibração final foi obtida por meio da interpolação de todos os pontos registrados (Figura C5).

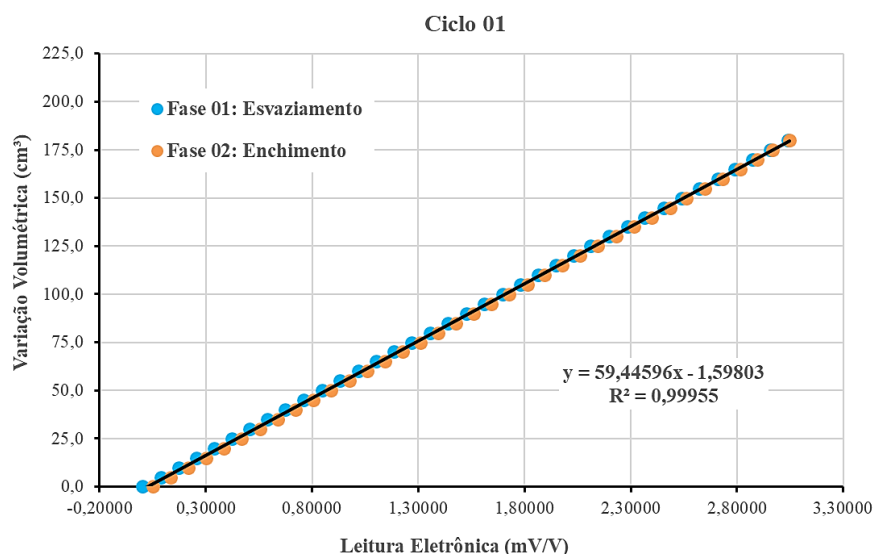


Figura C2 – Interpolação entre os pontos registrados durante o esvaziamento e o enchimento do Ciclo 01.

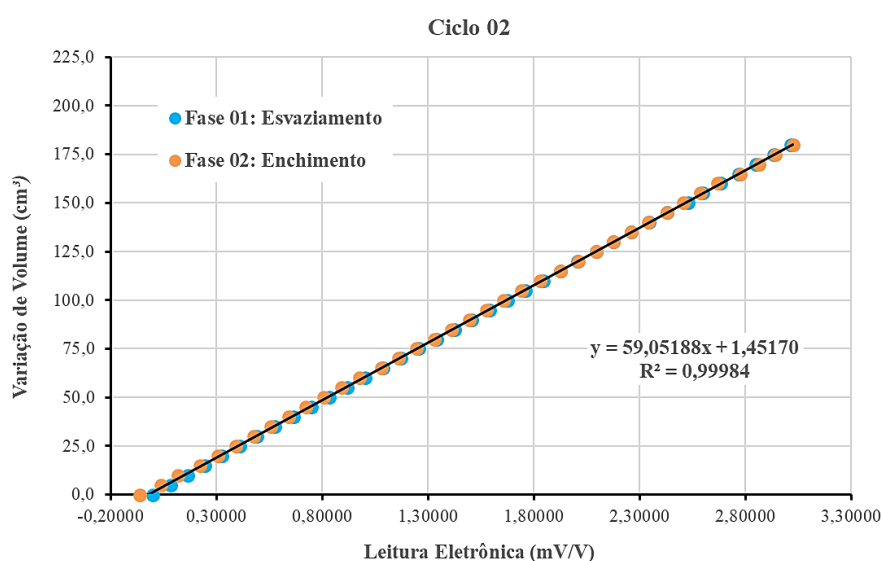


Figura C3 – Interpolação entre os pontos registrados durante o esvaziamento e o enchimento do Ciclo 02.

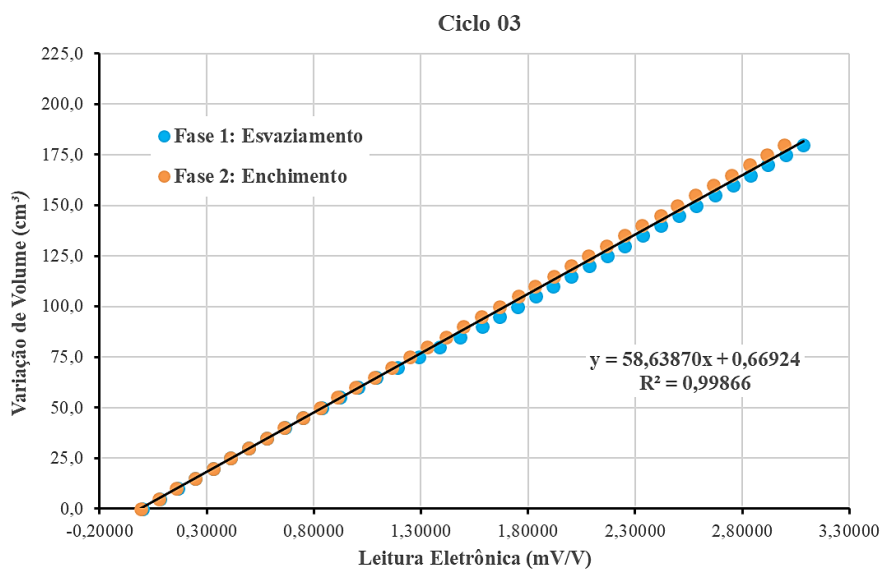


Figura C4 – Interpolação entre os pontos registrados durante o esvaziamento e o enchimento do Ciclo 03.

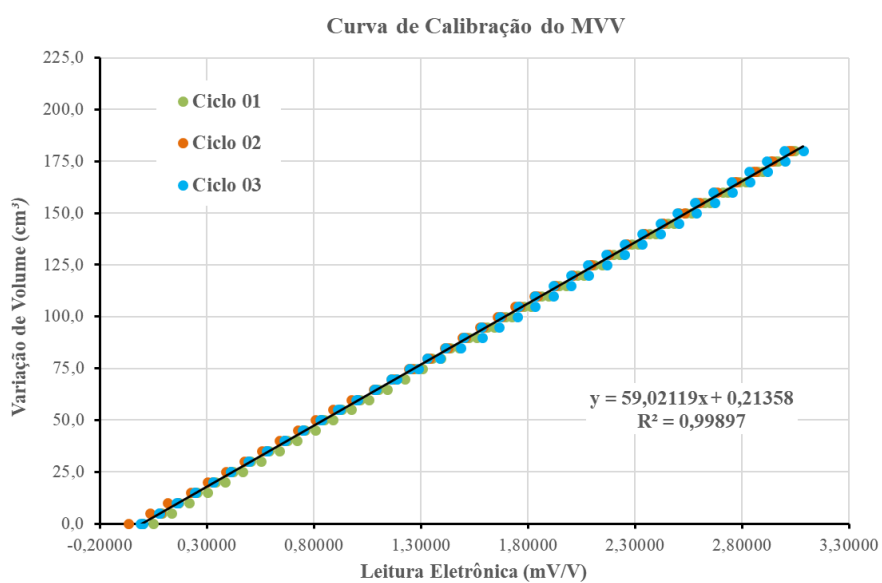


Figura C5 – Curva e equação de calibração do transdutor de deslocamento.

Apêndice D – Calibração dos transdutores de poropressão

Assim como na calibração do transdutor de deslocamento, a calibração dos transdutores de poropressão foi realizada mediante a conversão da leitura eletrônica desses, registrada pelo o sistema de aquisição de dados da seção 3.8.2. Contudo, para esses, as leituras eletrônicas eram convertidas em leituras de pressão.

Desse modo, com intuito de aplicar valores conhecidos de pressão aos transdutores, foi utilizado um sistema de aplicação de pressão chamado de balança de pressão (ou balança de peso morto) da marca Budenberg, apresentado no esquema da Figura D1. O Budenberg foi conectado ao sistema externo do permeâmetro (Figura 50) por meio da válvula 14, estando, além dessa, as válvulas 2, 3, 4, 5, 11, 12, 13 e 15 abertas. Dessa forma os três transdutores (TT, TC e TB) ficavam em comunicação com o Budenberg, de forma simultânea, mas isolados dos demais equipamentos. Para aplicação da pressão na linha de água conectada aos transdutores, uma carga de peso conhecido era aplicada sobre o pistão, que gerava uma pressão no sistema do Budenberg e nos transdutores, registrada pelo manômetro.

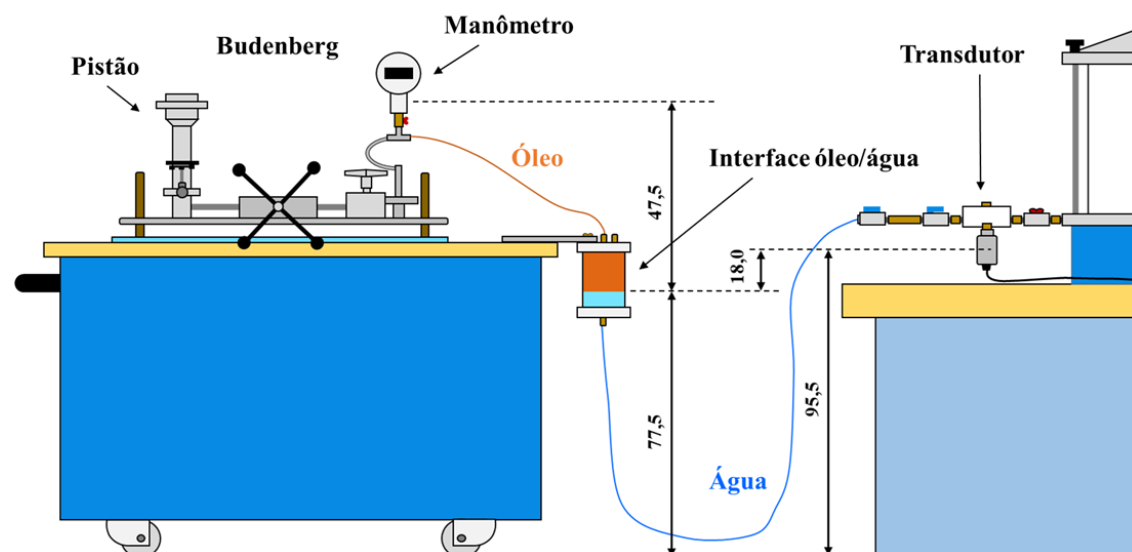


Figura D1 – Esquema da calibração dos transdutores de poropressão.

Para cada transdutor foram realizados 3 ciclos de carregamento e descarregamento, sendo: (a) o carregamento com 10 aplicações de pressão, da atmosférica até 9 kgf/cm² (882,6 kPa); e (b) o descarregamento com 8 aplicações de pressão, decrescendo de 9 kgf/cm² (882,6 kPa) a 1 kgf/cm² (98,1 kPa). Para cada valor de

pressão aplicada eram registradas 5 leituras eletrônicas, sendo a média dessas leituras o valor utilizado para a determinação das curvas de calibração. A Tabela D1 apresenta as características dos transdutores calibrados que foram utilizados nos ensaios da seção 3.8.2. As Figuras D2, D3 e D4 apresentam as curvas de calibração desses.

Tabela D1 - Características e funções dos transdutores de pressão utilizados no permeâmetro de parede flexível.

Instrumento	Marca / modelo / n° de série	Capacidade	Grandeza física medida
Transdutor de pressão de água (TC)	Wykeham Farrance / 28 WF 6301 / 11007364	2000 kPa	Pressão de água da câmara do permeâmetro (pressão de confinamento)
Transdutor de pressão de água (TB)	Gefran / TP 867 / 95290391	1000 kPa	Pressão de água (poropressão na base do corpo de prova)
Transdutor de pressão de água (TT)	Gefran / TP 867 / 95290390	1000 kPa	Pressão de água (poropressão no topo do corpo de prova)

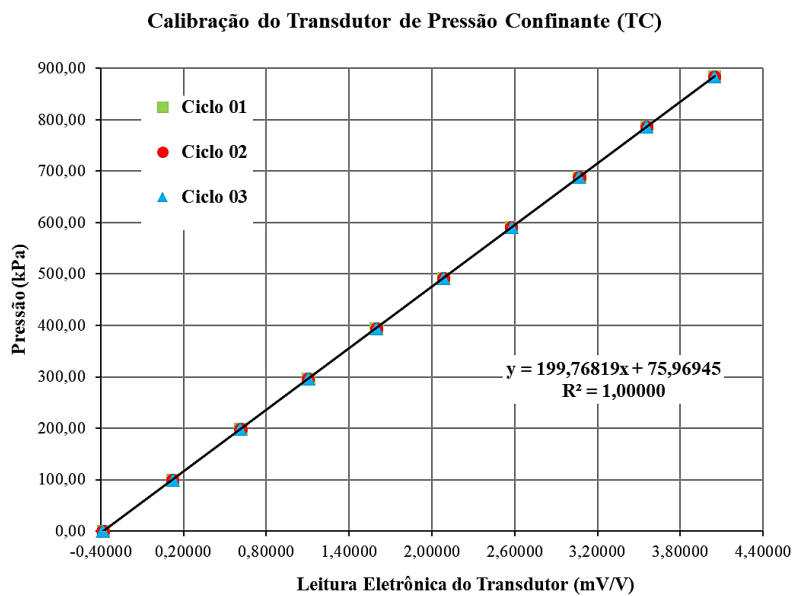


Figura D2 – Curva de calibração do transdutor de poropressão conectado à câmara do permeâmetro, ou seja, confinante ao corpo de prova (TC).

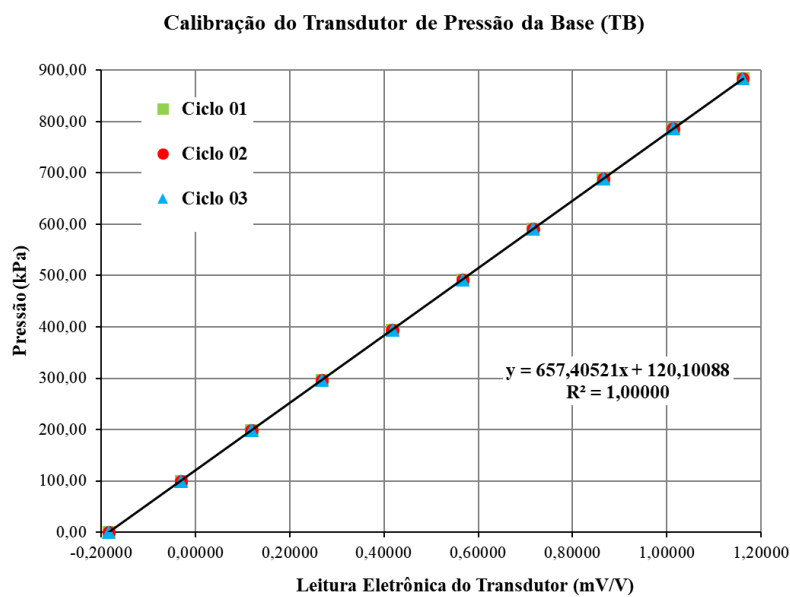


Figura D3 – Curva de calibração do transdutor de poropressão conectado à base do corpo de prova (TB).

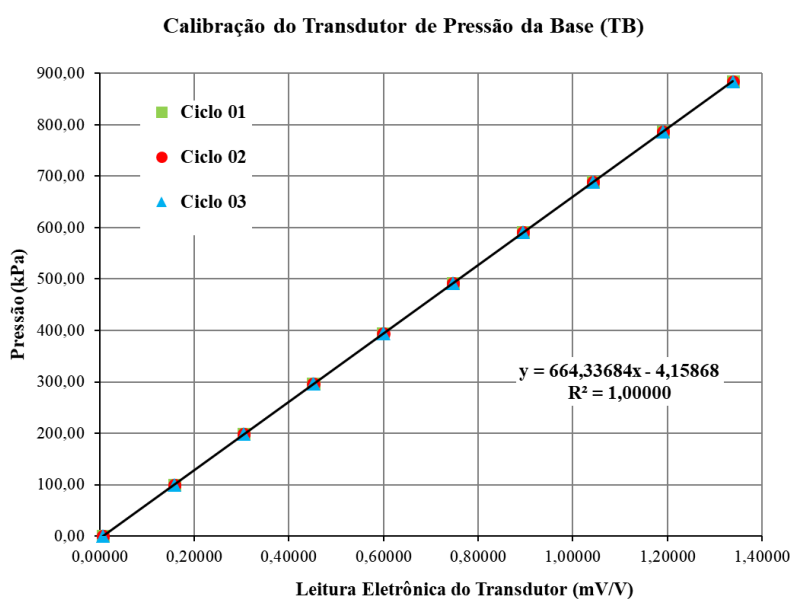


Figura D4 – Curva de calibração do transdutor de poropressão conectado ao topo do corpo de prova (TT).