

UNIVERSIDADE FEDERAL DO PAMPA

MARCUS FERNANDO FARIAS FERREIRA

**HIDRÁULICA DOS SOLOS: MONTAGEM DE UM APARATO PARA SIMULAÇÃO
DE REDES DE FLUXO E MONTAGEM DE PERMEÂMETRO DE CARGA
CONSTANTE**

**Alegrete
2014**

MARCUS FERNANDO FARIAS FERREIRA

**HIDRÁULICA DOS SOLOS: MONTAGEM DE UM APARATO PARA SIMULAÇÃO
DE REDES DE FLUXO E MONTAGEM DE PERMEÂMETRO DE CARGA
CONSTANTE**

Trabalho de Conclusão de Curso
apresentado ao Curso de Engenharia Civil
da Universidade Federal do Pampa, como
requisito parcial para obtenção do Título
de Bacharel em Engenharia Civil.

Orientador: Prof. Me. Magnos Baroni

**Alegrete
2014**

MARCUS FERNANDO FARIAS FERREIRA

**HIDRÁULICA DOS SOLOS: MONTAGEM DE UM APARATO PARA SIMULAÇÃO
DE REDES DE FLUXO E MONTAGEM DE PERMEÂMETRO DE CARGA
CONSTANTE**

Trabalho de Conclusão de Curso
apresentado ao Curso de Engenharia Civil
da Universidade Federal do Pampa, como
requisito parcial para obtenção do Título
de Bacharel em Engenharia Civil.

Trabalho de Conclusão de Curso defendido e aprovado em: ____/____/____.

Banca examinadora:

Prof. Me. Magnos Baroni
Orientador
UNIPAMPA

Prof.^a Dr.^a Fátima Cibele Soares
UNIPAMPA

Prof. Me. Jaelson Budny
UNIPAMPA

Dedico este trabalho a minha família que me apoiou e me deu forças sempre que as minhas se extinguiram, mas principalmente aos meus avôs Abílio Trindade Farias (*in memoriam*) e Grevi Freitas Scouto (*in memoriam*) que me deram as maiores lições de vida. Sem eles talvez não tivesse escolhido esta brilhante carreira.

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus pela dádiva da vida e por ter me guiado e me protegido sem me deixar cair em tentação e por me livrar de todo o mal.

Agradeço do fundo do coração os meus pais, Marcos e Giane, pelo exemplo de vida no qual me baseio tanto, pela força dada para que eu pudesse superar meus próprios limites e claro, pelo amor, carinho e compreensão que tiveram ao longo destes anos.

Aos meus irmãos Guilherme e Marcello, à minha segunda mãe Sônia, as minhas avós Aladir e Eloá e ao meu tio Sir Eduardo, obrigado pelo companheirismo, ajuda e conselhos dados nesta jornada.

Um agradecimento especial ao meu orientador, Magno Baroni, pela dedicação, disponibilidade e instrução não somente no desenvolvimento deste trabalho, mas também no convívio acadêmico.

Também agradeço aos amigos João, Leandro, Lucas e Ícaro, por terem me aturado nos cinco longos anos, estando eu, de bom ou mau humor. Pelas “*indiadas*” e loucuras que fizemos neste tempo e por terem sido meus amigos, meus irmãos.

Meu agradecimento àqueles amigos que não compartilharam o meu dia a dia universitário, mas que sempre me deram apoio e ajuda nos momentos que precisei.

Ao Cleber Rodrigues, técnico responsável pelo Laboratório de Geotecnia e Pavimentação da UNIPAMPA Campus Alegrete, pelo inestimável auxílio na montagem e na realização de cada ensaio necessário nesta pesquisa.

Aos professores e funcionários da Unipampa, que nos possibilitaram ter um aprendizado digno e de qualidade.

À todos que, embora não citados, de alguma forma colaboraram e acrescentaram no tempo em estive na faculdade.

Por fim a Universidade Federal do Pampa que custeou esta pesquisa, através de recursos próprios e pela bolsa PBDA concedida a mim.

... a todos meu muito obrigado!

“O conhecimento é uma arma, Jon. Arme-se bem antes de partir para a batalha”.

MARTIN, George R. R. – O Festim dos Corvos.

RESUMO

Para o engenheiro civil conhecer todas as características que envolvem uma construção é fundamental para o sucesso do seu trabalho. Atualmente o solo vem ganhando destaque devido a sua grande importância – sustentar e receber as forças provenientes de uma construção. Porém o estudo dos solos depende de muitas variáveis, dentre elas a permeabilidade. Com a evolução da Engenharia Geotécnica e partindo dos conceitos de Terzagui, Taylor e Darcy chega-se a um consenso que a presença ou não de água no solo é um dos maiores causadores de problemas em obras de terra. Desta forma, este trabalho tem como objetivo geral o desenvolvimento de um aparato para simulação das linhas de fluxo em solo saturado e possibilitar o uso do equipamento de Permeômetro de carga constante junto ao Laboratório de Geotecnia e Pavimentação da Universidade Federal do Pampa Campus Alegrete. Partindo do projeto proposto chegou-se a um equipamento que possibilitou a visualização de linhas de fluxo no interior de uma massa de solo. Com relação ao permeômetro de carga constante, embora montado temporariamente, concluiu-se seu perfeito estado de uso, sendo possível assim sua utilização em pesquisas futuras. Desta forma o trabalho realizado apresenta uma importante colaboração para a área de hidráulica dos solos da UNIPAMPA.

Palavras-chave: Solo; Permeabilidade; Linhas de Fluxo;

ABSTRACT

For a civil engineer, understanding all technical features which involve a construction is fundamental to achieve the success in his employment. Nowadays the soil is gaining prominence due to its big importance – to sustain and to receive forces from constructions. However, the study of soil depends on many variables, among these is permeability. With the evolution of Geotechnical Engineering and based on concepts of Terzagui, Taylor and Darcy a consensus was reached that the existence or not of water is one of the major causes of problems in earth works. Therefore, the general purpose of this work is to show the development of an instrument to simulate flux lines in saturated soil and to allow the use of permeameter with constant head along with Laboratório de Geotécnica e Pavimentação of Universidade Federal do Pampa Campus Alegrete (UNIPAMPA). Starting from the proposed project, the equipment which enabled the visualization of flux lines inside of soil was drawn up. In respect of the permeameter with constant head, although mounted temporally, its perfect performance was noted making it possible to use the equipment in future research. Hence, this work presents an important collaboration to the field of hydraulic soil of UNIPAMPA.

Key Words: Soil; Permeability; Flux Lines;

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Diagrama de fases	22
Figura 2 – Estrutura granular simples.....	24
Figura 3 – Arranjo estrutural.....	24
Figura 4 – Estrutura flokulada	25
Figura 5 – Movimento da água em um permeâmetro	27
Figura 6 – Permeâmetro de carga constante	31
Figura 7 – Permeâmetro de carga variável	33
Figura 8– Percolação ascendente.....	36
Figura 9 – Percolação descendente.....	37
Figura 10 – Representação da rede de fluxo no solo.....	38
Figura 11 – Croqui do prisma de vidro	42
Figura 12 – Detalhes especiais	43
Figura 13 – Perspectiva gráfica.....	44
Figura 14 – Estrutura metálica	44
Figura 15 – Desenho gráfico do aparato desenvolvido	46
Figura 16 – Croqui do permeâmetro tipo 1	48
Figura 17 – Materiais descritos na NBR 13292	50
Figura 18 – Curva granulométrica	51
Figura 19 – Areia utilizada nos testes dos equipamentos	51
Figura 20 – Corpo de prova pronto para o ensaio.....	54
Figura 21 – Corpo de prova saturado.....	55
Figura 22 – Equipamento para simulação de linhas de fluxo	56
Figura 23 – Primeiro teste de simulação	57
Figura 24 – Segundo teste	57
Figura 25 – Detalhe das mangueiras e do início do surgimento das linhas de fluxo .	58
Figura 26 – Reservatório de tinta	58
Figura 27 – Quatro linhas de fluxo traçadas ao longo do solo.....	59
Figura 28 – Corpo de prova concluído e não saturado.....	60
Figura 29 – Proveta utilizada para controle de volume	61

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 – Índices físicos do solo, utilizados no cálculo da permeabilidade.	23
Quadro 2 – Peças hidráulicas especiais.....	46
Quadro 3 – Materiais extras necessários	47
Quadro 4 – Índices físicos do solo	60

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Classificação do tamanho das partículas segundo British Standard	20
Tabela 2 – Classificação do tamanho das partículas segundo a NBR 6502/95	21
Tabela 3 – Descrição das placas de vidro utilizadas	42
Tabela 4 – Número de peças por comprimento	45
Tabela 5 – Leituras para cálculo de k.....	61
Tabela 6 – Valores do coeficiente k obtidos	62

LISTA DE SÍMBOLOS

A – área
C – coeficiente
CR – compacidade relativa
cm – centímetro
 D_e – diâmetro efetivo
e – índice de vazios
 $e_{máx}$ – índice de vazios máximo
 e_{min} – índice de vazios mínimo
g – gramas ou gravidade
H – perda de carga
h – altura
i – gradiente hidráulico
IP – índice de plasticidade
j – força de percolação
k – coeficiente de permeabilidade
L – comprimento
LL – limite de liquidez
LP – limite de plasticidade
 N_d – número de quedas potenciais
 N_f – número de canais de fluxo
Q ou q – vazão
S ou S_r – grau de saturação
t – tempo
u – pressão
v – velocidade
w – umidade
 γ_s – massa específica
 γ_w – peso específico
°C – graus Celsius
 Δ – variação

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	15
1.1 Contextualização e problema da pesquisa.....	15
1.2 Objetivos	16
1.2.1 Objetivo geral	17
1.2.2 Objetivos específicos.....	17
1.3 Justificativa.....	17
2 REFERENCIAL TEÓRICO	19
2.1 Entendendo o que é Solo	19
2.2 Estrutura dos solos.....	23
2.2.1 Estrutura dos solos grossos	24
2.2.2 Estrutura dos solos finos	25
2.3 Distribuição da água no solo	25
2.4 Permeabilidade	26
2.4.1 Lei de Darcy	27
2.4.2 Lei de Bernoulli.....	28
2.4.3 Coeficiente de permeabilidade	30
2.4.4 Fatores de influência na permeabilidade dos solos.....	34
2.5 Percolação	35
2.5.1 Força de percolação.....	35
2.6 Redes de Fluxo	37
2.7 A permeabilidade do solo e as obras civis	39
3 METODOLOGIA.....	41
3.1 Procedimentos realizados	41
3.2 Materiais e equipamentos necessários	41
3.2.1 Simulação das linhas de fluxo em solo saturado.....	41
3.2.2 Ensaio de permeabilidade	47
3.2.3 Material utilizado como teste	50
3.3 Procedimentos para realização dos ensaios	52
3.3.1 Teste de simulação das linhas de fluxos	52
3.3.2 Ensaio de permeabilidade para solos granulares.....	53
4 RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	56

4.1 Resultados da simulação das linhas de fluxo.....	56
4.2 Resultados do ensaio de permeabilidade para solos granulares	59
5 CONSIDERAÇÕES FINAIS E SUGESTÕES.....	63
5.1 Conclusões.....	63
5.2 Sugestões	64
REFERÊNCIAS.....	66
APÊNDICE A – Planilha de permeabilidade a carga constante	69
ANEXO A – Relação de viscosidade da água.....	70

1 INTRODUÇÃO

1.1 Contextualização e problema da pesquisa

Desde os primórdios da humanidade encontramos vestígios de conceitos da engenharia civil. A utilização de cavernas para abrigar e de troncos para atravessar rios são práticas primitivas da Engenharia.

Com o abandono da vida nômade o homem passou a construir moradas permanentes, porém é sabido que na era antiga e medieval essas construções eram criadas e executadas por mestres de obras, que iam fazendo da experiência sua prática.

A busca por aperfeiçoamento, o entendimento das ciências exatas e a própria evolução social se caracterizaram numa ciência própria – a engenharia civil – capaz de pensar a construção, não só de prédios, mas também de estradas, pontes, barragens, canais, entre outros, em todos os seus aspectos. Ao longo dos anos o uso de ferramentas modernas e da própria tecnologia tem cada vez mais aperfeiçoado essas construções.

Para o engenheiro civil conhecer todas as características que envolvem uma construção é fundamental para o sucesso do seu trabalho. Dentre essas características o solo tem ganhado papel relevante, pois é ele que dá estabilidade a uma obra.

Esse fato pode ser comprovado através de grandes obras que marcaram a história da humanidade: as obras que ergueram três magníficas pirâmides no Egito e a construção da gigantesca muralha da China tem no solo sua maior resistência, pois se ele tivesse baixa resistência ou alta permeabilidade elas não teriam aguentado intactas até os dias de hoje.

Já a Torre de Pisa, é um famoso exemplo do que pode ocorrer se o solo não for o ideal para servir de suporte para uma construção. Na atualidade ela é vista de forma paradoxal: é a comprovação de que a engenharia pode falhar se não considerar todos os seus aspectos, por outro lado, só continua em pé devido a utilização de conceitos modernos de engenharia.

Assim, pensar a construção, perpassa pela necessidade de conhecer o solo em que ela será executada:

Para o engenheiro civil, a necessidade do conhecimento das propriedades do solo vai além do seu aproveitamento como material de construção, pois o solo exerce um papel especial nas obras de Engenharia porquanto cabe a ele absorver as cargas aplicadas na sua superfície, e mesmo interagir com obras implantadas no seu interior (BUENO; VILAR, 1980 p. 1).

Por ser o solo um material natural, cujo processo de formação não depende de forma direta da intervenção humana, o seu estudo e o entendimento de seu comportamento depende de vários conceitos.

A Engenharia Geotécnica estuda o comportamento do solo quando este é usado ou como material de construção ou como material de fundação. Ela é uma área relativamente jovem da engenharia civil, somente sistematizada e aceita como ciência em 1925 por Terzaghi que é conhecido como o pai da Mecânica dos Solos. O conhecimento e aplicação de princípios de outras matérias básicas como geologia, física e química são também importantes no entendimento desta disciplina.

Ela evolui com o passar dos anos e atualmente os conceitos desenvolvidos principalmente por Terzaghi, Taylor e Darcy são aplicados em obras correntes, sendo de consenso geral que a água, sua presença ou falta, é um dos maiores causadores de problemas em obras de terra.

Estudos já realizados na região Sudoeste do estado do Rio Grande do Sul constataram que grande parte do solo local tem característica arenosa de origem do substrato arenítico de formação Botucatu (SUERTEGARAY, 1995).

Aprofundar os conhecimentos das diferentes formações que o solo apresenta na região Sudoeste, nas propriedades básicas das areias e na caracterização quanto aos fatores hidráulicos deste solo é imprescindível para fins da Engenharia.

Em face do exposto, este trabalho se propõe a realizar ensaios de permeabilidade em laboratório com permeâmetro de carga constante para obtenção do coeficiente de permeabilidade. É proposto ainda a realização de um aparato para simulação da movimentação da água – redes de fluxo - no interior dos solos.

1.2 Objetivos

Os objetivos deste estudo foram decompostos em objetivos gerais e objetivos específicos de acordo como apresentado a seguir.

1.2.1 Objetivo geral

Desenvolver um aparato para simulação das linhas de fluxo em solo saturado e possibilitar o uso do equipamento Permeômetro de carga constante junto ao laboratório de Geotecnia e Pavimentação da Universidade Federal do Pampa Campus Alegrete.

1.2.2 Objetivos específicos

- Projetar, executar e construir aparato que possibilite simulação das linhas de fluxo;
- Montar o ensaio de Permeabilidade para solos granulares;
- Testar os ensaios com solo granular conhecido;
- Certificar que ambos os ensaios estejam coerentes nos seus resultados;

1.3 Justificativa

Atualmente a água no solo é tema de várias pesquisas que são motivadas pelas consequências que esta combinação pode causar.

Conforme Cruz (1996) a água em movimento nas fundações de uma barragem pode ser capaz de carrear as partículas finas do solo ocasionando acidentes e até mesmo a ruptura da mesma.

Neste contexto, muitos autores (PINTO, 2006; SOARES, 2006; CAPUTO, 2011; DAS, 2011) concordam que o conhecimento da permeabilidade e da velocidade de percolação é importante para solucionar possíveis problemas e prevenir acidentes.

Os mesmos autores ainda citam que estes dados dos solos são fundamentais para os mais diversos cálculos, como por exemplo, nos cálculos de recalques, estabilidades, drenagem e volume de infiltração.

Outro fator importante é a necessidade do controle de fluxo de água, tanto em fundações quanto nos maciços de terra, dando assim, segurança a obra (CRUZ, 1996; MIRANDA, 2009).

Desta maneira a montagem do permeômetro de carga constante e o desenvolvimento do aparato para visualização das redes de fluxo da água no solo é

de extrema valia. Com o cumprimento dos objetivos deste trabalho o laboratório de Geotecnia e Pavimentação da UNIPAMPA terá disponível para utilização em pesquisas e aulas práticas duas importantes ferramentas que certamente vão colaborar com o entendimento do comportamento da água dentro de uma massa de solo e com o desenvolvimento de diferentes pesquisas na área da hidráulica dos solos.

2 REFERENCIAL TEÓRICO

2.1 Entendendo o que é Solo

O solo na Engenharia Civil pode ser descrito como todo material que pode ser escavado, sem o emprego de técnicas especiais, como por exemplo, explosivos (BUENO; VILAR, 1980). Desta maneira os solos bem como as rochas são a união de muitos minerais, possivelmente com presença de Quartzo e/ou matéria orgânica. Esta afirmação parte do fator que os solos são derivados das rochas e com isso trazem, muitas vezes, características e componentes presentes nas rochas originárias.

As rochas subdivide-se em três formações básicas que são: ígneas, sedimentares e metamórficas.

As rochas ígneas tem formação a partir do esfriamento do magma, tanto na superfície quanto no subsolo. Sua composição é diversificada devido aos diversos elementos que a compõe e o seu modo de esfriamento. (LIU; EVETT, 2008)

Já as rochas sedimentares são originadas a partir das concentrações de pedregulhos, areia, silte ou argila após sofrer um processo de compactação por pressão e ser cimentado por algum tipo de agente. Suas características partem do tipo de solo que a originou bem como o agente cimentício (DAS, 2011).

Já as rochas metamórficas são oriundas da alteração de propriedades de outras rochas pelo calor e pressão, fazendo surgir com isto, novos minerais e dando um novo aspecto para os grãos (DAS, 2011).

Desta forma a combinação de determinada rocha com os fatores pedogenéticos dão origem aos solos em geral.

O processo de degradação física faz cisalhar partes das rochas que, por força da natureza, parte esta porção cisalhada em outras tantas. Esse processo repete-se até que a partícula atinja determinado diâmetro, onde ainda é possível reconhecer as características da rocha (MARTINS, 2005).

Quanto ao processo químico, Martins (2005, p.6) diz que “(...) consiste na alteração da composição química dos minerais constituintes das rochas”. Também fala que a degradação por agentes biológicos podem ser por ação física ou química causada por organismos vivos.

Como já mencionado, as rochas com a ação de agentes físicos e químicos (intemperismo) dão origem aos diversos solos presentes no planeta. Assim, todas as ações acarretam na formação do solo, que por sua vez é constituído de partículas que se distinguem pelo seu tamanho e composição química.

Para reconhecer determinado solo, numa primeira análise, separam-se os diversos tipos de solos em pedregulhos, areia, silte ou argila, dependendo da dimensão média das partículas (DAS, 2011).

Para classificar os solos de acordo com essa separação, muitas entidades criaram tabelas com a dimensão mínima e máxima de cada tipo de partícula. As Tabelas 1 e 2 apresentam, respectivamente, a classificação utilizada no Reino Unido e no Brasil, conforme citado em Craig (2007, p.4) e na NBR 6502 (ABNT, 1995) respectivamente.

Tabela 1 – Classificação do tamanho das partículas segundo British Standard

Solo		Intervalo de diâmetros das partículas (mm)	
		min	max
Argila		<0,002	0,002
Silte	Fino	0,002	0,006
	Médio	0,006	0,02
	Grosso	0,02	0,06
Areia	Fino	0,06	0,2
	Médio	0,2	0,6
	Grosso	0,6	2
Pedregulho	Fino	2	6
	Médio	6	20
	Grosso	20	60
Pedra		60	200
Matacão		200	>200

Fonte: Adaptado de Craig (2007)

Tabela 2 – Classificação do tamanho das partículas segundo a NBR 6502/95

Solo		Intervalo de diâmetros das partículas (mm)	
		min	max
Argila		<0,002	0,002
Silte		0,002	0,06
Areia	Fino	0,06	0,2
	Médio	0,2	0,6
	Grosso	0,6	2
Pedregulho	Fino	2	6
	Médio	6	20
	Grosso	20	60
Pedra-de-mão		60	200
Matacão		200	>200

Fonte: Elaboração própria

Neste contexto em qualquer amostra de solo as partículas sólidas representam somente uma parte do volume total, o restante é ocupado por água ou ar. Esta parcela de água e ar é chamada de vazios do solo (PINTO, 2006). Assim, de maneira geral o solo é um sistema trifásico composto por partículas sólidas, água e ar (DAS, 2011).

A parcela de sólidos é formada por minerais e elementos orgânicos. A mistura dessas matérias dá origem aos grãos de solo que variam de forma e tamanho.

O solo é classificado em argila, silte, areia ou pedregulho dependendo da dimensão média dos grãos, e também pela textura, composição e configuração cristalográfica de suas partículas (SOARES, 2006).

O líquido muitas vezes encontrado no solo é basicamente composto de água, substâncias minerais e orgânicas dissolvidas. Sua quantidade dentro do solo determina o grau de saturação do mesmo (MELO, 2011).

Quanto à fase gasosa “é constituída pelo ar livre (mistura de vários gases) e vapor de água e está presente no espaço poroso não ocupado pela água, uma vez que o solo esteja em um estado não saturado ou “seco”” (SOARES, 2006 p. 10).

Segundo Craig (2007) as três fases do solo podem ser representadas pelo diagrama conforme a Figura 1.

Figura 1 – Diagrama de fases



Fonte: Craig (2007 p. 15)

Conforme Pinto “o comportamento de um solo depende da quantidade relativa de cada uma das três fases (sólidos, água e ar). Diversas relações são empregadas para expressar as proporções entre elas” (2006 p.35).

As relações aplicadas são conhecidas como propriedades do solo que são os métodos adotados para distinguir, em um determinado parâmetro, os diferentes tipos de solo, facilitando uma correlação entre eles.

A estrutura dos solos em geral, é formada pelas partículas sólidas e, nos espaços entre cada partícula, haverá água e/ou ar. A relação destes três elementos é conhecida na mecânica dos solos por índices físicos.

O conhecimento dessas propriedades é fundamental para base de qualquer estudo com o solo. O Quadro 1 apresenta índices físicos necessários para a caracterização hidráulica do solo segundo as Normas Brasileiras (NBR) 13292 (ABNT, 1995) e NBR 14545 (ABNT, 2000).

Quadro 1 – Índices físicos do solo, utilizados no cálculo da permeabilidade.

ÍNDICE FÍSICO	REPRESENTAÇÃO	CARACTERÍSTICA
Umidade	w	"Relação entre o peso da água e o peso dos sólidos" (PINTO, 2006 pg 36).
Massa específica aparente seca	ρ_d	Peso por volume unitário de solo seco, é a relação entre o peso dos sólidos por volume total (Das, 2011).
Índice de Vazios	e	"... É definido pela relação entre o volume de vazios e o volume de sólidos" (BUENO; VILAR, 1980 pg 12)
Grau de Saturação	S ou S_r	"...proporção entre o volume da água em relação ao volume de vazios..." (Das, 2011)

Fonte: Elaboração própria

Ainda, a NBR 13292 (1995) solicita o cálculo dos valores de máximos e mínimos do índice de vazios, estes representados por e_{max} e e_{min} respectivamente. Da mesma forma, diz que deve ser efetuado o cálculo da compactidade relativa (CR), sendo esta característica de solos granulares.

2.2 Estrutura dos solos

As propriedades de um solo afetam diretamente a sua estrutura, porém a estrutura deste solo somente interfere em algumas de suas propriedades.

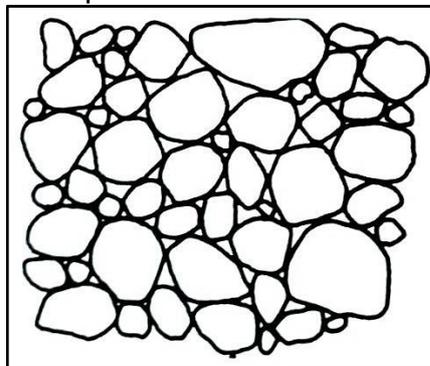
Muitos autores (BREWER; SLEEMAN, 1960; BUENO; VILAR, 1980; MCCARTHY, 2006) dizem que a estrutura do solo é definida a partir da disposição de suas partículas e que o tamanho, a textura e o arranjo físico das partículas, bem como a porosidade e a umidade do solo, são elementos básicos desta estrutura. Para Melo (2011 p. 26) "a estrutura é uma característica dinâmica, portanto, sofre modificações ou alterações com o tempo". Esta afirmação é baseada no princípio de que o solo sofre ação de agentes físicos e químicos (intemperismo).

2.2.1 Estrutura dos solos grossos

Também conhecidos por solos granulares, os solos grossos apresentam uma estrutura bastante simples, como descrito por Craig (2007), onde ele menciona o arranjo das partículas destes solos como granular simples, ou seja, não há elementos de ligação entre uma partícula e outra, como mostra Figura 2.

Observa-se também que o arranjo natural das partículas determina duas condições de estrutura: fofa ou compacta. Esta é dada ao analisar o índice mínimo e máximo de vazios do solo. (BUENO; VILAR, 1980; PINTO, 2006).

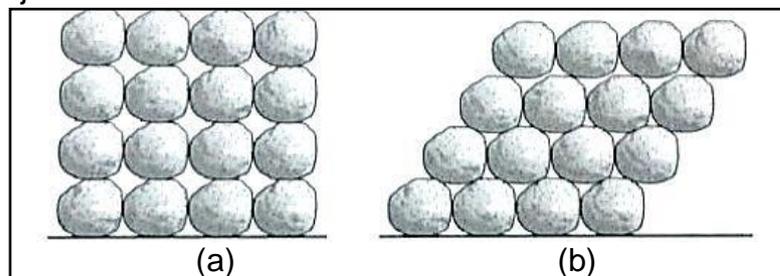
Figura 2 – Estrutura granular simples



Fonte: Craig (2007)

Na análise das estruturas fofas, Das (2011) exibe as partículas como estando uma ao lado da outra nas três dimensões existentes, conforme Figura (3a). Desta forma o índice de vazios do solo será alto. Todavia, a Figura (3b) mostra partículas deslocadas uma das outras, apresentando com isto, um menor índice de vazios.

Figura 3 – Arranjo estrutural

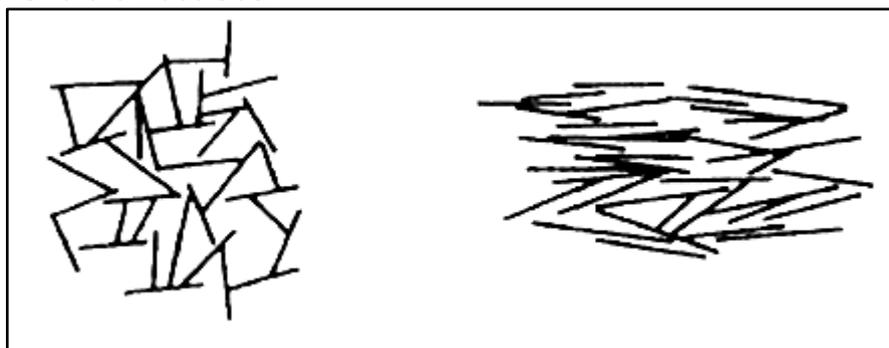


Fonte: McCarthy (2006 p. 49)

2.2.2 Estrutura dos solos finos

Ao contrário dos solos granulares, os solos de partículas finas apresentam uma estrutura bem mais complexa. Segundo McCarthy (2006) a estrutura dos solos finos é conhecida por estrutura floclada (Figura 4), e neste caso, entre suas partículas há um elemento de ligação, que muitas vezes, é a água.

Figura 4 – Estrutura floclada



Fonte: Craig (2007)

Devido ao fato de haver um elemento de ligação entre as partículas, estes solos também são chamados de solos coesivos. As partículas destes, geralmente tomam formas alongadas ou de placas, e por este motivo aumentam a relação área de superfície da partícula pela sua massa (BUENO; VILAR, 1980; PINTO, 2006; MCCARTHY, 2006; DAS, 2011).

Muitos autores concordam ainda, que as forças químicas de coesão entre as partículas dos solos finos, são devido à polaridade da mistura entre as partículas e a água. Desta forma Craig (2007, p. 2) diz que “(...) as unidades básicas não existem isoladas, mas se combinam para formar estruturas laminares”.

2.3 Distribuição da água no solo

É comum a água estar presente no solo ocupando os espaços vazios, ora parcialmente, ora totalmente. Nessas duas situações a água tanto pode estar em estado de repouso quanto em estado de movimento.

Soares (2006) afirma que a água presente no solo está sujeita a diversas forças e pressões. O autor completa ainda, dizendo que estas pressões geram

diferença de potencial, e que a soma de todos os potenciais formam o potencial da água no solo.

Cabe mencionar também que esta diferença de potencial interno é responsável pelo movimento da água por entre os vazios do solo (PINTO, 2006).

Já Bueno e Vilar (1980) apresentam a diferença dos movimentos da água relacionados aos tipos de solos. Os autores tratam do movimento da água em solos granulares como livre, podendo fluir pela ação da gravidade ou permanecer em equilíbrio hidrostático, e do movimento em solos finos como movimento complexo que envolve desde forças de superfície a forças gravitacionais.

Biassusi (2001), Pinto (2006), Soares (2006), dentre outros, concordam que atualmente, a presença e a movimentação da água no solo são focos de diversas pesquisas motivadas pelas consequências destas ações.

2.4 Permeabilidade

Quanto aos parâmetros que envolvem a presença de água, o fator mais importante do solo para a Engenharia é a permeabilidade, que é a capacidade de um fluido atravessar um corpo poroso.

Conforme Das (2011) os solos são permeáveis em função da existência dos vazios que se interligam, permitindo com isso a passagem de água por entre eles.

Desta forma Cruz (1996 p. 258) diz que “a permeabilidade de um meio poroso pode ser interpretada como a facilidade (ou dificuldade) que o meio oferece à passagem de um fluido pelos seus poros ou vazios”. Esta característica basicamente define o solo quanto a questões hidráulicas.

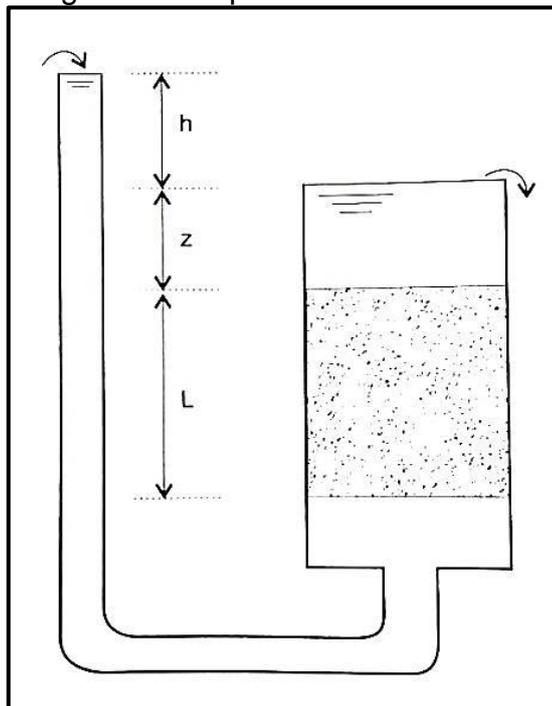
Pinto et al. (1993) dizem que é a propriedade do solo mais difícil de obter em laboratório devido às amostras serem de pequenas dimensões, apresentando determinadas limitações. Também apresenta maior amplitude de variação para um mesmo depósito.

Para a obtenção da permeabilidade, Das (2011), Pinto (2006), dentre outros, citam a lei de Darcy (1856) como principal forma de cálculo.

2.4.1 Lei de Darcy

Proposta em 1856 pelo engenheiro francês Henry Darcy, a partir de experiência que consistiu em passar um determinado volume de água por uma quantidade conhecida de solo de areia pura utilizando um permeâmetro, (Figura 05), pode-se verificar os fatores geométricos que influenciavam na vazão da água e que serviram como parâmetros para a equação de Darcy (Equação 1).

Figura 5 – Movimento da água em um permeâmetro



Fonte: Pinto (2006 p. 114)

$$Q = k \cdot \frac{h}{L} \cdot A$$

...(1)

Sendo,

- Q a vazão do líquido;
- k o coeficiente de permeabilidade do solo;
- h/L o gradiente hidráulico também expresso pela letra i ;
- A a área transversal do solo no permeâmetro.

Darcy reduziu sua fórmula até o ponto de obter a velocidade de percolação (v), como apresenta a Equação 2.

$$v = k \cdot i \quad \dots(2)$$

Onde v é a velocidade em que o líquido passa por uma quantidade conhecida de solo, k é igual o coeficiente de permeabilidade deste mesmo solo e o i é o gradiente hidráulico do solo.

Além desta definição, é importante ressaltar que, as Equações 1, 2 e 3 são válidas somente para um regime de escoamento laminar, bem como deve ser considerado nos solos naturais (CAPUTO, 2011).

2.4.2 Lei de Bernoulli

A lei de Bernoulli aplicada na Mecânica dos Solos é basicamente a conservação de energia em um escoamento de água por entre o solo. Das (2011) diz que “a carga total em um ponto na água em movimento pode ser dada pela soma das cargas piezométrica, cinética e altimétrica”, conforme a Equação 3.

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

Onde,

- h é carga total;
- u/γ_w é a carga piezométrica;
- u é a pressão;
- γ_w é o peso específico da água;
- $v^2/2 \cdot g$ é a carga cinética;
- v é a velocidade;
- g é a aceleração da gravidade;
- Z que é a carga altimétrica.

Partindo deste princípio para Bueno e Vilar (1980) a parcela de energia cinética é muito baixa, chegando ao ponto de quase ser desconsiderada. Assim, a Equação 4, representa a carga total de qualquer ponto no interior de um solo poroso.

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

Porém, o atrito entre as partículas do solo com a água pode provocar determinadas forças chamadas de forças de percolação, isto é ocasionado devido às perdas de cargas ocorridas neste movimento, quando comparadas a pontos distintos no trajeto do movimento.

Para determinar esta perda de carga ΔH , necessita-se de dois pontos como referência (aqui utilizados ponto 1 e 2) e ao subtrair um do outro, são geradas as Equações 5 e 6.

$$H_1 - H_2 = \left(\frac{u_1}{\gamma} + Z_1 \right) - \left(\frac{u_2}{\gamma} + Z_2 \right) \quad \dots(5)$$

$$\Delta H = \left(\frac{u_1}{\gamma} + Z_1 \right) - \left(\frac{u_2}{\gamma} + Z_2 \right) \quad \dots(6)$$

Onde,

- ΔH é perda de carga entre os pontos;
- u_1 e u_2 são as pressões nos pontos 1 e 2;
- γ_w é o peso específico da água;
- u/γ_w é a carga piezométrica;
- Z_1 e Z_2 que são as cargas altimétrica dos pontos 1 e 2.

Neste contexto Das (2011 p.124) diz que “a perda de carga ΔH pode ser expressa de forma adimensional” conforme a Equação 7.

$$i = \frac{\Delta H}{L} \quad \dots(7)$$

Sendo,

- I o gradiente hidráulico;
- ΔH é perda de carga entre os pontos;
- L a distância entre os pontos analisados.

Esta equação é a mesma citada por Darcy na sua lei, porém houve a substituição do fator único h para a variação do mesmo, que neste caso, corresponde também à perda de carga.

DAS (2011) completa que da mesma forma que a equação de Darcy não é válida por apresentar erros quando o movimento do fluido for turbulento, a Lei de Bernoulli também pode não ser.

2.4.3 Coeficiente de permeabilidade

Atualmente, existem três formas básicas para determinar o coeficiente de permeabilidade (k). Segundo Caputo (2011), são elas: cálculo por métodos indiretos, ensaios *in situ* e ensaios com permeâmetros em laboratório.

O coeficiente de permeabilidade pode ser calculado por meio de diversas fórmulas (indiretamente) como a de Hazen, que segundo Das (2011 p. 132), "propõe uma relação empírica para a condutividade hidráulica" conforme Equação 8.

$$k = C \cdot D_e^2 \quad \dots(8)$$

Onde,

- k coeficiente de permeabilidade;
- C coeficiente variável entre 90 e 120;
- D_e diâmetro efetivo dos grãos.

Esta equação diz que o coeficiente k de permeabilidade é igual à multiplicação do quadrado do diâmetro efetivo dos grãos do solo (D_e) por um coeficiente C que varia entre 90 e 120.

Da mesma forma, existem muitos métodos de determinar o coeficiente para permeabilidade *in loco*, mas atualmente, o método mais difundido é o ensaio de permeabilidade em furos de sondagem, devido ao seu baixo custo. Porém o ensaio

traz a grande desvantagem de depender de diversos fatores. Desta forma Pinto (2006 p. 117) diz que:

Os ensaios de campo são menos precisos do que os de laboratório. Entretanto, eles se realizam no solo em situação real. Os ensaios de laboratório são precisos no que se refere à amostra ensaiada, mas muitas vezes as amostras não são bem representativas do solo.

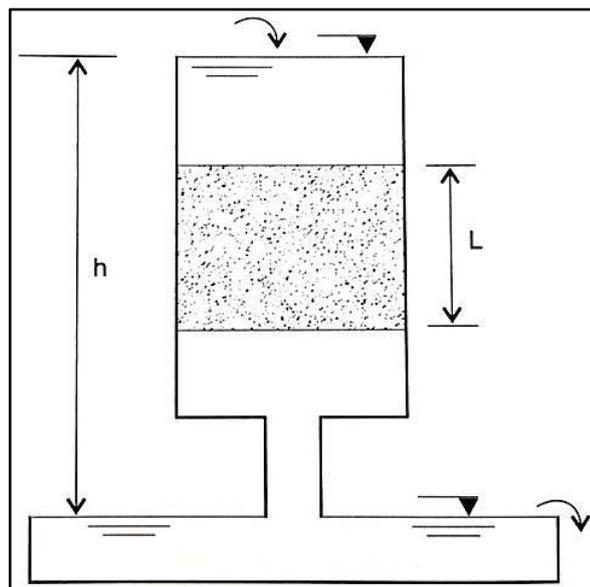
Por outro lado, Bueno e Vilar (1980), McCarthy (2006), Pinto (2006), Craig (2007), Caputo (2011), Das (2011), citam como os métodos mais utilizados para cálculo em laboratório do coeficiente de permeabilidade o permeâmetro de carga constante e o permeâmetro de carga variável.

- **Ensaio de permeâmetro de carga constante**

Este ensaio, segundo Pinto (2006), remete-se ao experimento executado pelo Engenheiro Henry Darcy (1950), pelo fato deste ensaio ser indicado para solos permeáveis, similar a areia pura que ele utilizou.

A Figura 6 esquematiza o ensaio de permeâmetro de carga constante, onde é mantida a carga de água h durante um tempo conhecido.

Figura 6 – Permeâmetro de carga constante



Fonte: Pinto (2006 p. 115)

Desta forma, a vazão de água que entra no sistema é igual à vazão que sai. A água que sai do sistema é captada por um frasco graduado para assim determinar o coeficiente k de permeabilidade do solo, conforme a Equação 9 (PINTO, 2006).

$$k = \frac{Q}{i.A} \quad \dots(9)$$

Tal que,

- k o coeficiente de permeabilidade do solo ensaiado;
- Q a vazão que entra no sistema;
- i o gradiente hidráulico conforme equação 6;
- A a área da seção transversal da amostra ensaiada.

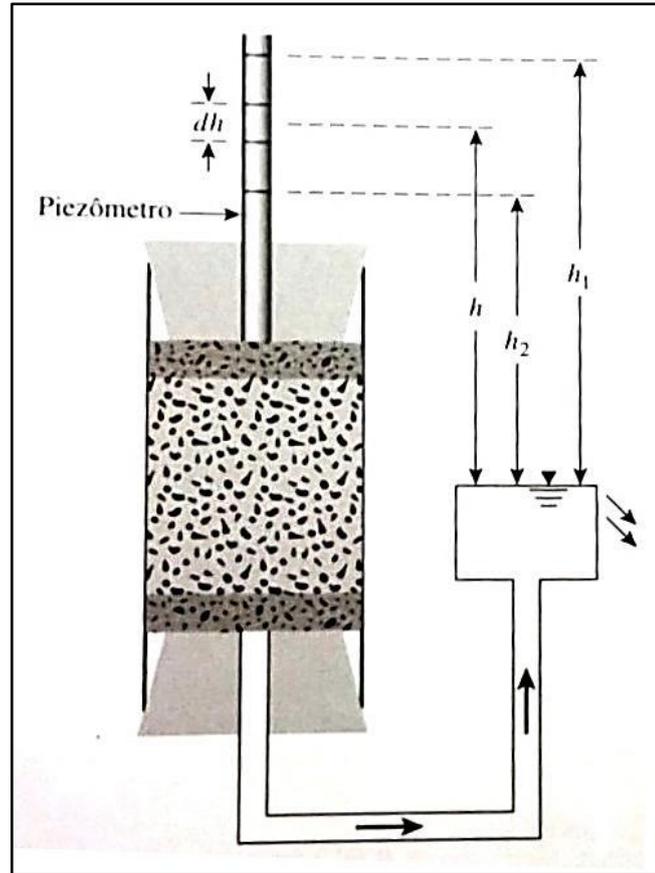
Vale ressaltar que a normativa que rege este ensaio é a NBR 13292 (ABNT, 1995). Ela, ainda, considera a viscosidade da água devido a sua temperatura.

- ***Ensaio de permeâmetro de carga variável***

Ao contrário do ensaio de permeâmetro citado no item anterior, este é indicado para solos pouco permeáveis. Segundo Bueno e Vilar (1980) isto é devido ao tempo de percolação de uma quantidade significativa que é expressivamente maior que em solos granulares.

Devido a este tempo maior de percolação, o ensaio tem como base a diferença do potencial de carga sobre o solo, ou seja, conforme a água percola a carga diminui. Desta forma a Figura 7 esquematiza o ensaio de permeâmetro de carga variável.

Figura 7 – Permeâmetro de carga variável



Fonte: Das (2011 p. 129)

Com isto, no início do ensaio, ou seja, $t=0$, o nível da água é h_1 após transcorrido um determinado tempo – t_2 – a carga é igual a h_2 (PINTO, 2006). Desse modo as Equações 10 e 11 detalham o procedimento para cálculo do coeficiente de permeabilidade (k) para solos pouco permeáveis.

$$k \cdot \frac{h}{L} \cdot A = - a \cdot \frac{dh}{dt} \quad \dots(10)$$

Onde a é a seção transversal do piezômetro e A é a seção transversal da amostra de solo.

Da resolução da equação 10 obtém-se então a equação 11.

$$k = 2,3 \cdot \frac{a \cdot L}{A \cdot t} \cdot \log_{10} \frac{h_1}{h_2} \quad \dots(11)$$

Conforme Bueno e Vilar (1980) a permeabilidade de solos poucos permeáveis pode também ser determinada realizando o ensaio de adensamento.

2.4.4 Fatores de influência na permeabilidade dos solos

Conforme mencionado anteriormente, este é um dos mais difíceis parâmetros para se determinar no solo, devido aos vários fatores que influenciam nos resultados. Estes fatores são:

- **Índice de Vazios:** devido a sua estrutura e arranjo das partículas, o solo se torna mais permeável quando seu índice de vazios aumenta. Caso contrário, com o decréscimo do índice de vazios o solo tende a diminuir a permeabilidade.
- **Grau de Saturação:** considerando a existência das três fases do solo (solo, ar e água) uma determinada quantidade de ar fica aprisionada na camada do líquido, isto devido à força tensão superficial do mesmo, isso acaba dificultando a percolação da água.
- **Estrutura dos solos:** é este fator que define todos os outros parâmetros, influentes na permeabilidade, pois, para Cruz (1996) o tamanho dos poros e o formato deles é que influencia diretamente na permeabilidade. Desta forma, o arranjo das partículas e o modo com que elas estão dispostas na estrutura são determinantes. Outro fator decisivo na permeabilidade é a anisotropia do solo, pois para Pinto (2006) em certos solos a permeabilidade horizontal poderá ser maior que a permeabilidade vertical.
- **Temperatura do fluido:** de acordo com este parâmetro a variação de temperatura provoca alterações no peso específico e na viscosidade. Quanto maior a temperatura, menor a massa específica e a menor a viscosidade facilitando assim o movimento da água. Para padronização foi adotando a temperatura de 20°C para o fluido. O Anexo A apresenta valores com relação à viscosidade da água conforme as normas NBR13292 (ABNT, 1995) e NBR14545 (ABNT, 2000).

2.5 Percolação

A Percolação pode ser definida como o movimento de um líquido no interior do solo. Este processo ocasiona uma perda de carga devido ao atrito viscoso da água com as partículas do solo. Esta perda de carga gera esforços na direção do fluxo conhecidos como força de percolação (PINTO, 2006).

A percolação é o fenômeno responsável pelo surgimento de areias movediças, de carreamento de finos (piping) e até ruptura hidráulica. (BUENO; VILAR, 1980).

2.5.1 Força de percolação

É a força causada pelo líquido devido a sua carga de fluxo. Representada pela letra j , pode ser interpretada como a força que o líquido causa no solo para manter seu trajeto com relação ao movimento vertical.

Para calcular esta força, basta analisar a carga de água, a área e o volume de atuação da força, conforme as Equações 12 e 13.

$$j = \frac{h \cdot \gamma_w \cdot A}{A \cdot L} \quad \dots(12)$$

Sendo $i = h/L$ o gradiente hidráulico, logo;

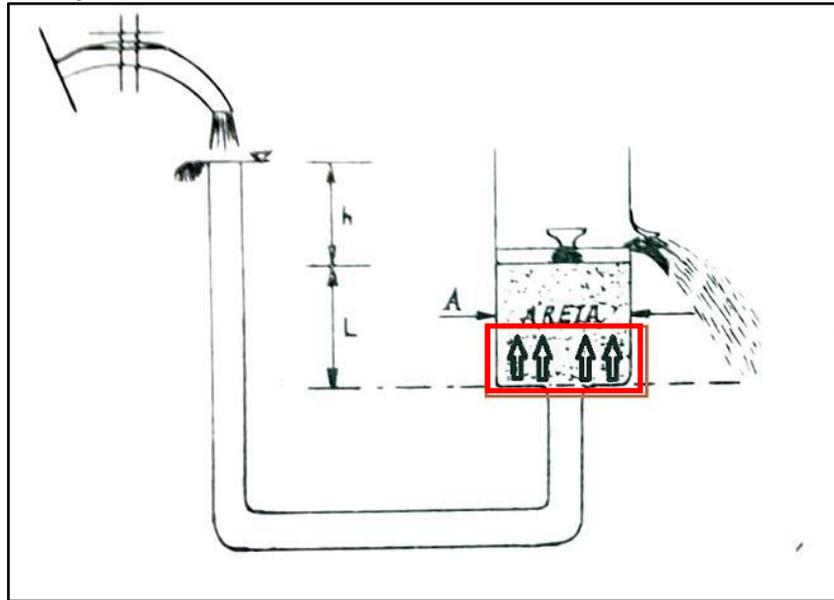
$$j = i \cdot \gamma_w \quad \dots(13)$$

Desta forma, tem-se j a força de percolação, o γ_w o peso específico, A e L a área e o comprimento da amostra, respectivamente.

Considerando que a percolação pode acontecer em duas direções (de cima para baixo ou, de baixo para cima) soma-se ou subtrai-se das forças gravitacionais.

Para melhor entendimento a Figura 8 apresenta a força de percolação atuando no sentido contrário ao da aceleração da gravidade, ou seja, de baixo para cima.

Figura 8– Percolação ascendente

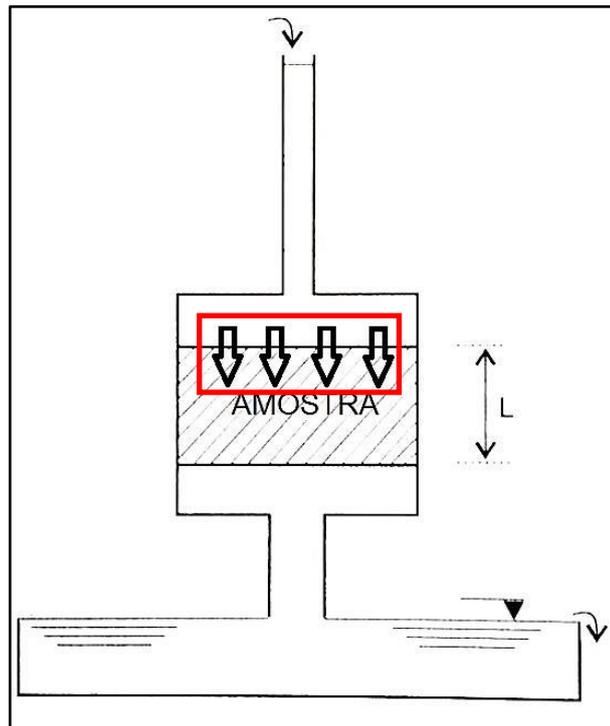


Fonte: Adaptado de Barata (1967)

O sistema apresentado na Figura 8 consiste num permeâmetro, onde o nível de carga da água está acima do orifício extravasador, e a amostra localizada logo abaixo do mesmo. As setas destacadas representam o sentido da força de percolação que devido a sua carga é o oposto da aceleração da gravidade.

Quando a percolação for com o mesmo sentido da aceleração da gravidade o solo tende a descer e a força de percolação é somada com as demais forças gravitacionais, Figura 9.

Figura 9 – Percolação descendente



Fonte: Adaptado de Pinto (2006)

Da mesma forma que a Figura 8, as setas destacadas representam o sentido da força de percolação que o líquido está exercendo sobre o solo na Figura 9.

2.6 Redes de Fluxo

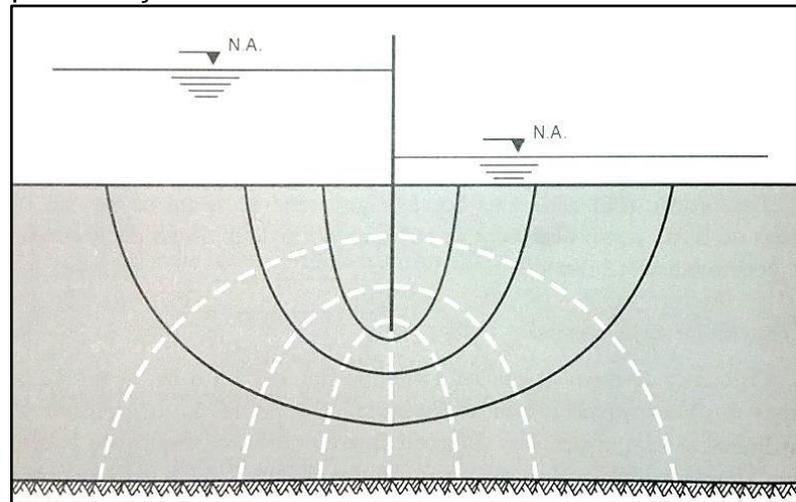
Redes de fluxo são um conjunto de várias linhas de fluxo e equipotenciais. Por corresponderem ao meio por onde o fluído escoa com a mesma carga, são utilizadas no cálculo da percolação e na análise de carga.

Para Pinto (2006) e Das (2011) as linhas de fluxo são o trajeto na qual uma partícula de água escoa de montante para jusante no interior do solo. Essas linhas quando analisadas se apresentam em paralelo umas com as outras, mesmo que seu formato seja curvo. Dessa maneira entre uma linha e outra se formam os *canais de fluxo*.

As linhas equipotenciais expressam o local onde a carga hidráulica é a mesma para diferentes pontos, ou seja, se instalado piezômetros ao longo de uma dessas linhas o nível alcançado de água é igual para todos. (CAPUTO, 2008; DAS, 2011).

A Figura 10 apresenta as linhas de fluxo, os canais de fluxo e também as linhas equipotenciais de um movimento e um solo com uma estaca prancha.

Figura 10 – Representação da rede de fluxo no solo.



Fonte: Pinto (2006 p. 148)

Pode-se destacar que as linhas de traço contínuo representam as linhas de fluxo e conseqüentemente a trajetória da partícula de água, que por princípios básicos da física, partem do ponto de maior carga para outro de menor. A cada espaço entre duas linhas de fluxo estão os canais de fluxo, que são espaços onde o líquido escoar com as mesmas propriedades de movimento.

Quanto às linhas equipotenciais são representadas na Figura 10 como sendo linhas tracejadas. Para Das (2011) é importante ressaltar que a área formada por duas linhas de fluxo e duas equipotenciais é chamada de elemento de fluxo e seu formato deve se aproximar a de um quadrado.

Desta forma, as linhas de fluxo proporcionam o cálculo das seguintes propriedades:

- **Vazão:** baseando-se na Lei de Darcy, onde a vazão é igual ao fator k de permeabilidade multiplicada pelo gradiente hidráulico. Desta forma vazão parcial do canal de fluxo é expressa conforme a Equação 14. Sendo, k o coeficiente de permeabilidade, H a variação de carga entre os lados a montante e a jusante, N_f o número de canais de fluxo e o N_d o número de quedas de potencial.

$$q = k \cdot H \cdot \left(\frac{N_f}{N_d} \right) \quad \dots(14)$$

- **Gradiente:** é a perda de carga entre linhas equipotenciais divididas pela distância entre as equipotenciais do início do trajeto (a montante) até o ponto analisado. Desta forma a perda de carga H é igual à Equação 15. Tendo, h_1 como a carga de água a montante. Segundo Pinto (2006) este é um fato que deve se tomar cuidado já que as distâncias entre equipotenciais nem sempre são iguais. O autor ainda fala que um ponto que deve ser sempre analisado é o ponto de saída do movimento, ou seja, na margem superior a jusante do sistema.

$$H = \frac{h_1}{N_d} \quad \dots(15)$$

- **Cargas e pressão:** neste, o cálculo da carga total e piezométrica do ponto leva em consideração o nível de carga a jusante e a montante. A carga total é calculada duas vezes no limite da camada impermeável, uma considerando as perdas de carga para montante e a outra para as perdas a jusante. A diferença destas cargas é o valor da carga piezométrica.

Após análise destes parâmetros é possível prever determinados problemas como, por exemplo, o fenômeno de areia movediça na parede da contenção a jusante onde a percolação ascendente terá mais força devido a menor perda de carga em seu trajeto.

2.7 A permeabilidade do solo e as obras civis

Quando é analisada a influência da permeabilidade do solo em obras de Engenharia, muitas perguntas precisam ser respondidas para se obter uma conclusão, isto devido às diversas variáveis que a característica da permeabilidade requer.

A interferência que a presença de água pode ter sobre uma edificação depende do tipo de solo, do carregamento dessa edificação, do sentido da percolação desta água, enfim são todos fatores que determinam a influência da água sobre uma edificação.

Porém independente das características citadas, a água irá interferir no solo em que esta edificação esta apoiada, e partindo deste preceito outras variáveis são analisadas para o entendimento das mais diversas situações.

Um caso muito comum em locais onde a presença de água subterrânea se encontra próxima à superfície é a necessidade de rebaixamento de lençol freático, para os mais diversos fins. Nestes casos, a água devido a forças se desloca para pontos desejados, portanto criando um caminho que pode ser estudado para melhorar seu aproveitamento.

Uma situação crítica onde à água e seu movimento interferem perigosamente é em regiões montanhosas, muitas vezes de solos argilosos onde o mesmo se torna instável perdendo parcialmente ou completamente a capacidade de coesão entre as partículas.

Nestes casos, as análises minuciosas do trajeto da água bem como as características do solo podem ajudar a prever acidentes como os ocorridos em Santa Catarina (2008) e Rio de Janeiro (2010).

Com relação às obras onde o solo é utilizado como material de construção, ou seja, obras de terra, estes cuidados devem ser ainda maiores devido ao fenômeno conhecido como *piping*. Das (2011) descreve este problema como sendo a perda de resistência de um ponto que forma furos por onde a água flui, levando com ela os finos desta região. Verifica-se que este problema, conforme Pinto “é uma das mais frequentes causas de ruptura de barragens” (2006 p. 126).

Silveira (2006) diz que a grande parcela das rupturas em barragens é causada por erosão interna e por cheias excepcionais. O mesmo ainda cita que isto é devido a acomodações e movimentos da estrutura da barragem, que cria passagens para a água.

Neste contexto de reservatórios surge, segundo Bueno e Vilar (1980), outro fenômeno chamado de areia movediça, que é motivado devido a grande carga hidráulica que um reservatório contém, fazendo com que o sentido de percolação seja ascendente após a contenção.

3 METODOLOGIA

Esta pesquisa teve como finalidade o projeto e execução do aparato para ensaio de linhas de fluxo e a montagem do permeâmetro de carga constante.

Para o cumprimento dos objetos propostos foi necessário à realização da simulação das linhas de fluxo no aparato montado e também o ensaio de permeabilidade com o permeâmetro de carga constante.

3.1 Procedimentos realizados

Considerando os objetivos específicos deste trabalho os seguintes processos foram realizados para o cumprimento da pesquisa.

- Projeto, execução e montagem do aparato de vidro;
- Montagem do equipamento para o Ensaio de permeabilidade para solos granulares;
- Realização de testes com areia média lavada nos dois equipamentos;
- Registro fotográfico dos procedimentos.

3.2 Materiais e equipamentos necessários

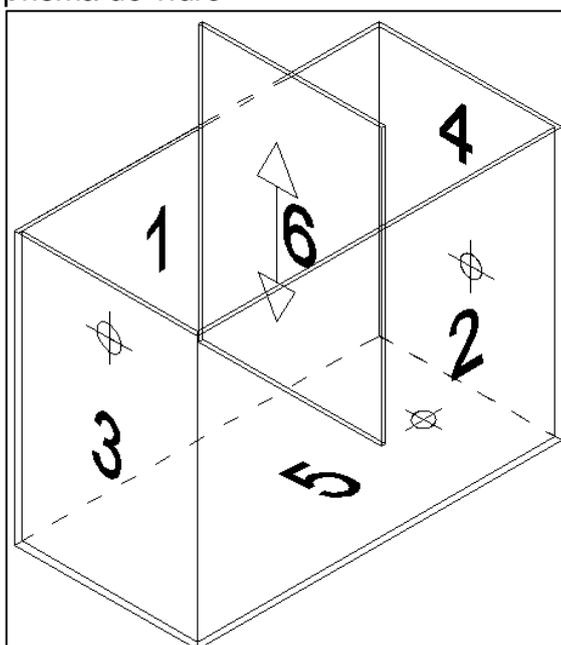
Os materiais e equipamentos utilizados neste trabalho estão relacionados a seguir conforme seu uso. Todos de acordo com os mencionados nas normas que regem os ensaios.

3.2.1 Simulação das linhas de fluxo em solo saturado

O aparato constituiu-se basicamente de um prisma de comprimento x altura x largura respectivamente igual a 80cm x 60cm x 40cm contando as paredes de vidro temperado de espessura igual a 8mm.

Para a realização deste equipamento, foi feito inicialmente um projeto utilizando as ferramentas de computação gráficas AutoCad® e SketchUp, pertencentes a AutoDesk e ao Google, como apresentado na Figura 11.

Figura 11 – Croqui do prisma de vidro



Fonte: Elaboração própria

Para as faces do aparato, foram utilizados 5 placas de vidro temperado 8 mm e 1 placa de vidro simples 6 mm, todas lisas e transparentes. Na Tabela 3 as dimensões de cada placa.

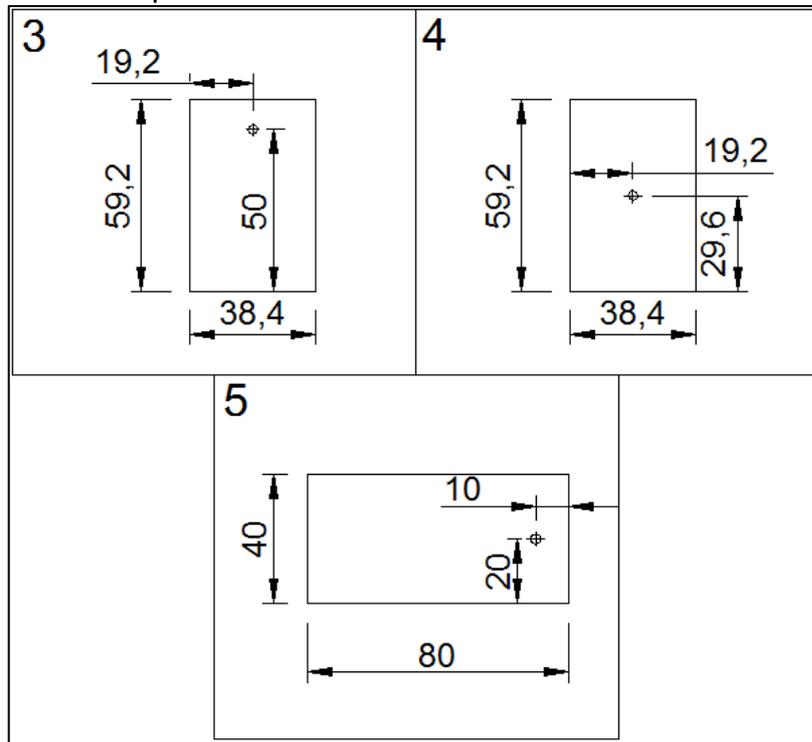
Tabela 3 – Descrição das placas de vidro utilizadas

Localização	Dimensão (mm) L X C X E	Presença de orifícios
1	800 x 592 x 8	não
2	800 x 592 x 8	não
3	384 x 592 x 8	sim
4	384 x 592 x 8	sim
5	400 x 800 x 8	sim
6	380 x 600 x 6	não

Fonte: Elaboração Própria

Foram feitos orifícios nas chapas 3, 4, 5, como apresentado, com a finalidade de encaixe da tubulação de água. Estes orifícios podem ser identificados e localizados conforme a Figura 12.

Figura 12 – Detalhes especiais

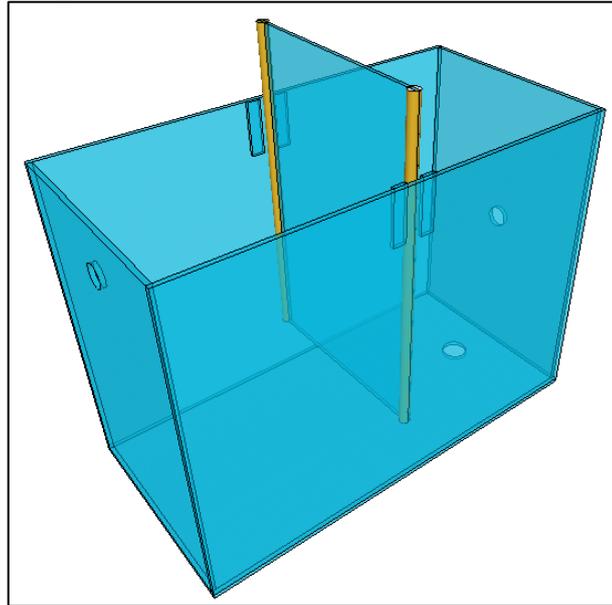


Fonte: Elaboração própria

Todas as placas de vidros foram encomendadas de uma empresa do município de Alegrete/RS.

Para o funcionamento correto deste equipamento a placa de nº 6 tem de ser móvel, verticalmente, para então simular as diversas situações em obras, como por exemplo, estaca prancha e núcleo impermeável de barragens de terra. Por este motivo nas bordas desta peça foram coladas borrachas, com o objetivo de vedar totalmente o contato placa móvel e parede de vidro, evitando, assim passagem de água nestes pontos e possibilitando seu movimento. A Figura 13 mostra em perspectiva as pelas de vidro que formam o aparato.

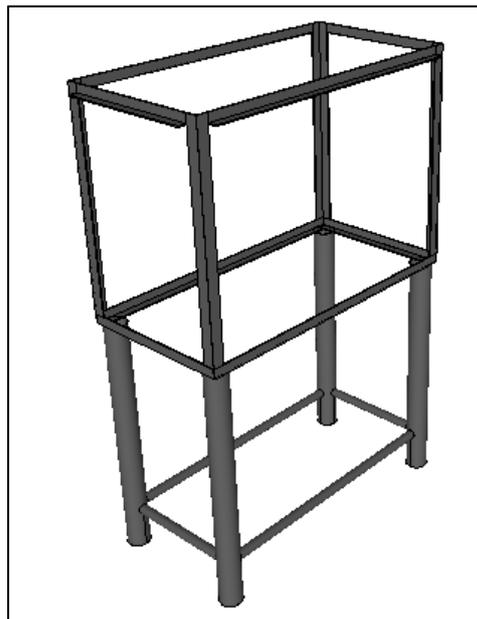
Figura 13 – Perspectiva gráfica



Fonte: Elaboração própria

Pelo fato de não se ter a noção da capacidade de suporte de um vidro temperado 8 mm, e também se somente a cola de silicone iria aguentar as forças causadas pelos materiais, foi desenvolvida a estrutura metálica no entorno do prisma que também servisse de base. Este conjunto, Figura 14, dividiu-se em duas partes básicas. São elas; estrutura para o vidro e suporte do aparato.

Figura 14 – Estrutura metálica



Fonte: Elaboração própria

A parte que serviu como estrutura do vidro foi feita de perfis L (cantoneiras) totalizando 12 peças, sendo 8 delas postas e soldadas entre si nos vértices das faces onde haviam encontro de vidros. As outras 4 foram soldadas um pouco abaixo dos bordos livres para impedir deformações excessivas do aparato. Estes perfis têm abas iguais a 3 cm e espessura de 0,25 cm. Na Tabela 4 estão descritos as unidades de cada comprimento utilizado.

Tabela 4 – Número de peças por comprimento

Unidades	Comprimento (cm)
2	81
2	41
2	75
2	35
4	57

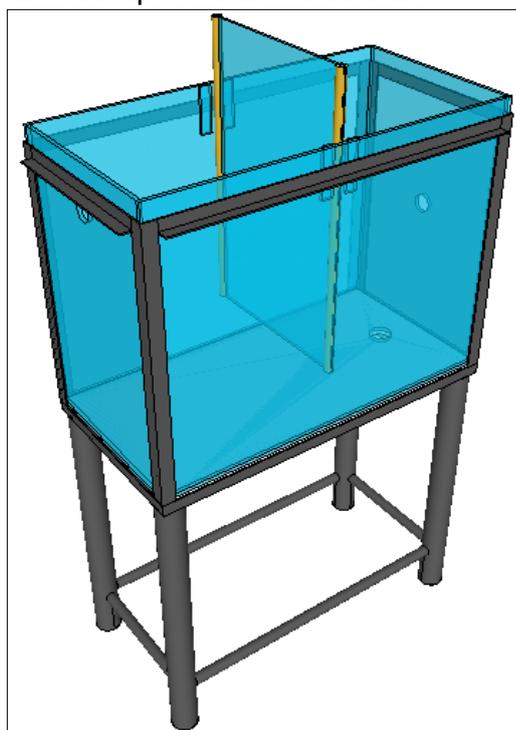
Fonte: Elaboração própria

Já o suporte foi constituído de peças tubulares de metal, soldadas entre si e na parte de molde para o vidro. Foram utilizadas 4 peças de diâmetro igual a 6,06 cm com 65 cm de comprimento que serviram de pilares de sustentação e 4 peças de diâmetro 2,67cm utilizadas como cinta para os 4 pilares, duas destas com 29 cm e as outras duas com 69 cm.

Considerando o volume dos materiais a serem usados no ensaio e o seus respectivos pesos, foi necessário o uso de uma folha de isopor sobreposta a 4 ripas de madeira para melhorar a distribuição das forças transmitidas do aparato para a estrutura metálica evitando com isto esforços excessivos na placa de vidro inferior.

A Figura 15 apresenta a perspectiva da estrutura do equipamento desenvolvido.

Figura 15 – Desenho gráfico do aparato desenvolvido



Fonte: Elaboração própria

Na sequência a estrutura do aparato, foram utilizadas peças especiais que compõem a parte hidráulica do equipamento, todas elas discriminadas no Quadro 2.

Quadro 2 – Peças hidráulicas especiais

	Descrição	Quantidade	Utilização
1	Torneiras de $\Phi 25$ mm	2	Entrada e Regulagem de nível de água
2	Flange de $\Phi 25$ mm	2	Suporte para torneiras
3	Flange de $\Phi 32$ mm	1	Início de tubulação de limpeza
4	joelho de $\Phi 32$ mm	1	Componente de tubulação de limpeza
5	Registro de Gaveta de $\Phi 32$ mm	1	Registro de tubulação de limpeza
6	Tubulação de $\Phi 32$ mm	1	Tubulação de limpeza
7	Adaptador de mangueira de $\Phi 32$ mm	1	Adaptador mangueira da tubulação de limpeza
8	Adaptador de mangueira de $\Phi 25$ mm	1	Adaptador para mangueira de entrada de água
9	mangueira de jardim de $\Phi 25$ mm	1	Mangueira para torneira de regulagem de nível
10	mangueira de jardim de $\Phi 32$ mm	1	Para entrada de água e limpeza
11	Redução rosqueável $\Phi 32$ mm x $\Phi 25$ mm	1	Adaptador para torneira da rede da Universidade

Fonte: Elaboração própria

Também, foi utilizado um recipiente pequeno graduado e quatro mangueiras cristal para a montagem do reservatório de pigmento.

Outros materiais foram de suma importância para o propósito de funcionalidade do equipamento. O Quadro 3 mostra os demais materiais juntamente com o seu uso na realização do equipamento.

Quadro 3 – Materiais extras necessários

	Material	Utilização
1	Silicone	Todas as vedações
2	Silicone para pvc	União das peças hidráulicas lisas
3	Fita Veda Rosca	Vedação das peças hidráulicas rosqueáveis
4	Geotextil	Filtros para saídas de água

Fonte: Elaboração própria

Com o equipamento de simulação de linhas de fluxo montado passou-se a realizar testes para verificar sua funcionalidade e para isto foi necessário os seguintes materiais;

- Álcool 92,8°INPM;
- Tinta para caneta de quadro branco.

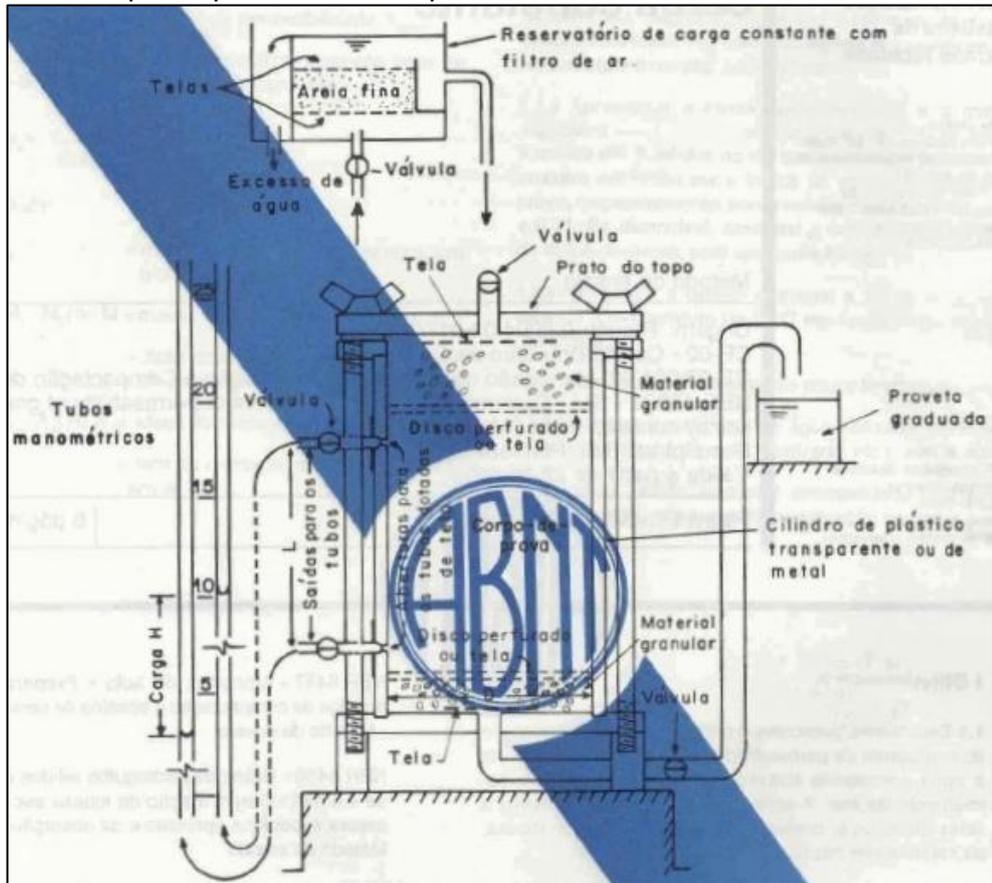
3.2.2 Ensaio de permeabilidade

De acordo com a NBR 13292 (ABNT, 1995) o ensaio de permeabilidade com carga constante requer;

- **Permeâmetro de Carga Constante:**
De diâmetro interno de no mínimo 8 vezes a dimensão máxima dos grãos maiores do solo, e no máximo 12 vezes a mesma dimensão. Possuir altura útil 50% a 100% mais que o diâmetro interno. O permeâmetro entre outros aspectos citados pela norma deve contar saídas para manômetros e bicos de entra e saída de água com válvulas.

Cabe salientar que na Norma, é apresentando dois tipos de permeâmetro. Nesta pesquisa, foi utilizado o permeâmetro tipo 1, conforme a Figura 16.

Figura 16 – Croqui do permeâmetro tipo 1



Fonte: NBR 13292 (ABNT, 1995)

- **Tela metálica**

Utilizada no interior do permeâmetro, serviu para separar as camadas de dreno da camada do solo em testes.

- **Reservatório de água**

Como não há restrições para este equipamento foi utilizado um reservatório de 10 litros com abertura superior para alimentação de água e uma torneira inferior para controle de vazão de saída.

- **Manômetros**

Foram utilizados dois manômetros com altura de 300 mm, fixados em suporte de madeira, e conectados nos pontos laterais do permeâmetro.

- **Proveta graduada**

Necessária na medição do tempo de enchimento, foi utilizado uma bureta graduada de 1000ml, sendo cronometrado o tempo de seu enchimento.

- **Cronômetro**

Utilizado na medição do tempo de enchimento da proveta. Por norma, anotação do tempo em segundos.

- **Termômetro**

Com precisão de 0,1°C foi utilizado para medir a temperatura da água a cada leitura do tempo de enchimento da proveta.

- **Balança**

Com precisão de 0,1g utilizada na determinação do peso do corpo de provas.

- **Filtro**

Conforme descrito na NBR 13292 (ABNT, 1995) foi utilizado como filtro um material mais permeável que o solo testado, neste caso pó de brita de granulometria variando entre 1,4mm a 2,0 mm.

- **Bomba a vácuo**

Com capacidade de aplicação de sucção a uma força de pressão de 50cmHg. Foi utilizada na saturação do corpo de prova.

A Figura 17 apresenta os materiais alguns dos materiais utilizados no ensaio de permeabilidade de solos granulares com permeâmetro de carga constante.

Figura 17 – Materiais descritos na NBR 13292



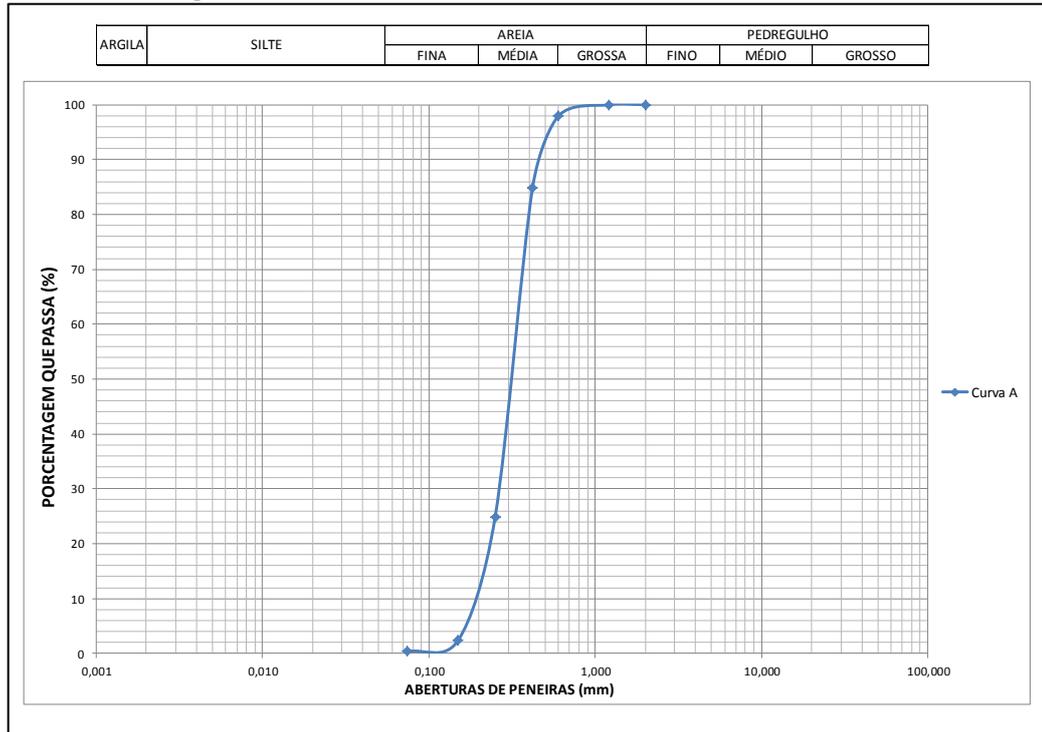
Fonte: Elaboração própria

3.2.3 Material utilizado como teste

Para a realização dos testes de simulação das linhas de fluxo e também do ensaio de permeabilidade de solos granulares foi utilizado como material ensaiado uma areia branca comum na região oeste do estado do Rio Grande do Sul de granulometria média a fina, conforme as Figuras 18 e 19.

Foi adotado este material com o propósito de facilitar a visualização das linhas de fluxo no momento do ensaio.

Figura 18 – Curva granulométrica



Fonte: Elaboração própria

Figura 19 – Areia utilizada nos testes dos equipamentos



Fonte: Elaboração própria

3.3 Procedimentos para realização dos ensaios

3.3.1 Teste de simulação das linhas de fluxos

- *Montagem da estrutura:*

Partindo da estrutura metálica apresentada foram posicionadas as tabuas de madeira na primeira camada, e para regularização posta na segunda camada, a folha de isopor. Desta forma as forças geradas dissiparam-se para estrutura sem danificar os vidros.

Na sequência foi posicionada a chapa de fundo e sobre ela foram coladas as outras quatro placas em suas respectivas posições. Para a cola foi utilizado um adesivo selante de silicone de cura acética de multiuso.

Após a fixação das quatro placas com o fundo e entre si, foi aplicada em todos os vértices uma camada de silicone, para uma vedação completa de qualquer falha, e deixando sempre o silicone comprimido com o auxílio do peso das placas.

Com a estrutura principal do aparato montada, colada e vedada, instalaram-se então as partes hidráulicas. As peças de 25 mm foram instaladas nas laterais e as peças de 32 mm no fundo para limpeza.

Com relação à placa móvel, foi utilizada cola de contato para a fixação das tiras de borracha e após cola de silicone para a vedação. Esta placa foi então posta no centro do aparato de forma a ficar perpendicularmente a maior face lateral com seu movimento vertical livre.

Quanto à rede hidráulica a mangueira de entrada de água foi instalada na rede de abastecimento água, a mangueira de controle de nível conectada e a saída pra limpeza acoplada ao sistema de esgoto.

Por fim, em um recipiente graduado instalou-se no seu fundo as quatro mangueiras cristal. Este objeto foi utilizado na simulação como reservatório de pigmento.

- *Procedimentos para realização do ensaio:*

Para a realização do ensaio, foi aberta a torneira de entrada de água, enquanto o registro de gaveta e a torneira de controle de nível estavam fechados fazendo com que enchesse de água o aparato. Sendo realizado assim o primeiro teste – *teste de estanqueidade*.

Na sequência posicionou-se a placa central na altura requerida, deixando em torno de 10 cm de espaço entre a base da placa central e o fundo do aparato. Posteriormente, será neste espaço que a água e o pigmento de tinta irão percolar.

Com o nível de água acima da metade do aparato, despejou-se a areia lavada de tal modo que o lado que possui a entrada (montante) de água fique com mais solo que lado oposto (jusante).

Após o derramamento da areia, foi aberta a torneira de controle de nível de água, fazendo com que a altura de água diminuísse até atingir o nível da torneira, para um melhor resultado, a vazão de entrada de água teve de ser regulada a partir da vazão de saída, aproximando-se uma da outra.

Com os níveis constantes foi instalado o recipiente com as mangueiras de cristal em uma das paredes do aparato. Para a inserção das mangueiras no interior da areia, foi colocada água no recipiente, retirando o ar de dentro das mangueiras e então as fixando na camada de solo junto à parede de vidro em uma das laterais. Este procedimento foi realizado para as quatro mangueiras.

À medida que o nível de água de dentro do recipiente foi baixando, foi sendo completo, a ponto de ficar em um nível constante, com a solução de álcool 92,8°INPM e tinta de caneta para quadro branco. Este nível foi mantido para registro fotográfico e análise das redes de fluxo.

3.3.2 Ensaio de permeabilidade para solos granulares

Com os materiais já descritos separados iniciou-se então a preparação para o ensaio conforme descrito na NBR 13292 (ABNT, 1995).

Desta forma, foi medido a altura e o diâmetro do permeâmetro, anotando os valores. Foi então pesado o permeâmetro com os filtros e tarado, para determinação da massa do solo dentro do corpo de provas. Após, foi retirados os matérias deixando os separados para reutilização.

Com isto, foi colocado no fundo uma base de pó-de-brita compactada chegando a uma espessura de 2 a 3 cm. Na parte superior a camada drenante colou-se a tela metálica para separar uma camada da outra, evitando que ambas se misturassem podendo assim causar uma diminuição da permeabilidade.

Por cima da tela metálica foi despejado com o auxílio do funil a areia pesada e separada até ficar 2 cm da parte superior do permeâmetro. Neste espaço restante

foi colocada a outra tela metálica e o preenchimento total com outra camada de pó-de-brita compactada. Então foi posicionada a parte superior do permeâmetro sendo fixado com as hastes laterais, como apresentado na Figura 20.

Figura 20 – Corpo de prova pronto para o ensaio



Fonte: Elaboração própria

Foi conectado o reservatório de água com a rede hidráulica através de uma mangueira necessária para o controle de vazão. Este reservatório então conectado na parte inferior do permeâmetro com o registro fechado.

Com o registro inferior e os registros laterais fechados, instalou-se a bomba de vácuo na parte de superior do permeâmetro. Após, foi aberto o registro superior e acionada a bomba a uma força de sucção de 50cmHg por 10 minutos. Então, foi aberto o registro inferior permitindo a passagem da água para dentro do corpo de prova.

Neste momento inicia-se a elevação do reservatório, até que ele atinja sua cota final.

No momento de saturação total do corpo de prova, como mostrado na Figura 21, a bomba foi desligada e os registros fechados para então efetuar-se a troca da posição da ligação do reservatório, passando agora para o registro superior e sendo acoplado ao registro inferior uma mangueira para auxílio do enchimento da proveta. Por fim foram abertos os registros laterais.

Figura 21 – Corpo de prova saturado



Fonte: Elaboração própria

Porém, alguns cuidados tiveram de ser tomados, principalmente com relação as alturas manométricas, neste caso a retirada de toda e qualquer bolha de ar do interior das mangueiras, pois constatou-se que com a presença delas elevaria o percentual de erro.

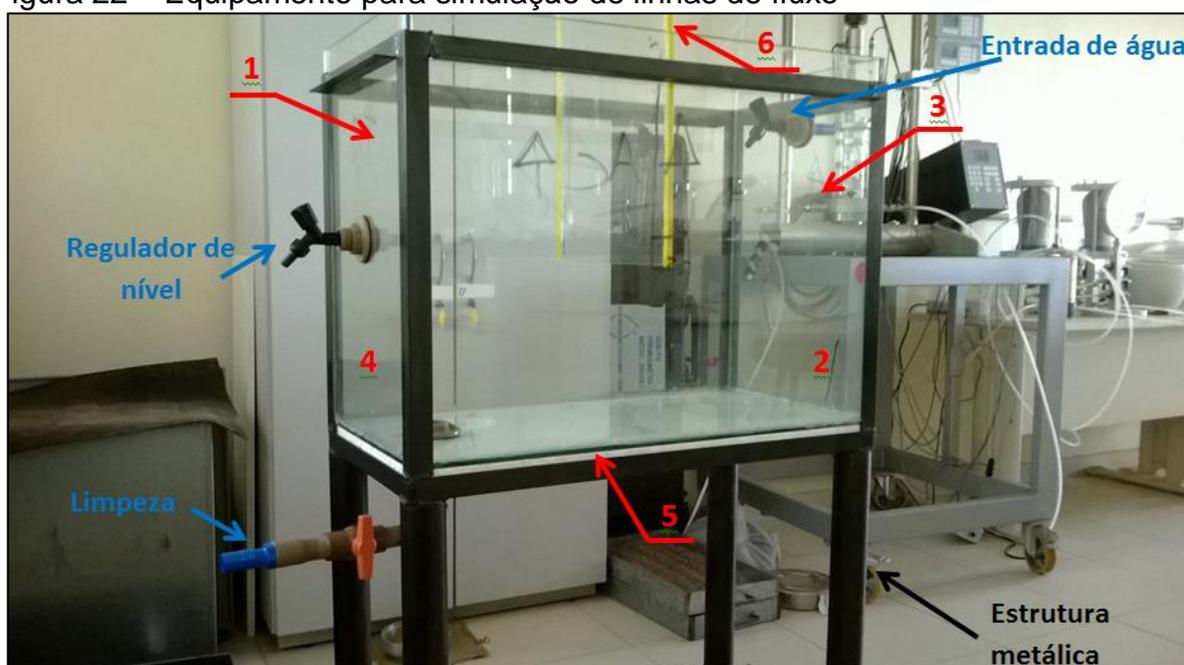
Desta forma, para o início das leituras esperou-se um nível constante do reservatório e dos manômetros, de forma que a cada leitura foi medido a temperatura da água. Todos os valores obtidos foram anotados para análise e cálculo do coeficiente de permeabilidade.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 Resultados da simulação das linhas de fluxo.

Após a montagem do aparato, como descrito no capítulo 3, obtivemos um equipamento conforme apresentado na Figura 22.

Figura 22 – Equipamento para simulação de linhas de fluxo



Fonte: Elaboração própria

Os números marcados em vermelho representam a numeração das placas conforme a Figura 11 do Capítulo 3. Quanto às peças marcadas em azul são as três partes hidráulicas do aparato (entrada de água, saída de água e limpeza). Já a estrutura metálica está assinalada em preto.

A partir deste momento, ligaram-se as mangueiras na rede e iniciaram-se os testes de estanqueidade. Nos pontos que não estavam completamente estanques foi aplicada uma camada de silicone na mesma hora.

Na sequência, após o derramamento de areia, foi aplicado o processo de rebaixamento de nível de água pela saída de controle, obtendo com isto a diferença de nível da parte de entrada com a parte de saída.

Desta forma, através das forças internas a água busca nivelar-se novamente, porém, ela precisa passar pela camada de areia. Este movimento cria caminhos de

características semelhantes, mas não idênticas. A cada fronteira destes movimentos surgem as linhas de fluxo.

Estas linhas não são perceptíveis sem uma forma de pigmentação junto a areia. Para isto, o uso do reservatório da solução tinta com álcool.

Após a imersão das mangueiras e a colocação da mistura álcool e tinta no reservatório, pode-se então observar o surgimento dos traços que formaram as linhas de fluxo nos teste. As Figuras 23 e 24 apresentam os dois testes realizados para esta simulação.

Figura 23 – Primeiro teste de simulação



Fonte: Elaboração própria

Figura 24 – Segundo teste



Fonte: Elaboração própria

As imagens mostram a formação das linhas em dois testes distintos. A Figura 23 tem suas linhas em azul e podem-se observar algumas manchas arredondadas

no solo, isto devido ao fato que o reservatório aplica uma pressão maior que o nível de água por estar acima deste.

Já na Figura 24, segundo teste realizado com tinta vermelha, as manchas arredondadas não aparecem. Isto devido ao fato do pigmento ser aplicado após a imersão das mangueiras, sendo possível a observação das linhas partindo mais próximo da superfície do solo.

As Figuras 25, 26 e 27 ilustram outros testes realizados.

Figura 25 – Detalhe das mangueiras e do início do surgimento das linhas de fluxo



Fonte: Elaboração própria

É apresentado na Figura 25 todo o equipamento em funcionamento, e pode-se ver ainda as mangueiras imersas no solo juntamente com o local onde está a saída da tinta.

Figura 26 – Reservatório de tinta



Fonte: Elaboração própria

Na Figura 26 o reservatório de tinta e a posição das mangueiras cristal. Neste foi mantido um nível quase que constante de tinta, para evitar o aparecimento das manchas arredondadas.

Figura 27 – Quatro linhas de fluxo traçadas ao longo do solo



Fonte: Elaboração própria

Na Figura 27 é possível notar a diferença dos níveis de água e a principal função da placa de vidro central. Notam-se também as partes hidráulicas e suas funções.

4.2 Resultados do ensaio de permeabilidade para solos granulares

Conforme os passos descritos na NBR 13292 (ABNT, 1995) foi realizado a medição de diâmetro e altura do permeâmetro. Para estes dados foram encontrado 15,7 cm e 21,7 cm respectivamente.

Com estes valores obtivemos para a área do permeâmetro um valor aproximadamente igual a 193,6 cm² e um volume de 5265,7 cm³.

Visando a determinação da massa total do solo em teste mediu-se o peso do permeâmetro mais as duas camadas de filtro e na sequência o permeâmetro pronto para ensaio. Os valores encontrados foram 17100 g para o permeâmetro sem solo e 24360 g para permeâmetro com solo. Desta forma a massa total do solo é igual a 7260 g.

Conhecendo o solo testado adotou-se como densidade real dos grãos (G) um valor igual a 2,65 e como massa específica da água igual a 1g/cm³.

Com estes dados foram calculados os seguintes parâmetros: Massa específica natural do solo (γ_s), índice de vazios (e_0), Volume dos sólidos (V_s), Densidade real dos grãos (G) conforme Quadro 4.

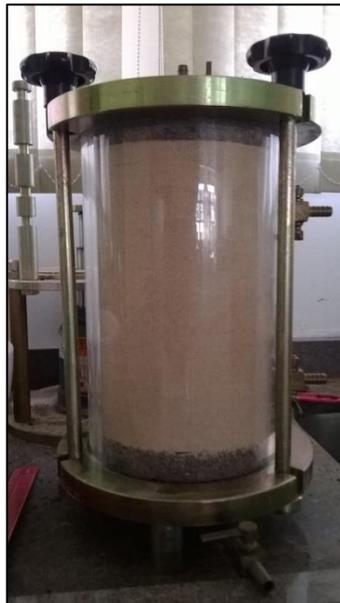
Quadro 4 – Índices físicos do solo

γ_s (g/cm ³)	1,7
e_0	0,5
V_s (cm ³)	2739,6
G	2,65

Fonte: Elaboração própria

Após os procedimentos de preparo do corpo de prova com os dois filtros e o solo em questão, foi medida a altura que o solo atingia, este valor é igual a 21,7 cm. Portanto o volume estimado de solo teste é de 4201,1 cm³. A Figura 28 mostra o permeâmetro com o corpo de prova ainda seco.

Figura 28 – Corpo de prova concluído e não saturado.



Fonte: Elaboração própria

Com a montagem do equipamento e também do corpo de prova, e após a execução de todos os procedimentos já descritos, fez-se com que o reservatório atingisse um nível constante e os manômetros se estabilizassem.

A partir disto pode-se iniciar uma série de leituras medindo-se então a vazão de saída do corpo de prova. A Tabela 5 apresenta as leituras realizadas de tempo, temperatura e alturas dos dois manômetros.

Tabela 5 – Leituras para cálculo de k

	Tempo (s)	Temperatura (°C)	h1 (cm)	h2 (cm)
1	45,33	29	26	4
2	45,28	29	27	5
3	46,13	29	27	4
4	46,78	29	28	6
5	47	29	27	5

Fonte: Elaboração própria

Todas as leituras de tempo realizadas são para um volume igual a 1000 cm³ medido e controlado na proveta, conforme Figura 29.

Figura 29 – Proveta utilizada para controle de volume



Fonte: Elaboração própria

Desta forma então, a Tabela 6 apresenta os valores do coeficiente k obtidos para as temperaturas lidas bem como o mesmo coeficiente para a temperatura de 20°C, conforme NBR 13292 (ABNT, 1995).

Tabela 6 – Valores do coeficiente k obtidos

	k t°C (cm/s)	k 20°C (cm/s)
1	0,112	0,091
2	0,113	0,091
3	0,106	0,086
4	0,109	0,088
5	0,108	0,088

Fonte: Elaboração própria

Para a determinação do coeficiente k a uma temperatura de 20°C foi aplicado a correlação conforme o Anexo A. Calculando a média dos coeficientes k a uma temperatura de 20°C obteve-se um resultado igual a 0,08 cm/s.

Para Das (2011) e Pinto (2006) consentem que para as areias médias o valor de k é dado na ordem de 0,01. Desta forma o valor médio obtido neste ensaio esta dentro do intervalo indicado pelos autores para o tipo de solo, ou seja, para areias médias.

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS E SUGESTÕES

Neste capítulo são apresentadas as conclusões referentes aos procedimentos realizados para cada ensaio e na sequência são dadas sugestões para próximas pesquisas.

5.1 Conclusões

Com base no exposto neste trabalho, algumas conclusões podem ser extraídas com relação ao desenvolvimento do método para simulação das linhas de fluxo em solo saturado e do ensaio de determinação do coeficiente de permeabilidade de solos granulares à carga constante.

No entanto, os métodos criados bem como o próprio aparato se mostraram eficientes naquilo que lhe foi desejado – simular e visualizar a partir da diferença de nível de água o caminho que esta faz no interior de um solo.

Porém, devido ao fato de não ter sido baseado em outras pesquisas o desenvolvimento do equipamento teve elevado grau de complexidade. Diversas dúvidas e problemas surgiram no decorrer da sua execução.

A execução desta estrutura foi outro problema, pois não se poderia colar os vidros e então soldar a estrutura, pois o risco era grande de estourar uma das placas devido às altas temperaturas que as soldas alcançam. Com isto, a estrutura tomou forma somente com as dimensões dos vidros sem a presença dos mesmos.

Por fim, se enfrentou a dificuldade na escolha do melhor pigmento para o traço das linhas, pois tinha que ser um material pouco denso e que de certa forma demorasse ou não se misturasse com a água, correndo o risco de a linha ser diluída antes de completar seu percurso. Foram testadas anilina em pó e a tinta para caneta de quadro branco diluídas em álcool.

Ambas se dissolveram bem no álcool, porém a anilina quando entrava em contato com a água, voltava ao seu aspecto original, ou seja, voltava a virar pó, fazendo com o que entupisse os vazios da areia por onde a água deveria passar.

Já a tinta neste quesito não apresentou problema, desde que diluída em álcool 92,8°INPM, caso contrário, a tinta não se misturava e ainda por cima ficava em diversos pedaços soltos.

Embora todos os problemas e o grau de dificuldade enfrentado, os objetivos de projetar, execução e construção de aparato que possibilitasse simulação das linhas de fluxo, bem como os testes realizados neste equipamento, foram alcançados com êxito.

Ao contrário do aparato para a visualização das linhas de fluxo montado nesta pesquisa, o ensaio para a Determinação do coeficiente de permeabilidade de solos granulares a carga constante é normatizado pela NBR 13292 (ABNT, 1995).

Seguindo o recomendado pela norma, o coeficiente de permeabilidade a uma temperatura de 29°C foi de 1,10E-01 cm/s. Como a norma prevê o coeficiente padronizado a temperatura de 20°C foi obtido um resultado de 0,08 cm/s.

Todos os quesitos descritos nas normas foram seguidos e atendidos e o resultado do coeficiente de permeabilidade para o solo usado para os testes esta dentro das faixas descritas pela bibliografia técnica. Não havendo assim, problemas que interferissem gravemente nos resultados obtidos.

Embora o ensaio não tenha sido instalado em um lugar definitivo, e somente montado para este trabalho, concluiu-se que ele está em perfeitas condições de uso tanto para fins didáticos quanto para pesquisas futuras.

5.2 Sugestões

Com intuito de dar continuidade aos fatos apresentados nesta pesquisa sugere-se para pesquisas futuras, os seguintes tópicos;

- Simular as linhas de fluxo utilizando solos de obras que necessitam o conhecimento deste fator;
- Simular as linhas de fluxo no equipamento aqui desenvolvido, porém tomando o formato de barragem;
- Simular as linhas de fluxo, tomando o formato de talude;
- Montar e realizar testes com o permeâmetro de carga variável junto ao Laboratório de Geotecnia e Pavimentação da Universidade Federal do Pampa;

- Determinar a constante de permeabilidade dos solos da região;
- Criar um banco de dados das características hidráulicas do solo que possa ser acessado por todos.

REFERÊNCIAS

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT): **NBR 6458**: Grãos de pedregulho retidos na peneira de 4,8mm – determinação da massa específica, da massa específica aparente e da absorção de água. Rio de Janeiro, 1984.

____. **NBR 6508**: Grãos de solos que passam na peneira de 4,8mm – determinação da massa específica. Rio de Janeiro, 1984.

____. **NBR 7181**: Solo – Análise granulométrica. Rio de Janeiro, 1984.

____. **NBR 6457**: Amostras de solos – Preparação para ensaios de compactação e ensaio de caracterização. Rio de Janeiro, 1986

____. **NBR 6502**: Rochas e solos. Rio de Janeiro, 1995.

____. **NBR 12051**: Solo – Determinação do índice de vazios mínimos de solos não coesivos – método de ensaio. Rio de Janeiro, 1991.

____. **NBR 13292**: Solo – Determinação do coeficiente de permeabilidade de solos granulares à carga constante – método de ensaio. Rio de Janeiro, 1995.

____. **NBR 14545**: Solos – Determinação do coeficiente de permeabilidade de solos argilosos a carga variável. Rio de Janeiro, 2000.

BARATA, Fernando Emmanuel. **Cadeira de materiais de construção disciplina de mecânica dos solos**. Rio de Janeiro – RJ: UFRJ, 1967.

BIASSUSI, Marcelo. **Simulação do movimento da água no solo utilizando modelo numérico**. Porto Alegre - RS: UFRGS, 2001. p. 84.

BREWER, R.; SLEEMAN, J. R. Soil structure: attempts at its quantitative characterization. **Journal of Soil Science**, 1960, n. 11, p. 172-185.

BUENO, B. S.; VILAR, O. M. **Mecânica dos Solos**. Viçosa - MG: Imprensa Universitária Universidade Federal de Viçosa (UFV), 1980, p. 131.

CAPUTO, Homero Pinto. **Mecânica dos solos e suas aplicações**. Rio de Janeiro – RJ: LTC, 2008.v. 2, 6. ed.

____. **Mecânica dos solos e suas aplicações**. Rio de Janeiro – RJLTC, 2011. v. 1, 6.Ed.

CRAIG, Robert F. **Craig Mecânica dos Solos**. Rio de Janeiro – RJ: LTC, 2007. 7. ed., p. 365.

NOTAS de Aula do Prof. Me. Magnos Baroni.

CRUZ, Paulo Teixeira da.**100 Barragens brasileiras: casos histórico, materiais de construção, projeto**. São Paulo – SP: Oficina de Textos, 1996.

DAS, Braja M. **Fundamentos de Engenharia Geotécnica**. São Paulo – SP: Cengage Learning, 2011.

KLAMT, Rodrigo André. **Utilização da cal e da cinza da casca de arroz no melhoramento das propriedades geotécnicas de solos**. Alegrete – RS: UNIPAMPA, 2012.

LOPES, Francisco R. **Percolação nos Solos**Notas de apoio às aulas.Rio de Janeiro – RJ:COPPE/UFRJ, 2007.v 1.3.

LIU, Cheng; EVETT, Jack B. **Soils and foundations**. New Jersey – USA: Pearson Prentice Hall, 2008.

MARTINS, Adriana P. de Souza. **Estudo da influência das interações físico-químicas no comportamento mecânico de dois solos tropicais do município de Ouro Preto-MG**. Rio de Janeiro – RJ: COPPE/UFRJ, 2005.

MCCARTHY, David F. **Essentials of soil mechanics and foundations: basic geotechnics**.New Jersey – USA: Pearson Prentice Hall, 2006.

MELO, Lucyana Vieira de. **Comportamento tensão – deformação – resistência de solos compactados dos núcleos das barragens Engº Armando Ribeiro Gonçalves (RN) e Bocaina (PI)**. Rio de Janeiro – RJ: COPPE/UFRJ, 1986.

MIRANDA, Stéfano de Amorim. **Análise paramétrica do regime de fluxo numa barragem de terra assente em solos permeáveis: estudo de caso PCH Canoa Quebrada.** Ouro Preto – MG: UFOP, 2009.

PAZZETTO, Morgane Brogni. **Estudo da permeabilidade de solos argilosos disponíveis para recuperação de áreas degradadas pela mineração de carvão no sul de Santa Catarina.** Criciúma – SC: UNESC, 2009.

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

PINTO, C.S.; GOBARA, W., PERES, J.E.E; NADER, J.J. Propriedades dos Solos Residuais. **Solos do Interior de São Paulo.** São Carlos: ABMS/USP, 1993. Cap5, v. 1, p. 95-142.

RODRIGUES, Ricardo Eguilhor. **Caracterização e estabilização de um solo na cidade de Alegrete/RS com cimento Portland e cinza de casca de arroz.** Alegrete – RS: UNIPAMPA, 2012.

SILVEIRA, João Francisco Alves. **Instrumentação e segurança de barragens de terra e enrocamento.** São Paulo: Oficina de Textos, 2006.

SUERTEGARAY, Dirce Maria Antunes. Natureza, Produção e Sustentabilidade: e O Rio Grande do Sul Descobre Seus Desertos. **Ciência e Ambiente**, Ed. UFSM e UNIJUI, v 11, n. 2, p. 33-52, 1995.

SOARES, Anderson Borghetti. **Fluxo de água em talude arenoso: Modelagem física e numérica.** Rio de Janeiro – RJ: COPPE/UFRJ, 2006.

APÊNDICE A – Planilha de permeabilidade a carga constante

Permeâmetro nº.		Tara + solo seco (g)	24360
Diâmetro (cm)	15,7	Tara (g)	17100
Área (cm ²)	193,59	Ws (g)	7260
Altura CP(cm)	21,7	G	2,65
Volume Inicial (cm ³)	4201,0	Vs (cm ³)	2739,62
γ_s (g/cm ³)	1,73	Hs (cm)	14,15
e_0	0,53	Viscosidade Nt(g.s/cm ²)	8,178
γ_w (g/cm ³)	1	Viscosidade N20º(g.s/cm ²)	10,09

Tensaio°C	29
T a 20°C	20

<i>Dados do corpo de Prova</i>	1	2	3	4	5
<i>Altura (cm)</i>	21,7	21,7	21,7	21,7	21,7
<i>Área (cm²)</i>	193,59	193,59	193,59	193,59	193,59
<i>Altura constante 1 (cm)</i>	26	27	27	28	27
<i>Altura constante 2 (cm)</i>	4	5	4	6	5
<i>h= HF-HI (cm)</i>	22	22	23	22	22
<i>Tempo do ensaio (seg)</i>	45,33	45,28	46,13	46,78	47
<i>Volume (cm³)</i>	1000	1000	1000	1000	1000
<i>Coef. PermenbilidadeKt (cm/seg)</i>	1,12E-01	1,13E-01	1,06E-01	1,09E-01	1,08E-01
<i>Temperatura do ensaio (°C)</i>	29	29	29	29	29
<i>Coef. PermenbilidadeK20 (cm/seg)</i>	9,11E-02	9,12E-02	8,56E-02	8,83E-02	8,79E-02
<i>K20 médio (cm/seg)</i>	8,88E-02				

ANEXO A – Relação de viscosidade da água

Temperatura (°C)	$V_t/V_{20^\circ\text{C}}$									
	0,0	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9
8	1,374	1,370	1,366	1,362	1,358	1,354	1,352	1,348	1,344	1,340
9	1,336	1,332	1,328	1,325	1,321	1,318	1,314	1,310	1,306	1,302
10	1,298	1,259	1,292	1,288	1,284	1,281	1,277	1,273	1,269	1,266
11	1,262	1,259	1,256	1,252	1,249	1,245	1,241	1,238	1,234	1,231
12	1,227	1,224	1,221	1,218	1,215	1,211	1,208	1,205	1,202	1,198
13	1,195	1,192	1,189	1,186	1,183	1,180	1,177	1,174	1,170	1,167
14	1,165	1,162	1,159	1,156	1,153	1,150	1,147	1,144	1,141	1,138
15	1,135	1,132	1,129	1,126	1,123	1,121	1,118	1,115	1,112	1,109
16	1,106	1,103	1,100	1,098	1,095	1,092	1,089	1,086	1,084	1,081
17	1,078	1,075	1,073	1,070	1,067	1,064	1,062	1,059	1,056	1,054
18	1,051	1,048	1,046	1,043	1,041	1,038	1,035	1,033	1,030	1,028
19	1,025	1,023	1,020	1,018	1,015	1,013	1,010	1,008	1,005	1,003
20	1,000	0,998	0,995	0,993	0,991	0,989	0,986	0,984	0,982	0,979
21	0,975	0,973	0,971	0,968	0,966	0,964	0,961	0,959	0,957	0,954
22	0,952	0,950	0,948	0,945	0,943	0,941	0,939	0,937	0,934	0,932
23	0,930	0,928	0,926	0,923	0,921	0,919	0,917	0,915	0,912	0,910
24	0,908	0,906	0,904	0,902	0,900	0,898	0,895	0,893	0,891	0,889
25	0,887	0,885	0,883	0,881	0,879	0,877	0,875	0,873	0,871	0,869
26	0,867	0,865	0,863	0,861	0,859	0,857	0,855	0,853	0,851	0,849
27	0,847	0,845	0,843	0,841	0,839	0,838	0,836	0,834	0,832	0,830
28	0,828	0,826	0,825	0,823	0,821	0,820	0,818	0,816	0,814	0,813
29	0,811	0,809	0,807	0,806	0,804	0,802	0,800	0,798	0,797	0,795
30	0,793	0,791	0,789	0,788	0,786	0,784	0,782	0,780	0,779	0,777
31	0,776	0,775	0,773	0,772	0,770	0,768	0,767	0,765	0,763	0,762

Fonte: NBR 13292 (ABNT, 1995 p. 7)