

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA  
CENTRO TECNOLÓGICO DE JOINVILLE  
CURSO DE ENGENHARIA CIVIL DE INFRAESTRUTURA

BRUNO HENRIQUE ROCHA VEIGA

AVALIAÇÃO DA CONDUTIVIDADE HIDRÁULICA DE CAMADAS DE BASE PARA  
GRAMADOS ESPORTIVOS

Joinville

2020

BRUNO HENRIQUE ROCHA VEIGA

AVALIAÇÃO DA CONDUTIVIDADE HIDRÁULICA DE CAMADAS DE BASE PARA  
GRAMADOS ESPORTIVOS

Trabalho apresentado como requisito para obtenção do título de bacharel no Curso de Graduação em Engenharia Civil de Infraestrutura do Centro Tecnológico de Joinville da Universidade Federal de Santa Catarina.

Orientador: Dr. Marcelo Heidemann

Joinville

2020

BRUNO HENRIQUE ROCHA VEIGA

AVALIAÇÃO DA CONDUTIVIDADE HIDRÁULICA DE CAMADAS DE BASE PARA  
GRAMADOS ESPORTIVOS

Este Trabalho de Conclusão de Curso foi julgado adequado para obtenção do título de bacharel em Engenharia Civil de Infraestrutura, na Universidade Federal de Santa Catarina, Centro Tecnológico de Joinville.

**Banca Examinadora:**

---

Dr. Marcelo Heidemann  
Orientador  
Presidente

---

Dr. Daniel Hastenpflug  
Membro  
Universidade Federal de Santa Catarina

---

Me. Juliana Cristina Frankowiak  
Membro  
Universidade do Estado de Santa Catarina

## RESUMO

O aumento da demanda por estádios e arenas no Brasil, causado pela escolha do país como sede de eventos esportivos de importância internacional, trouxe forte procura por gramados de alta qualidade no país. Tal fato movimentou a pesquisa científica em torno de todos os elementos que compõe o gramado. Dentre estes elementos, as camadas de base e sub-base, responsáveis por suportar esforços mecânicos e acomodar águas de irrigação e chuva, são elementos chave no dimensionamento dos pavimentos. Além de não permitir a passagem de partículas da camada de solo logo abaixo do gramado para o sistema de drenagem, as camadas devem permitir o escoamento rápido de águas de chuva. Neste contexto, este trabalho apresenta o estudo de propriedades erosivas e hidráulicas de camadas de base encontradas na literatura, sobretudo aquelas propostas por normativas técnicas contemporâneas à construção dos estádios para a Copa do Mundo de 2014. Para isso, foram realizadas caracterizações granulométricas de turfa, areias e britas comerciais para comparação com a granulometria proposta na literatura. Além disso, ensaios de condutividade hidráulica foram realizados com os materiais propostos em diferentes combinações de espessuras, para avaliar o coeficiente de condutividade hidráulica de tais estruturas. Os resultados da caracterização validaram as curvas granulométricas das faixas comerciais dos materiais estudados. Por fim, os resultados de coeficientes de condutividade hidráulica mostraram que camadas com faixas granulométricas mais graduadas, em que as diferenças entre os diâmetros de camadas limítrofes são menores, tendem a apresentar maiores coeficientes de condutividade hidráulica – até  $7,99 \times 10^{-2}$  cm/s, 30% a mais do que camadas menos graduadas – e menor carregamento de finos para as camadas de filtro – com redução do índice de vazios de, em média, 12%, sete pontos percentuais a menos que camadas menos graduadas.

**Palavras-chave:** Camada drenante, erosão, condutividade hidráulica.

## ABSTRACT

The increase in the demand for stadia in Brazil, provoked by the country's election as host of international sporting events, represented a higher demand for top quality grass pitches. That demand increased scientific research regarding all elements of grass surfaces nationwide. The base and sub base layers are responsible for mechanical support and for carrying both irrigation and rain water. These layers are key elements of the pitch structure, serving both as a conduit for rain water and a filter for the draining system, which should be designed to accommodate high rainfall levels. For that, this study performed characterization of recommended materials and grain size ranges. Also, this study performed hydraulic conductivity testing in laboratory to analyze the hydraulic conductivity coefficient for recommended base and sub base combinations. The characterization results validated the applicability of the materials to base and sub base layers. Furthermore, the hydraulic conductivity coefficients obtained for specific layers arrangements highlighted an increased hydraulic performance of structures with higher uniformity of grading curves, in which neighboring layers diameter gaps are lower. Finally, more uniform grading curves pointed to a lower tendency to the occurrence of fine sediments piping.

**Keywords:** Drainage layers, erosion, hydraulic conductivity.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Esquema do permeâmetro de carga constante. ....	15
Figura 2: Etapas do processo de erosão interna em barragens. ....	19
Figura 3: Exemplos de diferentes classificações de granulometrias. ....	21
Figura 4: Todos os materiais que serão estudados. ....	28
Figura 5: Turfa tipo <i>green</i> . ....	29
Figura 6: Areia média. ....	30
Figura 7: Areia grossa.....	30
Figura 8: Brita 0.....	31
Figura 9: Brita 1.....	32
Figura 10: Funcionamento do reservatório alimentador do permeâmetro. ....	34
Figura 11: Detalhamento do permeâmetro de carga constante do LMS. ....	34
Figura 12: Esquema geral do permeâmetro à carga constante. ....	35
Figura 13: Distribuição granulométrica da turfa tipo <i>green</i> . ....	37
Figura 14: Curva granulométrica da areia média. ....	38
Figura 15: Curva granulométrica da areia grossa.....	40
Figura 16: Curva granulométrica da brita 0.....	41
Figura 17: Grãos fibrilares e volumosos da brita 0. ....	42
Figura 18: Curva granulométrica da brita 1.....	42
Figura 19: Grãos lamelares e volumosos da brita 1.....	43
Figura 20: Registro de todas as estruturas testadas. ....	43
Figura 21: Estrutura A. ....	44
Figura 22: Curvas sobrepostas do solo-base (areia média) e filtro (brita 1) da estrutura A. ....	45
Figura 23: Estrutura montada com a estrutura B. ....	46
Figura 24: Curvas sobrepostas do solo-base e filtro da estrutura B. ....	47
Figura 25: Estrutura montada com a estrutura C. ....	48
Figura 26: Curvas sobrepostas do solo-base e filtro da estrutura C. ....	49
Figura 27: Estrutura montada com a estrutura D.....	50
Figura 28 Curvas sobrepostas do solo-base e filtro da estrutura D. ....	51
Figura 29: Ensaio de condutividade hidráulica na turfa. ....	52
Figura 30: Ensaio de condutividade hidráulica na areia média. ....	54
Figura 31: Ensaio de condutividade hidráulica na areia grossa.....	56
Figura 32: Ensaio de condutividade hidráulica na brita 0. ....	58

Figura 33: Ensaio de condutividade hidráulica na brita1. ....	60
Figura 34: Transporte de areia para a camada de brita nas estruturas A e C.....	68
Figura 35: Proteção das camadas de brita nas estruturas B e D. ....	68

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Valores de condutividade hidráulica para diferentes solos. ....	15
Tabela 2: Valores típicos de coeficiente de condutividade hidráulica .....	16
Tabela 3: Valores de k para solos típicos .....	16
Tabela 4: Valores típicos para o coeficiente c na equação de Hazen .....	17
Tabela 5: Faixa granulométrica areia USGA. ....	26
Tabela 6: Intensidade pluviométrica nas cidades sede da Copa do Mundo de 2014.....	27
Tabela 7: Todas as estruturas de camadas que serão montadas .....	32
Tabela 8: Comparativo entre faixa granulométrica USGA (2011) e areia média. ....	39
Tabela 9: Comparativo entre faixa granulométrica USGA (2011) e areia grossa.....	40
Tabela 10: Análise de critérios de filtros para a estrutura A. ....	45
Tabela 11: Análise de critérios de filtros para a estrutura B. ....	47
Tabela 12: Análise de critérios de filtros para a estrutura C. ....	49
Tabela 13: Análise de critérios de filtros para a estrutura D. ....	51
Tabela 14: Resultados do ensaio de permeabilidade da turfa.....	53
Tabela 15: Resultados do ensaio de permeabilidade da areia média.....	55
Tabela 16: Resultados do ensaio de permeabilidade da areia grossa. ....	57
Tabela 17: Resultados do ensaio de permeabilidade da brita 0. ....	58
Tabela 18: Resultados do ensaio de permeabilidade da brita 1. ....	60
Tabela 19: Índices físicos dos materiais ao início do ensaio da estrutura A .....	61
Tabela 20: Resultados do ensaio de permeabilidade da estrutura A. ....	62
Tabela 21: Índices físicos dos materiais ao início do ensaio da estrutura B. ....	63
Tabela 22: Resultados do ensaio de permeabilidade da estrutura B.....	63
Tabela 23: Índices físicos dos materiais ao início do ensaio da estrutura C. ....	64
Tabela 24: Resultados do ensaio de permeabilidade da estrutura C.....	64
Tabela 25: Índices físicos dos materiais ao início do ensaio da estrutura D. ....	65
Tabela 26: Resultados do ensaio de permeabilidade da estrutura D. ....	66
Tabela 27: Cálculo da variação de densidade nas camadas de brita. ....	67
Tabela 28: Comparativo entre faixas granulométricas no contato brita-areia.....	68
Tabela 29: Indicadores de desempenho das estruturas.....	69

## SUMÁRIO

<b>1 INTRODUÇÃO .....</b>	<b>10</b>
1.1 OBJETIVOS .....	11
<b>1.1.1 Objetivo Geral.....</b>	<b>11</b>
<b>1.1.2 Objetivos Específicos .....</b>	<b>11</b>
<b>2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA.....</b>	<b>13</b>
2.1 CONDUTIVIDADE HIDRÁULICA .....	13
2.2 FORÇAS DE PERCOLAÇÃO.....	17
2.3 EROSÃO INTERNA.....	18
2.4 CLASSIFICAÇÃO GRANULOMÉTRICA .....	20
2.5 RELAÇÕES ENTRE PESO, VOLUME E ESTRUTURA DO SOLOS .....	21
2.6 FORMA DAS PARTÍCULAS .....	21
2.7 CRITÉRIOS DE FILTRO .....	22
<b>2.7.1 Critério de Terzaghi .....</b>	<b>22</b>
<b>2.7.2 Critério de Sherard et al. (1963).....</b>	<b>23</b>
<b>2.7.3 Critério do USBR (1977) .....</b>	<b>24</b>
2.8 COMPOSIÇÃO DE CAMADAS DE BASE PARA GRAMADOS.....	24
2.9 INTENSIDADE PLUVIOMÉTRICA .....	26
<b>3 METODOLOGIA.....</b>	<b>28</b>
3.1 MATERIAIS UTILIZADOS.....	28
<b>3.1.1 Turfa green Natural .....</b>	<b>29</b>
<b>3.1.2 Areia média .....</b>	<b>29</b>
<b>3.1.3 Areia grossa.....</b>	<b>30</b>
<b>3.1.4 Brita 0 .....</b>	<b>31</b>
<b>3.1.5 Brita 1 .....</b>	<b>31</b>
3.2 ESTRUTURAS TESTADAS .....	32
<b>3.2.1 Solo-base .....</b>	<b>32</b>
<b>3.2.2 Camada drenante .....</b>	<b>33</b>
3.3 ENSAIO DE PERMEABILIDADE À CARGA CONSTANTE – NBR 13292/1995 (ABNT, 1995).....	33
<b>4 RESULTADOS E DISCUSSÕES.....</b>	<b>37</b>
4.1 CARACTERIZAÇÃO DOS MATERIAIS .....	37

<b>4.1.1 Turfa</b> .....	<b>37</b>
<b>4.1.2 Areia média</b> .....	<b>38</b>
<b>4.1.3 Areia grossa</b> .....	<b>39</b>
<b>4.1.4 Brita 0</b> .....	<b>41</b>
<b>4.1.5 Brita 1</b> .....	<b>42</b>
<b>4.2 CARACTERIZAÇÃO DAS ESTRUTURAS</b> .....	<b>43</b>
<b>4.2.1 Estrutura A</b> .....	<b>44</b>
<b>4.2.2 Estrutura B</b> .....	<b>46</b>
<b>4.2.3 Estrutura C</b> .....	<b>48</b>
<b>4.2.4 Estrutura D</b> .....	<b>50</b>
<b>4.3 ENSAIOS DE CONDUTIVIDADE HIDRÁULICA</b> .....	<b>52</b>
<b>4.3.1 Turfa</b> .....	<b>52</b>
<b>4.3.2 Areia média</b> .....	<b>54</b>
<b>4.3.3 Areia grossa</b> .....	<b>56</b>
<b>4.3.4 Brita 0</b> .....	<b>58</b>
<b>4.3.5 Brita 1</b> .....	<b>59</b>
<b>4.3.6 Estrutura A</b> .....	<b>61</b>
<b>4.3.7 Estrutura B</b> .....	<b>62</b>
<b>4.3.8 Estrutura C</b> .....	<b>64</b>
<b>4.3.9 Estrutura D</b> .....	<b>65</b>
<b>4.4 EROSÃO INTERNA</b> .....	<b>66</b>
<b>4.5 INDICADORES DE DESEMPENHO DAS ESTRUTURAS</b> .....	<b>69</b>
<b>5 CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES</b> .....	<b>72</b>
<b>5.1 SUGESTÕES PARA PESQUISAS FUTURAS</b> .....	<b>73</b>
<b>REFERÊNCIAS</b> .....	<b>74</b>

## 1 INTRODUÇÃO

A escolha do Brasil como sede dos dois principais eventos esportivos mundiais aqueceu o mercado de pavimentos revestidos em grama com foco na alta performance. A construção de novos estádios e arenas, assim como a modernização de sítios já existentes, gerou no mercado nacional uma demanda por gramados e sistemas de drenagem de alto padrão. Ao todo, doze estádios e 83 campos de treinamento foram utilizados para a Copa do Mundo de 2014, todos sob as exigências mundiais mais altas de qualidade e desempenho. (AMBROSIO, 2013 e SEGALLA, 2014).

Devido à importância da Copa do Mundo da FIFA de futebol, em 2014, as partidas deveriam ocorrer com condições ideais de gramado. Para tal, houve a necessidade de buscar espécies de gramado, materiais de camadas subjacentes e sistemas de drenagem que comportassem as condições climáticas locais sem apresentar empoçamento, buracos, fissuras ou outras condições adversas aos atletas na superfície. Segundo Oliveira (2016), o gramado deve apresentar absoluta homogeneidade, ser liso e nivelado e contar com sistemas de irrigação e drenagem adequados para comportar partidas em dias de chuva.

No entanto, para garantir a funcionalidade da superfície, há a necessidade de um projeto competente e ainda mais crítico das camadas subjacentes ao gramado (Oliveira, 2016). Tais camadas têm função de garantir o nivelamento, comportar esforços mecânicos durante a execução do campo e operação, conduzir águas pluviais, além de fornecer condições de umidade e adubamento que propiciem o crescimento do gramado e sua regeneração após as partidas (Azeredo Neto, 2003 e Oliveira, 2016).

Segundo o Comitê Organizador Brasileiro Copa 2014 (2009), vários são os fatores que influenciam a determinação de parâmetros do projeto do gramado e das camadas de base. A escolha da espécie da grama, da utilização da praça fora de dias de jogos, do método construtivo das camadas e sistema de drenagem e, sobretudo, a escolha dos materiais a serem aplicados são fatores geradores de incerteza que impactam diretamente o projeto e a implantação do gramado. (COMITÊ ORGANIZADOR BRASILEIRO COPA 2014, 2009).

Além disso, segundo o Comitê (2009), existem mundialmente diversas metodologias construtivas que resultam em um gramado com o padrão exigido para uma Copa do Mundo. Parte desses métodos foi concebida ao longo dos anos com base em pesquisas específicas para necessidades distintas e levando em consideração características regionais de clima, normas e padrões aceitos e materiais disponíveis naturalmente.

Segundo Oliveira (2016), os materiais mais comuns na utilização de bases e sub-bases são argilas, areias e turfas. No contexto de estruturas e materiais aplicáveis na construção de gramados de alto desempenho, a *United States Golf Association* (USGA) é o órgão referência mundial. Suas normativas são utilizadas por outros órgãos esportivos, como a *Fédération Internationale de Football Association* (FIFA) e o Comitê Organizador Brasileiro Copa 2014 (OLIVEIRA, 2016). Em geral, as normativas atrelam composições com alturas de camadas em função de granulometria proposta, sem atrelar parâmetros de permeabilidade que devem ser alcançados pela estrutura.

Neste contexto este trabalho dedicou-se a avaliar propriedades de permeabilidade e erosão de estruturas de base de pavimentos esportivos de alto rendimento. Também foram estudadas características geotécnicas básicas de materiais sugeridos pela literatura e a influência de tais características nas propriedades de permeabilidade e erosão das estruturas analisadas.

## 1.1 OBJETIVOS

### 1.1.1 Objetivo Geral

O estudo visou determinar a melhor composição de camada de base para a aplicação em gramados de estádios e arenas esportivas, tendo em vista as estruturas já propostas na literatura. Para isso, foram formuladas amostras compostas por camadas de diferentes materiais para a obtenção de coeficientes de condutividade hidráulica e avaliação da ocorrência de erosão interna das camadas.

### 1.1.2 Objetivos Específicos

- Formular estruturas compostas por camadas de turfa, areia e brita, a partir de referências reportadas na literatura.
- Determinar das propriedades geotécnicas básicas dos materiais empregados.
- Medir o coeficiente de condutividade hidráulica dos materiais empregados.
- Medir o coeficiente de condutividade hidráulica de corpos de prova representativos das estruturas de base.
- Avaliar a ocorrência e intensidade de fenômenos de erosão interna.

- Avaliar as estruturas e indicar as estruturas com melhor desempenho em termos de condutividade hidráulica e resistência à erosão interna.

## 2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

### 2.1 CONDUTIVIDADE HIDRÁULICA

Segundo Das (2007), o estudo do fluxo de água através de um solo é um fator importante na mecânica dos solos. Neste contexto, a propriedade de condutividade hidráulica  $k$  de solos determina a maior ou menor facilidade com que um fluido percorre a matriz de poros interconectados do solo (COACALLA, 2012).

Henry Darcy (DAS, 2007), postulou, em 1856, a relação disposta na Equação 1, em que definia o comportamento de um fluxo de água através de um solo em regime laminar.

$$q = k * \frac{\Delta h}{L} * A \quad (1)$$

Em que  $q$  representa a vazão do fluido (em  $m^3/s$ ),  $k$  representa o coeficiente de condutividade hidráulica (em  $m/s$ ),  $\Delta h$  é definido como a perda total de carga do fluxo (em  $cm/cm$ ) e  $A$  representa a área de seção transversal do solo percolado (em  $m^2$ ) (COACALLA, 2012). Isolando para o coeficiente  $k$  de condutividade hidráulica, obtém-se a Equação 2.

$$k = \frac{q}{\frac{\Delta h}{L} * A} \quad (2)$$

Para cada ponto do fluxo, a carga hidráulica  $h$  disponível pode ser determinada através da Equação de Bernoulli (FERNANDES, 2017), descrita na Equação 3.

$$h = \frac{u}{\gamma_w} + \frac{v^2}{2g} + z \quad (3)$$

Em que  $u$  representa a pressão aplicada ao ponto (em Pa),  $\gamma_w$  é o peso específico da água ( $9810N/m^3$  a  $20^\circ C$  e  $1atm$ ),  $v$  é a velocidade do fluxo (em  $m/s$ ),  $g$  é a aceleração da gravidade ( $9,81m/s^2$ ) e  $z$  é distância vertical do ponto a uma referência de nível (em  $m$ ) (FERNANDES, 2017).

Para o fluxo de água pelo meio de um solo poroso, o termo que contém energia cinética ( $v^2/2g$ ) pode ser desprezado (DAS, 2007). Assim, tem-se que a carga total em um ponto em que ocorre escoamento de água sobre um solo poroso é dada pela Equação 4.

$$h = \frac{u}{\gamma_w} + z \quad (4)$$

A perda de carga em dois pontos A e B, portanto, é descrita pela Equação 5.

$$\Delta h = h_A - h_B = \left( \frac{u_A}{\gamma_w} + z_A \right) - \left( \frac{u_B}{\gamma_w} + z_B \right) \quad (5)$$

Por fim, a perda de carga  $\Delta h$  pode ser expressa de forma adimensional (DAS, 2007) em função da distância  $L$  entre os pontos A e B. Essa razão adimensional  $i$ , descrita na Equação 6, é conhecida como gradiente hidráulico.

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

Substituindo  $\Delta h/L$  na Equação 2, deriva-se a Equação 7.

$$k = \frac{q}{i * A} \quad (7)$$

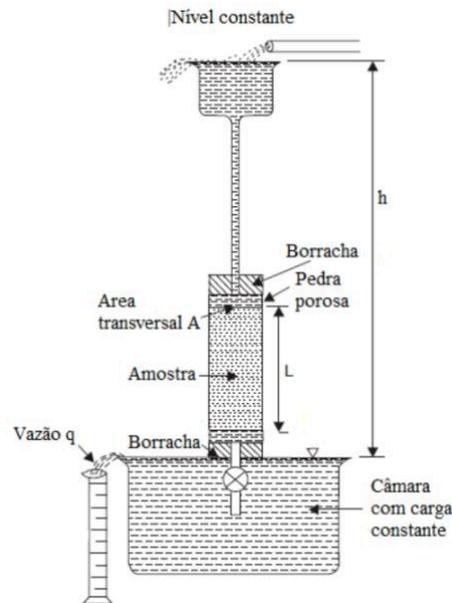
A condutividade hidráulica varia de acordo com o diâmetro das partículas da camada. Em linhas gerais, solos mais granulares como britas, pedregulhos e areias, apresentam melhor condutividade do que solos finos, como siltes e argilas (COACALLA, 2012). Isso se explica pelo espaçamento entre as partículas do solo, que é maior para materiais com maior granulometria.

Para a medição do coeficiente de condutividade hidráulica, segundo Coacalla (2012), os ensaios com permeâmetros de paredes rígidas e à carga constante são mais recomendados para amostras de solos granulares. Tal ensaio consiste na aplicação de um fluxo constante  $q$  conhecido a uma altura pré-determinada  $h$  sobre uma amostra com altura  $L$  e área de seção transversal  $A$ . O coeficiente de condutividade hidráulica  $k$  é dado pela Equação 8, e é derivado da Lei de Darcy (Equação 1) aplicando a interpretação da Equação de Bernoulli (Equação 3).

$$k = \frac{q * L}{A * h} \quad (8)$$

A Figura 1 esquematiza o permeâmetro de carga constante e paredes rígidas.

Figura 1: Esquema do permeâmetro de carga constante.



Fonte: Coacalla (2012).

A Tabela 1 apresenta resultados esperados de condutividade hidráulica, em cm/s, para ensaios de índice de condutividade hidráulica.

Tabela 1: Valores de condutividade hidráulica para diferentes solos.

Condutividade hidráulica (cm/s)												
	10	10 <sup>-1</sup>	10 <sup>-2</sup>	10 <sup>-3</sup>	10 <sup>-4</sup>	10 <sup>-5</sup>	10 <sup>-6</sup>	10 <sup>-7</sup>	10 <sup>-8</sup>	10 <sup>-9</sup>	10 <sup>-10</sup>	10 <sup>-11</sup>
Drenagem	Bom						Pobre		Praticamente impermeável			
Tipo de solo	Pedregulho limpo		Areias limpas, Areias mais pedregulhos limpos			Areias muito finas, siltes orgânicos e inorgânicos, misturas de areias, siltes e argilas, depósitos estratificados de argilas			"Impermeáveis" argilas homogêneas embaixo de zonas de intemperismo			
					"Impermeáveis", solos modificados pelos efeitos, de vegetação e intemperismo							

Fonte: Casagrande e Fadum (1940) *apud* Coacalla (2012).

Das (2007) também traz valores característicos de condutividade hidráulica para diferentes materiais, dispostos na Tabela 2.

Tabela 2: Valores típicos de coeficiente de condutividade hidráulica

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

Fonte: Adaptado de Das (2007).

Hoydal e Heyerdahl (2006) também listam valores característicos esperados para coeficientes de condutividade hidráulica para materiais típicos, listados na Tabela 3.

Tabela 3: Valores de k para solos típicos

<b>Solo típico</b>	<b>k (cm/s)</b>	<b>Volume equivalente de infiltração pluviométrica (mm/dia)</b>
Areias	$1,0 \times 10^{-2}$ a $1,0 \times 10^{-5}$	$8,64 \times 10^3$ a $8,64 \times 10^0$
Silte	$1,0 \times 10^{-5}$	$8,64 \times 10^0$
Argila magra	$1,0 \times 10^{-6}$	$8,64 \times 10^1$

Fonte: Adaptado de Hoydal e Heyerdahl (2006).

Hazen (1930) propôs uma estrutura empírica para a determinação do coeficiente k de permeabilidade em função do diâmetro característico ( $D_{10}$ ) do material (FERNANDES, 2017). A Equação 9 apresenta a equação proposta por Hazen.

$$k \text{ (cm/s)} = c * D_{10}^2 \quad (9)$$

Em que c é um coeficiente em função do tipo de solo, disposto na Tabela 4 e  $D_{10}$  é o diâmetro em que 10%, em peso, das partículas do solo apresentam diâmetro superior a.

Tabela 4: Valores típicos para o coeficiente c na equação de Hazen

<b>Material</b>	<b>c</b>
Areia muito fina, pobremente selecionada	0,4 – 0,8
Areia fina argilosa ou siltosa	0,4 – 0,8
Areia média, bem selecionada	0,8 – 1,2
Areia grossa, pobremente selecionada	0,8 – 1,2
Areia grossa, bem sortida, limpa	1,2 – 1,5

Fonte: Fetter (1994) *apud* Fernandes (2017).

Segundo Das (2007), a condutividade hidráulica de um material é também dada em função do peso específico e da viscosidade da água que o percola. Esses fatores, por sua vez, são variáveis em função da temperatura. A NBR 13292/1995 (ABNT, 1995) exige que os coeficientes k de condutividade hidráulica sejam dados relativos a uma temperatura de 20°C. Caso o coeficiente seja medido em uma temperatura diferente de 20°C, um fator de correção em função da viscosidade da água deve ser aplicado, conforme Equação 10.

$$k_{20^{\circ}C} = \frac{\eta_{T^{\circ}C}}{\eta_{20^{\circ}C}} * k_{T^{\circ}C} \quad (10)$$

Em que  $k_{20^{\circ}C}$  é o coeficiente de condutividade hidráulica do material equivalente para uma temperatura da 20°C,  $\eta_{T^{\circ}C}$  e  $\eta_{20^{\circ}C}$  são, respectivamente, a viscosidade da água na temperatura do ensaio e a 20°C (em Pa\*s) e  $k_{T^{\circ}C}$  é o coeficiente de condutividade medido a temperatura do ensaio.

## 2.2 FORÇAS DE PERCOLAÇÃO

Pinto (2006) descreve a força de percolação como a resultante da dissipação da energia da água através de atrito viscoso. “A força de percolação é uma grandeza semelhante ao peso específico e atua da mesma forma que a força gravitacional” (PINTO, 2006). Ainda segundo Pinto (2006), a força de percolação se soma a força gravitacional em fluxos descendentes e é subtraída da força gravitacional em fluxos ascendentes. Pinto (2006) ainda cita que a força de percolação tende a carregar partículas na direção do movimento do fluxo, sendo contraposta pelo próprio peso da partícula ou por forças externas. No contexto de camadas filtro, uma força externa de contrapartida a tendência de movimento causada pela percolação é a reação oferecida por partículas de maior diâmetro nas camadas do filtro.

Segundo Pinto (2006), a força de percolação  $F$  no fluxo é descrita pela Equação 16.

$$F = \gamma_w * \Delta h * A \quad (16)$$

Onde  $\gamma_w$  é o peso específico da água,  $\Delta h$  é a perda de carga piezométrica no conjunto e  $A$  é a área da seção transversal.

### 2.3 EROSAO INTERNA

O processo de erosão interna pode causar danos à matriz permeável da estrutura, assim como pode vir a colmatar a estrutura e os tubos da rede de drenagem (OLIVEIRA, 2016). Ainda “a erosão interna é caracterizada essencialmente pelo movimento de partículas através do solo, como consequência da desestabilização do equilíbrio de forças na matriz do solo” (SILVA, 2016, p. 26). Tal equilíbrio de forças refere-se às forças geradas pelo movimento vertical da água em direção à região de menor potencial gravitacional (camadas mais internas do pavimento) contraposta às forças internas de atrito que resistem ao movimento.

Nesse contexto, observa-se a importância da escolha adequada das geometrias e da distribuição adequada da faixa granulométrica da estrutura. Segundo Azeredo Neto (2003), os materiais aplicados devem ter partículas que sejam de formato angular ou arredondado e não devem ter mais de 20% de partículas em formato lamelar ou formato de escamas. Isso se deve ao fato de que partículas lamelares podem formar caminhos preferenciais de passagem para a água. Tais caminhos podem gerar aumento de pressões no sentido do fluxo descendente da água, que, por sua vez, pode vir a carregar partículas das camadas superiores mais finas para as camadas drenantes da estrutura.

Segundo Foster e Fell (1999) *apud* Pimenta Filho (2013), o processo de erosão interna ocorre em quatro fases distintas. Tais fases estão exemplificadas na Figura 2.

Figura 2: Etapas do processo de erosão interna em barragens.



Fonte: Foster e Fell (1999) *apud* Pimenta Filho (2013).

Na primeira etapa, há o gatilho do processo, que pode ser ocasionado por escoamentos concentrados, erosão regressiva ou de contato ou sufusão. No contexto de gramados esportivos, os escoamentos concentrados podem ser exemplificados por falhas no nivelamento da superfície final, que pode ocasionar acúmulos locais de água e, conseqüentemente, excesso de pressões hidrostáticas à montante. Essas pressões serão dissipadas no fluxo descendente de água, podendo carregar consigo partículas das camadas superiores do pavimento (mais finas) para as camadas inferiores (mais granulares) (FOSTER E FELL (1999) *apud* PIMENTA FILHO (2013)),

Na segunda etapa do processo de erosão interna, ou etapa de continuação, segundo Foster e Fell (1999) *apud* Pimenta Filho (2013), as partículas não interceptadas pela ação de algum filtro começam a ser acumular nas camadas drenantes. Após a etapa de continuação, inicia-se a terceira etapa do processo, conhecida como progressão. Tal etapa é caracterizada pela formação de um tubo de movimento preferencial do fluxo de água. Aqui, vale ressaltar a observação feita por Azeredo Neto (2003) sobre o formato das partículas das camadas drenantes. Caso as partículas tenham, em sua maioria, formatos lamelares, a formação do tubo comentado por Foster e Fell (1999) *apud* Pimenta Filho (2013) tende a ser facilitada. Ainda segundo Foster e Fell (1999) *apud* Pimenta Filho (2013), a terceira fase da erosão interna apresenta estabilização ou intensificação das poropressões à jusante da estrutura.

Por fim, segundo Foster e Fell (1999) *apud* Pimenta Filho (2013), há uma etapa final caracterizada pela ruptura da estrutura, que gera vazão descontrolada do reservatório (no caso de barragens) através da abertura de fendas. Para camadas de solo-base e filtro para gramados, tal fenômeno pode representar uma sobrecarga do sistema de drenagem, pois não há dissipação de energia caso haja fendas de fluxo preferencial na estrutura.

## 2.4 CLASSIFICAÇÃO GRANULOMÉTRICA

A análise granulométrica é a determinação de faixas de tamanhos das partículas, em função dos pesos secos medidos para diferentes diâmetros (DAS, 2007). A determinação da classificação granulométrica de um solo com diâmetros superiores da 0,075mm é dada pela NBR 7181/2016 (ABNT, 2016), através do ensaio de peneiramento. Ele consiste na passagem da amostra por uma sequência de peneiras com aberturas conhecidas e consequente aferição da massa retida em cada uma das peneiras da série. Ainda segundo a NBR 7181/2016 (ABNT, 2016), para partículas com diâmetros inferiores a 0,075mm, o ensaio a ser realizado é o ensaio de sedimentação (DAS, 2007).

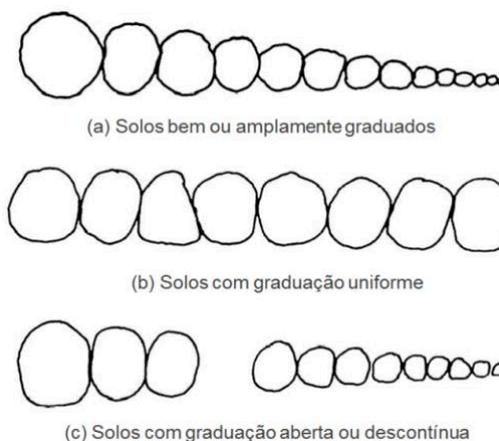
Após a realização do ensaio adequado, procede-se para a classificação do solo. Para tal, tomam-se medidas de  $D_{10}$ ,  $D_{30}$  e  $D_{60}$ , que representam as aberturas das peneiras em que 10%, 30% e 60%, respectivamente, da amostra não ficam retidos (PIMENTA FILHO, 2013). Em posse dos três diâmetros e aplicando as Equações 11 e 12, é possível obter o coeficiente de uniformidade ( $C_u$ ) e o coeficiente de curvatura ( $C_c$ ) da faixa granulométrica do solo.

$$C_u = \frac{D_{60}}{D_{10}} \quad (11)$$

$$C_c = \frac{(D_{30})^2}{D_{60} * D_{10}} \quad (12)$$

Para o coeficiente de uniformidade, são considerados solos muito uniformes aqueles que apresentam  $C_u$  inferior a 5, medianamente aqueles que apresentam  $C_u$  entre 5 e 15 e desuniformes (ou bem graduados) os solos com  $C_u$  superior a 15 (PIMENTA FILHO, 2013, p. 23). Para os coeficientes de curvatura, são considerados solos bem graduados aqueles que apresentam  $C_c$  entre 1 e 3 (PIMENTA FILHO, 2013, p. 23). A Figura 3 apresenta exemplos de solos bem graduados, uniformes e com graduação aberta (ou descontínua).

Figura 3: Exemplos de diferentes classificações de granulometrias.



Fonte: PLTW (2016) *apud* Silva (2016).

## 2.5 RELAÇÕES ENTRE PESO, VOLUME E ESTRUTURA DO SOLOS

Aqui serão apresentadas algumas relações físicas entre peso, volume e estrutura dos solos que serão utilizadas para o cálculo da redução dos índices de vazios das camadas de brita.

Das (2007) também define:

- Índice de vazios ( $e$ ): proporção entre o volume de vazios ( $V_v$ ), dado pela soma entre volume de água ( $V_w$ ) e volume de ar ( $V_a$ ), e o volume de sólidos ( $V_s$ ), dado pela Equação 15:

$$e = \frac{V_v}{V_s} = \frac{V_t - V_s}{V_s} = \frac{V_w + V_a}{V_s} \quad (15)$$

Onde  $V_t$  é o volume total da amostra.

- Densidade real dos grãos (ou peso específico relativo): é a relação entre o peso específico da fração sólida de um solo e o peso específico da água ( $0,998 \text{ g/cm}^3$  a  $20^\circ\text{C}$ ).

## 2.6 FORMA DAS PARTÍCULAS

A classificação do formato das partículas é feita levando em consideração três medidas distintas dos eixos ortogonais existentes na geometria. Conforme Das (2007), existem três principais categorias de classificação geométrica dos granulares: volumosa (que ainda podem ser classificadas em angular, subangular, subarredondada, arredondada e bem arredondada), laminar e fibrilar.

A classificação volumosa é caracterizada por grãos em que nenhuma das dimensões se destaca em relação às demais, em qualquer combinação de eixos ortogonais. Em outras palavras, são partículas com as três dimensões de mesma grandeza. Dentre as subclassificações, o que diferencia as partículas de angulares a bem arredondadas é o ângulo predominante nas arestas do sólido formado. Partículas angulares apresentam ângulos agudos e bem definidos. Partículas bem arredondadas, por outro lado, não apresentam ângulos proeminentes, sendo sua geometria próxima a uma esfera (DAS, 2007 e PINTO, 2006)

Conforme proposto por Azeredo Neto (2003), as partículas mais recomendadas para a aplicação em colchões drenantes são angulares a arredondadas. Esses formatos facilitam a drenagem das águas sem causar riscos de erosão interna.

As partículas laminares, por sua vez, apresentam duas dimensões de grandezas superiores a terceira. Isso faz com que as partículas se assemelhem a planos de pequena espessura. Como já comentado e discutido por Azeredo Neto (2003), tais partículas não devem estar presentes em quantidades superiores a 20% nas camadas drenantes, para evitar problemas de erosão interna.

## 2.7 CRITÉRIOS DE FILTRO

O dimensionamento de uma camada drenante, conforme já discutido, tem forte dependência da distribuição granulométrica e dos vazios internos. (COACALLA, 2016, OLIVEIRA, 2006, DAS, 2007 e PINTO 2006). Aqui serão discutidos alguns dos critérios e sua aplicação no estudo da camada drenante para gramados esportivos. Um fator importante relacionado à distribuição granulométrica de uma estrutura de camada drenante é o conceito de auto filtragem da camada superior da base:

Se o solo for bem graduado, as partículas maiores fecham os vazios do material do filtro impedindo a passagem das partículas médias para dentro do filtro, que por sua vez impedem as partículas finas. Neste caso, o processo depende da distribuição granulométrica do material [...] (SILVA, 2016, p. 67).

### 2.7.1 Critério de Terzaghi

A determinação dos parâmetros de projeto para uma camada filtrante em solo é objeto de estudo desde Terzaghi, em 1926 (SILVA, 2016). De fato, a influência de Karl Von Terzaghi no estudo de solos drenantes é tanta que seu estudo foi intitulado de “Critério Clássico de Terzaghi” (SILVA, 2016), e marca o passo inicial de vários outros estudos

posteriores. A avaliação de Terzaghi consiste em garantir a camada drenante duas propriedades fundamentais: retenção de partículas do material protegido e permeabilidade de água.

O critério de Terzaghi é válido para materiais não coesivos e uniformes. As granulometrias aqui propostas não apresentam porcentagens significativas de argilas e siltes, o que permite a aplicação dos critérios. A teoria de Terzaghi é simples e leva em conta as porcentagens passantes em cada peneira do ensaio de peneiramento. Para que uma camada esteja adequada, ela precisa atender as Equações 13 e 14.

$$\frac{D_{15F}}{D_{85B}} \leq 4 \quad (13)$$

$$\frac{D_{15F}}{D_{15B}} \geq 4 \quad (14)$$

Em que  $D_{15F}$  representa o diâmetro em que 15% das partículas do filtro são passantes,  $D_{85B}$  representa o diâmetro em que 85% das partículas do solo base são passantes e  $D_{15B}$  representa o diâmetro em que 15% das partículas do solo base são passantes,

### 2.7.2 Critério de Sherard et al. (1963)

O método de Sherard et al. (1963) *apud* Silva (2016) aponta cinco critérios para o dimensionamento do filtro. Diferente de Terzaghi, o critério traz relações entre a curva granulométrica da camada drenante e do solo-base. O dimensionamento consiste em:

- I)  $D_{15F} \leq 5D_{85B}$ ;
- II)  $D_{15F} \geq 5D_{15B}$ ;
- III) As curvas do solo-base e do material filtrante devem apresentar a mesma forma;
- IV) Se o solo-base apresentar uma elevada percentagem de pedregulhos, o filtro deve ser concebido considerando a porção mais fina passante na peneira de 1” (25,4 mm);
- V) Os filtros não devem conter mais de 5% de finos passantes na peneira nº 200, e estes não devem ser coesos (SHERARD ET AL., 1963 *apud* SILVA, 2016).

Em que  $D_{15F}$  representa o diâmetro em que 15% das partículas do filtro são passantes,  $D_{85B}$  representa o diâmetro em que 85% das partículas do solo base são passantes e  $D_{15B}$  representa o diâmetro em que 15% das partículas do solo base são passantes,

### 2.7.3 Critério do USBR (1977)

O critério do USBR (1977) também prevê um dimensionamento da camada em função dos diâmetros das partículas presentes nos materiais. Conforme descrito por Fell et al. (2015) *apud* Silva (2016), o método prevê os seguintes passos de dimensionamento:

- I)  $5 \leq D_{15F} / D_{15B} \leq 40$ ;
- II)  $D_{15F} / D_{85B} \leq 5$ ;
- III) O filtro não possui mais do que 5% de finos passantes na peneira nº 200 e estes finos devem ser pouco coesivos;
- IV) A curva de distribuição granulométrica do filtro deve ser aproximadamente paralela à curva do material do solo-base;
- V) Tamanho máximo das partículas do filtro deve ser igual a 75mm, para evitar a segregação durante a construção;
- VI) Para o solo-base com partículas de pedregulho, o  $D_{15B}$  e  $D_{85B}$  devem ser analisados em função da graduação do solo mais fino que 4,7mm.

Em que  $D_{15F}$  representa o diâmetro em que 15% das partículas do filtro são passantes,  $D_{85B}$  representa o diâmetro em que 85% das partículas do solo base são passantes e  $D_{15B}$  representa o diâmetro em que 15% das partículas do solo base são passantes,

## 2.8 COMPOSIÇÃO DE CAMADAS DE BASE PARA GRAMADOS

Conforme discutido pelo Comitê Organizador Brasileiro Copa 2014 (2019), há mais de uma metodologia construtiva que atenda os padrões exigidos pela FIFA. No Brasil, vários autores trazem estruturas de estruturas do subsolo com diferentes materiais e espessuras. Azeredo Neto (2003) divide a estrutura do subsolo do gramado em duas principais camadas:

- Camada solo-base ou *top-soil*: composta por material arenoso (areia média) com (AZEREDO NETO, 2003) ou sem (COMITÊ ORGANIZADOR BRASILEIRO COPA 2014, 2009) matéria orgânica. Oliveira (2016) cita a turfa como o principal material a ser utilizado como matéria orgânica. Essa camada fornece resistência mecânica aos esforços solicitantes e sustentação

física e química para o enraizamento da grama (COMITÊ ORGANIZADOR BRASILEIRO COPA 2014, 2009);

- Colchão drenante ou filtro: composto por materiais granulares (areia grossa, brita 0 e brita 1): fornece proteção ao sistema de drenagem (AZEREDO NETO, 2003), elevando a eficiência do sistema de drenagem como um todo (COMITÊ ORGANIZADOR BRASILEIRO COPA 2014, 2009).

Dentre os materiais citados, a NBR 6502/1995 os define como:

- Turfa: “Solo com grande percentagem de partículas fibrosas e matéria orgânica no estado coloidal, com coloração marrom-escuro a preta. É um material mole, altamente compressível, não plástico, combustível e de cheiro característico.” (ABNT, 1995, p. 18);
- Areia média: “Areia com grãos de diâmetros compreendidos entre 0,20 mm e 0,60 mm.” (ABNT, 1995, p. 8);
- Areia grossa: “Areia com grãos de diâmetros compreendidos entre 0,60 mm e 2,0 mm.” (ABNT, 1995, p. 8);

Quaresma (2009) define as faixas diametraais para britas comerciais:

- Pedregulho fino (brita 0): brita com diâmetros entre 4,8mm e 9,5mm (QUARESMA, 2009, p. 6);
- Brita 1: brita com diâmetros entre 9,5mm e 19,0mm (QUARESMA, 2009, p. 6).

A utilização da turfa como solo-base é prática comum na montagem de gramados – tanto para jardinagem e paisagismo, como para pavimentos esportivos (ZANON, 2003, AZEREDO NETO, 2003 e OLIVEIRA 2016). Além disso, segundo Oliveira (2016), a turfa tipo *green* fornece bons níveis de pH, condutividade elétrica, concentração de fósforo, potássio e magnésio, além de boa sustentação mecânica e área de contato para trocas gasosas. Oliveira (2016) cita tais características como fundamentais para o bom desenvolvimento do gramado que será colocado acima da turfa. Ainda, a adição de turfa na camada de solo-base favorece fatores hidráulicos da camada, aumentando a retenção de água quando comparado a camadas simples de areia e, conseqüentemente, reduzindo a demanda por água de irrigação (OLIVEIRA, 2016). No entanto, a maior capacidade de retenção de água pode representar riscos para períodos de alto volume pluviométrico por empoçamento.

Oliveira (2016) também cita os riscos provenientes do uso desse material com alta concentração de matéria orgânica, sugerindo que a mistura seja levada a testes em laboratório.

Para as areias, a USGA (OLIVEIRA, 2016) determina faixas granulométricas dispostas na Tabela 5.

Tabela 5: Faixa granulométrica areia USGA.

<b>Caracterização</b>	<b>Granulometria (mm)</b>	<b>Recomendação (%)</b>
Areia muito grossa	1,0 – 2,0	$\leq 10$
Areia grossa	0,5 – 1,0	$\geq 60$
Areia média	0,25 – 0,5	
Areia fina	0,15 – 0,25	$\leq 20$
Areia muito fina*	0,05 – 0,15	$\leq 5$
Silte*	0,002 – 0,05	$\leq 5$
Argila*	<0,002	$\leq 5$

\* O total destas 3 classes juntas não deve ultrapassar 10%.

Fonte: USGA (2011) *apud* Oliveira (2016).

## 2.9 INTENSIDADE PLUVIOMÉTRICA

A NBR 10844/1989 define intensidade pluviométrica como o “quociente entre a altura pluviométrica precipitada num intervalo de tempo e este intervalo” (ABNT, 1989, p. 2)..Esses dados são disponibilizados em função de um período de retorno. O período de retorno é um número médio de anos decorridos para que uma determinada intensidade pluviométrica ocorra (ABNT, 1989). Para a NBR 10844/1989 (ABNT, 1989), o período de retorno indicado em áreas nas quais empoçamentos e extravasamentos não são tolerados é de 25 anos.

Fleming, *et al* (2016), no entanto, citam que raramente as intensidades pluviométricas em gramados em dias de jogos ultrapassam aquelas referentes a um período de retorno de cinco anos. A Tabela 6 apresenta valores característicos para as doze sedes (ou cidades mais próximas) da Copa do Mundo de 2014 para um período de retorno de cinco anos, assumido como o mais crítico para a utilização dos gramados (FLEMING, FROST E SIMPSON, 2016).

Tabela 6: Intensidade pluviométrica nas cidades sede da Copa do Mundo de 2014.

<b>Cidade</b>	<b>Intensidade Pluviométrica (mm/dia)</b>
<b>Belo Horizonte</b>	9,46x10 <sup>0</sup>
<b>Brasília (Formosa/GO)</b>	7,33x10 <sup>0</sup>
<b>Cuiabá</b>	7,92x10 <sup>0</sup>
<b>Curitiba</b>	8,50x10 <sup>0</sup>
<b>Fortaleza</b>	6,50x10 <sup>0</sup>
<b>Manaus</b>	7,50x10 <sup>0</sup>
<b>Natal</b>	5,00x10 <sup>0</sup>
<b>Porto Alegre</b>	6,08x10 <sup>0</sup>
<b>Recife (Olinda/PE)</b>	6,96x10 <sup>0</sup>
<b>Rio de Janeiro (Praça Saenz Peña)</b>	5,79x10 <sup>0</sup>
<b>Salvador</b>	5,08x10 <sup>0</sup>
<b>São Paulo (Mirante Santana)</b>	7,17x10 <sup>0</sup>

Fonte: Adaptado de NBR 10844/2016 (ABNT, 1989).

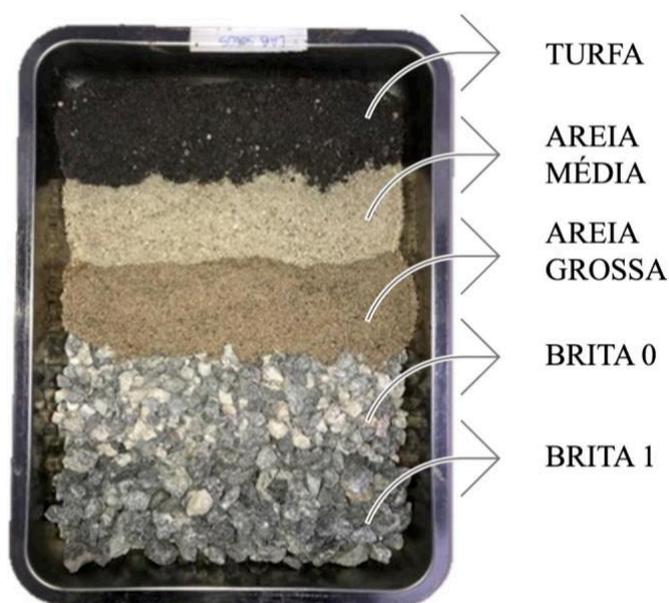
### 3 METODOLOGIA

#### 3.1 MATERIAIS UTILIZADOS

Os materiais foram adquiridos em comércio especializado em materiais para construção e jardinagem. Ainda que não voltados especificamente para fins desportivos, conforme conversas com pessoas do ramo, as distribuidoras regionais que fornecem para revenda local tendem a ser as mesmas que fornecem diretamente para construtoras e incorporadoras, inclusive aquelas responsáveis pelo projeto e execução de praças esportivas. No caso específico da turfa, por exemplo, a compra seguiu a especificação de marca e modelo sugerida por Oliveira (2016).

Para os materiais granulares, por se tratarem de graduações comerciais e normatizadas, esperou-se encontrar faixas granulométricas dentro daquelas estipuladas em norma, e, assim, conseguir simular de forma realista a situação em campo. A Figura 4 mostra todos os materiais em ordem crescente de diâmetro característico, que também representa a ordem em que os materiais são aplicados abaixo no nível do gramado.

Figura 4: Todos os materiais que serão estudados.



Fonte: Elaborado pelo autor.

### 3.1.1 Turfa green Natural

Após compra do material, encaminhou-se a amostra para o Laboratório de Mecânica dos Solos (LMS) do Centro Tecnológico de Joinville (CTJ) da Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC). Primeiramente, separou-se uma amostra de aproximadamente 300g para análise de granulometria. A amostra passou pelo ensaio de peneiramento e sedimentação (NBR 7181/2016), densidade e teor de umidade (NBR 6457/2016). A Figura 5 apresenta uma foto da embalagem e do material contido de turfa *green*.

Figura 5: Turfa tipo *green*.



Fonte: Elaborado pelo autor.

### 3.1.2 Areia média

A areia média foi escolhida para o material de camada base recomendado pela USGA (OLIVEIRA, 2016). O material foi utilizado como camada de solo-base. A areia média comercial possui uma faixa granulométrica predominante de 0,2mm a 0,6mm, com baixa presença ou ausência completa de silte e argila. O material foi adquirido em uma loja de materiais de construção e jardinagem em um saco plástico de 15kg. Uma amostra de aproximadamente 500g fora encaminhada para análise de caracterização. Foram realizados os ensaios de peneiramento grosso, peneiramento fino e sedimentação (NBR 7181/2016), além de densidade e teor de umidade (NBR 6457/2016). A Figura 6 apresenta uma fotografia da areia média.

Figura 6: Areia média.



Fonte: Elaborado pelo autor.

### 3.1.3 Areia grossa

Assim como a areia fina, a areia grossa foi comprada em um comércio de materiais para construção e jardinagem, em sacos de 15kg. O material, então, foi encaminhado para o LMS, onde fora secado e peneirado (NBR 7181/2016), e mediu-se sua densidade e umidade (NBR 6457/2016). A Figura 7 apresenta uma imagem da areia grossa.

Figura 7: Areia grossa.



Fonte: Elaborado pelo autor.

### 3.1.4 Brita 0

A brita 0 será utilizada como material drenante. O material foi adquirido em um comércio de materiais para construção e jardinagem, em um saco plástico contendo 25kg, passou por peneiramento grosso (NBR 7181/2016) e mediu-se sua densidade (NBR 6457/2016) e classificação volumétrica. A Figura 8 apresenta uma imagem da brita 0.

Figura 8: Brita 0



Fonte: Elaborado pelo autor.

### 3.1.5 Brita 1

Similarmente a brita 0, a brita 1 foi adquirida em um saco plástico de 25kg em uma loja de materiais para construção e jardinagem. O material passou por peneiramento grosso (NBR 7181/2016) e recebeu análise volumétrica, além da medida de sua densidade e avaliação volumétrica (NBR 6457/2016). A Figura 9 mostra uma amostra da brita 1.

Figura 9: Brita 1.



Fonte: Elaborado pelo autor.

### 3.2 ESTRUTURAS TESTADAS

Estruturas publicadas de camadas de base foram testadas para suas propriedades drenantes. São duas configurações para a camada de ou solo-base e duas configurações para a camada drenante, conforme Tabela 7.

Tabela 7: Todas as estruturas de camadas que serão montadas

<b>Estrutura</b>	<b>Solo-base</b>	<b>Camada drenante</b>
A	20cm areia média	10cm brita 1
B	20cm areia média	10cm areia grossa 5cm brita 0
C	4cm turfa 16cm areia média	10cm brita 1
D	4cm turfa 16cm areia média	10cm areia grossa 5cm brita 0

Fonte: Elaborado pelo autor.

#### 3.2.1 Solo-base

O solo-base, posicionado imediatamente abaixo do gramado, foi testado para duas estruturas, conforme propostas pelo Comitê Organizador Brasileiro Copa 2014 (2009) e por Azeredo Neto (2003). A primeira estrutura consistiu em uma camada composta somente por

20cm areia média (COMITÊ ORGANIZADOR BRASILEIRO COPA 2014, 2009). A segunda configuração previu os mesmos 20cm, dos quais 80% são areia média e 20% turfa (AZEREDO NETO, 2003).

### **3.2.2 Camada drenante**

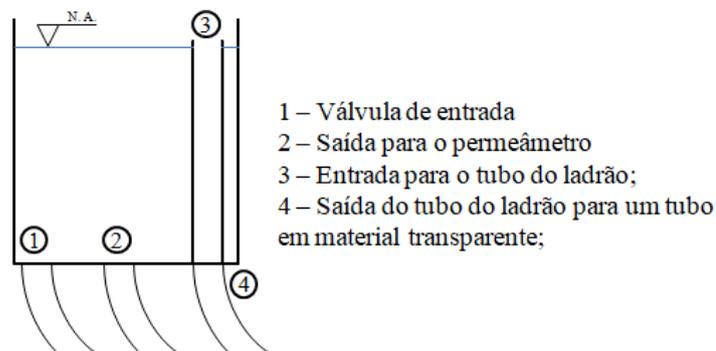
Para a camada drenante, também foram testadas duas configurações. A primeira configuração testada foi a proposta pelo Comitê Organizador Brasileiro Copa 2014 (2009). O Comitê determina a utilização de uma camada de brita lavada de 10cm. No entanto, não foi determinado um diâmetro característico ou um tamanho comercial de brita a ser aplicado. Como a outra estrutura a ser testada já prevê a utilização de brita comercial 0, propôs-se testar a camada proposta pelo Comitê com brita comercial 1. A segunda configuração testada é a proposta por Azeredo Neto (2003), composta por brita 0 com 5cm de espessura e areia grossa com 10cm de espessura.

### **3.3 ENSAIO DE PERMEABILIDADE À CARGA CONSTANTE – NBR 13292/1995 (ABNT, 1995)**

O ensaio de permeabilidade para determinação do fluxo de água e dos coeficientes de permeabilidade, tanto para os materiais isoladamente, quanto para as camadas das estruturas propostas, foi realizado com o permeâmetro de carga constante do LMS.

O ensaio consistiu em aplicar fluxo de água de um reservatório à carga constante em uma amostra de solo isolada por material altamente drenante dentro de um recipiente acrílico hermético. O reservatório de água utiliza um sistema de ladrão para a garantia de carga constante. Há um tubo dentro do reservatório em que uma de suas extremidades fica rente ao topo do reservatório, exposto a atmosfera, e a outra extremidade fica conectada e vedada, na face inferior do reservatório, a um tubo de material transparente que retira água do reservatório. Durante a aplicação dos fluxos, garantiu-se que sempre houvesse fluxo de água e ar – em aproximadamente mesma proporção – na saída do ladrão. A Figura 10 mostra o princípio de funcionamento do reservatório.

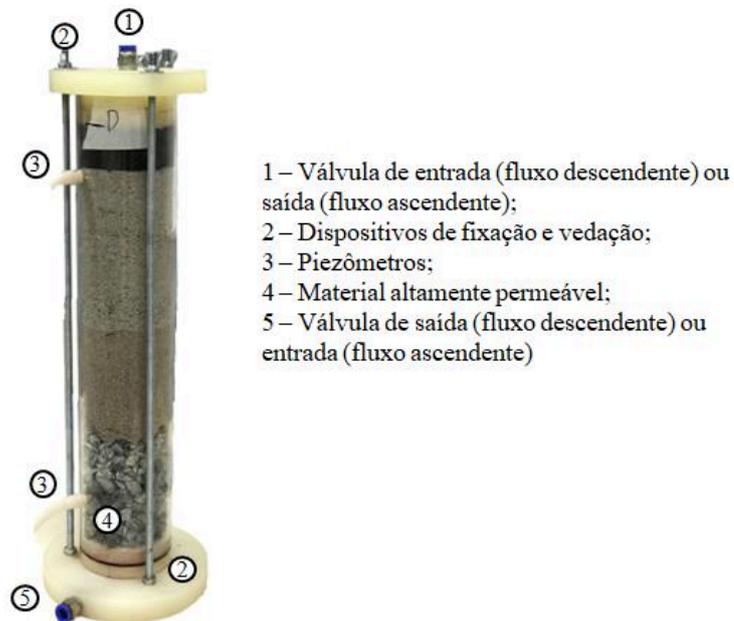
Figura 10: Funcionamento do reservatório alimentador do permeâmetro.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Após estabilização das pressões e saturação da camada, abriu-se a válvula de saída do sistema e tomaram-se leituras de altura de coluna da água próximo às válvulas de entrada e de saída do dispositivo. Então, com o auxílio de um cronômetro, um béquer graduado e uma balança digital tomaram-se leituras da vazão da saída do sistema. A Figura 11 apresenta o permeâmetro do LMS.

Figura 11: Detalhamento do permeâmetro de carga constante do LMS.

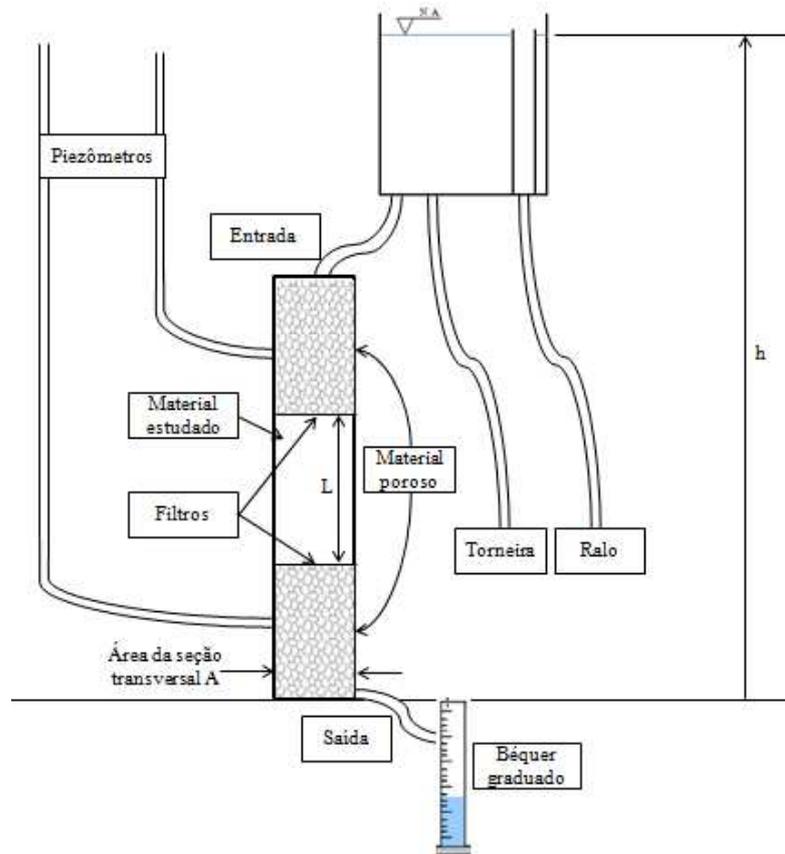


Fonte: Elaborado pelo autor.

Para os casos em que as alturas das camadas das estruturas propostas não alcançaram a altura total do permeâmetro, a altura faltante foi completada com um material de alto coeficiente de permeabilidade (nesse caso, brita 1). Quando foram tomadas as leituras dos materiais isolados, o material ficou no ao centro do permeâmetro, protegido com filtros

geotêxteis e acompanhados por camadas da brita 1 acima e abaixo dos filtros, conforme esquematizado na Figura 12.

Figura 12: Esquema geral do permeâmetro à carga constante.



Fonte: Elaborado pelo autor.

O permeâmetro tem um comprimento interno de 44cm com 9cm de diâmetro ( $63,62\text{cm}^2$  de área da seção transversal e  $572,55\text{cm}^3$  de volume interno). As amostras dos materiais isolados foram montadas com 15cm de espessura, enquanto as estruturas com camadas mistas tiveram suas espessuras montadas com base na literatura e então completadas com brita 1 até que a altura total do permeâmetro fosse preenchida.

As medidas de fluxo foram realizadas com água da rede municipal, cuja temperatura medida foi de  $24^\circ\text{C}$  (densidade  $0,998\text{g/cm}^3$  e peso específico  $9,81\text{kN/m}^3$ ). A carga hidráulica utilizada foi de 90cm para materiais isolados e variou entre 138cm e 147cm para as estruturas compostas, para que as alturas de coluna d'água nos piezômetros gerassem leituras claras na graduação disponível.

O permeâmetro tinha os piezômetros posicionados a 4cm das bordas superior e inferior internas do aparelho. Para os ensaios de materiais isolados, a posição do material no

centro do permeâmetro – cercado por brita 1 e um filtro nas duas extremidades – permitiu que a leitura de  $\Delta h$  fosse a medida da energia dissipada pelo material. No entanto, nos casos dos ensaios com as composições de materiais, os 4cm acima do permeâmetro superior já continham material em análise, impedindo que a leitura da diferença de carga nos piezômetros seja diretamente a perda de carga da estrutura. Por tal motivo, os coeficientes de permeabilidade hidráulica dos materiais isolados foram calculados em função da perda de carga lida nos piezômetros (Equação 7), enquanto os coeficientes para as estruturas compostas foram calculados em função das massas de água coletadas e da altura da camada proposta (Equação 8).

As amostras de materiais isolados foram expostas a fluxos ascendentes para garantia de saturação e tentar mitigar eventuais efeitos de caminhos preferenciais entre a parede do tubo e o solo, que pode resultar em variações no cálculo do coeficiente de permeabilidade (COACALLA, 2012). As amostras compostas, por sua vez, foram submetidas a fluxos descendentes não saturados para simular de forma mais realista a situação de campo (ocorrência de chuva).

Todas as amostras foram montadas sem energia de compactação e foi aplicado apenas um nivelamento na superfície final de cada material na cota de assentamento indicada por uma medida feita por um marcador permanente.

As amostras dos materiais individuais foram posicionadas no meio do permeâmetro, em camadas de 15cm, com o preenchimento de um conjunto brita 1 (material de maior permeabilidade disponível) e filtro acima e abaixo do material.

Após estabilização do fluxo e medida das vazões, o material ficou submetido a fluxo constante até que o tempo total de ensaio completasse duas horas. Então, tomou-se medidas visuais de uma última amostra de aproximadamente um litro do fluxo gerado para comparação da turbidez da água. Nos casos das estruturas de solo-base e filtro, todo o material contido abaixo da cota de assentamento da camada superior de brita foi coletado, secado em estufa a 100°C por 24h e peneirado nas peneiras de 19mm, 9,5mm e 4,8mm para medida de massa de finos retida na camada mais granular do sistema.

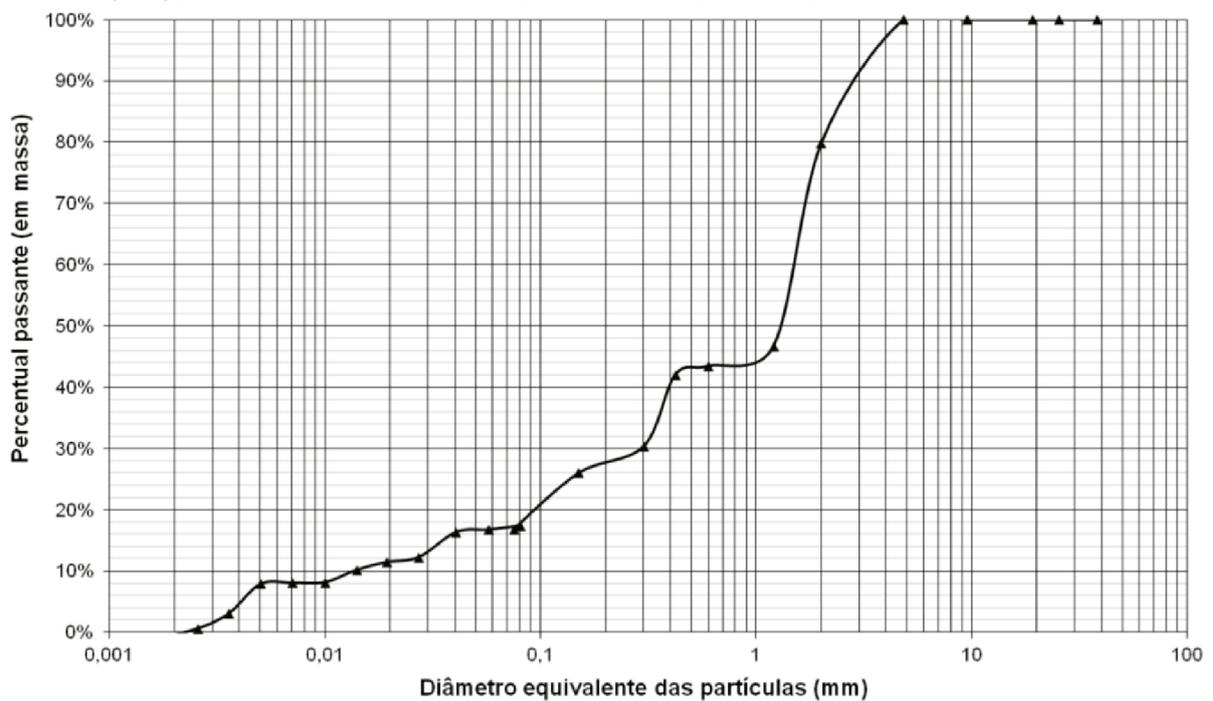
## 4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

### 4.1 CARACTERIZAÇÃO DOS MATERIAIS

#### 4.1.1 Turfa

A Figura 13 mostra a curva granulométrica da turfa.

Figura 13: Distribuição granulométrica da turfa tipo *green*.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Observa-se a presença de partículas com diâmetros materiais finos (silte) e também de materiais granulares (areia fina a grossa). As presenças de tais materiais também foram observadas em uma análise tátil-visual do material, em que se observou uma grande mistura de materiais de diâmetros variados, sobretudo partículas de areia fina a média (de coloração mais clara) em meio a aglomerados de partículas com característica orgânica (de coloração mais escura). Tais aglomerados, quando submetidos à pressão entre os dedos em uma análise tátil, se separam em várias partículas de menor diâmetro. Na prática, devido à ausência de aplicação de grandes esforços ao material em campo, esses aglomerados devem se comportar, no contexto de uma camada integrante de uma camada filtrante, como partículas de areia

média a grossa, que deverão ser interceptadas pelas camadas de areia adjacente, representando baixo risco de carregamento de finos para o sistema de drenagem.

Para os cálculos de coeficiente de uniformidade e curvatura, a análise gráfica da curva retorna que:

- i.  $D_{10} = 0,014\text{mm}$ ;
- ii.  $D_{30} = 0,300\text{mm}$  e
- iii.  $D_{60} = 1,500\text{mm}$

Sendo assim e aplicando as Equações 11 e 12, tem-se que:

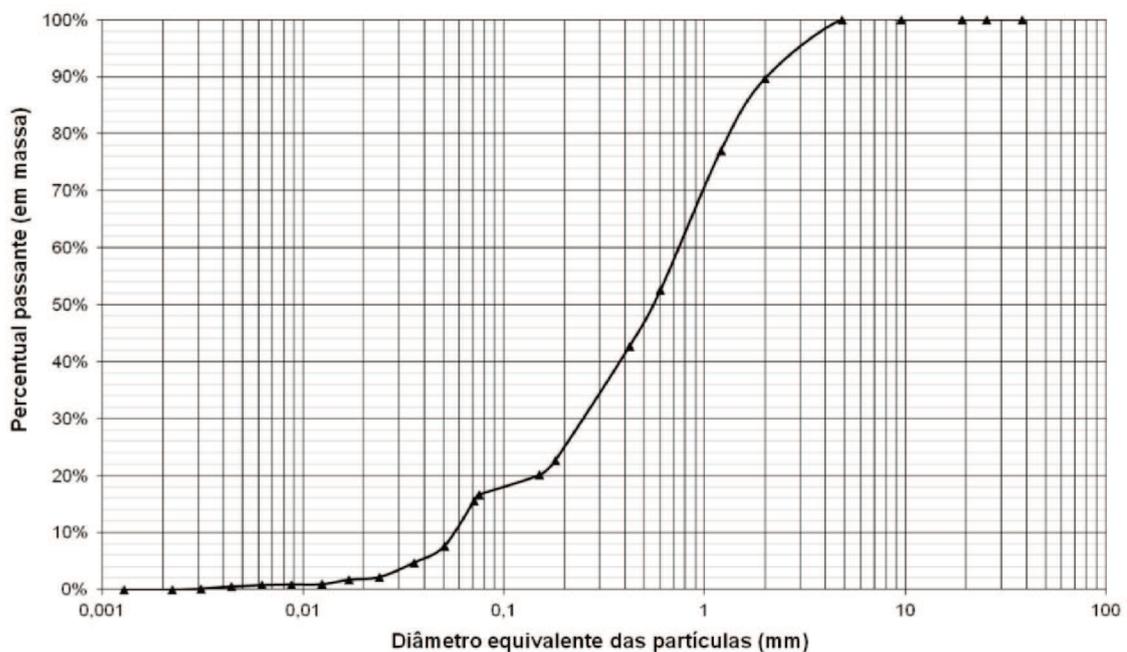
- a.  $C_u = 107,14$  (desuniforme)
- b.  $C_c = 4,29$  (mal graduado)

Também foram realizados testes de teor de umidade e densidade real dos grãos para calcular parâmetros de entrada para a curva de granulometria, nos quais se obteve um teor de umidade de 69,2% da amostra retirada do pacote, uma densidade real dos grãos de 2,222 (adimensional).

#### 4.1.2 Areia média

A Figura 14 mostra a curva granulométrica da areia média.

Figura 14: Curva granulométrica da areia média.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Observa-se a presença de pequenas frações de silte e areia fina, o que pode representar um risco de carregamento de finos por entre as camadas filtrantes e, conseqüentemente, para dentro do sistema de drenagem. No entanto, as frações observadas de tais materiais ficam dentro da estrutura proposta pela USGA, conforme disposto na Tabela 8, com base nas informações listadas na Tabela 5.

Tabela 8: Comparativo entre faixa granulométrica USGA (2011) e areia média.

<b>Caracterização</b>	<b>Granulometria (mm)</b>	<b>Recomendação (%)</b>	<b>Composição (%)</b>
Areia muito grossa	1,0 – 2,0	$\leq 10$	10,3%
Areia grossa	0,5 – 1,0	$\geq 60$	85,0%
Areia média	0,25 – 0,5		
Areia fina	0,15 – 0,25	$\leq 20$	3,0%
Areia muito fina*	0,05 – 0,15	$\leq 5$	1,0%
Silte*	0,002 – 0,05	$\leq 5$	0,8%
Argila*	<0,002	$\leq 5$	>0,1%

Fonte: Adaptado de USGA (2011) *apud* Oliveira (2016).

A análise do gráfico para a classificação quanto à uniformidade do material retorna os parâmetros:

- i.  $D_{10} = 0,057\text{mm}$ ;
- ii.  $D_{30} = 0,25\text{mm}$  e
- iii.  $D_{60} = 0,75\text{mm}$

Sendo assim e aplicando as Equações 11 e 12, tem-se que:

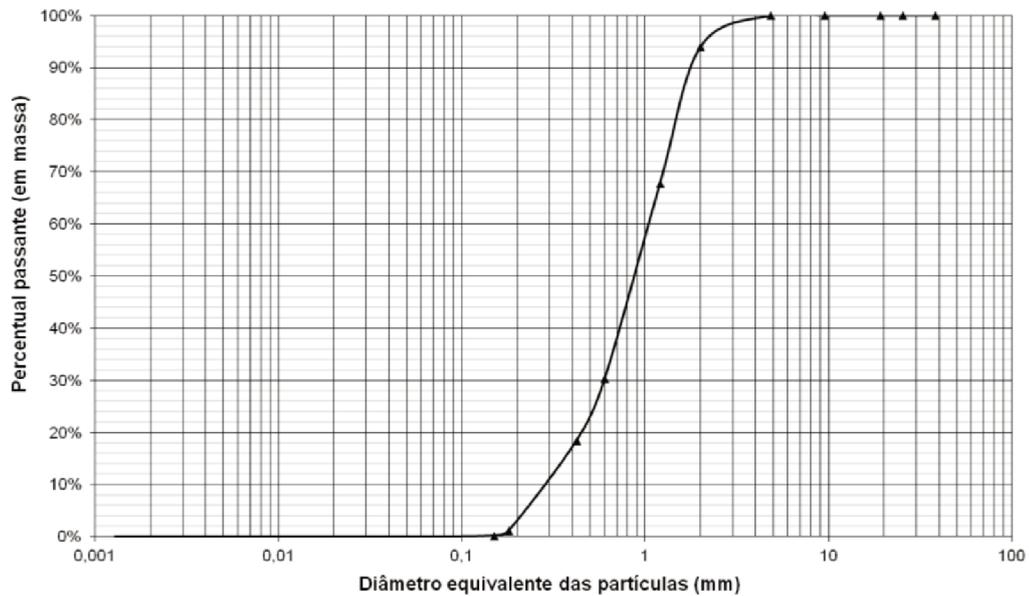
- a.  $C_u = 13,16$  (medianamente uniforme)
- b.  $C_c = 1,46$  (bem graduado)

Também foram realizados testes de teor de umidade e densidade real dos grãos para calcular parâmetros de entrada para a curva de granulometria, nos quais se obteve um teor de umidade de 5,9% da amostra retirada do pacote e uma densidade real dos grãos de  $2,669^3$ .

#### 4.1.3 Areia grossa

A Figura 15 apresenta a curva granulométrica da areia grossa.

Figura 15: Curva granulométrica da areia grossa..



Fonte: Elaborado pelo autor.

Do gráfico, extraiu-se que:

- i.  $D_{10} = 0,29\text{mm}$ ;
- ii.  $D_{30} = 0,60\text{mm}$  e
- iii.  $D_{60} = 1,07\text{mm}$ .

E, assim:

- a.  $C_u = 3,69$  (muito uniforme) e
- b.  $C_c = 1,16$  (bem graduado)

A Tabela 9 compara as faixas granulométricas com as sugeridas pela USGA (2011).

Tabela 9: Comparativo entre faixa granulométrica USGA (2011) e areia grossa.

Caracterização	Granulometria (mm)	Recomendação (%)	Composição (%)
Areia muito grossa	1,0 – 2,0	$\leq 10$	6,0%
Areia grossa	0,5 – 1,0	$\geq 60$	94,0%
Areia média	0,25 – 0,5	$\leq 20$	>0,1%
Areia fina	0,05 – 0,25	$\leq 5$	>0,1%
Areia muito fina*	0,002 – 0,05	$\leq 5$	>0,1%
Silte*	<0,002	$\leq 5$	>0,1%
Argila*	<0,002	$\leq 5$	>0,1%

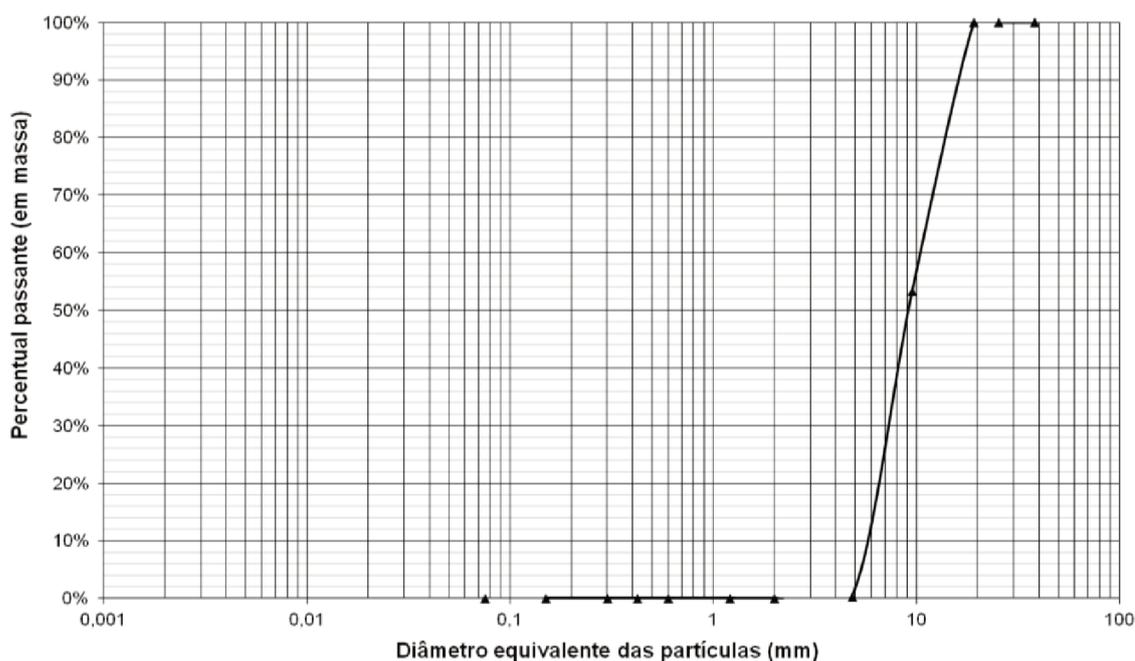
Fonte: Adaptado de USGA (2011) *apud* Oliveira (2016).

Para a areia grossa, assume-se um índice de vazios de 34,2% (LENZ, 2016, p. 87) e mediu-se uma densidade real dos grãos de 2,669 (adimensional).

#### 4.1.4 Brita 0

A Figura 16 mostra a curva granulométrica obtida para a brita 0.

Figura 16: Curva granulométrica da brita 0.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Da análise da curva, tem-se:

- i.  $D_{10} = 5,81\text{mm}$ ;
- ii.  $D_{30} = 7,53\text{mm}$  e
- iii.  $D_{60} = 10,07\text{mm}$ .

E, assim:

- a.  $C_u = 1,73$  (muito uniforme) e
- b.  $C_c = 1,00$  (bem graduado)

Uma análise visual e geométrica da amostra permitiu concluir que a ausência ou baixíssima ocorrência de grãos lamelares, aproximadamente 18,2% de grãos fibrilares e 81,8% de grãos volumosos. Dentre as partículas volumosas, é possível afirmar que suas formas são predominantemente subangulares a subarredondadas. A Figura 17 mostra a separação de uma amostra aleatória entre grãos fibrilares (à esquerda) e volumosos (à direita).

Figura 17: Grãos fibrilares e volumosos da brita 0.



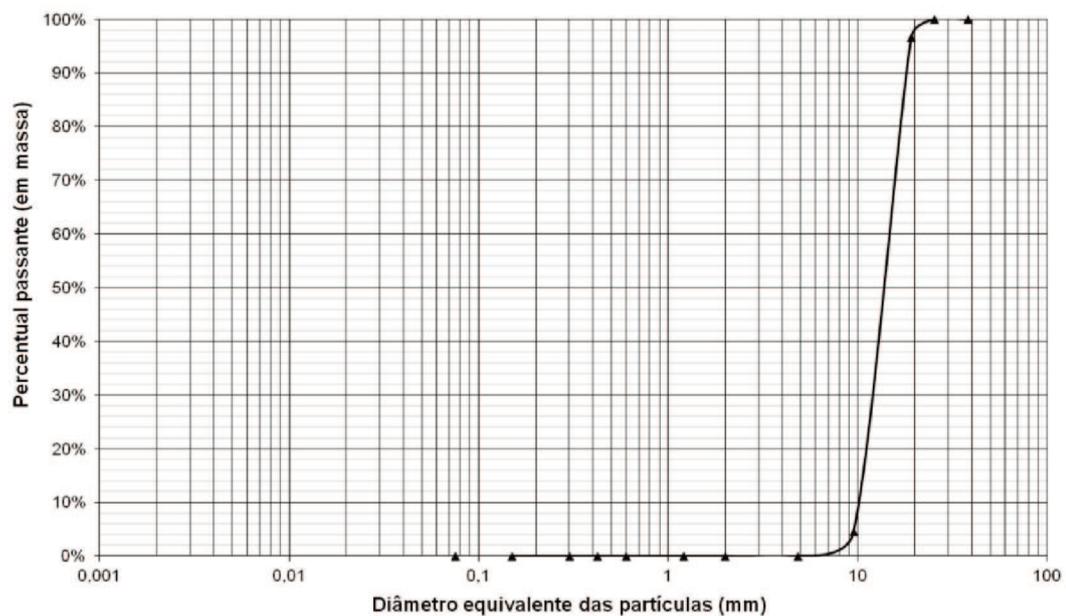
Fonte: Elaborado pelo autor.

Para o material, assume-se um índice de vazios de 38,8% (LENZ, 2016) e uma densidade real dos grãos de 2,6 (adimensional) (PINTO, 2006).

#### 4.1.5 Brita 1

Assim como a brita 0, a brita 1 passou por ensaio de peneiramento grosso no LMS. A Figura 18 apresenta a curva granulométrica obtida para a brita 1.

Figura 18: Curva granulométrica da brita 1.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Extraindo do gráfico:

- i.  $D_{10} = 10,0\text{mm}$ ;
- ii.  $D_{30} = 10,3\text{mm}$  e
- iii.  $D_{60} = 10,56\text{mm}$ .

Aplicando as Equações 11 e 12:

- a.  $C_u = 1,06$  (muito uniforme) e
- b.  $C_c = 1,00$  (bem graduado).

A análise visual e geométrica da amostra apontou para a presença de partículas lamelares (36,4% da amostra) e volumosas (63,6%). Além disso, assim como no caso da brita 0, as partículas apresentam arestas que indicam formatos subangulares a subarredondados. A Figura 19 apresenta os grãos com formato lamelar (à esquerda) e volumoso (à direita).

Figura 19: Grãos lamelares e volumosos da brita 1.



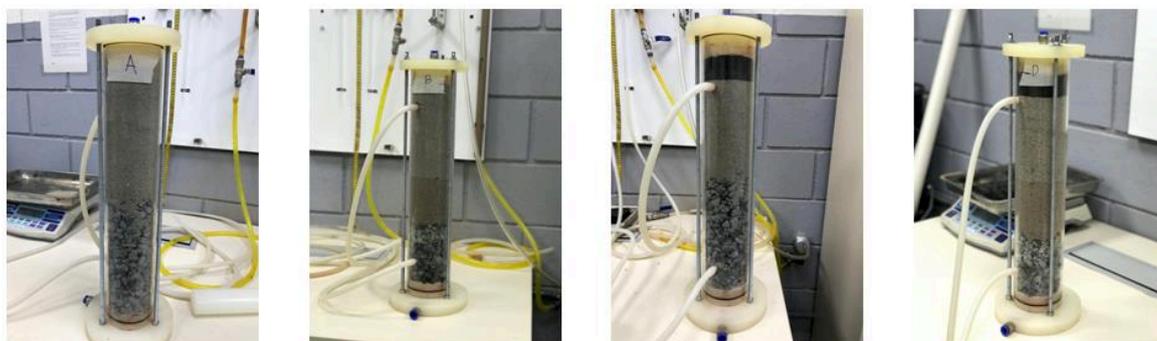
Fonte: Elaborado pelo autor.

Para o material, assume-se um índice de vazios de 43,0% (LENZ, 2016) e uma densidade real dos grãos de 2,6 (adimensional) (PINTO, 2006).

#### 4.2 CARACTERIZAÇÃO DAS ESTRUTURAS

Para a determinação dos coeficientes de condutividade hidráulica, as estruturas foram montadas no permeâmetro de paredes fixas à carga constante. A utilização de material acrílico permitiu o registro fotográfico dos ensaios comparando as estruturas montadas, disposto na Figura 20.

Figura 20: Registro de todas as estruturas testadas.

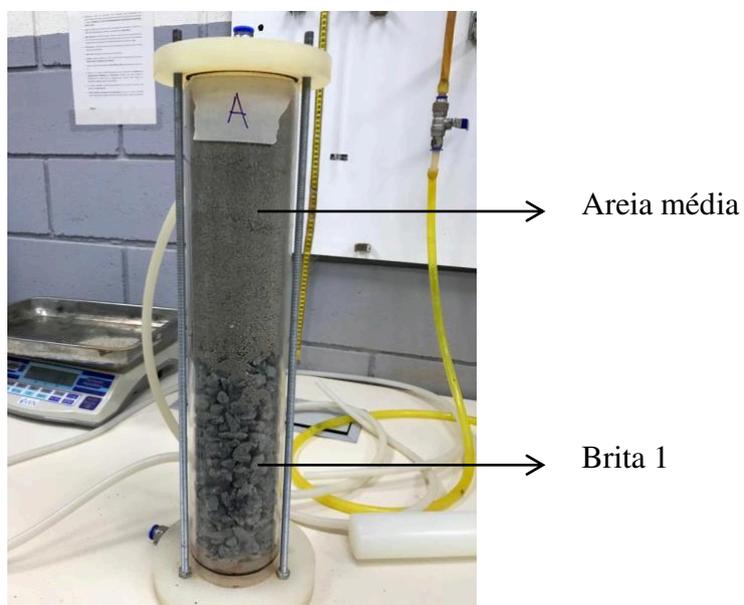


Fonte: Elaborado pelo autor.

#### 4.2.1 Estrutura A

A estrutura A tem as camadas de solo-base e de colchão drenante propostas pelo Comitê Organizador Brasileiro Copa 2014 (2009), e é a mais simples dentre as levantadas. O solo-base é composto por 20cm de areia média e o filtro é composto unicamente por 10cm brita 1. Para preenchimento do permeâmetro, 14cm de brita 0 foram posicionados abaixo da camada de 20cm de brita 0. A Figura 21 detalha o posicionamento dos materiais para o ensaio.

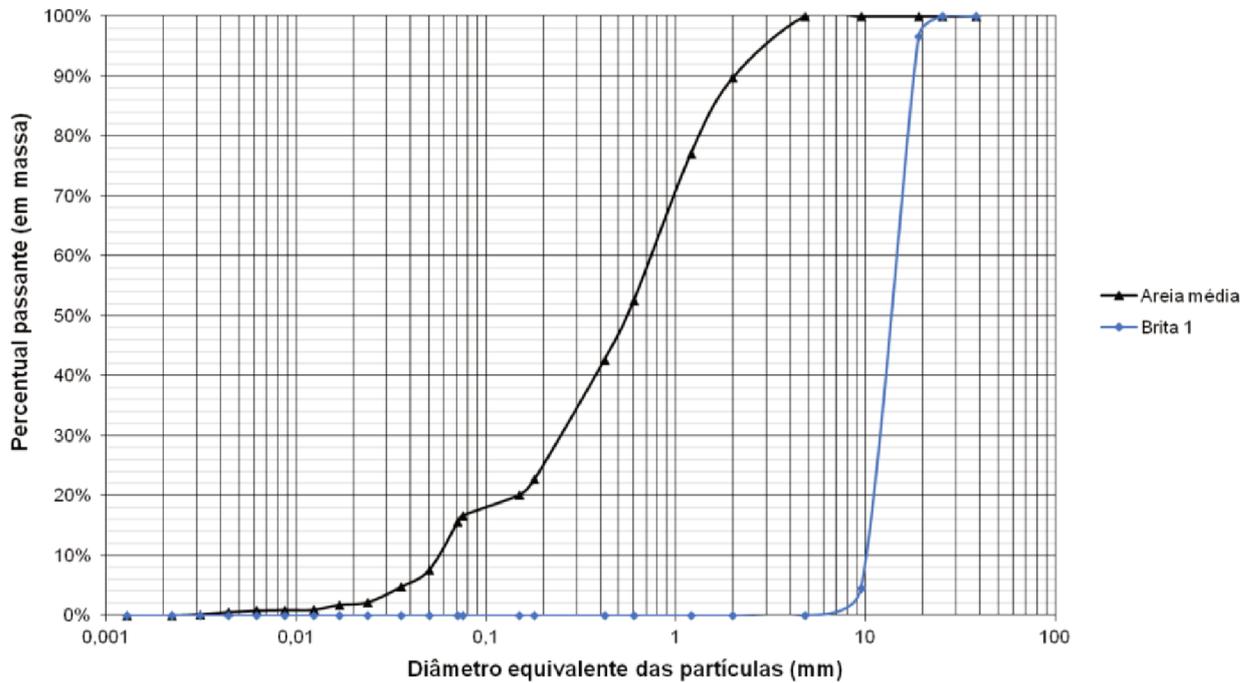
Figura 21: Estrutura A montada em permeâmetro de parede rígida.



Fonte: Elaborado pelo autor.

A Figura 22 mostra as curvas granulométricas do material de solo-base e do filtro sobrepostas.

Figura 22: Curvas sobrepostas do solo-base (areia média) e filtro (brita 1) da estrutura A.



Fonte: Elaborado pelo autor.

A Tabela 10 lista todos os critérios de filtros levantados na revisão bibliográfica e a conformidade – ou a não conformidade – da estrutura em cada critério.

Tabela 10: Análise de critérios de filtros para a estrutura A.

Estrutura	Metodologia	Critérios					
		I	II	III	IV	V	VI
A	Terzaghi	Não atende	Atende	-	-	-	-
	Sherard et al	Não atende	Atende	Não atende	Atende	Atende	-
	USBR	Não atende	Não atende	Atende	Não atende	Atende	Atende

Fonte: Elaborado pelo autor.

Para as verificações de comparação de diâmetros entre as camadas, foram considerados:

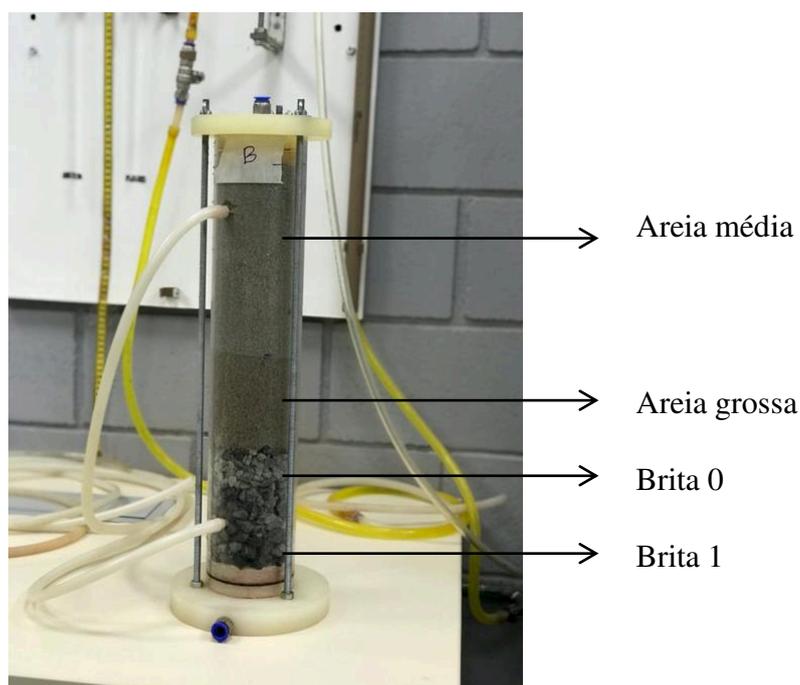
- i.  $D_{15F} = 10,10\text{mm}$
- ii.  $D_{15B} = 0,07\text{mm}$
- iii.  $D_{85B} = 1,85\text{mm}$

Dos 13 critérios de filtro listados nas três metodologias consultadas, a configuração A respeitou apenas sete. É possível atrelar o mau desempenho da estrutura quando comparada aos critérios a sua pobre distribuição granulométrica, sendo restrita a apenas dois materiais granulares com diâmetros pouco variados.

#### 4.2.2 Estrutura B

A estrutura B é formada por uma camada de solo-se é composta por 20cm de areia média (COMITÊ ORGANIZADOR BRASILEIRO COPA 2014, 2009) e uma camada de filtro de 10cm de areia grossa e 5cm de brita 0 (AZEREDO NETO, 2003). Para a o preenchimento do permeâmetro, 9cm adicionais de brita 1 (material mais permeável disponível) foram adicionados abaixo da camada de brita 0. A Figura 23 expõe o registro do ensaio.

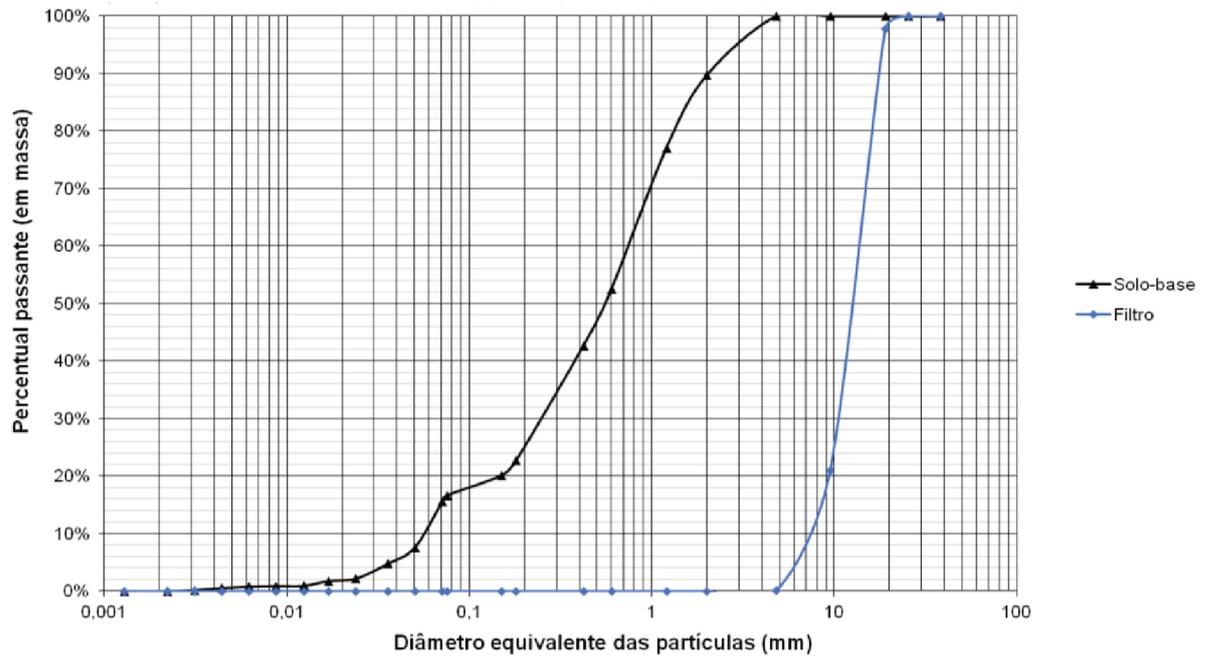
Figura 23: Estrutura B montada em permeâmetro de parede rígida.



Fonte: Elaborado pelo autor.

A Figura 24 mostra as curvas granulométricas do solo-base e do filtro da configuração B.

Figura 24: Curvas sobrepostas do solo-base e filtro da estrutura B.



Fonte: Elaborado pelo autor.

A Tabela 11 lista todos os critérios de filtros levantados na revisão bibliográfica e a conformidade – ou a não conformidade – da configuração B em cada critério.

Tabela 11: Análise de critérios de filtros para a estrutura B.

Estrutura	Metodologia	Critérios					
		I	II	III	IV	V	VI
B	Terzaghi	Não atende	Atende	-	-	-	-
	Sherard et al	Atende	Atende	Não atende	Atende	Atende	-
	USBR	Não atende	Atende	Atende	Não atende	Atende	Atende

Fonte: Elaborado pelo autor.

Para as verificações de comparação de diâmetros entre as camadas, foram considerados:

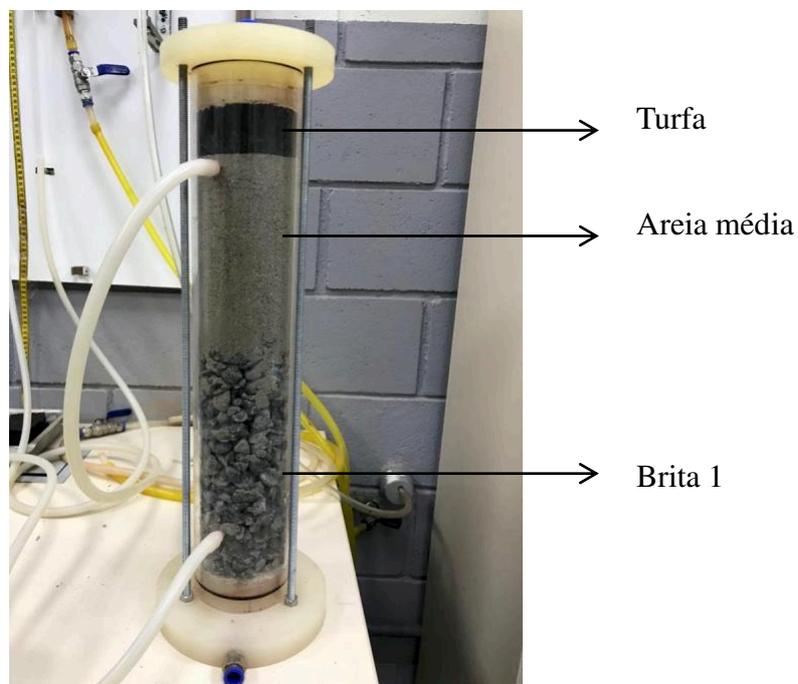
- i.  $D_{15F} = 8,50\text{mm}$
- ii.  $D_{15B} = 0,07\text{mm}$
- iii.  $D_{85B} = 1,85\text{mm}$

É possível observar que a combinação B atende a nove dos 13 critérios levantados.

### 4.2.3 Estrutura C

A Estrutura C é composta por uma camada de solo-base de 4cm de turfa e 16cm de areia média (AZEREDO NETO, 2003) e uma camada de filtro de 10cm brita 1 (COMITÊ ORGANIZADOR BRASILEIRO COPA 2014, 2009). Os 14cm faltantes para completar os 44cm do permeâmetro foram preenchidos com brita 1 abaixo da própria brita 1 proposta pelo Comitê. A Figura 25 apresenta uma fotografia da camada montada para C.

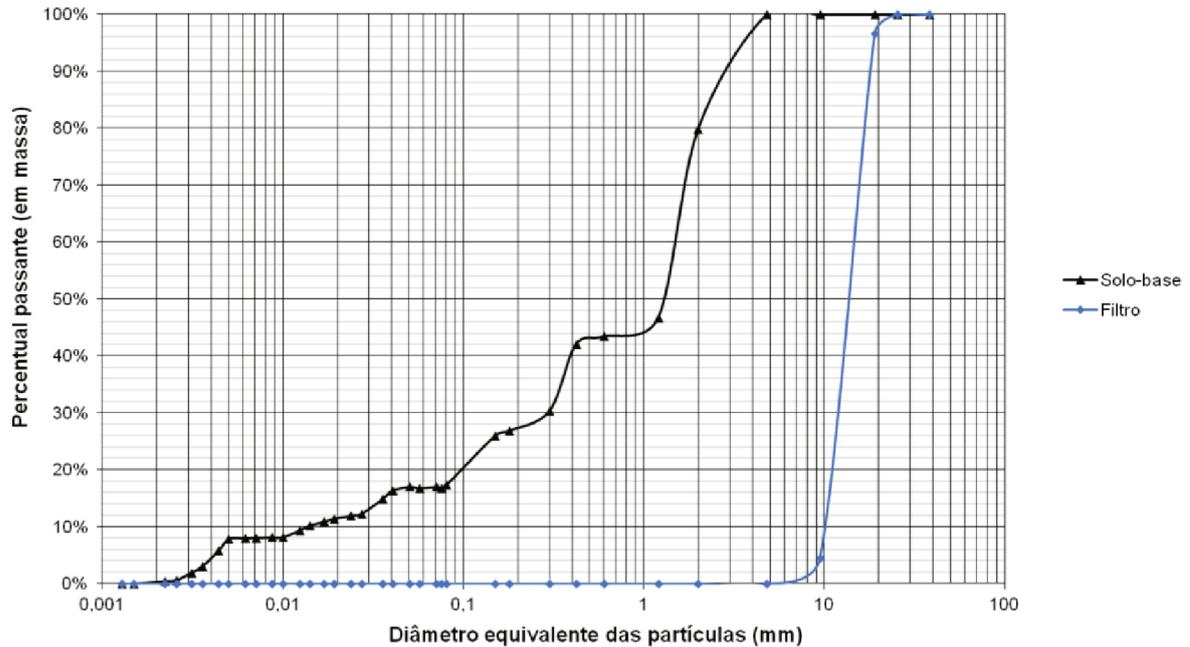
Figura 25: Estrutura C montada em permeâmetro de parede rígida.



Fonte: Elaborado pelo autor.

A Figura 26 mostra as curvas do solo-base e do filtro de C.

Figura 26: Curvas sobrepostas do solo-base e filtro da estrutura C.



Fonte: Elaborado pelo autor.

A Tabela 12 lista todos os critérios de filtros levantados na revisão bibliográfica e a conformidade – ou a não conformidade – da estrutura em cada critério.

Tabela 12: Análise de critérios de filtros para a estrutura C.

Estrutura	Metodologia	Critérios					
		I	II	III	IV	V	VI
C	Terzaghi	Não atende	Atende	-	-	-	-
	Sherard et al	Atende	Atende	Não atende	Atende	Atende	-
	USBR	Não atende	Atende	Atende	Não atende*	Atende	Atende

Fonte: Elaborado pelo autor.

Para o critério IV proposto pelo USBR (USBR 1997 *apud* Fell et al 2015), que trata do paralelismo aproximado entre as curvas, é possível observar que esta configuração apresenta curvas de solo-base e filtro paralelas a partir das frações acima de 1mm de diâmetro. No entanto, o critério foi considerado não conforme para porque as curvas apresentam formatos bastante distintos nas frações abaixo de 1mm. Assim sendo, a configuração atendeu a nove dos 13 critérios levantados.

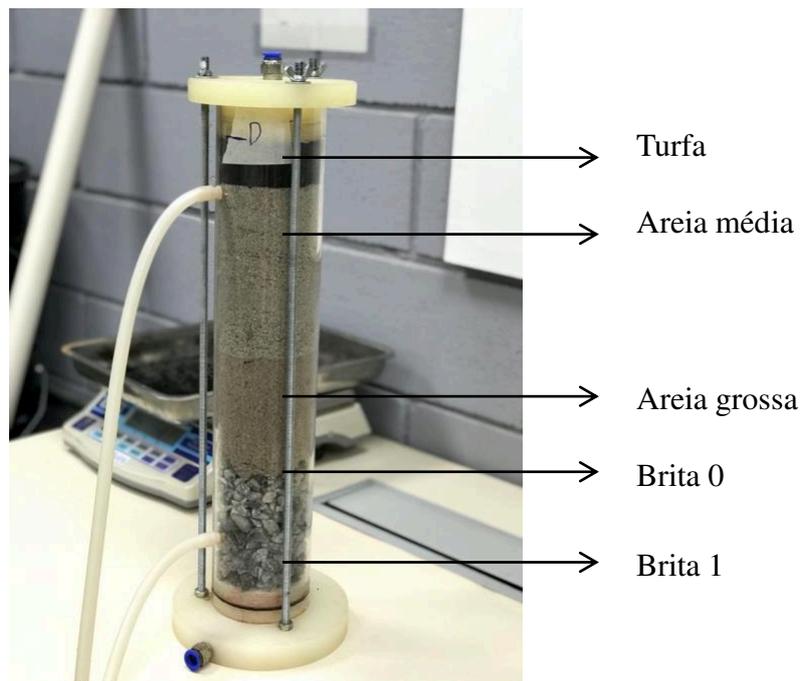
Para as verificações de comparação de diâmetros entre as camadas, foram considerados:

- i.  $D_{15F} = 11,00\text{mm}$
- ii.  $D_{15B} = 0,05\text{mm}$
- iii.  $D_{85B} = 2,50\text{mm}$

#### 4.2.4 Estrutura D

A estrutura D é composta por 4cm de turfa e 16cm areia média na camada de solo-base (AZEREDO NETO, 2003) e um filtro composto por 10cm de areia grossa e 5cm de brita 0 (AZEREDO NETO, 2003). Os 9cm restantes para completar o comprimento interno do permeâmetro foram preenchidos com o material mais drenante disponível, a brita 1. A Figura 27 mostra um registro do ensaio.

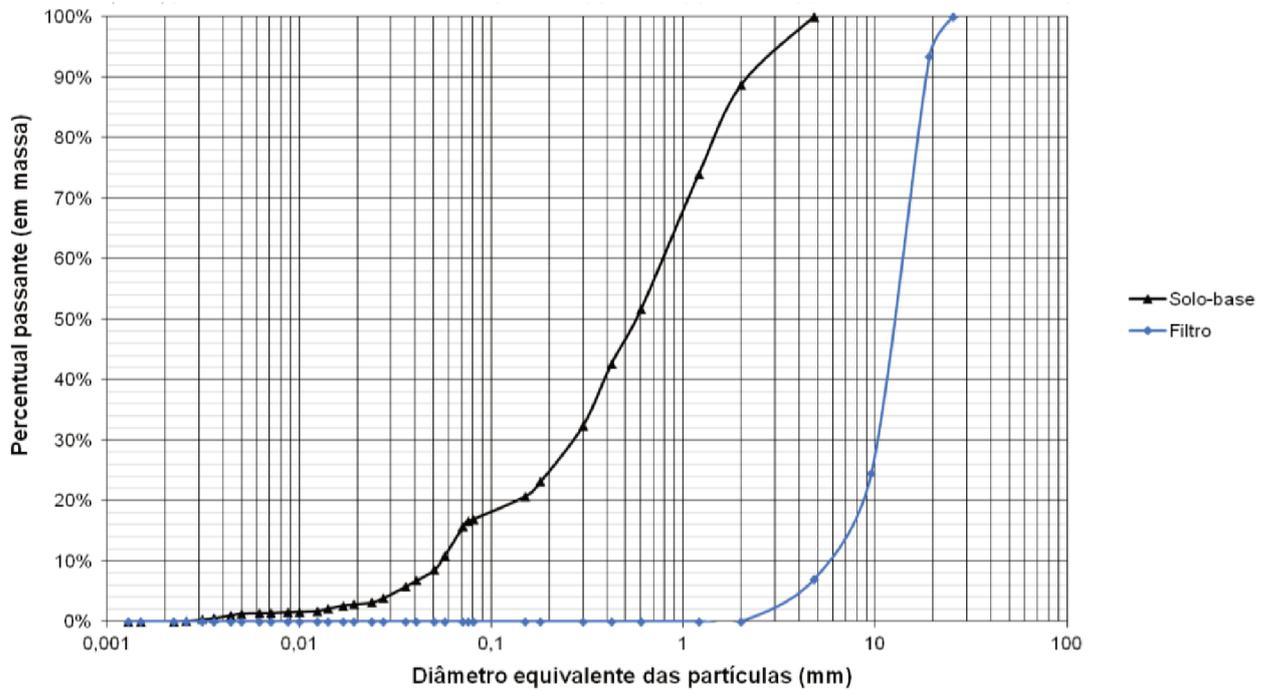
Figura 27: Estrutura D montada em permeâmetro de parede rígida.



Fonte: Elaborado pelo autor.

A Figura 28 apresenta as curvas do solo-base e do filtro para D.

Figura 28 Curvas sobrepostas do solo-base e filtro da estrutura D.



Fonte: Elaborado pelo autor.

A Tabela 13 apresenta o resultado da camada em função dos critérios de filtro.

Tabela 13: Análise de critérios de filtros para a estrutura D.

Estrutura	Metodologia	Critérios					
		I	II	III	IV	V	VI
D	Terzaghi	Atende	Atende	-	-	-	-
	Sherard et al	Atende	Atende	Atende	Atende	Atende	-
	USBR	Não atende	Atende	Atende	Atende	Atende	Atende

Fonte: Elaborado pelo autor.

Para as verificações de comparação de diâmetros entre as camadas, foram considerados:

- i.  $D_{15F} = 7,50\text{mm}$
- ii.  $D_{15B} = 0,08\text{mm}$
- iii.  $D_{85B} = 1,90\text{mm}$

A camada apresentou o melhor aproveitamento quando comparada aos critérios de filtro, atendendo doze dos treze critérios levantados.

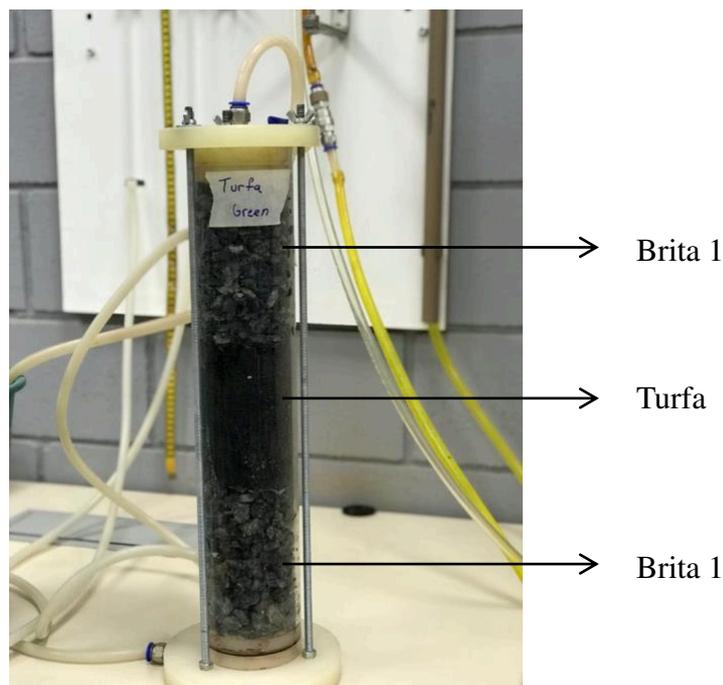
### 4.3 ENSAIOS DE CONDUTIVIDADE HIDRÁULICA

A seguir, serão expostos os resultados obtidos nos ensaios de condutividade hidráulica à carga constante, tanto para os materiais isoladamente, quanto para as camadas montadas com base nas estruturas propostas. Os resultados mais relevantes para a análise são os valores de vazão que, após a aplicação da Equação 3, deram origem aos valores de coeficientes de condutividade hidráulica, além de taxas de aumento da densidade da camada drenante.

#### 4.3.1 Turfa

A condutividade hidráulica da turfa foi obtida conforme ensaio registrado na Figura 29.

Figura 29: Ensaio de condutividade hidráulica na turfa.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Os resultados de vazão, calculados a partir da massa de água coletada em períodos de 30 segundos durante o ensaio, estão dispostos na Tabela 14.

Tabela 14: Resultados do ensaio de permeabilidade da turfa.

Leitura	Volume (cm <sup>3</sup> )	t (s)	Vazão (cm <sup>3</sup> /s)
1	561,30	30	18,71
2	520,40	30	17,35
3	515,88	30	17,20
4	529,36	30	17,65
5	600,02	30	20,00

Fonte: Elaborado pelo autor.

Tomando-se a média da vazão:

- $q_{\text{turfa}} = 18,18 \text{ cm}^3/\text{s}$ , com  $1,18 \text{ cm}^3/\text{s}$  de desvio padrão.

Das leituras dos piezômetros durante o ensaio, tem-se que:

- $\Delta h = 85 \text{ cm}$  e
- $L = 15 \text{ cm}$

Assim, tem-se um gradiente hidráulico dado por:

- $i_{\text{turfa}} = 5,67$ .

Por fim, aplicando a Equação 7:

$$k = \frac{18,18 \text{ cm}^3/\text{s}}{5,67 * 63,62 \text{ cm}^2}$$

Portanto, o coeficiente  $k$  de condutividade hidráulica do conjunto com turfa é de:

- $k_{\text{turfa}} = 3,52 \times 10^{-2} \text{ cm/s}$

Aplicando o fator de conversão de viscosidade da água para 20°C, conforme Equação 10, tem-se:

- $k_{20 \text{ turfa}} = 3,24 \times 10^{-2} \text{ cm/s}$

Essa turfa apresenta um coeficiente de condutividade hidráulica aproximado ao de areias finas a médias quando comparada aos valores típicos apresentados na revisão bibliográfica, e, pela classificação proposta por Casagrande e Fadum (1940) *apud* Coacalla (2012), apresenta boa condição para drenagem.

A força de percolação aplicada a camada, descrita na Equação 16 é dada por:

$$F_{\text{turfa}} = 9,81 \frac{\text{kN}}{\text{m}^3} * 0,85 \text{ m} * 0,006362 \text{ m}^2$$

Portanto, a força de percolação atuante no ensaio na turfa é:

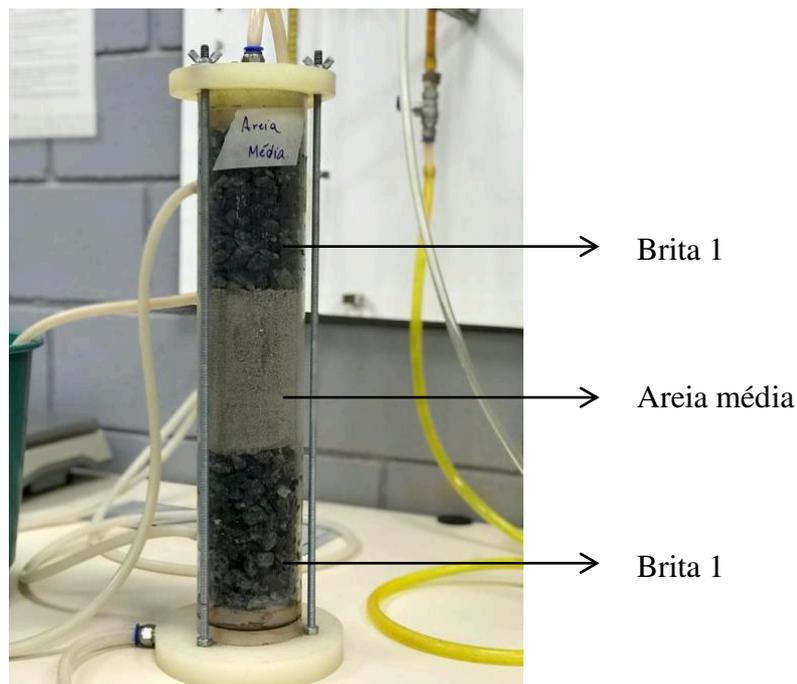
- $F_{\text{turfa}} = 52,22 \text{ kN}$ .

Por se tratar do material de solo-base, a turfa é um material crítico em termos de empoçamento, estando mais próxima a superfície de jogo. Assumindo os valores de infiltração pluviométrica propostos por Hoydal e Heyerdahl (2016), é possível assumir que os índices de infiltração pluviométrica comportados pela turfa estão na ordem de  $8,64 \times 10^0$  mm/dia a  $8,64 \times 10^3$  mm/dia. Comparando com os valores de precipitação para tempo de retorno em cinco anos, dispostos na Tabela 6, infere-se que a turfa comporta os índices característicos de todas as cidades sede.

### 4.3.2 Areia média

A condutividade hidráulica da areia média foi medida usando o arranjo conforme mostrado na Figura 30.

Figura 30: Ensaio de condutividade hidráulica na areia média.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Os resultados de vazão, calculados a partir da massa de água coletada em períodos de 30 segundos durante o ensaio, estão dispostos na Tabela 15.

Tabela 15: Resultados do ensaio de permeabilidade da areia média.

Leitura	Volume (cm <sup>3</sup> )	t (s)	Vazão (cm <sup>3</sup> /s)
1	593,17	30	19,77
2	609,18	30	20,31
3	593,70	30	19,79
4	621,46	30	20,72
5	620,32	30	20,68

Fonte: Elaborado pelo autor.

Tomando-se a média da vazão:

- $q_{\text{areia média}} = 20,25 \text{ cm}^3/\text{s}$ , com  $0,46 \text{ cm}^3/\text{s}$  de desvio padrão.

Das leituras dos piezômetros durante o ensaio, tem-se que:

- $\Delta h = 66 \text{ cm}$  e
- $L = 15 \text{ cm}$

Assim, tem-se um gradiente hidráulico dado por:

- $i_{\text{areia média}} = 4,40$ .

Por fim, aplicando a Equação 7:

$$k = \frac{20,25 \text{ cm}^3/\text{s}}{4,40 * 63,62 \text{ cm}^2}$$

Portanto, o coeficiente de condutividade hidráulica do conjunto com areia média é:

- $k_{\text{areia média}} = 5,11 \times 10^{-2} \text{ cm/s}$

Aplicando o fator de conversão de viscosidade da água para 20°C, conforme Equação 10, tem-se:

- $k_{20 \text{ areia média}} = 4,65 \times 10^{-2} \text{ cm/s}$

Essa areia apresenta boa condição de drenagem, conforme classificação proposta por Casagrande e Fadum (1940) *apud* Coacalla (2012) e respeita os valores característicos encontrados na literatura.

A força de percolação aplicada a camada, descrita na Equação 16 é dada por:

$$F_{\text{areia média}} = 9,81 \frac{\text{kN}}{\text{m}^3} * 0,66 \text{ m} * 0,006362 \text{ m}^2$$

Portanto, a força de percolação atuante no ensaio na areia média é:

- $F_{\text{areia média}} = 40,54 \text{ kN}$ .

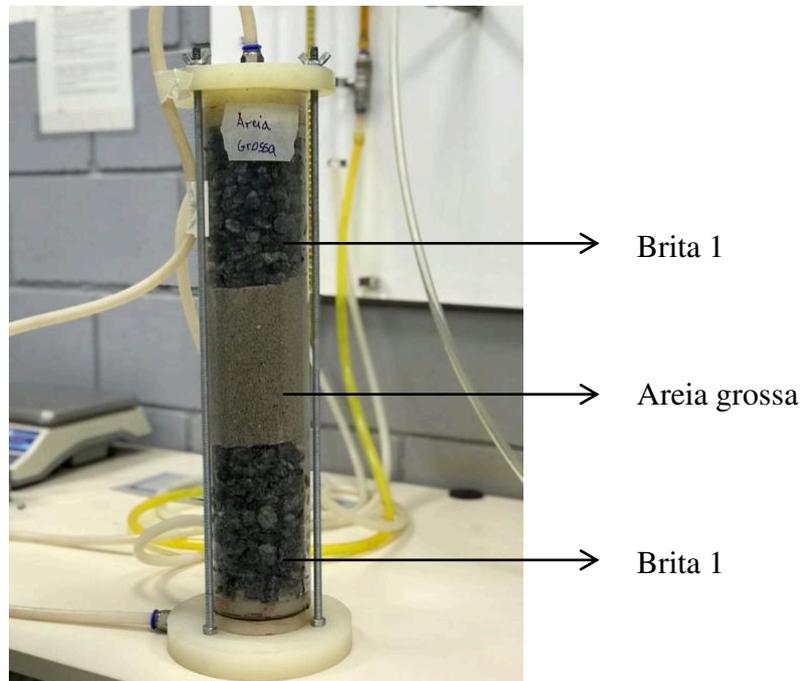
Similarmente à turfa, a areia média é um dos materiais de solo-base e, portanto, apresenta elevada importância em termos de empocamento. Assumindo os valores de

infiltração pluviometria propostos por Hoydal e Heyerdahl (2016), é possível assumir que os índices de infiltração pluviométrica comportados pela areia média estão na ordem de  $8,64 \times 10^0$  mm/dia a  $8,64 \times 10^3$  mm/dia. Comparando com os valores de precipitação para tempo de retorno em cinco anos, dispostos na Tabela 6, infere-se que, assim como a turfa, a areia média comporta os índices característicos de todas as cidades sede.

### 4.3.3 Areia grossa

A condutividade hidráulica da areia grossa foi medida usando o arranjo conforme mostrado na Figura 31.

Figura 31: Ensaio de condutividade hidráulica na areia grossa.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Os resultados de vazão, calculados a partir da massa de água coletada em períodos de 30 segundos durante o ensaio, estão dispostos na Tabela 16.

Tabela 16: Resultados do ensaio de permeabilidade da areia grossa.

Leitura	Volume (cm <sup>3</sup> )	t (s)	Vazão (cm <sup>3</sup> /s)
1	746,15	30	24,87
2	743,55	30	24,79
3	789,81	30	26,33
4	799,78	30	26,66
5	791,20	30	26,37

Fonte: Elaborado pelo autor.

Tomando-se a média da vazão:

- $q_{\text{areia grossa}} = 25,80 \text{ cm}^3/\text{s}$ , com  $0,90 \text{ cm}^3/\text{s}$  de desvio padrão.

Das leituras dos piezômetros durante o ensaio, tem-se que:

- $\Delta h = 27 \text{ cm}$  e
- $L = 15 \text{ cm}$

Assim, tem-se um gradiente hidráulico dado por:

- $i_{\text{areia grossa}} = 0,16$ .

Por fim, aplicando a Equação 7:

$$k = \frac{25,80 \text{ cm}^3/\text{s}}{0,16 * 63,62 \text{ cm}^2}$$

Portanto, a condutividade hidráulica do conjunto com areia grossa é dada por:

- $k_{\text{areia grossa}} = 1,59 \times 10^{-1} \text{ cm/s}$

Aplicando o fator de conversão de viscosidade da água para 20°C, conforme Equação 10, tem-se:

- $k_{20 \text{ areia grossa}} = 1,45 \times 10^{-1} \text{ cm/s}$

A areia grossa apresentou condutividade hidráulica alinhada com o proposto por Das (2007) e está na ordem de grandeza de pedregulhos limpos, segundo Casagrande e Fadum (1940) *apud* Coacalla (2012).

A força de percolação aplicada a camada, descrita na Equação 16 é dada por:

$$F_{\text{areia grossa}} = 9,81 \frac{\text{kN}}{\text{m}^3} * 0,27 \text{ m} * 0,006362 \text{ m}^2$$

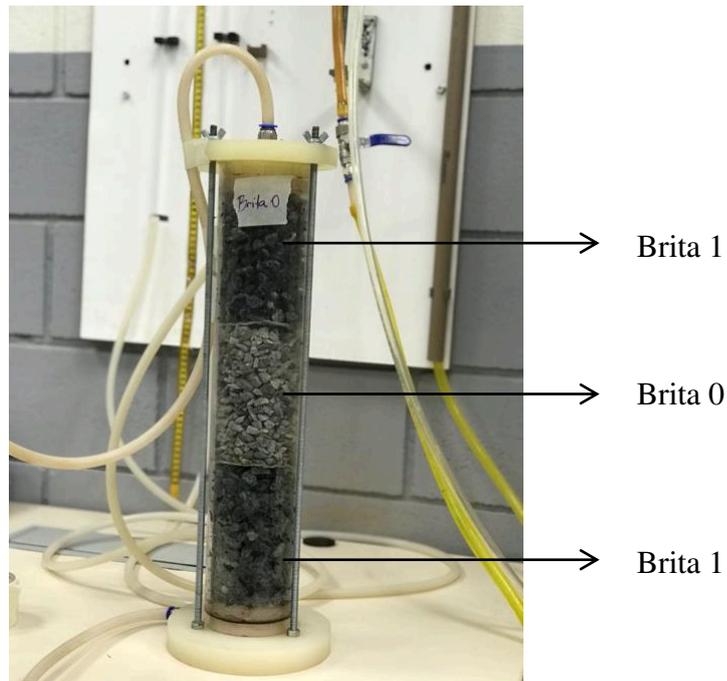
Portanto, a força de percolação atuante no ensaio na areia grossa é:

- $F_{\text{areia grossa}} = 16,57 \text{ kN}$ .

#### 4.3.4 Brita 0

A condutividade hidráulica da brita 0 foi medida usando o arranjo conforme mostrado na Figura 32.

Figura 32: Ensaio de condutividade hidráulica na brita 0.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Os resultados de vazão, calculados a partir da massa de água coletada em períodos de 30 segundos durante o ensaio, estão dispostos na Tabela 17.

Tabela 17: Resultados do ensaio de permeabilidade da brita 0.

Leitura	Volume (cm <sup>3</sup> )	t (s)	Vazão (cm <sup>3</sup> /s)
1	927,18	30	30,91
2	910,03	30	30,33
3	895,31	30	29,84
4	915,00	30	30,50
5	906,69	30	30,22

Fonte: Elaborado pelo autor.

Tomando-se a média da vazão:

- $q_{\text{brita 0}} = 30,36 \text{ cm}^3/\text{s}$ , com  $0,39 \text{ cm}^3/\text{s}$  de desvio padrão.

Das leituras dos piezômetros durante o ensaio, tem-se que:

- $\Delta h = 2\text{cm}$  e
- $L = 15\text{cm}$

Assim, tem-se um gradiente hidráulico dado por:

- $i_{\text{brita 0}} = 0,02$ .

Por fim, aplicando a Equação 7:

$$k = \frac{30,36\text{cm}^3/\text{s}}{0,02 * 63,62\text{cm}^2}$$

Portanto:

- $k_{\text{brita 0}} = 2,51 \times 10^1 \text{ cm/s}$

Aplicando o fator de conversão de viscosidade da água para 20°C, conforme Equação 10, tem-se:

- $k_{20 \text{ brita 0}} = 1,95 \times 10^1 \text{ cm/s}$

Segundo a classificação de Casagrande e Fadum (1940) *apud* Coacalla (2012), a brita 0 apresentou bom desempenho de drenagem e se encaixa na descrição de pedregulho limpo proposta por Das (2007).

A força de percolação aplicada no ensaio, descrita na Equação 16 é dada por:

$$F_{\text{brita 0}} = 9,81 \frac{\text{kN}}{\text{m}^3} * 0,02\text{m} * 0,006362\text{m}^2$$

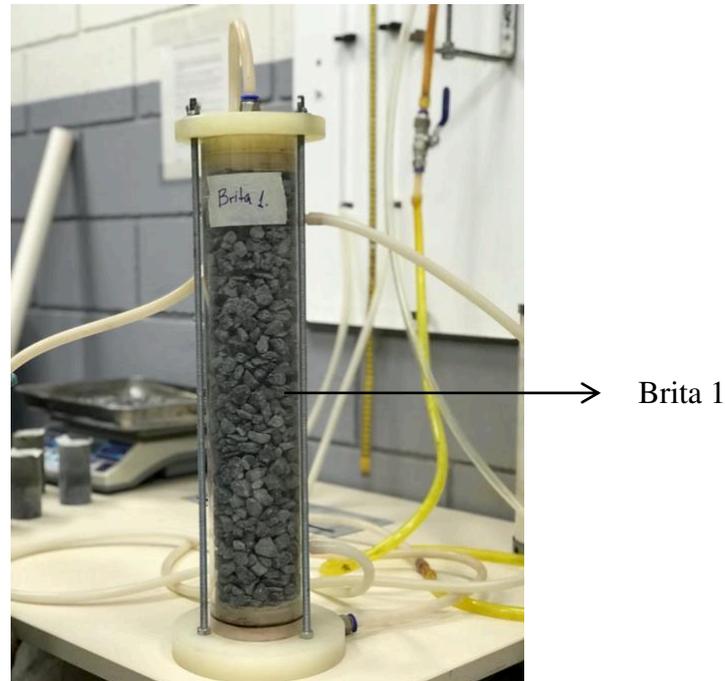
Portanto, a força de percolação atuante no ensaio da brita 0 é:

- $F_{\text{brita 0}} = 1,23\text{kN}$ .

#### 4.3.5 Brita 1

A condutividade hidráulica da brita 1 foi medida usando o arranjo conforme mostrado na Figura 33.

Figura 33: Ensaio de condutividade hidráulica na brita 1.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Os resultados de vazão, calculados a partir da massa de água coletada em períodos de 30 segundos durante o ensaio, estão dispostos na Tabela 18.

Tabela 18: Resultados do ensaio de permeabilidade da brita 1.

<b>Leitura</b>	<b>Volume (cm<sup>3</sup>)</b>	<b>t (s)</b>	<b>Vazão (cm<sup>3</sup>/s)</b>
<b>1</b>	974,57	30	32,49
<b>2</b>	942,12	30	31,40
<b>3</b>	985,19	30	32,84
<b>4</b>	960,54	30	32,02
<b>5</b>	967,97	30	32,27

Fonte: Elaborado pelo autor.

Tomando-se a média da vazão:

- $q_{\text{brita 1}} = 32,20 \text{ cm}^3/\text{s}$ , com  $0,54 \text{ cm}^3/\text{s}$  de desvio padrão.

Das leituras dos piezômetros durante o ensaio, tem-se que:

- $\Delta h = 0,2 \text{ cm}$  e
- $L = 15 \text{ cm}$

Assim, tem-se um gradiente hidráulico dado por:

- $i_{\text{brita 1}} = 0,01$ .

Por fim, aplicando a Equação 7:

$$k = \frac{32,20 \text{ cm}^3/\text{s}}{0,01 * 63,62 \text{ cm}^2}$$

Portanto:

- $k_{\text{brita 1}} = 3,80 \times 10^1 \text{ cm/s}$

Aplicando a conversão de viscosidade da água a 20°C, conforme Equação 10, tem-se:

- $k_{20 \text{ brita 1}} = 3,45 \times 10^1 \text{ cm/s}$

A brita 1 apresentou, como esperado, o maior coeficiente de permeabilidade. Na escala de Casagrande e Fadum (1940) *apud* Coacalla (2012), o coeficiente medido está ainda acima da melhor classificação, e encontra-se em linha com os valores propostos por Das (2007) para pedregulhos limpos.

A força de percolação aplicada a camada, descrita na Equação 16 é dada por:

$$F_{\text{brita 1}} = 9,81 \frac{\text{kN}}{\text{m}^3} * 0,002 \text{ m} * 0,006362 \text{ m}^2$$

Portanto, a força de percolação atuante no ensaio da brita 1 é:

- $F_{\text{brita 1}} = 0,12 \text{ kN}$ .

#### 4.3.6 Estrutura A

O ensaio com a estrutura A foi realizado com as densidades e índices de vazios ao início do ensaio estão dispostas na Tabela 19.

Tabela 19: Índices físicos dos materiais ao início do ensaio da estrutura A

	<b>Estrutura A</b>	
	<b>Areia média</b>	<b>Brita 1</b>
<b>Massa (g)</b>	2236	2279
<b>Altura (cm)</b>	20	24
<b>Volume (cm<sup>3</sup>)</b>	1272,35	1526,81
<b>Densidade aparente seca (g/cm<sup>3</sup>)</b>	1,76	1,49
<b>Índice de vazios</b>	34%	43%

Fonte: Elaborado pelo autor.

Os resultados de vazão, calculados a partir da massa de água coletada, estão dispostos na Tabela 20.

Tabela 20: Resultados do ensaio de permeabilidade da estrutura A.

Leitura	Volume (cm <sup>3</sup> )	t (s)	Vazão (cm <sup>3</sup> /s)
1	690,38	60	11,51
2	744,98	60	12,42
3	744,86	60	12,41
4	738,37	60	12,31
5	755,92	60	12,60
6	753,79	60	12,56
7	769,61	60	12,83
8	775,64	60	12,93
9	787,76	60	13,13
10	755,80	60	12,60

Fonte: Elaborado pelo autor.

Tomando-se a média das vazões, tem-se que:

- $q_{\text{estrutura A}} = 12,53 \text{ cm}^3/\text{s}$ , com  $0,44 \text{ cm}^3/\text{s}$  de desvio padrão.

Aplicando a Equação 8, para uma amostra com espessura L total de 44cm e carga hidráulica medida em 138cm:

$$k_{\text{estrutura A}} = \frac{13,52 \text{ cm}^3/\text{s} * 44 \text{ cm}}{63,62 \text{ cm}^2 * 138 \text{ cm}}$$

Assim, o coeficiente k é dado por:

- $k_{\text{estrutura A}} = 6,29 \times 10^{-2} \text{ cm/s}$

Aplicando a conversão de viscosidade da água a 20°C, conforme Equação 10, tem-se:

- $k_{20 \text{ estrutura A}} = 5,70 \times 10^{-2} \text{ cm/s}$

A força de percolação aplicada à camada composta pela estrutura A, descrita na Equação 16 é dada por:

$$F_{\text{conjunto estrutura A}} = 9,81 \frac{\text{kN}}{\text{m}^3} * 0,67 \text{ m} * 0,006362 \text{ m}^2$$

Portanto, a força de percolação atuante no conjunto estrutura A é:

- $F_{\text{conjunto estrutura A}} = 41,16 \text{ kN}$ .

#### 4.3.7 Estrutura B

O ensaio da estrutura B foi realizado conforme disposto na Figura 14. As densidades, índices de vazios ao início do ensaio estão dispostas na Tabela 21.

Tabela 21: Índices físicos dos materiais ao início do ensaio da estrutura B.

	<b>Estrutura B</b>			
	<b>Areia média</b>	<b>Areia grossa</b>	<b>Brita 0</b>	<b>Brita 1</b>
<b>Massa (g)</b>	2223	1083	499	858
<b>Altura (cm)</b>	20	10	5	9
<b>Volume (cm<sup>3</sup>)</b>	1272,35	636,17	318,09	572,56
<b>Densidade aparente seca (g/cm<sup>3</sup>)</b>	1,75	1,70	1,57	1,50
<b>Índice de vazios</b>	35%	36%	40%	42%

Fonte: Elaborado pelo autor.

Os resultados de vazão estão dispostos na Tabela 22.

Tabela 22: Resultados do ensaio de permeabilidade da estrutura B.

<b>Leitura</b>	<b>Volume (cm<sup>3</sup>)</b>	<b>t (s)</b>	<b>Vazão (cm<sup>3</sup>/s)</b>
<b>1</b>	837,13	40	20,93
<b>2</b>	654,27	30	21,81
<b>3</b>	624,39	30	20,81
<b>4</b>	617,95	30	20,60
<b>5</b>	609,99	30	20,33
<b>6</b>	642,49	30	21,42
<b>7</b>	644,55	30	21,49
<b>8</b>	634,09	30	21,14
<b>9</b>	609,73	30	20,32
<b>10</b>	627,23	30	20,91

Fonte: Elaborado pelo autor.

Tomando-se a média das vazões, tem-se que:

- $q_{\text{estrutura B}} = 20,98 \text{ cm}^3/\text{s}$ , com  $0,44 \text{ cm}^3/\text{s}$  de desvio padrão.

Aplicando a Equação 8, para uma amostra com espessura L total de 44cm e carga hidráulica medida em 165cm:

$$k_{\text{estrutura B}} = \frac{20,98 \text{ cm}^3/\text{s} * 44 \text{ cm}}{63,62 \text{ cm}^2 * 165 \text{ cm}}$$

Assim, o coeficiente k é dado por:

- $k_{\text{estrutura B}} = 8,79 \times 10^{-2} \text{ cm/s}$

Aplicando o fator de conversão de viscosidade da água para 20°C, conforme Equação 10, tem-se:

- $k_{20 \text{ estrutura B}} = 7,99 \times 10^{-2} \text{ cm/s}$

A força de percolação aplicada à camada composta pela estrutura B, descrita na Equação 16 é dada por:

$$F_{\text{conjunto estrutura B}} = 9,81 \frac{kN}{m^3} * 0,50m * 0,006362m^2$$

Portanto, a força de percolação atuante no conjunto estrutura A é:

- $F_{\text{conjunto estrutura B}} = 30,71kN$ .

#### 4.3.8 Estrutura C

O ensaio da estrutura C foi realizado conforme disposto na Figura 15. As densidades, índices de vazios ao início do ensaio estão dispostas na Tabela 23.

Tabela 23: Índices físicos dos materiais ao início do ensaio da estrutura C.

	<b>Estrutura C</b>		
	Turfa	Areia média	Brita 1
<b>Massa (g)</b>	177	1775	2311
<b>Altura (cm)</b>	4	16	24
<b>Volume (cm<sup>3</sup>)</b>	254,47	1017,88	1526,81
<b>Densidade aparente seca (g/cm<sup>3</sup>)</b>	0,70	1,74	1,51
<b>Índice de vazios</b>	69%	35%	42%

Fonte: Elaborado pelo autor.

Os resultados de vazão, calculados a partir da massa de água coletada, estão dispostos na Tabela 24.

Tabela 24: Resultados do ensaio de permeabilidade da estrutura C.

<b>Leitura</b>	<b>Volume (cm<sup>3</sup>)</b>	<b>t (s)</b>	<b>Vazão (cm<sup>3</sup>/s)</b>
<b>1</b>	395,55	30	13,18
<b>2</b>	407,59	30	13,59
<b>3</b>	867,36	60	14,46
<b>4</b>	895,99	60	14,93
<b>5</b>	879,57	60	14,66
<b>6</b>	892,81	60	14,88
<b>7</b>	908,79	60	15,15
<b>8</b>	904,12	60	15,07
<b>9</b>	900,85	60	15,01
<b>10</b>	887,60	60	14,79

Fonte: Elaborado pelo autor.

Tomando-se a média das vazões, tem-se que:

- $q_{\text{estrutura C}} = 14,57 \text{ cm}^3/\text{s}$ , com  $0,66 \text{ cm}^3/\text{s}$  de desvio padrão.

Aplicando a Equação 8, para uma amostra com espessura  $L$  total de 44cm e carga hidráulica medida em 146cm:

$$k_{\text{estrutura C}} = \frac{14,57 \text{ cm}^3/\text{s} * 44 \text{ cm}}{63,62 \text{ cm}^2 * 146 \text{ cm}}$$

Assim, o coeficiente  $k$  é dado por:

- $k_{\text{estrutura C}} = 6,90 \times 10^{-2} \text{ cm/s}$

Aplicando o fator de conversão de viscosidade da água para 20°C, conforme Equação 10, tem-se:

- $k_{20 \text{ estrutura C}} = 6,27 \times 10^{-2} \text{ cm/s}$

A força de percolação aplicada à camada composta pela estrutura C, descrita na Equação 16 é dada por:

$$F_{\text{conjunto estrutura C}} = 9,81 \frac{\text{kN}}{\text{m}^3} * 0,54 \text{ m} * 0,006362 \text{ m}^2$$

Portanto, a força de percolação atuante no conjunto estrutura A é:

- $F_{\text{conjunto estrutura C}} = 33,17 \text{ kN}$ .

#### 4.3.9 Estrutura D

O ensaio da estrutura D foi realizado conforme disposto na Figura 16. As densidades, índices de vazios ao início do ensaio estão dispostas na Tabela 25.

Tabela 25: Índices físicos dos materiais ao início do ensaio da estrutura D.

	<b>Estrutura D</b>				
	Turfa	Areia média	Areia grossa	Brita 0	Brita 1
<b>Massa (g)</b>	181	1794	1094	504	859
<b>Altura (cm)</b>	4	16	10	5	9
<b>Volume (cm<sup>3</sup>)</b>	254,47	1017,88	636,17	318,09	572,56
<b>Densidade aparente seca (g/cm<sup>3</sup>)</b>	0,71	1,76	1,72	1,58	1,50
<b>Índice de vazios</b>	68%	34%	36%	39%	42%

Fonte: Elaborado pelo autor.

Os resultados de vazão, calculados a partir da massa de água coletada, estão dispostos na Tabela 26.

Tabela 26: Resultados do ensaio de permeabilidade da estrutura D.

<b>Leitura</b>	<b>Volume (cm<sup>3</sup>)</b>	<b>t (s)</b>	<b>Vazão (cm<sup>3</sup>/s)</b>
<b>1</b>	889,81	60	14,83
<b>2</b>	927,51	60	15,46
<b>3</b>	922,39	60	15,37
<b>4</b>	920,74	60	15,35
<b>5</b>	898,21	60	14,97
<b>6</b>	907,62	60	15,13
<b>7</b>	906,55	60	15,11
<b>8</b>	902,72	60	15,05
<b>9</b>	912,27	60	15,20
<b>10</b>	906,20	60	15,10

Fonte: Elaborado pelo autor.

Tomando-se a média das vazões, tem-se que:

- $q_{\text{estrutura D}} = 15,16\text{cm}^3/\text{s}$ , com  $0,19\text{cm}^3/\text{s}$  de desvio padrão.

Aplicando a Equação 8, para uma amostra com espessura L total de 44cm e carga hidráulica medida em 147cm:

$$k_{\text{estrutura D}} = \frac{15,16\text{cm}^3/\text{s} * 44\text{cm}}{63,62\text{cm}^2 * 147\text{cm}}$$

Assim, o coeficiente k é dado por:

- $k_{\text{estrutura D}} = 7,13 \times 10^{-2} \text{ cm/s}$

Aplicando o fator de conversão de viscosidade da água para 20°C, conforme Equação 10, tem-se:

- $k_{20 \text{ estrutura D}} = 6,48 \times 10^{-2} \text{ cm/s}$

A força de percolação aplicada à camada composta pela estrutura D, descrita na Equação 16 é dada por:

$$F_{\text{conjunto estrutura D}} = 9,81 \frac{\text{kN}}{\text{m}^3} * 0,54\text{m} * 0,006362\text{m}^2$$

Portanto, a força de percolação atuante no conjunto estrutura A é:

- $F_{\text{conjunto estrutura D}} = 32,56\text{kN}$ .

#### 4.4 EROSÃO INTERNA

Após os ensaios, coleta dos materiais contidos abaixo da cota de assentamento da brita e secagem e peneiramento do material coletado, determinou-se o peso de finos que intruiu na

camada de brita. A Tabela 27 mostra os resultados de aumento das densidades das camadas mais granulares e, conseqüentemente, redução dos índices de vazios causada pelo carregamento de grãos de areia para as camadas subseqüentes. Esse fenômeno pode representar redução da eficiência de drenagem do granular por representar maior dificuldade da água fluir entre os vazios disponíveis na brita.

Tabela 27: Cálculo da variação de densidade nas camadas de brita.

Condição	Indicador	Estrutura			
		A	B	C	D
Inicial	Volume total da camada de brita (cm <sup>3</sup> )	1526,88	890,68	1526,88	890,68
	Índice de vazios ponderado	0,42	0,41	0,42	0,42
	Volume de sólidos da camada de brita (cm <sup>3</sup> )	1067,75	627,24	1067,75	627,24
Final	Massa de finos intrudida após o ensaio (g)	139,78	68,24	185,62	51,09
	Volume de sólidos de finos intrudidos após o ensaio (g)	62,91	30,71	83,54	22,99
	Volume de sólidos da camada de brita (g)	1130,66	657,95	1151,29	650,23
	Índice de vazios ponderado	0,35	0,35	0,33	0,37
$\Delta$	Redução do índice de vazios	17%	14%	22%	11%

Fonte: Elaborado pelo autor.

O índice de vazios inicial ponderado foi calculado considerando o índice de vazios proposto para cada brita em função da altura das camadas. O volume de sólidos dos finos intrudidos foi calculado com base na massa aferida após o ensaio e a densidade real dos grãos calculada para a areia. O índice de vazios final foi calculado assumindo que o volume total da camada de brita se manteve estável devido à restrição física imposta pelas camadas superiores e assumindo um novo valor de volume de sólidos dado pela soma entre o volume de sólidos inicial e o incremento dado pela intrusão da areia.

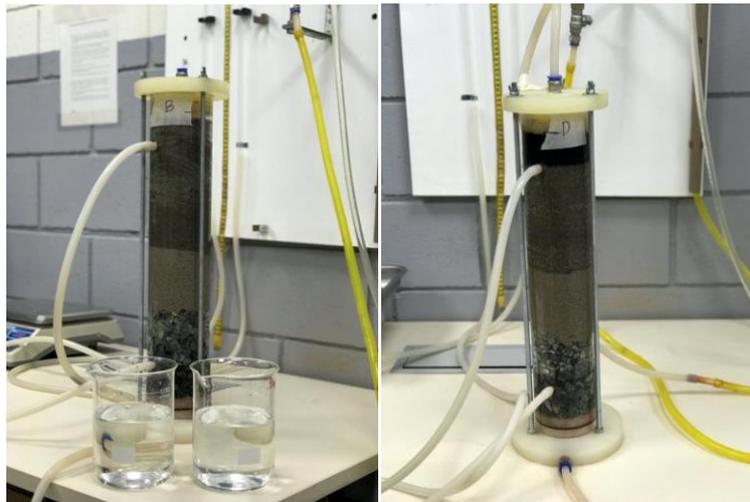
É possível observar, nas Figuras 34 e 35, que as estruturas B e D mantiveram as camadas nitidamente menos alteradas e melhor segregadas do que as estruturas A e C.

Figura 34: Transporte de areia para a camada de brita nas estruturas A e C.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 35: Proteção das camadas de brita nas estruturas B e D.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Comparando as granulometrias, as camadas B e D apresentam areia grossa assentada em cima de brita 0, enquanto A e C apresentam areia média acima de brita 1. A Tabela 28 apresenta um resumo dos diâmetros comerciais que estão em contato em A e C e B e D.

Tabela 28: Comparativo entre faixas granulométricas no contato brita-areia.

	<b>Camadas A e C</b>	<b>Camadas B e D</b>
<b>Faixa granulométrica da brita (mm)</b>	Brita 1: 9,5 – 19	Brita 0: 4,8 – 9,5
<b>Faixa granulométrica da areia (mm)</b>	Areia média: 0,2 – 0,6	Areia grossa: 0,6 – 2,0

Fonte: Elaborado pelo autor.

Comparando as diferenças médias entre os diâmetros, é possível observar que os materiais contidos no contato brita-areia nas estruturas A e C apresentam maiores aberturas entre grãos devido à maior diferença entre diâmetros das camadas do que em B e D. Pelo conceito de auto filtragem da camada, discutido por Silva (2016), é possível atrelar a ocorrência de uma redução mais expressiva em A e C dos índices de vazios da brita, pois não há, no contato brita-areia o fechamento dos vazios do material do filtro impedindo a passagem das partículas para dentro da estrutura intragranular do filtro.

#### 4.5 INDICADORES DE DESEMPENHO DAS ESTRUTURAS

Após cálculo dos principais indicadores de desempenho, criou-se uma comparação entre as estruturas para determinação da camada mais recomendável. Essa comparação foi dada com uma pontuação de 1 a 4, em que 1 representa a melhor camada, enquanto 4, a pior, seguindo as seguintes propostas:

- i. Critérios de filtro: número de critérios satisfeitos. Como as camadas B e C apresentaram o mesmo índice, atribui-se a ambas o indicador 2.
- ii. Coeficiente  $k$  de permeabilidade: ordem decrescente dos coeficientes obtidos (a camada de maior coeficiente recebeu o indicador 1);
- iii. Erosão interna: ordem crescente do aumento de densidade da camada de brita (a camada de menor aumento de densidade recebeu o indicador 1).

A Tabela 29 elenca os indicadores propostos com a classificação de cada estrutura em relação às demais. Nela, é possível observar que as camadas B e D apresentam o melhor desempenho.

Tabela 29: Indicadores de desempenho das estruturas

Indicador	Estrutura			
	A	B	C	D
<b>Critérios de filtro</b>	3	2	2	1
<b>k</b>	4	1	3	2
<b>Erosão interna</b>	3	2	4	1

Fonte: Elaborado pelo autor.

Quando comparados ao indicador proposto por Casagrande e Fadum (1940) *apud* Coacalla (2012, p. 25) disposto na Tabela 1, todos os coeficientes de condutividade hidráulica resultantes alcançaram desempenho “bom”. Ainda, a estrutura B é a mais recomendada para aplicação em camadas de base para gramados esportivos por apresentar um coeficiente  $k$  29,8% superior à média das demais estruturas.

Os resultados apresentados apontam para a conclusão de que a utilização da areia grossa como parte da camada filtro eleva o desempenho geral da estrutura tanto em condutividade hidráulica como em proteção das camadas granulares (e, conseqüentemente, das redes de drenagem nela disposta).

Ainda, as Figuras 34 e 35 corroboram com tal conclusão, demonstrando a degradação das camadas de areia média do solo-base nas estruturas A e C para dentro da camada de brita. Em contrapartida, as imagens mostram camadas protegidas e bem definidas em B e D, mesmo após o total de duas horas de ensaio. O bom resultado de permeabilidade obtido na camada D mostra que a areia grossa não só auxilia na retenção da areia média, mas também pode suavizar os impactos da camada de turfa, material que, naturalmente, tem a mais baixa condutividade hidráulica dentre todos os estudados.

Além disso, os valores estimados para forças de percolação nos sistemas, ainda que impactados pela posição dos piezômetros, indicam que a força de carregamento de partículas na direção do fluxo tende a ser 17% maior nas estruturas sem a presença de areia grossa (A e C) do que as estruturas com areia grossa (B e D).

Os critérios de filtro apresentados na revisão bibliográfica se mostraram uma boa ferramenta pré-ensaio para determinar o desempenho de uma estrutura de solo-base e filtro. Enquanto a amostra D foi a estrutura que atendeu a mais critérios e apresentou o segundo melhor coeficiente de permeabilidade, a amostra B apresentou a segunda melhor observância dos critérios e teve o melhor desempenho hidráulico.

Ainda, o uso da areia grossa parece ser a principal variável impactante na condutividade hidráulica global das estruturas. Além disso, mesmo com o menor desempenho hidráulico da turfa dentre todos os materiais, não é possível concluir que sua utilização com 4cm de espessura impacte o desempenho global das estruturas. Pareando os testes A (sem turfa) com C (com turfa) e B (sem turfa) e D (com turfa), observa-se que a utilização da turfa elevou em 9,9% o coeficiente  $k$  no primeiro caso e reduziu em 23,3% no segundo. Sendo assim, não se pode afirmar se o uso da turfa com 4cm de espessura é recomendável ou não do um ponto de vista hidráulico, e sua aplicabilidade deve estar atrelada a critério bioquímicos em sua interação com o gramado.

Por fim, não é possível afirmar, dentre brita 0 e brita 1, qual tem melhor performance, devido ao uso exclusivo da brita 0 em combinação com a areia grossa no estudo. Como se atrelou o fenômeno do aumento excessivo da densidade na camada de brita à presença de areia média e pela inexistência de testes pareados de brita 0 ou brita 1 com e sem areia média,

não há dados para comparação do impacto do uso de uma brita diretamente comparado com a outra.

## 5 CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

A partir da revisão bibliográfica realizada, da metodologia proposta, dos materiais escolhidos e dos ensaios realizados, observou-se que todas as formulações obtiveram resultados satisfatórios de condutividade hidráulica. Quando comparados ao indicador proposto por Casagrande e Fadum (1940) apud Coacalla (2012, p. 25) disposto na Tabela 1, todos os coeficientes de condutividade hidráulica resultantes alcançaram desempenho “bom”. Ainda, a formulação B é a mais recomendada para aplicação em camadas de base para gramados esportivos por apresentar um coeficiente  $k$  29,8% superior à média das demais formulações.

Todos os materiais estudados desempenham funções específicas dentro das estruturas. As britas fornecem permeabilidade, a areia grossa tem o potencial de proteger as camadas de brita, a areia média fornece resistência mecânica e acabamento de nivelamento enquanto a turfa, conforme apresentado anteriormente, apresenta características bioquímicas atrativas para o crescimento da grama.

Os critérios de filtro apresentados na revisão bibliográfica se mostraram uma boa ferramenta pré-ensaio para determinar o desempenho de uma formulação de solo-base e filtro. Enquanto a amostra D foi a formulação que atendeu a mais critérios e apresentou o segundo melhor coeficiente de permeabilidade, a amostra B apresentou a segunda melhor observância dos critérios e teve o melhor desempenho hidráulico.

Os resultados apresentados apontam para a conclusão de que a utilização da areia grossa como parte da camada filtro eleva o desempenho geral da formulação tanto em condutividade hidráulica como em proteção das camadas granulares (e, conseqüentemente, das redes de drenagem nela disposta). Ainda, as Figuras 22 e 23 corroboram com tal conclusão, demonstrando a degradação das camadas de areia média do solo-base nas formulações A e C para dentro da camada de brita. Em contrapartida, as imagens mostram camadas protegidas e bem definidas em B e D, mesmo após o total de duas horas de ensaio. O bom resultado de permeabilidade obtido na camada D mostra que a areia grossa não só auxilia na retenção da areia média, mas também pode suavizar os impactos da camada de turfa, material que, naturalmente, tem a mais baixa condutividade hidráulica dentre todos os estudados.

## 5.1 SUGESTÕES PARA PESQUISAS FUTURAS

Por fim, recomenda-se, em trabalhos futuros, a realização de um ensaio com uma estrutura que preveja a aplicação de uma camada de brita 1 entre as camadas de areia grossa e brita 0 para otimizar o conceito de auto filtragem e avaliar os impactos de uma granulometria ainda mais graduada. Ainda, considerando os resultados dos ensaios e as conclusões aqui traçadas, os tópicos a seguir ficam listados como recomendações para novas pesquisas:

- Utilizar filtros geotêxteis para proteger as camadas de brita;
- Estudar o desempenho de uma camada de brita 1 entre a areia média ou grossa e a brita 0;
- Ensaiar testes pareados de brita 0 e brita 1 com e sem a presença da areia grossa;
- Ensaiar as estruturas propostas com fluxo ascendente e com camadas saturadas para simular uma condição extrema de uso.

## REFERÊNCIAS

AMBROSIO, Tauan. **Copa 1950-2014**: as principais mudanças que aconteceram desde então. 2013. Disponível em: <https://www.goal.com/br/news/619/especiais/2013/11/21/4422996/copa-1950-2014-asprincipais-mudan%C3%A7as-que-aconteceram-desde%3E>. Acesso em: 25 nov. 2020.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6457**: Amostras de solo — Preparação para ensaios de compactação e ensaios de caracterização. Rio de Janeiro, 2016. 18 p. Disponível em: <https://www.abntcatalogo.com.br/norma.aspx?ID=353216>. Acesso em: 25 nov. 2020.

\_\_\_\_\_. **NBR 6502**: Rochas e solos - Terminologia. Rio de Janeiro, 1995. 18 p. Disponível em: <https://www.abntcatalogo.com.br/norma.aspx?ID=4050>. Acesso em: 25 nov. 2020.

\_\_\_\_\_. **NBR 7181**: Solo – Análise granulométrica. Rio de Janeiro, 2016. 12 p. Disponível em: <https://www.abntcatalogo.com.br/norma.aspx?ID=398421>. Acesso em: 20 maio 2019.

\_\_\_\_\_. **NBR 10844**: Instalações prediais de águas pluviais. Rio de Janeiro, 1989. 6 p. Disponível em: <https://www.abntcatalogo.com.br/norma.aspx?ID=4510>. Acesso em: 27 novembro 2020.

\_\_\_\_\_. **NBR 13292**: Solo – Determinação do coeficiente de permeabilidade de solos granulares à carga constante - Método de ensaio. Rio de Janeiro, 1995. 8 p. Disponível em: <https://www.abntcatalogo.com.br/norma.aspx?ID=4092>. Acesso em: 17 jun. 2019.

AZEREDO NETO, Paulo Antonio. Implantação e manejo de gramados esportivos. In: **SIGRA – SIMPÓSIO SOBRE GRAMADOS – PRODUÇÃO, IMPLANTAÇÃO E MANUTENÇÃO**, 1., 2003, Botucatu. Artigo. Botucatu: Unesp, 2003. p. 1 - 10. Disponível em: <http://infograma.com.br/wp-content/uploads/2015/10/IMPLANTA%C3%87%C3%83O-EMANEJO-DE-GRAMADOS-ESPORTIVOS.pdf>. Acesso em: 30 abr. 2019.

COACALLA, Tania Zapata. **Estimativa de propriedades hidráulicas de solos a partir do ensaio de ascensão capilar**. 2012. 166 f. Dissertação (Mestrado) - Programa de Pós-Graduação em Geotecnia, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2012. Disponível em: <http://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/18/18132/tde-08112012-113750/pt-br.php>. Acesso em: 04 abr. 2019.

COMITÊ ORGANIZADOR BRASILEIRO COPA 2014. **FIFA**: Recomendação técnica para gramados em estádios e CTs. [S.I.]: Fifa, 2009. Disponível em: <http://infograma.com.br/wp-content/uploads/2015/10/recomendacaotecnica.pdf>. Acesso em: 17 jun. 2019.

DAS, Braja M. **Fundamentos da Engenharia Geotécnica**. 6. ed. São Paulo: Thomson Learning, 2007.

Fell, R.; Macgregor, P.; Stapledon, D.; Bell, G.; Foster, M. (2015). **Geotechnical Engineering of Dams**. Taylor e Francis Group, London, UK, 2nd Edition.

FERNANDES, Marcos Túlio. **Avaliação das técnicas de laboratório e campo para realização de ensaios de permeabilidade de solos**. 2017. 138 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Civil, Departamento de Engenharia Civil, Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 2017. Disponível em: <https://www.locus.ufv.br/bitstream/123456789/10648/1/texto%20completo.pdf>. Acesso em: 17 jun. 2019.

FLEMING, Paul R; FROST, Matthew W; SIMPSON, Murray. **Drainage behaviour of sport pitches: findings from a research study**. Loughborough: Loughborough University For Industry Stakeholders, 2016. 25 p. Disponível em: <http://planning.northwarks.gov.uk/portal/servlets/AttachmentShowServlet?ImageName=327476>. Acesso em: 25 nov. 2020.

HOYDAL, Oyvind Armand; HEYERDAHL, Hakon. Methodology for calculation of rain-induced slides. In: UNSATURATED SOILS, 4., 2006, Carefree. **Proceedings [...]**. Carefree: Asce, 2006. p. 473-484.

LENZ, Lauri Anderson. **Avaliação da influência do empacotamento do esqueleto granular no módulo de elasticidade de concretos convencionais**. 2016. 158 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia de Construção Civil, Departamento de Construção Civil, Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2016. Disponível em: <https://acervodigital.ufpr.br/bitstream/handle/1884/46249/R%20-%20D%20-%20LAURI%20ANDERSON%20LENZ.pdf?sequence=1&isAllowed=y>. Acesso em: 19 nov. 2020.

OLIVEIRA, Mauricio Roberto de. **Composição de substrato na qualidade de campo esportivo de grama Bermuda**. 2016. 66 f. Tese (Doutorado) - Doutorado em Agronomia (Agricultura), Universidade Estadual Paulista, Botucatu, 2016. Disponível em: <https://repositorio.unesp.br/handle/11449/147109>. Acesso em: 16 maio 2019.

PIMENTA FILHO, Marco de Ávila. **Análise de erosão interna de solos em barragens com base na distribuição de vazios**. 2013. 124 f. Dissertação (Mestrado) - Mestrado em Geotecnia e Transportes, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2013. Disponível em: <http://www.bibliotecadigital.ufmg.br/dspace/handle/1843/BUOS-9E5H5B>. Acesso em: 16 maio 2019.

PINTO, Carlos de Sousa. **Curso Básico de Mecânica dos Solos em 16 Aulas**. 3. ed. São Paulo: Oficina de Textos, 2006. 367 p.

QUARESMA, Luiz Felipe. **Relatório Técnico 30: perfil de brita para construção civil**. [S.I.]: Secretaria de Geologia, Mineração e Transformação Mineral, 2009. 30 p. Disponível em: [http://www.mme.gov.br/documents/36108/448620/P22\\_RT30\\_Perfil\\_de\\_brita\\_para\\_construcao\\_civil.pdf/0b657545-498a-46ee-b836-a974026d435a?version=1.0](http://www.mme.gov.br/documents/36108/448620/P22_RT30_Perfil_de_brita_para_construcao_civil.pdf/0b657545-498a-46ee-b836-a974026d435a?version=1.0). Acesso em: 04 abr. 2019.

SEGALLA, Vinícius. **Estádios da Copa foram pagos com dinheiro público: saiba por que nunca pôde ser diferente**. Saiba por que nunca pôde ser diferente. 2014. Disponível em: <https://folhapolitica.jusbrasil.com.br/noticias/122597307/estadios-da-copa-foram-pagos-com-dinheiro-publico-saiba-por-que-nunca-pode-ser->

