

**UNIVERSIDADE REGIONAL DO NOROESTE DO
ESTADO DO RIO GRANDE DO SUL**

DEPARTAMENTO DE TECNOLOGIA

Curso de Engenharia Civil

Francielle Diemer

**ESTUDO DA PERMEABILIDADE DO SOLO DA REGIÃO DE
IJUÍ – RS PERCOLANDO ÁGUA E ÓLEO DIESEL**

Ijuí/RS

2008

Francielle Diemer

**ESTUDO DA PERMEABILIDADE DO SOLO DA REGIÃO DE
IJUÍ – RS PERCOLANDO ÁGUA E ÓLEO DIESEL**

**Trabalho de conclusão de curso de Engenharia
Civil apresentado como requisito parcial para
obtenção do grau de Engenheiro Civil.**

**Ijuí
2008**

Trabalho de conclusão de curso defendido e aprovado em sua forma final pelo professor orientador e pelos membros da banca examinadora.

Prof. Luciano Pivoto Specht, Dr. - Orientador
UNIJUI/DeTec

Banca Examinadora

Prof. Marcelo Adriano Duarte, Msc
UNIJUI/DeTec

Prof. Marco Antonio Pinheiro, Dr.
UNIJUI/DeTec

Agradecimento

Grandes pessoas estiveram ao meu lado durante estes 6 anos de graduação, pessoas especiais que merecem muito mais do que um pequeno agradecimento. Por isso, não declaro aqui somente minha profunda gratidão a elas, mas principalmente a certeza de que irão no meu coração para sempre.

Agradeço aos meus pais Paulo e Carla, pelo amor que sempre me fizeram seguir em frente, pela excelente educação, pelo exemplo de dignidade e honestidade que tanto me orgulham, por ter mantido a firmeza diante de dificuldades impensáveis, e principalmente, por me apoiar, sempre. Tudo que conquistei até hoje eu devo à vocês, super mãe e super pai! Amo vocês muito!

À minha irmã Mariana, que sempre esteve junto comigo nestes anos de graduação me apoiando e me ajudando sempre que precisei.

À todos os colegas, ex-colegas e amigos do Curso de Engenharia Civil, especialmente aos Laboratoristas Salete e Luis, pela grande amizade, pelas boas conversas, e por sempre estarem dispostos a me ajudar, independentemente das condições. Aos amigos Dimas, André, Jaelson, por todo auxílio nos ensaios e conhecimentos repassados, ao Diego, Fernando Boeira, Mariane, Tamile, Cauana, Carina, Paula, Joana, Laura Miron, Ricardo Rupp, Ricardo Novroth, Simone, Dona Tereza pelo companheirismo e amizade.

Ao meu orientador Luciano Pivoto Specht, pelos inúmeros ensinamentos dentro e fora da sala de aula, pela confiança a mim depositada nestes dois anos e meio de trabalho como bolsista de iniciação científica, pela amizade e palavras de estímulo.

Ao Professor Nilo Cezar Consoli e ao mestrando em geotecnia Carlos Emmanuel Ribeiro Lautenschlager da UFRGS pelo apoio nos ensaios realizados e ensinamentos repassados.

Por fim, agradeço a Deus, que me manteve firme na luta, me dando força e me mostrando a cada momento que sempre é possível chegar onde se deseja!

RESUMO

O solo na construção civil tem uma ampla utilização por estar disponível em abundância na natureza. Porém para que ele possa ser empregado em obras de engenharia corretamente precisamos conhecer alguns requisitos no tocante à resistência, à compressibilidade e a hidráulica dos solos. O conhecimento do coeficiente de condutividade hidráulica (k) dos solos é essencial para qualquer obra de engenharia, principalmente quando se deseja estimar a vazão que percolará através de um maciço, em obras de barragens, barreiras impermeáveis e até mesmo em camadas impermeabilizantes de aterros sanitários. Seguindo este contexto, esse trabalho buscou estudar o comportamento hidráulico do solo da região de Ijuí-RS, em seu estado natural e compactado, avaliando assim o efeito da estrutura, para avaliar sua utilização em barreiras impermeáveis. Para cumprir com os objetivos propostos foram realizados ensaios de condutividade hidráulica em permeâmetro de parede flexível no ENVIRONGEO - Laboratório de Engenharia Geotécnica da Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS) – e ensaios de condutividade hidráulica em permeâmetro de parede rígida de carga variável no Laboratório de Engenharia Civil (LEC) da Universidade Regional do Noroeste do Estado do Rio Grande do Sul (UNIJUÍ). Ambos os ensaios servem para estimar o k deste solo em seu estado natural e compactado nas três energias de compactação. A partir dos ensaios verificou-se que as amostras ensaiadas na condição natural no equipamento de parede flexível apresentaram um k na ordem de 10^{-4} m/s e a amostra ensaiada em permeâmetro de parede rígida apresentaram um k na ordem de 10^{-7} m/s e, quando compactado na energia normal, passa ter um k abaixo de 10^{-9} m/s, que, segundo Head 1980, solos com (k) acima de 10^{-9} m/s são considerados impermeáveis. Com os resultados apresentados, conclui-se que este solo em seu estado compactado pode ser utilizado como barreira impermeável no caso de contenção de plumas de contaminação e/ou derramamento de resíduos ou ainda com barreira em aterros sanitários.

Palavras-chave: condutividade hidráulica; contaminação de solos; solo argiloso; óleo diesel.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Água percolando num permeâmetro	19
Figura 2: Esquema de permeâmetro de carga constante.....	20
Figura 3: Esquema de permeâmetro de carga variável.....	21
Figura 4: Províncias geomorfológicas.....	39
Figura 5: Perfil com os horizontes do solo	40
Figura 6: Distribuição granulométrica do solo em estudo.....	41
Figura 7: Curvas de compactação do solo.....	42
Figura 8: Amostra de solo indeformada sendo moldada para ensaio.....	44
Figura 9: Vista geral dos permeâmetros instalados em um capela de exaustão de gases.....	46
Figura 10: Permeâmetro.....	46
Figura 11: Equipamento de permeabilidade de parede flexível – ENVIRONGEO/ UFRGS..	48
Figura 12: Trado	52
Figura 13: Escarificador.....	52
Figura 14: Tubo acoplador	52
Figura 15: Esquema de ensaio em furo de sondagem.....	53
Figura 16: Seqüência de execução do ensaio em furo de sondagem.....	53
Figura 17: Coeficiente Condutividade Hidráulica do solo do Campus	55
Figura 18: Resultado das leituras do ensaio da amostra indeformada	57
Figura 19: Coeficiente de Condutividade Hidráulica – EN.....	58
Figura 20: Coeficiente de Condutividade Hidráulica – EI.....	59
Figura 21: Coeficiente de Condutividade Hidráulica – EM.....	60
Figura 22: Média dos resultados encontrados nas 3 energias de compactação.....	61
Figura 23: Energia <i>versus</i> k.....	62
Figura 24: Índice de vazios <i>versus</i> k	62
Figura 25: Locais ensaiados no talude do Campus	63
Figura 26: Condutividade Hidráulica Talude do Campus	64
Figura 27: Local do ensaio da Rua José Gabriel	64
Figura 28: Condutividade Hidráulica Rua José Gabriel	65
Figura 29: Local do ensaio da Rua Venâncio Aires nº 236	66
Figura 30: Condutividade Hidráulica Centro	67
Figura 31: Média dos resultados	67

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Classificação dos solos segundo seu coeficiente de permeabilidade.....	24
Tabela 2: Valores típicos de permeabilidade	24
Tabela 3: Propriedades físicas médias do solo	41
Tabela 4: Resultado dos ensaios de compactação	42
Tabela 5: Informações sobre o óleo diesel	43
Tabela 6: Parâmetros utilizados para moldagem das amostras compactadas	58
Tabela 7: Resumo dos Coeficientes de Condutividade Hidráulica	60
Tabela 8: Propriedades físicas médias do solo	65
Tabela 9: Propriedades físicas médias do solo	66

LISTA DE SIGLAS, SIMBOLOS E ABREVIATURAS

A = área de permeâmetro

a/c = relação água cimento

ABNT = Associação Nacional de Normas Técnicas

C = fator de forma

D_s = um diâmetro efetivo das partículas

e = relação de vazios

ENVIRONGEO = Laboratório de Engenharia Geotécnica

G = Peso específico dos grãos

GCL = Geosynthetic Clay *Liners*

h_{ót} = umidade ótima

h = Umidade média de campo

i = gradiente hidráulico

IA = Índice de Atividade

IP = Índice de Plasticidade

K = Coeficiente de Condutividade Hidráulica

k₀ = fator que depende da forma dos poros e a relação entre a longitude da trajetória real do fluxo e espessura da camada atravessada.

kPa = Quilo-Pascal

L = comprimento da amostra

LEC – Laboratório de Engenharia Civil – Unijuí

LEGG – Laboratório de Engenharia Geotécnica

LL = Limite de Liquidez

LP = Limite de Plasticidade

Liners = Barreira horizontal impermeável

NBR = Norma Brasileira Regulamentadora

Q = vazão

RS = Rio Grande do Sul

S = superfície específica

SB = Solo - bentonita

SCB = Solo – cimento - bentonita

Slurry Walls = barreira vertical de contenção

t = Duração do ensaio

UFRGS = Universidade Federal do Rio Grande do Sul

UNIJUI = Universidade Regional do Noroeste do Estado do Rio Grande do Sul

V = Velocidade

ϕ = Ângulo de Atrito

c' = Coesão

γ_n = Peso específico natural

$\gamma_{d_{\max}}$ = Massa específica aparente seca máxima

γ_d = Massa específica aparente seca

γ = peso específico do fluido

μ = viscosidade do fluido

CETESB = Companhia de Tecnologia e Saneamento Ambiental

n = Porosidade

SUMÁRIO

INTRODUÇÃO	12
1.1 TEMA DA PESQUISA	12
1.2 DELIMITAÇÃO DO TEMA.....	12
1.3 FORMULAÇÃO DAS QUESTÕES DE ESTUDO.....	12
1.4 DEFINIÇÃO DOS OBJETIVOS DO ESTUDO.....	12
1.4.1 <i>Objetivo geral</i>	12
1.4.2 <i>Objetivos específicos</i>	13
1.5 JUSTIFICATIVAS	13
1.6 SISTEMATIZAÇÃO DA PESQUISA.....	15
REVISÃO DA LITERATURA	17
2.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS.....	17
2.2 PERMEABILIDADE DOS SOLOS.....	17
2.2.1 <i>Determinação da permeabilidade dos solos</i>	17
2.2.2 <i>Fatores que influem na permeabilidade dos solos</i>	22
2.2.3 <i>Valores típicos de coeficientes de condutividade hidráulica (k)</i>	23
2.3 CONTAMINAÇÃO DE SOLOS.....	25
2.3.1 <i>Técnicas de remediação aplicadas a áreas contaminadas</i>	25
2.3.2 <i>Barreiras impermeáveis</i>	26
2.3.2.1 <i>Geomembranas</i>	28
2.3.2.2 <i>Geocomposto Bentonítico (GCL)</i>	28
2.3.2.3 <i>Slurry Walls</i>	29
2.3.2.4 <i>Painéis de HPDE</i>	30
2.3.2.5 <i>Aplicação de geossintéticos na remediação de locais contaminados</i>	31
2.3.3 <i>Técnicas de encapsulamento de solos</i>	31
2.3.3.1 <i>Tratamentos convencionais de resíduos oleosos</i>	32
2.3.3.2 <i>Processos de encapsulamento</i>	32
METODOLOGIA	37
3.1 CLASSIFICAÇÃO DO ESTUDO.....	37
3.2 PLANEJAMENTO DA PESQUISA.....	37
3.3 MATERIAIS UTILIZADOS NA PESQUISA.....	38
3.3.1 <i>Solo</i>	38

3.3.2 Água.....	43
3.3.3 Óleo diesel.....	43
3.4 MÉTODOS UTILIZADOS.....	43
3.4.1 Coleta dos materiais e preparação dos corpos-de-prova.....	44
3.4.2 Ensaios.....	45
3.4.2.1 Ensaios de condutividade hidráulica em permeâmetro de parede rígida.....	45
3.4.2.2 Ensaios de condutividade hidráulica em permeâmetro de parede flexível.....	47
3.4.2.3 Ensaio de condutividade hidráulica in situ em furo de sondagem.....	50
APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS.....	55
4.1 COEFICIENTE DE CONDUTIVIDADE HIDRÁULICA EM PERMEÂMETRO DE PAREDE FLEXÍVEL.....	55
4.2 COEFICIENTE DE CONDUTIVIDADE HIDRÁULICA EM PERMEÂMETRO DE PAREDE RÍGIDA.....	56
4.2.1 Amostras indeformadas.....	56
4.2.2 Amostras compactadas.....	57
4.3 COEFICIENTE DE CONDUTIVIDADE HIDRÁULICA <i>IN SITU</i>	63
CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	69
5.1 CONCLUSÃO.....	69
5.2 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.....	70
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	71
ANEXO I.....	76
ANEXO II.....	88

INTRODUÇÃO

1.1 Tema da pesquisa

O tema da pesquisa é Geotecnia Ambiental.

1.2 Delimitação do tema

Este trabalho consistiu numa pesquisa relacionada à determinação do coeficiente de permeabilidade do solo da região de Ijuí-RS, através de ensaios realizados em laboratório e medições realizadas *in situ*.

1.3 Formulação das questões de estudo

As questões que balizaram este estudo foram:

- Quais os valores do coeficiente de condutividade hidráulica (k) do solo de Ijuí no estado natural e compactado?
- Qual a diferença do coeficiente de condutividade hidráulica (k) do solo de Ijuí percolando-se água e óleo diesel?
- Podemos utilizar este solo como barreira impermeável vertical na ocorrência de uma contaminação por óleo diesel?

1.4 Definição dos objetivos de estudo

1.4.1 *Objetivo geral*

Esta pesquisa teve como objetivo estudar as propriedades hidráulicas do solo residual de basalto da região de Ijuí-RS, em seu estado natural e compactado considerando o fluido percolado.

1.4.2 Objetivos específicos

- Determinar os parâmetros de permeabilidade (coeficiente de condutividade hidráulica - k) para o solo em seu estado natural e compactado, percolando água e óleo diesel através de ensaios de laboratório;
- Determinar o coeficiente de condutividade hidráulica (k) *in situ*;
- Avaliar o efeito da estrutura no valor do k ;
- Avaliar a possibilidade de utilizar este solo compactado como barreira impermeável vertical na ocorrência de contaminação por óleo diesel.

1.5 Justificativa

Sabe-se que cada vez mais é necessário conhecermos a permeabilidade dos solos para realização de algumas obras de engenharia, principalmente, na estimativa da vazão que percolará através do maciço, em obras de drenagem, rebaixamento do nível d'água, adensamento, etc.

Com a evolução e o desenvolvimento dos processos industriais, no Brasil, surgiram também grandes problemas de ordem ambiental, principalmente com a questão da disposição inadequada de resíduos industriais. Este fato ocasionou o aparecimento de várias áreas contaminadas, resultando em degradações ambientais acentuadas, destacando a contaminação do solo e das águas superficiais e subterrâneas.

A Companhia de Tecnologia de Saneamento Ambiental (CETESB, 1999) destaca que são diversos os problemas causados pela presença de áreas contaminadas, que vão desde a restrição do uso e ocupação do solo, com conseqüente redução do valor imobiliário do local e seu entorno, até o comprometimento da saúde pública e ecossistemas locais.

Os resíduos industriais, principalmente os gerados nas indústrias petroquímicas, constituem-se em um dos graves problemas sócio-ambientais do país, e são apontados como

um dos grandes desafios para as áreas responsáveis pelas pesquisas em planejamento e operação do sistema de destino final de resíduos sólidos.

O petróleo começou a ser economicamente explorado a partir da segunda metade do século XIX. Iniciando pelos EUA, a produção foi crescendo sistematicamente. Da destilação daquela massa preta, se tirava de tudo: querosene, gasolina, diesel, óleo combustível, gás, plásticos.

Os derivados de petróleo se tornaram indispensáveis e a sociedade ficou inteiramente presa a eles na energia usada para nossas vestimentas, na produção de alimentos, nos multíusos dos plásticos, nos transportes, nas tintas, em quase tudo.

O petróleo é extraído em todos os sentidos, direta ou indiretamente. E mais, sua extração e uso eram a baixo custo. Daí nossa crescente dependência do petróleo. Abandonaram-se os costumes antigos e não se sabe mais viver sem ele. A produção foi crescendo e a dependência mundial se acentuando.

Em 2007 a produção mundial de petróleo diária foi de cerca de 1,8 milhão de barris de petróleo, e para 2008 a produção diária deve aumentar para 2,0 milhões de barris de petróleo, pois estão sendo instaladas mais quatro novas plataformas de petróleo no Brasil (Agência Brasil, 2008).

Santos (2002) destaca que o resíduo mais abundante na natureza é o material oleoso, o qual apresenta capacidade adesiva de aglomerar areia ou pó de pedra, podendo formar uma massa de resíduo final entre 10-20 vezes maior que o resíduo inicial. Principalmente devido ao elevado teor de óleo, este tipo de resíduo não pode ser simplesmente disposto em lagos ou diques, dando origem a um problema de relevância ambiental.

Diante de toda essa estrutura logística da produção e comercialização do petróleo e de seus derivados, as preocupações relacionadas ao potencial de contaminação de solos e águas subterrâneas, principalmente por vazamentos de tanques de armazenamento subterrâneos em postos de combustíveis e a acidentes envolvendo veículos transportadores vêm crescendo, provocando a contaminação do solo e dos mananciais hídricos.

Um caso recente aconteceu no município de Ijuí, no noroeste do estado do Rio Grande do Sul, onde o descarrilamento e tombamento de um comboio com 7 vagões da empresa América Latina Logística, provocou vazamento (de um dos vagões) de cerca de 54 mil litros de óleo diesel próximo ao km 123 da RS 342, entre Ijuí e Cruz Alta (Conselho Estadual de Trânsito, 2008).

Segundo pesquisa realizada pelo Fórum Biodiesel-BR, um litro de óleo diesel contamina 1 milhão de litros de água o equivalente ao consumo de uma pessoa no período de 14 anos. Isso acontece porque os óleos de origem fóssil, como o petróleo, são suficientes para prejudicar a transferência de oxigênio na interface ar-água e além de tudo é tóxico, matando a vegetação e os pequenos animais.

Diante do exposto, reforça-se a necessidade de estudar mecanismos que atenuam os problemas ambientais causados pelo derramamento de derivados de petróleo.

1.6 Sistematização da pesquisa

O relatório desta pesquisa apresenta a seguinte estrutura:

Neste primeiro capítulo é apresentado o tema da pesquisa, junto com sua delimitação, seguida da questão de estudo, dos objetivos gerais e específicos, justificativa e sistematização do estudo;

O segundo capítulo aborda assuntos relacionados ao tema da pesquisa como: Permeabilidade de solos, contaminação de solos, barreiras impermeáveis, encapsulamento de solos. Também são apresentadas figuras, tabelas e equações que explicam o conteúdo proposto do estudo.

No terceiro capítulo é descrita a metodologia utilizada na pesquisa, envolvendo o método de estudo, o procedimento da coleta de dados, os materiais e equipamentos utilizados nos ensaios.

O quarto capítulo é constituído da tabulação dos dados obtidos em cada ensaio, seguido da análise, interpretação e comparação dos dados.

Por fim, o quinto e último capítulo diz respeito as considerações finais, onde são apresentadas as conclusões do estudo e algumas sugestões para trabalhos futuros de pesquisa.

REVISÃO DA LITERATURA

2.1 Considerações iniciais

No decorrer deste capítulo serão apresentados assuntos que darão embasamento à pesquisa, abordando assuntos como: Permeabilidade de solos, contaminação de solos, barreiras impermeáveis, encapsulamento de solos.

2.2 Permeabilidade dos solos

A água é um elemento comumente presente nos solos, ocupando parte ou a totalidade dos seus vazios. Quando este fluido fica submetido a diferenças de potenciais, desloca-se no interior do solo, originando tensões desiguais.

Pinto (2002) salienta que o estudo da percolação da água nos solos tem grande importância, uma vez que intervém em vários problemas práticos, como por exemplo: no cálculo de vazões (quantidade d'água que infiltra numa escavação); na análise de recalques (diminuição de vazios quando há expulsão de água); nos estudos de estabilidade (depende das pressões neutras); além dos estudos de fuga d'água de reservatórios (barragens de terra).

2.2.1 Determinação da permeabilidade dos solos

A permeabilidade de um solo é uma propriedade que indica o grau de facilidade deste permitir a percolação (deslocamento) da água, expresso numericamente pelo Coeficiente de Permeabilidade. Trata-se de uma propriedade com enorme faixa de variação, sendo necessária a utilização de técnicas específicas para a sua determinação, dependendo dos valores que se deseja medir.

A permeabilidade do solo é afetada por diversos fatores inerentes ao solo. Pode-se destacar, entre eles, o tamanho das partículas, o índice de vazios, a mistura, a estratificação e o grau de saturação do solo. A estrutura interna é uma das características mais importantes do solo que influenciam a condutividade hidráulica, essencialmente em solos finos.

Segundo Lambe & Whitman (1974), a determinação do coeficiente de permeabilidade pode ser realizada em laboratório ou em campo. Quando a determinação for realizada em laboratório, esta se torna mais fácil do que realizá-la *in situ*. Porém, pelo fato da permeabilidade depender muito da estrutura do solo (tanto da microestrutura como da macroestrutura) e devido à dificuldade de se obter amostras de solo representativas, são necessárias determinações da permeabilidade média *in situ*. Desta maneira, os ensaios de laboratório permitem estudar a relação entre a permeabilidade e índice de vazios, que é realizado habitualmente quando não se dispõe de medidas de campo.

De acordo com Caputo (1988) o coeficiente de permeabilidade é determinado levando em consideração a Lei Experimental de Darcy (proposta em 1856 por esse engenheiro francês). Essa lei é válida apenas para um escoamento “laminar”, tal como pode ser considerado o escoamento na maioria dos solos naturais.

A Lei de Darcy foi fundamentada a partir da percolação de água num permeâmetro, conforme visto na Figura 1. Ela é expressa pela seguinte equação:

$$Q = K \cdot \frac{h}{L} \cdot A \quad \text{Equação (1)}$$

Onde: Q = vazão

A = área de permeâmetro

K = coeficiente de condutividade hidráulica

h/L = gradiente hidráulico (i)

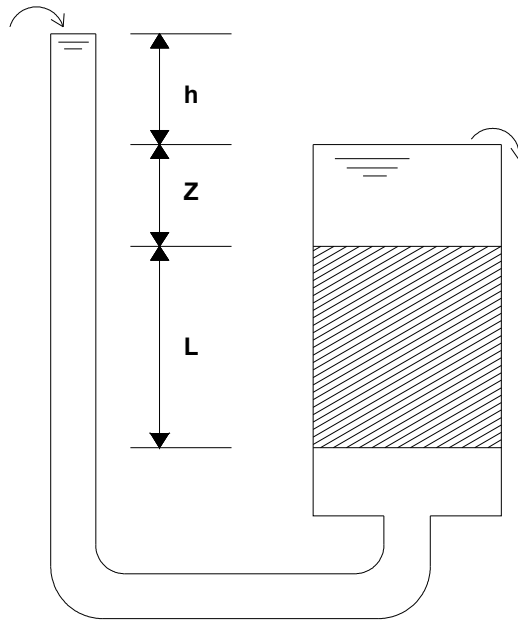


Figura 1: Água percolando num permeâmetro.

Fonte: Pinto (2002)

Substituindo a relação h/L pela letra “ i ” e dividindo a vazão (Q):

$$v = K \cdot i \quad \text{ou} \quad K = v/i \quad \text{Equação (2)}$$

Onde: v = velocidade de percolação da água

K = coeficiente de condutividade hidráulica

i = gradiente hidráulico

Observa-se nessas expressões, que o coeficiente de condutividade hidráulico representa a velocidade de percolação da água quando o gradiente hidráulico for igual a um.

A determinação do coeficiente de condutividade hidráulico dos solos pode ser realizada pelos seguintes métodos:

- Permeâmetro de carga constante: Consiste num permeâmetro (Figura 2) cuja carga h , é mantida por um certo tempo para que a água percole pelo solo e depois medida. Assim pode-se calcular a vazão d’água e conhecendo-se as características geométricas do sistema, calcula-se o coeficiente de permeabilidade diretamente com a Lei de Darcy:

$$K = \frac{Q}{i \cdot A}$$

Equação (3)

Onde: Q = vazão

i = gradiente hidráulico

A = área do permeâmetro

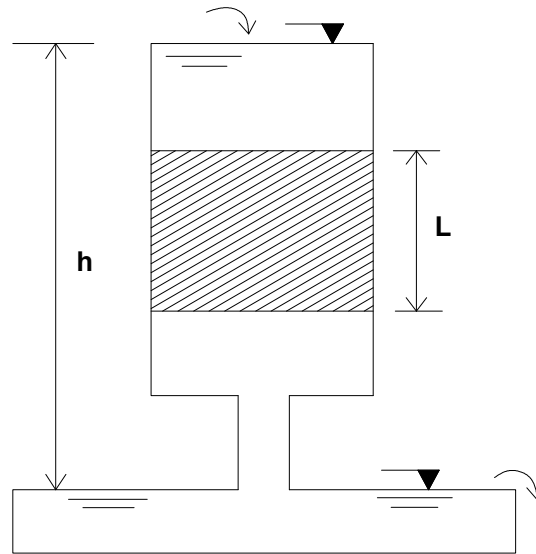


Figura 2: Esquema de permeâmetro de carga constante

Fonte: Pinto (2002)

- Permeâmetro de carga variável: Esse tipo de permeâmetro é usado em solos cujo coeficiente de permeabilidade é muito baixo (argilas). Na Figura 3 é apresentado um esquema desse permeâmetro. A vazão da água que passa pelo solo pode ser medida pela água que passa pela bureta. Nesse caso, o coeficiente de condutividade hidráulica pode ser calculado pela fórmula:

$$K = 2,3 \cdot \frac{al}{Al} \cdot \log \frac{h_i}{h_f}$$

Equação (4)

Onde: K = coeficiente de condutividade hidráulica

a = área do tubo

L = comprimento da amostra

A = área da amostra

h_i = altura água inicial

h_f = altura água final

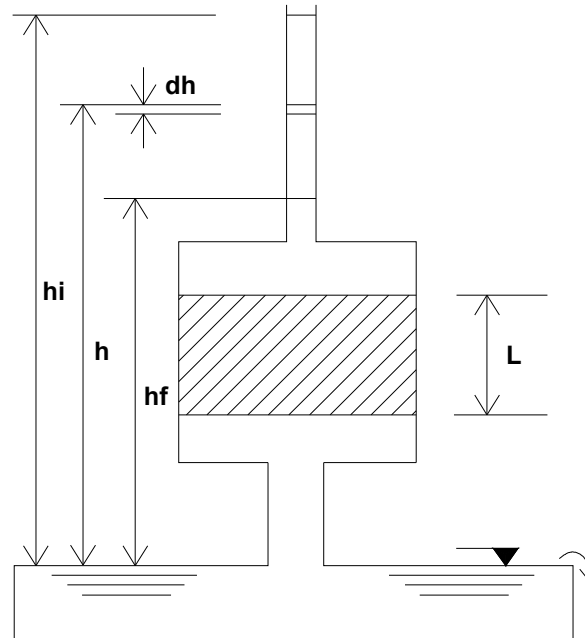


Figura 3: Esquema de permeâmetro de carga variável

Fonte: Pinto (2002)

- Ensaio de campo: De acordo com Pinto (2002), pode-se medir o coeficiente de condutividade hidráulica do solo através de um furo de sondagem de simples reconhecimento. Esse ensaio consiste em interromper a operação de perfuração, enchendo o tubo de revestimento com água, mantendo o seu nível (cheio). Mede-se então a vazão necessária para manter o nível d'água desejado, calculando assim coeficiente de condutividade hidráulica. Por assim se proceder, os ensaios de campo são considerados menos precisos que os de laboratório.
- Métodos indiretos: O coeficiente de condutividade hidráulica também pode ser obtido por meio de ensaios de adensamento, realizados para o estudo de recalques e seu desenvolvimento ao longo do tempo. Sabendo-se a velocidade de recalque de um solo submetido a uma compressão, encontra-se a velocidade da água que sai dos vazios do solo, a qual depende do seu coeficiente de condutividade hidráulica.

2.2.2 Fatores que influem na permeabilidade dos solos

Sabe-se que um grande número de fatores influencia a condutividade hidráulica de um solo. Dentre eles, incluem o teor de umidade de moldagem, o grau de saturação, o método de compactação, o esforço de compactação, o gradiente hidráulico, a distribuição dos tamanhos dos poros, a composição química do líquido permeante, a idade da amostra a ser testada, o índice de vazios e outros.

Segundo Lambe & Whitman (1974), o valor da permeabilidade de um solo depende basicamente das características do fluido e do solo. A influência do fluido e do solo na permeabilidade pode ser representada pela equação a seguir, deduzida por Taylor (1948) a partir da Lei de Poiseuille:

$$K = D_s^2 \cdot \frac{\gamma}{\mu} \cdot \frac{e^3}{(1+e)} \cdot C \quad \text{Equação (5)}$$

onde: K = coeficiente de condutividade hidráulica de Darcy

D_s = um diâmetro efetivo das partículas

γ = peso específico do fluido

μ = viscosidade do fluido

e = relação de vazios

C = fator de forma

A seguinte equação expressa a permeabilidade dos meios porosos e é conhecida como equação de Kozeny-Carman:

$$K = \frac{1}{k_0 \cdot S^2} \cdot \frac{\gamma}{\mu} \cdot \frac{e^3}{(1+e)} \quad \text{Equação (6)}$$

onde: k_0 = fator que depende da forma dos poros e a relação entre a longitude da trajetória real do fluxo e espessura da camada atravessada.

S = superfície específica.

As duas equações acima mostram que tanto a viscosidade quanto o peso específico do fluido influenciam no valor da permeabilidade.

Quanto ao tipo de solo, a influência na permeabilidade dos solos, se dá em função de suas características, como: tamanho das partículas, relação de vazios, composição, estrutura e grau de saturação.

Pinto (2002) afirma que os coeficientes de permeabilidade são proporcionais aos vazios do solo e ao tamanho das partículas, ou seja, quanto menor for os vazios do solo e das partículas, menor será o k .

De acordo com Caputo (1988), o coeficiente de permeabilidade pode variar para o mesmo tipo de solo em função do seu índice de vazios e da temperatura do fluido (menor viscosidade). Quanto maior for a temperatura da água e o índice de vazios do solo, maior a facilidade com que ela escoar no interior do solo.

Pinto (2002) afirma que o coeficiente de permeabilidade de um solo não saturado é menor do que se ele estivesse totalmente saturado, uma vez que as bolhas de ar existentes constituem obstáculos ao fluxo da água.

A permeabilidade também é influenciada pela estrutura e anisotropia do solo, ou seja, depende da disposição relativa dos grãos. Quando o solo é compactado com baixa umidade, a disposição de suas partículas (estrutura floculada) favorece a passagem de água, enquanto que ao ser compactado mais úmido (estrutura dispersa), oferece maior dificuldade ao escoamento. Além disso, os solos são anisotrópicos com relação à permeabilidade, pelo fato de apresentarem coeficientes de permeabilidade maior na direção horizontal do que na vertical. Isso se dá em decorrência das partículas tenderem a ficar com suas maiores dimensões orientadas na posição horizontal.

2.2.3 Valores típicos de coeficientes de condutividade hidráulica (k)

Os solos podem ser rapidamente classificados segundo seu grau de permeabilidade, conforme visto na Tabela 1 (LAMBE & WHITMAN, 1974):

Tabela 1: Classificação dos solos segundo seu coeficiente de permeabilidade

Fonte: Lambe & Whitman (1974)

Grau de permeabilidade	Valor de k (cm/seg)
Elevada	Superior a 10^{-1}
Média	10^{-1} a 10^{-3}
Baixa	10^{-3} a 10^{-5}
Muito baixa	10^{-5} a 10^{-7}
Praticamente impermeável	Menor de 10^{-7}

Na Tabela 2, o referido autor apresenta os valores de permeabilidade para os solos sedimentares:

Tabela 2: Valores típicos de coeficientes de permeabilidade

Fonte: Pinto (2002)

Solos sedimentares	Valores de k
Argilas	$< 10^{-9}$ m/s
Siltes	10^{-6} a 10^{-9} m/s
Areias argilosas	10^{-7} m/s
Areias finas	10^{-5} m/s
Areias médias	10^{-4} m/s
Areias grossas	10^{-3} m/s

A Lei de Darcy não pode ser utilizada no cálculo de permeabilidade dos pedregulhos e areias grossas, uma vez que a velocidade do escoamento de fluido nestes materiais é bastante elevada, tornando o fluxo turbulento.

Sabe-se que o valor de k depende não só do tipo de solo, mas também de sua estrutura e de sua compactidade ou consistência. Assim, por exemplo, uma areia grossa com finos pode ser menos permeável que uma areia fina uniforme.

De acordo com o autor referenciado anteriormente, os solos residuais e solos evoluídos apresentam estrutura com macroporos, nos quais a água percola com bastante facilidade. Porém, se estes materiais tiverem sua estrutura desfeita mecanicamente e em seguida compactada, o coeficiente de permeabilidade diminui consideravelmente.

2.3 Contaminação de solos

As preocupações relacionadas ao potencial de contaminação de solos e águas por vazamento/derramamento de combustíveis vêm crescendo, sendo diversas as origens: acidentes envolvendo o transporte de combustíveis por navios, trens de carga, caminhões ou dutos e também devido a vazamentos de tanques de armazenamento subterrâneos, os quais estão sujeitos a fortes processos corrosivos.

Os problemas gerados pela contaminação do solo e da água subterrânea por hidrocarbonetos são vários, dentre eles: a existência de riscos à segurança das pessoas e das propriedades, riscos à saúde pública e dos ecossistemas e restrições ao desenvolvimento urbano e imobiliário. Esta ocorrência de vazamentos de hidrocarbonetos configura perigo constante de incêndio ou explosão nos locais atingidos.

Além destes problemas é importante ressaltar que a recuperação de áreas contaminadas é uma tarefa complexa, onerosa e bastante demorada, e em alguns casos não se consegue atingir os limites permitidos pela legislação ou pelos órgãos ambientais. Outro fator complicador é o custo, pois são dependentes do tipo de contaminante, das características do local e da amplitude da área.

2.3.1 Técnicas de remediação aplicadas a áreas contaminadas

Atualmente, existe uma preocupação e conscientização da sociedade em relação à qualidade ambiental, a população vem tornando-se mais crítica e participativa, exigindo atuações cada vez maiores das autoridades. Desta forma, em função da crescente demanda em relação ao gerenciamento de áreas contaminadas, avanços significativos ocorreram nas últimas décadas nos estudos que visavam à recuperação ambiental. Por esse motivo, diversas tecnologias de remediação têm sido desenvolvidas e consolidadas principalmente pelos países desenvolvidos. O Brasil, hoje mais preocupado com seus locais contaminados, começa a

desenvolver suas próprias tecnologias e também a adaptar as tecnologias já estabelecidas às nossas condições ambientais.

Um dos desafios da remediação está na localização e remoção da massa de contaminantes que estão servindo como fonte contínua de poluição nos solos e nas águas. Ao serem localizados, os contaminantes podem estar com difícil acesso ou em profundidades que dificultam a remoção, e em alguns casos a remoção parcial dos poluentes não acompanha proporcionalmente a melhoria na qualidade da água ou solo, pois o restante funciona como fonte de contaminação por muitos anos e se a dissolução for suficientemente grande ou rápida pode representar um perigo potencial ao meio ambiente.

Considerando-se que os hidrocarbonetos são relativamente móveis e biodegradáveis quando comparados a outros tipos de contaminantes (ex. metais), um grande número de tecnologias vem sendo desenvolvidas e aplicadas na remediação de locais contaminados por hidrocarbonetos de petróleo. Nesta seção serão descritas algumas tecnologias que vem sendo utilizadas na remediação de áreas contaminadas por hidrocarbonetos de petróleo, principalmente nos países desenvolvidos onde a preocupação e os investimentos na recuperação de áreas contaminadas já alcançaram níveis mais satisfatórios.

2.3.2 Barreiras impermeáveis

As barreiras impermeáveis são uma necessidade em várias obras de engenharia e, em geral, naquelas destinadas à disposição de resíduos, como os aterros e as lagoas de efluentes. Tradicionalmente camadas de solos compactados têm sido utilizadas para essa finalidade. O advento dos geossintéticos tem introduzido novos materiais que podem cumprir com essa finalidade, contudo, eles, em geral estão associados a solos compactados, formando barreiras compostas.

Solos compactados constituem, portanto, uma presença constante em barreiras impermeáveis de sistema de contenção de resíduos. O uso de solos compactados como barreiras impermeabilizantes não é novo na geotecnia, porém, ganhou grande expressão nos últimos anos pelo crescente interesse de sua utilização em barreiras de fundo ou cobertura em aterros de resíduos.

Eles podem compor as barreiras ou *liners* de cobertura e de base, bem como as laterais do aterro, Nesse sentido, esses solos devem ter características apropriadas, integridade e funcionalidade, como a baixa permeabilidade.

Um *liner* é uma camada de um determinado material que serve como barreira impermeável, utilizada para minimizar a infiltração de água para dentro de resíduos previamente dispostos (*liners* de cobertura ou *cover liners*) e para controlar a liberação de afluente líquido do resíduo (*liners* de fundo ou *boton liners*). Para que estes objetivos possam ser alcançados, o *liner* deverá apresentar baixa condutividade hidráulica por longos períodos de tempo. Esta condutividade hidráulica deverá ser suficientemente baixa, o que normalmente é o problema mais difícil de ser resolvido. Além disso, espera-se que o *liner* atenua a movimentação do efluente líquido gerado, agindo como um filtro químico, absorvendo ou atenuando certos compostos e também sirva para outras funções a que for solicitado (Kalteziotis et al, 1994, apud Heineck 2002).

Segundo Daniel (1993) existem três tipos de liners: liners naturais de argila, liners de argila compactada e *liners* com geossintéticos (GCL – *Geosynthetic Clay Liners*).

O uso de geossintéticos em obras geotécnicas de proteção ambiental tem crescido muito nos últimos anos. Em especial, as geomembranas, que compõem uma classe de geossintéticos de reduzida permeabilidade, prestam-se a compor sistemas de impermeabilização da base de aterros de resíduos e de lagoas de efluentes, bem como sistemas de impermeabilização de cobertura de aterros. Cabe aos geossintéticos, que atualmente estão sendo usados em grande escala nas obras de cunho ambiental, desempenhar funções de impermeabilização, impedindo que os poluentes atinjam os meios a serem protegidos.

Estes sistemas de impermeabilização combinam, além das geomembranas, diferentes materiais, como solos argilosos compactados, solos granulares e outros materiais sintéticos, como geotêxteis e geocompostos bentoníticos, formando as barreiras compostas. Os principais tipos de geossintéticos utilizados para a finalidade de impermeabilização são as geomembranas e os GCL's (*Geosynthetic Clay Liner*).

2.3.2.1 Geomembranas

As geomembranas são mantas poliméricas flexíveis que apresentam permeabilidades extremamente baixas (da ordem de 10^{-12} cm/s) e que são utilizadas como barreiras para líquidos e vapores. São produzidas industrialmente em geral, na forma de rolos que são levados ao local da obra, onde se procede ao lançamento da manta e sua emenda. Alguns tipos de geomembranas podem ser soldados na fábrica e formar grandes painéis, reduzindo ou eliminando os trabalhos de emenda em campo. As geomembranas mais utilizadas são: Polietileno de alta densidade (PEAD), Polietileno bastante flexível (PBF) e a Polivinil Clorado (PVC).

2.3.2.2 Geocomposto Bentonítico (GCL)

Os geocompostos bentoníticos, *geosynthetic clay liners*, na literatura de língua inglesa, são materiais compostos em que uma camada de argila em pó, usualmente bentonita sódica, é ligada por meios mecânicos ou químicos a geotêxteis ou a uma geomembrana. São fabricados em painéis, com dimensões da ordem de 5m por 50m e espessura de 1cm, sendo o conteúdo de argila, com umidades entre 10 e 20% da ordem de 5kg/m². Uma classificação geral dos diferentes tipos de geocompostos bentoníticos separa-os em reforçados e não reforçados. No caso dos reforçados, as camadas externas de geossintéticos são mecanicamente unidas utilizando-se costura ou agulhamento; os não reforçados são fabricados com o uso de adesivos. Estes geocompostos têm sido utilizados em substituição ou em adição a solos em sistemas impermeabilizantes. Suas principais qualidades residem no fato de ser flexível, com propriedades de auto-cicatrização, no caso de perfuração é relativamente fácil de instalar. Ao contrário das geomembranas, que são fácil de emendar. A condutividade hidráulica destes geocompostos varia entre 10^{-10} e 10^{-8} cm/s, dependendo das tensões atuantes.

A empresa SUEZ AMBIENTAL realizou a aplicação de Geocomposto bentonítico em taludes do aterro sanitário de Joinville – SC, denominado de Catarinense, o qual o projeto original não preconizava a impermeabilização dos taludes dos depósitos através da colocação de geomembranas sintéticas. Em análises de laboratório verificou-se que o solo local exibiu $k=5,49 \times 10^{-9}$ m/s em amostra moldada na umidade ótima (energia normal de compactação). Considerando tais características optou-se pela utilização de geocomposto bentonítico (GCL). Tal geocomposto, para a tensão confinante de 30kPa, exibiu, em ensaios de laboratório,

condutividade hidráulica de 5×10^{-11} m/s. As principais vantagens da utilização do geocomposto bentonítico, determinantes na sua escolha foram:

- Disponibilidade de mantas de GCL de acordo com a medida dos taludes;
- Baixos custos de instalação;
- Agilidade na instalação;
- Melhor suporte para a geomembrana.

2.3.2.3 *Slurry Walls*

Outra barreira vertical de contenção muito empregada é a conhecida como *Slurry Walls*. Consiste em uma escavação em forma de trincheira, normalmente com 0,60 a 1,50m de largura, em que as paredes de escavação são suportadas por uma lama de bentonita, que posteriormente enrijece dentro do trecho ou é substituída por um material geotécnico (solo).

Este sistema vem, nos últimos anos, substituindo outros processos construtivos consagrados de barreiras de contenção, como por exemplo: estacas-pranchas, paredes diafragma entre outros, principalmente pela sua maior rapidez construtiva e devido seu menor custo.

Estas trincheiras são geralmente preenchidas com Solo-Bentonita (SB) ou Solo-Cimento-Bentonita (SCB), e passam a constituir uma barreira de materiais misturados por equipamentos móveis, que acompanham o ritmo de escavação. Entre eles pode-se citar as retro-escavadeiras e as carregadeiras de esteiras. Esta é a principal razão para a alta produtividade e diminuição dos custos das barreiras tipo *Slurry Walls*.

Outra forma de *liner* muito utilizado é a argila compactada, que pode ser de dois tipos: argila compactada utilizando aditivos e a estabilização mecânica. Na mistura com aditivo espera-se estabilizar o solo por cimentação das partículas de argila, aumentando a resistência do solo e na estabilização mecânica, utilizando uma grande energia de compactação (modificada) ou aplicando uma tensão de compressão maior ou igual a 70kPa, É utilizada para tornar uma argila compactada invulnerável ao ataque de químicos orgânicos.

Santos (2005) estudou o comportamento de *liners* sob a influência de um contaminante orgânico, e os ensaios de compressão não confinada demonstrou uma maior resistência com a diminuição do fator *a/c*. A mistura de SB apresentou um aumento da condutividade hidráulica quando permeada com óleo diesel comparando como o valor encontrado quando permeado com água. As amostras de SCB devido a introdução do cimento apresentaram um acréscimo inicial na condutividade hidráulica (permeadas com água) quando comparadas com amostras de SB seguidas de uma redução na condutividade hidráulica quando permeadas com óleo diesel.

Nobre (2006) estudou a condutividade hidráulica, de um solo da Formação Barreira compactado e contaminado por gasolina. O autor concluiu que a argila da Formação Barreira tem uma relevante aplicação na contenção de hidrocarbonetos principalmente gasolina, podendo ser utilizada como barreira de contenção.

2.3.2.4 Painéis de HDPE

Cortinas interceptadoras de fluxo (*cut-off walls*) tem sido utilizadas para confinar locais contaminados e fontes de contaminação, como, por exemplo, locais de lançamento indiscriminado de resíduos. Em geral estas cortinas se estendem pelo solo de fundação, até uma camada de baixa permeabilidade ou, em certos casos, até camadas impermeáveis especialmente construídas para este fim.

As cortinas podem desempenhar diferentes funções. Uma delas é a contenção de contaminantes dentro de uma área definida, além de evitar a continuidade da propagação de poluentes. Essas cortinas são construídas das mais variadas formas, como através de trincheiras preenchidas com solo compactado ou em mistura de solo e aditivos, como bentonita e cimento; paredes diafragmas; estacas secantes ou justapostas, dentre outras formas.

Os geossintéticos têm ganhado uma crescente aceitação de uso em sistemas de cortinas de interceptação, podendo ser utilizados isoladamente, à semelhança de estacas prancha, ou em conjunto com lamas bentoníticas e solos de reaterro, aditivados ou não, formando uma barreira composta. Em geral os painéis que compõem essas cortinas são de PEAD (polietileno

de alta densidade), com sistemas de conexão bastante elaborados, com o intuito de impedir vazamentos.

2.3.2.5 Aplicação de geossintéticos na remediação de locais contaminados

Diferentes técnicas de remediação de locais contaminados têm sido desenvolvidas nos últimos anos. Os geossintéticos podem ser utilizados em muitas dessas técnicas, desempenhando funções de filtração, de separação ou encapsulando materiais componentes de barreiras reativas. Na composição dessas barreiras atuam processos físicos, químicos ou biológicos, graças a diferentes componentes, dentre os quais se incluem, quando necessário, polímeros biodegradáveis. Outras opções recentes incluem a utilização de alternativas tradicionais, como os drenos pré-fabricados ou geocompostos drenantes, usualmente empregados para acelerar recalques, em atividades de remediação.

2.3.3 Técnica de encapsulamento de solos

Encapsulamento, ou técnica de solidificação/estabilização, é um processo conhecido de tratamento de resíduos industriais, a partir do qual, procura-se fixar em uma matriz, os contaminantes presentes no resíduo, visando transformá-los em materiais com melhores características de manuseio, transporte e destinação final. Uma vantagem adicional inerente ao processo de solidificação/estabilização, pode resultar nas situações em que o agente químico (encapsulante) é o cimento Portland, caso haja possibilidade de se utilizar o produto final no setor da construção civil.

A técnica de encapsulamento de contaminantes tem por objetivo produzir um estrado solidificado, diminuindo a área superficial e limitando a solubilidade e a transferência do contaminante quando exposto a um fluido lixiviante. O encapsulamento se dá por micro e macroencapsulamento, sendo que o primeiro é definido como um aglomerado de partículas já microencapsuladas, e o segundo como sendo o envolvimento das partículas unitárias do contaminante.

De uma forma geral, a tecnologia de encapsulamento é considerada uma forma segura de tratamento para uma variedade de contaminantes, incluindo os resíduos oriundos do petróleo. Esta técnica de solidificação/estabilização é amplamente utilizada há mais de 30

anos em países como os Estados Unidos, Alemanha, França, Inglaterra e Japão. Porém no Brasil, esta tecnologia ainda é considerada recente e está basicamente direcionada ao tratamento de resíduos industriais classificados segundo a NBR 10.004 (1987) como Classe I (perigoso) e Classe II (não inerte) (Rojas, 2007).

2.3.3.1 Tratamentos convencionais de resíduos oleosos

Historicamente, o encapsulamento não era uma técnica aplicada a resíduos com conteúdo orgânico maior que 10% devido à incompatibilidade entre resíduos e agentes encapsulantes, por isso, tecnologias tais como: incineração, *landfarming* e disposição em aterros eram as mais recomendadas. Entretanto, evidências sobre o impacto produzido pelas emissões gasosas de compostos químicos (dioxinas e furanos) pela incineração, fizeram com que esta tecnologia se tornasse a mais combatida pelos ambientalistas. Considera-se também que os resíduos orgânicos oleosos são gerados em grandes quantidades, tornando a incineração uma prática inviável devido ao seu alto custo.

A tecnologia de *landfarming* requer um controle rigoroso dos processos operacionais para que a degradação biológica seja efetiva, estando susceptível a choques eventuais da população microbiana reativa do solo, como também a drástica diminuição da atividade microbiana durante períodos de chuva intensa e prolongada. O *landfarming* constitui-se em uma tecnologia de tratamento de resíduos que exige o cumprimento de critérios, sem os quais estará destinado a provocar uma série de problemas ambientais.

O homem possui a tendência natural de utilizar o solo como corpo receptor natural de seus resíduos, seja sob a forma de aterros ou como um fluxo de infiltração. O aterro é uma forma de disposição de resíduos que deve estar fundamentada em critérios de engenharia e normas operacionais específicas para garantir um confinamento seguro em termos de poluição ambiental. Sem a adoção de medidas de proteção ambiental, a disposição indiscriminada de resíduos industriais pode incorrer em danos irreparáveis.

2.3.3.2 Processos de Encapsulamento

Encontram-se disponíveis várias técnicas e processos de encapsulamento, sendo necessário à observância de possíveis incompatibilidades entre agentes encapsulantes e

resíduos, tanto a curto como a longo prazo, para que o produto obtido apresente desempenho quanto à sua disposição final (resistência a intempéries e ataques químicos e/ou biológicos). As principais técnicas de encapsulamento de resíduos atualmente desenvolvidas e aplicadas são as seguintes:

Processo à base de cimento Portland

A solidificação através da adição de cimento Portland ou outros produtos inorgânicos semelhantes é particularmente eficiente para resíduos com altos teores de metais tóxicos, porque o pH da matriz de cimento favorece a transformação de cátions em hidróxidos e carbonatos insolúveis, e muitos íons metálicos podem ser incorporados à estrutura cristalina da matriz de cimento.

Processo à base de cal e materiais pozolânicos (não incluindo o cimento)

Os materiais pozolânicos, artificiais ou naturais (cinzas volantes e escórias de alto forno), contêm partículas silicosas que combinadas com cal, na presença de água, produzem um material com propriedades cimentícias. O uso desses materiais é particularmente vantajoso, pois permite que resíduos gerados em duas fontes distintas sejam tratados ao mesmo tempo.

Técnicas à base de polímeros

Os processos termoplásticos foram inicialmente desenvolvidos para o tratamento de resíduos radioativos, sendo posteriormente adaptados para resíduos industriais. O resíduo submetido ao processo é inicialmente desidratado e aquecido, sendo posteriormente diluído em uma matriz plástica pré-aquecida. A matriz é então resfriada e solidificada, sendo, posteriormente, acondicionada em tambores metálicos.

Técnicas à base de polímeros orgânicos

A técnica à base de polímeros orgânicos mais difundida é a que utiliza uréia-formaldeído. A polimerização ocorre através de um processo em bateladas, onde os resíduos são misturados com um pré-polímero, sendo posteriormente acrescentado, ainda em condições

de mistura, o catalisador da reação. A mistura termina antes que o polímero se forme, sendo que a matriz polímero-resíduo é transferida para o recipiente final. A matriz polimérica não reage com o resíduo, apenas forma um corpo esponjoso que retém fisicamente as partículas sólidas.

Técnicas de encapsulamento superficial

Quando se emprega a técnica de encapsulamento superficial os resíduos são prensados, aglomerados ou entamborados e revestidos superficialmente com materiais (poliuretanos e resinas de fibra de vidro) que atuam como um selo entre o resíduo e o meio ambiente.

Técnicas de auto-solidificação

As técnicas de auto-solidificação são aplicadas em resíduos com altos teores de sulfitos e sulfatos de cálcio. Normalmente uma pequena parte de resíduo, 8% a 10 % em massa, é submetida à calcinação em condições controladas, produzindo um material cimentício formado basicamente de sulfato e sulfito de cálcio, parcialmente desidratados. O resíduo calcinado é então recolocado em contato com o resíduo bruto, propiciando a solidificação.

Técnicas de transformação em vidros e/ou cerâmicas

Os vidros e os silicatos cristalinos lixiviam muito lentamente sob ação da água, fazendo com que os produtos obtidos através desse processo sejam considerados seguros quanto à disposição final. A técnica de vitrificação baseia-se na fusão de resíduos com sílica para formar vidro. Esta técnica é aplicável a materiais de alta periculosidade como os resíduos radioativos.

Técnicas baseadas em argilas naturais modificadas

As argilas naturais modificadas são produzidas a partir de argilo-silicatos naturais, cuja modificação é feita pela substituição de cátions inorgânicos por cátions orgânicos, por meio de troca iônica. Após a substituição, as moléculas orgânicas são adsorvidas na estrutura cristalina do mineral aumentando sua capacidade adsorviva, o que favorece o surgimento de reações de estabilização quando em contato com contaminantes.

Braga (2002) propôs avaliar o encapsulamento de resíduos oleosos através de processos à base de cimento Portland e à base de argilas naturais ou modificadas. A proposta baseia-se na caracterização e classificação dos resíduos oleosos a serem encapsulados. Braga (2002) concluiu que os processos de encapsulamento à base de cimento Portland e à base de argilas naturais ou modificadas são os mais aplicáveis a resíduos oleosos, por apresentarem propriedades que favorecem a imobilização dos compostos químicos que conferem aos resíduos características de periculosidade. Os mesmos processos quanto a relação custo/benefício podem ser competitivos aos processos convencionais de destinação final de resíduos oleosos, tais como incineração, *landfarming* e aterro industrial.

A metodologia experimental proposta por Braga (2002) pode proporcionar um melhor conhecimento e aproveitamento do resíduo ao longo do tempo, redução de passivo ambiental e melhoria do gerenciamento, como também ao aperfeiçoamento de encapsulamento sobre aspectos técnicos, econômicos e ambientais, através de estudos desenvolvidos em campo e laboratório.

No setor da construção civil, o autor diz que, se deve buscar alternativas de valorização com a confecção de matrizes encapsuladas à base de cimento Portland e à base de argilas naturais ou modificadas, aplicáveis em artefatos de concreto e em estradas, respectivamente.

Rojas (2007) propôs aplicar a técnica de encapsulamento, conhecida também como solidificação/estabilização, em um solo contaminado com crescentes quantidades do resíduo industrial borra oleosa ácida, utilizando como agente encapsulante o cimento Portland CP-V ARI. Consistiu na realização de estudos pré e pós-tratamento, analisando fisicamente o solo através de ensaios de caracterização geotécnica, compactação, resistência à compressão simples, durabilidade e condutividade hidráulica.

Realizou ensaios de lixiviação em coluna e análises químicas e físico-químicas do lixiviado. Os resultados apontam que quanto maior a quantidade de borra oleosa ácida presente no solo tratado, maior é a temperatura de hidratação do cimento e mais rápido atinge o pico máximo, resultando em menor resistência à compressão simples e maior perda de massa. Em amostras sem cimento, a condutividade hidráulica diminuiu com o aumento de borra oleosa ácida, quando adicionado cimento a condutividade hidráulica inicialmente diminuiu com

o acréscimo de borra oleosa ácida, mas volta a aumentar com quantidades maiores de contaminante.

A técnica de encapsulamento mostrou-se eficiente quanto à redução dos metais pesados, devido, principalmente, ao aumento do pH e a precipitação de tais elementos. Porém não se mostrou eficiente quanto ao sulfato, condutividade elétrica e demanda química de oxigênio.

METODOLOGIA

3.1 Classificação do estudo

A pesquisa realizada caracterizou-se como sendo de ordem quantitativa, uma vez que foram realizados ensaios em laboratório e em campo, e cujos resultados foram analisados.

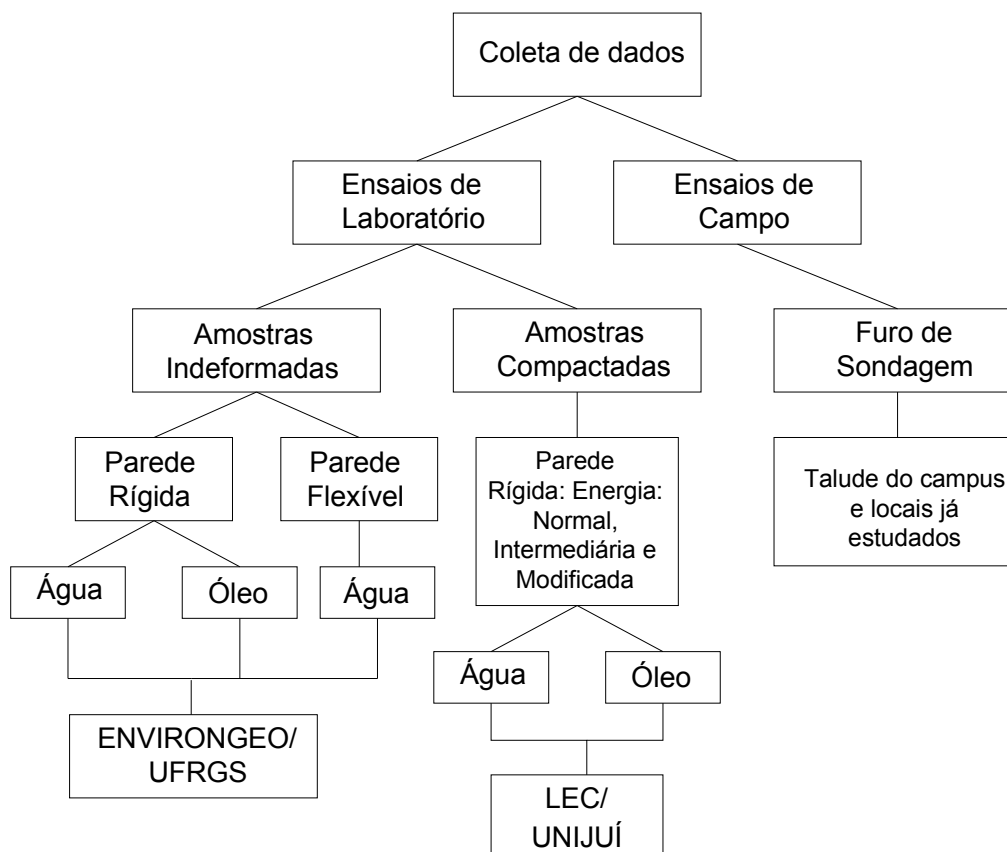
3.2 Planejamento da pesquisa

O planejamento da pesquisa contempla as seguintes etapas: a) Definição do tema, b) problema e objeto de estudo, c) revisão da literatura, (d) coleta de dados, (e) análise dos resultados, (f) conclusões e (g) elaboração do relatório.

As atividades práticas (d) deste trabalho foram realizadas no ENVIRONGEO/LEGG-Laboratório de Engenharia Geotécnica da UFRGS e no LEC – Laboratório de Engenharia Civil da UNIJUÍ, e os ensaios *in situ* foram realizados a campo, no talude do campus da UNIJUÍ, e posterior em locais distintos da cidade de Ijuí, que já foram estudados anteriormente por Sala (2007).

O equipamento que foi utilizado para determinar o coeficiente de condutividade hidráulica (k) da amostra indeformada e compactadas foi o permeâmetro de parede rígida, e para as amostras remoldadas foi o permeâmetro de parede flexível, e os ensaios de campo foram realizados através de ensaios em furos de sondagens acima do nível d'água.

A seguir é apresentado o delineamento do programa experimental utilizado nesta pesquisa onde pode ser visto de forma clara cada etapa dos trabalhos e os ensaios que foram realizados.



3.3 Materiais utilizados na pesquisa

Os materiais utilizados nesta pesquisa bem como suas características e localização são apresentados abaixo.

3.3.1 Solo

O solo utilizado nesta pesquisa foi o solo residual de basalto encontrado na região de Ijuí - RS devido sua vasta exploração nas pesquisas realizadas (Viecili 2003, Bonafé 2004, Diemer et al 2008), bem como sua abundância natural nas proximidades. Para os ensaios de laboratório foi coletado solo de um talude do campus da UNIJUÍ localizado próximo ao prédio de Engenharia Civil, e para execução dos ensaios *in situ*, além do talude do campus da UNIJUÍ, que foi executado em locais já estudados por Sala (2007).

A área que será estudada caracteriza-se pela ocorrência de rochas vulcânicas da Formação Serra Geral.

Na Figura 4 é apresentado um mapa delimitando as províncias geomorfológicas com destaque para a Formação Serra Geral.

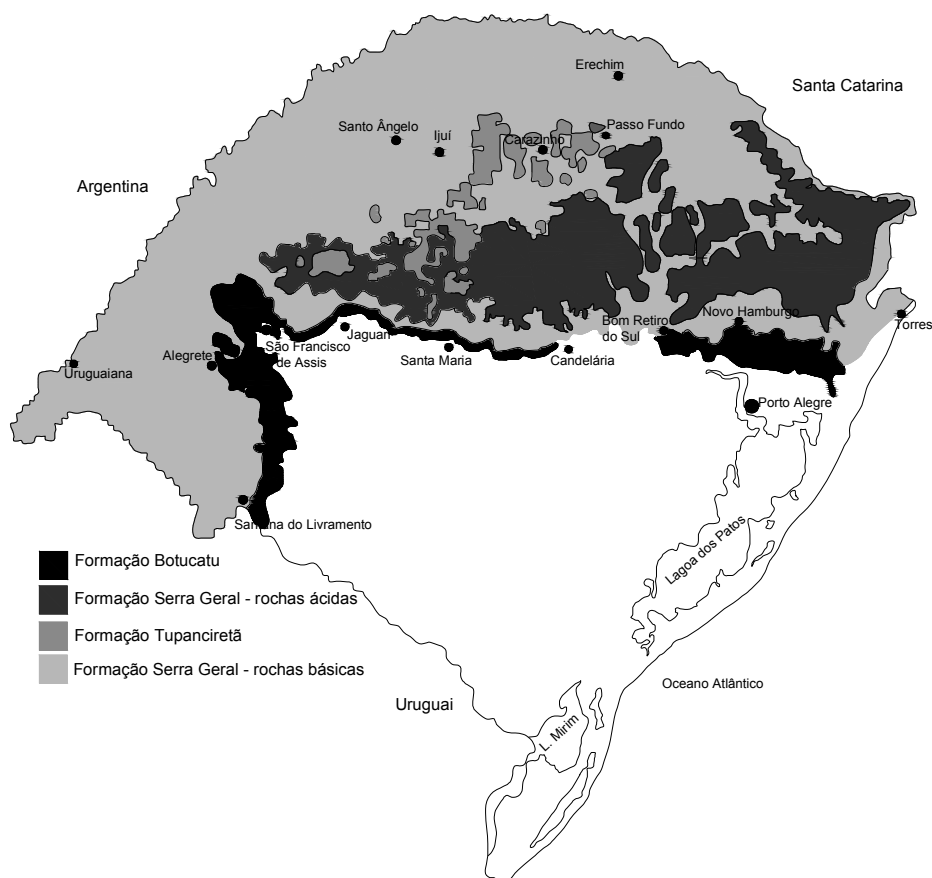


Figura 4: Mapa das províncias geomorfológicas

Fonte: Adaptado de IBGE

Na região de Ijuí os perfis de solos são homogêneos, havendo pouca diferenciação entre os horizontes, sendo que apresentam as seguintes características morfológicas principais:

- **horizonte A:** espesso (varia de 30 a 60cm aproximadamente), de coloração avermelhada escura, argiloso (mais de 60% de argila), com estrutura desenvolvida granular ou em blocos subangulares, poroso, friável, ligeiramente plástico e pegajoso.

- **horizonte B:** muito espesso (mais de 200cm), de coloração vermelha escura, argiloso (com mais de 75% de argila), estruturado normalmente, fraco em blocos subangulares, poroso, friável, ligeiramente plástico e pegajoso quando o material for muito trabalhado.
- **horizonte C:** a mais de 200cm de profundidade, é espesso e composto por basalto intemperizado, possuindo teor de silte.

A Figura 5 apresenta um perfil delimitando os horizontes do solo.

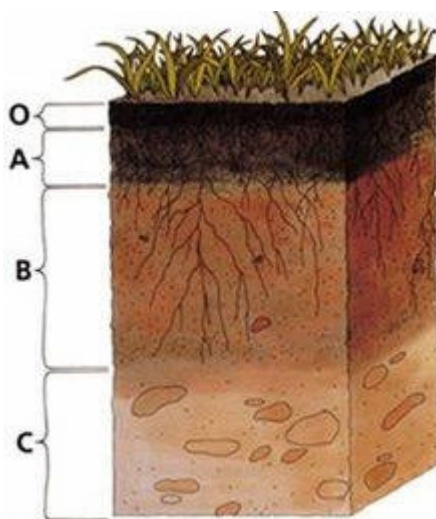


Figura 5: Perfil com os horizontes do solo.

Suas propriedades físicas médias foram determinadas por Viecili (2003) e estão apresentados na Tabela 3. A Figura 6 apresenta a distribuição granulométrica, obtida para o solo residual de basalto.

Tabela 3: Propriedades físicas médias do solo

Fonte: Viecili (2003).

Propriedades	Valores Médios
Limite de Liquidez (LL)	59%
Limite de Plasticidade (LP)	47%
Índice de Plasticidade (IP)	12%
Peso específico real dos grãos (G)	28,52 kg/cm ³
Índice de Atividade (Ia)	0,14
Umidade média de campo (H)	34,53%
Peso específico natural (γ_n)	13,74 kg/cm ³
Índice de vazios	1,65
Porosidade (n)	0,64

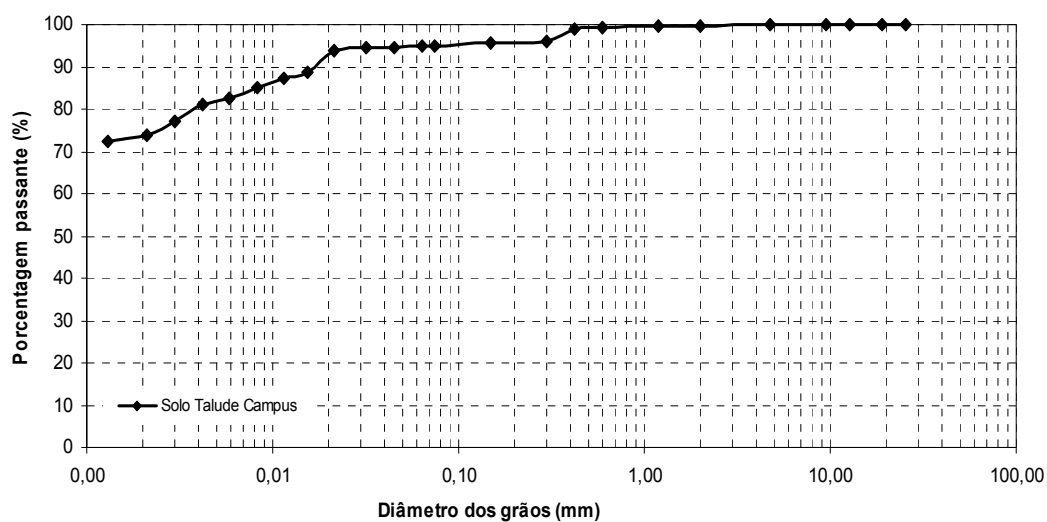


Figura 6: Distribuição granulométrica do solo em estudo.

Verifica-se que o solo residual de Ijuí é composto por: 85% de argila, 10% de silte, 4,12 % de areia fina, 0,72% de areia média e 0,16 % de areia grossa, não possuindo fração de pedregulho. Segundo a classificação HRB o solo classifica-se como sendo A-7-5. Conforme classificação unificada o solo classifica-se como MH (silte de alta compressibilidade). Observando o índice de consistência e de atividade calculados, este solo se enquadra como uma argila dura inativa (VIECILI, 2003).

Bonafé (2004) determinou os parâmetros de compactação do solo em estudo nas três energias de compactação (normal, intermediária e modificada) onde pode-se ver os resultados apresentados na Figura 7 e na Tabela 4. Este estudo é indispensável em obras de terra, principalmente na construção de aterros.

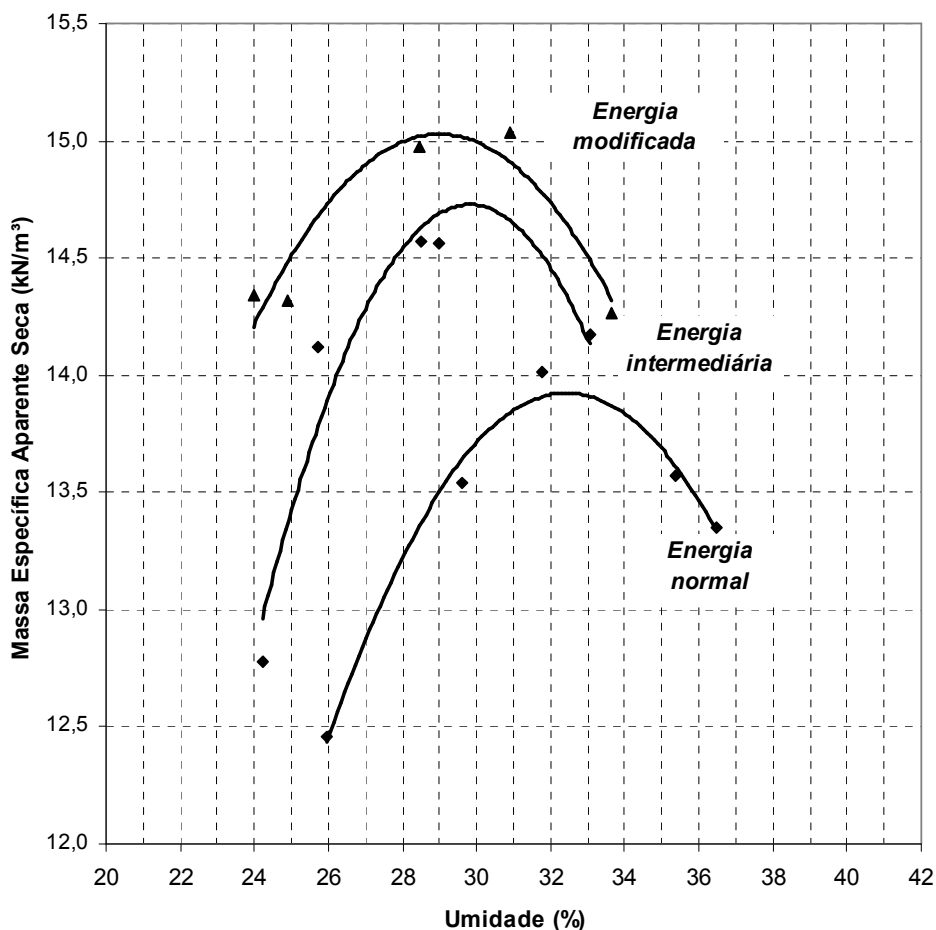


Figura 7: Curvas de compactação do solo

Tabela 4: Resultados dos ensaios de compactação

Amostra	Energia	$h_{ót}$ (%)	$\gamma_{d_{máx}}$ (kN/m^3)
Solo A	Normal	32,30	13,93
Solo A	Intermediária	30,00	14,73
Solo A	Modificada	29,00	15,03

3.3.2 Água

A água utilizada na concepção das amostras para os ensaios de laboratório foi do tipo destilada, de forma a não haver interferência de qualquer possível mineral presente na água sobre o solo. Para os ensaios de campo foi utilizada água da rede pública.

3.3.3 Óleo diesel

Empregou-se como contaminante à base de hidrocarbonetos nesta pesquisa, o óleo diesel, obtido junto a Refinaria Alberto Pasqualini – REFAP, da cidade de Canoas/RS. O óleo diesel apresenta um comportamento não volátil, sendo imiscível em água. A densidade unitária do óleo diesel é de 0,839 e uma viscosidade $\mu=1,8\text{Pa.s}$. Demais dados do óleo diesel são apresentados na Tabela 5.

Tabela 5 – Informações sobre o óleo diesel (REFAP, 2003)

Componente	Concentração
Hidrocarbonetos saturados	70 – 75% (volume)
Hidrocarbonetos olefínicos	< 1% (volume)
Hidrocarbonetos aromáticos	20 – 30% (volume)
Enxofre	< 0,5 % (peso)
Ponto de ebulição	174°C

Em caso de contaminação de água, o produto pode formar películas superficiais sobre a água. É moderadamente tóxico à vida aquática. Pode transmitir qualidades indesejáveis à água afetando o uso. Quanto à contaminação do solo, por percolação pode degradar a qualidade das águas do lençol freático, além de contaminar as plantas existentes. Seu pH medido em laboratório está em torno de 5,8 (Caberlon, 2004).

3.4 Métodos utilizados

A seguir será descrito o método utilizado para a preparação e moldagem dos corpos-de-prova e os métodos de ensaios que foram empregados durante o programa experimental.

3.4.1 Coleta dos materiais e preparação dos corpos-de-prova

Para os ensaios com amostras indeformadas foi coletado um bloco de solo do talude do campus da UNIJUI, embalado com parafina e serragem para que não se altere as propriedades naturais do solo, após embalado e colocado em uma caixa de madeira, para posteriormente ser enviado ao ENVIRONGEO – Laboratório de Geotecnia da UFRGS, onde foi executado o ensaio de condutividade hidráulica. Para a execução do ensaio, as amostras foram cuidadosamente extraídas deste bloco e moldadas no tamanho (5x10cm e 15x15cm), como pode ser visualizado na Figura 8.

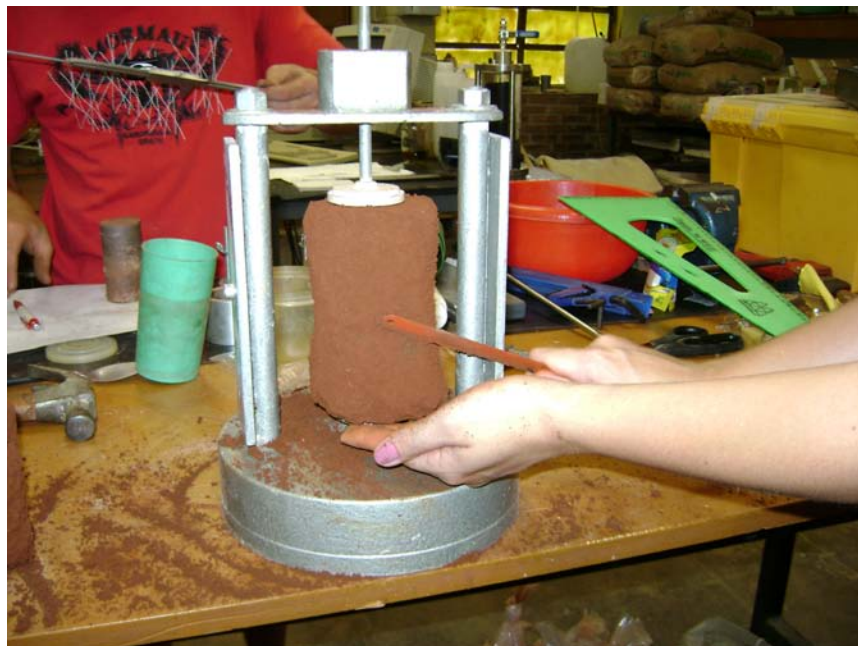


Figura 8 – Amostra de solo indeformada sendo moldada para ensaio.

Para os ensaios que foram realizados no LEC, com amostras remoldadas, foi utilizado um cilindro de diâmetro de 10 cm e altura de 12,73 cm. Foi realizado o ensaio de condutividade hidráulica compactado nas três energias de compactação (normal, intermediária e modificada).

Para as amostras compactadas, o solo foi coletado no talude do campus da UNIJUI, seco ao ar, destorroado, e passado na peneira #10 (2 mm). Posteriormente foi compactado dentro do cilindro e realizado o ensaio.

3.4.2 Ensaios

3.4.2.1 Ensaios de condutividade hidráulica em permeâmetro de parede rígida

Os permeâmetros de paredes rígidas consistem em tubos rígidos que contém a amostra a ser permeada. A amostra tende a apresentar menor expansividade que a amostra ensaiada em um permeâmetro de parede flexível, além de uma maior facilidade no uso, porém apresenta como desvantagem a não saturação total da amostra, a impossibilidade de saturação por contra pressão, a não existência de controle sobre as pressões atuantes na amostra e a existência da possibilidade de haver fluxo lateral pelas paredes do tubo do permeâmetro.

Na pesquisa em questão foi utilizado o permeâmetro do tipo *Compaction mold permeameter*, o qual foi desenvolvido e construído no ENVIRONGEO/UFRGS, segundo a ASTM D 5856.

Entre as partes do equipamento estão: cilindro de aço inox para colocação da amostra e em que é moldada, e cilindro, também em aço inox, para armazenamento do contaminante.

Os materiais utilizados no desenvolvimento deste equipamento são inertes ao ataque de produtos químicos e tóxicos, como é o caso dos hidrocarbonetos que constituem o óleo diesel utilizado nesta pesquisa. Deste modo, grande parte das peças que compõem o equipamento é de aço inox. Em virtude do alto custo do inox, algumas partes em que não há contato com material contaminante são constituídas de outros materiais como o latão. Foi utilizada uma tubulação de nylon por ser inerte ao ataque do óleo diesel.

Neste ensaio foram utilizadas cargas constantes através de aplicação de ar comprimido numa interface ar/água, regulada com um registro de pressão de precisão de 15kPa, resultando em um gradiente hidráulico de 10. A amostra que foi utilizada neste ensaio foi indeformada, a qual foi extraída de um bloco retirado do local de estudo e previamente embalado e enviado ao ENVIRONGEO para realização do ensaio. Lá, ela foi moldada até atingir o tamanho aproximado do cilindro (15x15cm). O líquido percolante foi primeiramente água e após a saturação da amostra foi percolado óleo diesel.

As Figuras 9 e 10 apresentam fotos do permeâmetro, bem como alguns de seus detalhes.



Figura 9 – Vista geral dos permeômetros instalados em uma capela de exaustão de gases

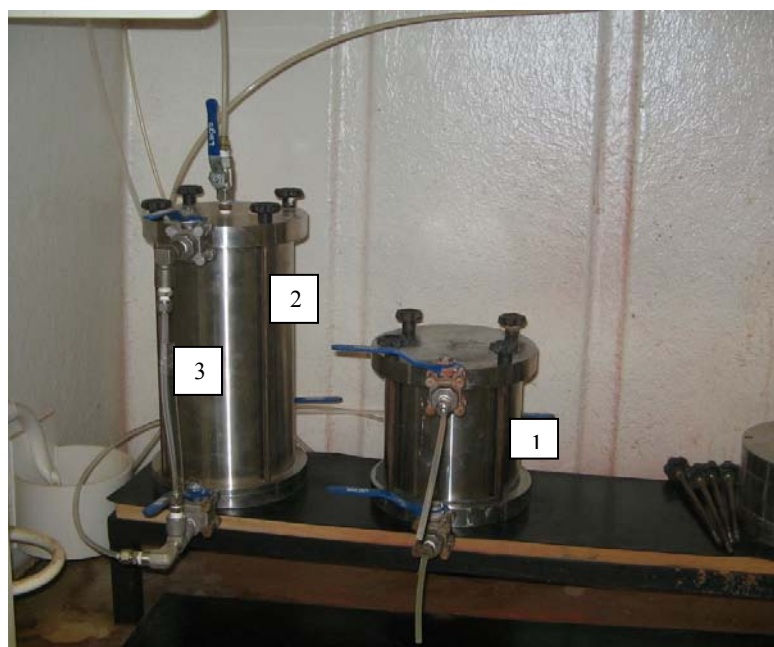


Figura 10 – Permeômetro: (1) Cilindro com a amostra, (2) cilindro que contém o líquido permeante e (3) tubo graduado para leitura da vazão

O ensaio de condutividade hidráulica obedeceu às seguintes etapas:

- a) Preparação da amostra, conforme já mencionado anteriormente;
- b) Colocação da amostra no cilindro, deixando a mesma curar durante vinte e quatro (24) horas;
- c) Início do ensaio de condutividade hidráulica com a percolação de água da base para o topo da amostra com uma carga de 15kPa e gradiente hidráulico de 10, tendo-se o cuidado de retirar todas as bolhas de ar encontradas na tubulação através da percolação de água pela base da amostra;
- d) Retirada de leituras regulares no ensaio medindo-se a altura do material permeante no reservatório de contaminante, com o auxílio de um tubo graduado conectado ao reservatório, onde verifica-se o nível do líquido permeante e juntamente com o valor do peso do líquido permeado pode ser calculado a condutividade hidráulica da amostra;
- e) Continuidade do ensaio até se obter a estabilidade da condutividade hidráulica, ou seja, no mínimo quatro valores de condutividade hidráulica próximos;
- f) Depois de obtida esta estabilidade, preparou-se o ensaio, isolando-se a amostra através do fechamento das válvulas e retirando-se a pressão aplicada;
- g) Posteriormente foi substituída no reservatório de contaminante a água por óleo diesel, tornando-se novamente o cuidado de retirar as bolhas de ar que ficaram na tubulação.
- h) Reinício do ensaio com a mesma carga e o mesmo gradiente hidráulico, até se obter novamente a estabilidade da condutividade hidráulica, com pelo menos quatro leituras de condutividade hidráulica aproximadas;
- i) Após o término do ensaio o equipamento foi desmontado para a limpeza e descontaminado.

3.4.2.2 Ensaio de condutividade hidráulica em permeômetro de parede flexível

O permeômetro de parede flexível é o mais confiável em função do selamento que a membrana proporciona ao redor de toda a amostra. Possui vantagens como: amostras indeformadas podem ser facilmente testadas, a contra pressão pode ser utilizada para saturar a amostra e as tensões verticais e horizontais podem ser facilmente monitoradas.

Os ensaios de determinação do coeficiente de condutividade hidráulica em amostras deformadas e indeformadas, segundo a ASTM D 5084 (1990), foram realizados no equipamento permeâmetro de parede flexível, ilustrado pela Figura 11.

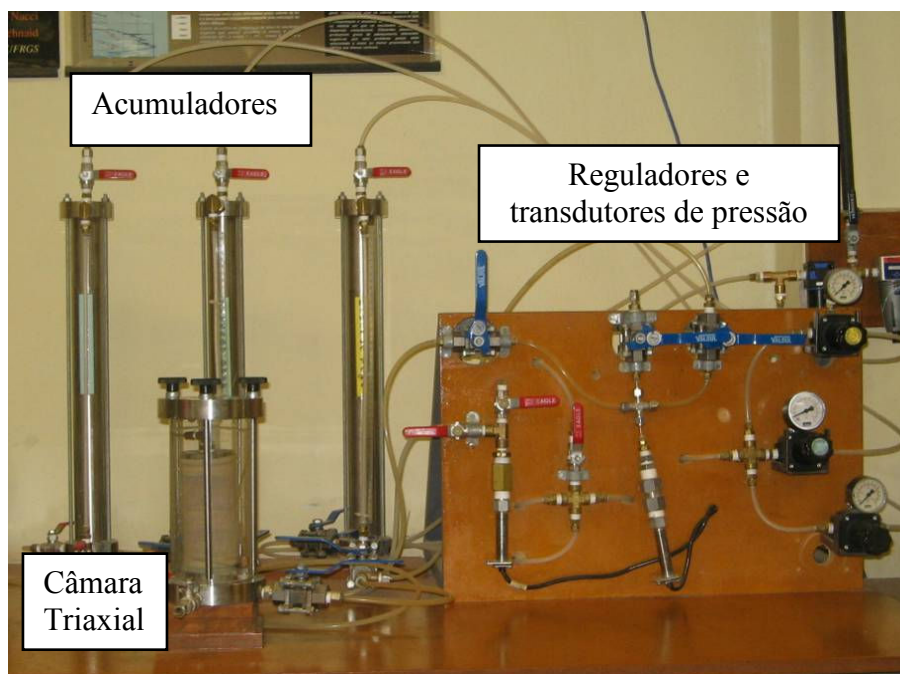


Figura 11: Equipamento Permeâmetro de parede flexível - ENVIRONGEO/UFRGS

Os ensaios de condutividade hidráulica foram realizados pelas seguintes etapas: instalação, percolação, saturação, adensamento e medição da condutividade hidráulica. As etapas são descritas detalhadamente e individualmente nos itens a seguir.

Instalação

Após a moldagem, o corpo-de-prova foi instalado na câmara do permeâmetro de parede flexível sobre o pedestal, com as pedras porosas convencionais e papel filtro nas extremidades. Posteriormente foi fixado por anéis de vedação nas extremidades. Após selar a câmara se procede com o enchimento da mesma com água.

Percolação

Esta fase visa à eliminação de bolhas de ar na amostra e facilita a saturação do corpo-de-prova. O procedimento iniciou-se com a aplicação de uma contra pressão (altura de coluna de água disponível para percolação) e uma tensão de confinamento na amostra, de modo que a tensão efetiva fique em aproximadamente 10 kPa. A base deve estar conectada ao reservatório de água e o topo à pressão ambiente, para que aconteça o fluxo. Esta etapa dura até que percole 2 vezes o volume de vazios da amostra, aproximadamente 24 horas, ou até quando não são mais percebidas bolhas de ar saindo da amostra.

Saturação

A saturação consiste na aplicação de incrementos de tensão de 50kPa na tensão confinante e na contra pressão, mantendo-se a tensão efetiva constante em aproximadamente 20kPa. O novo incremento foi aplicado somente depois que a contra pressão aplicada no topo da amostra atinge a base do corpo-de-prova. A garantia de saturação da amostra foi monitorada através da medição do parâmetro B de Skempton, medido nos dois últimos níveis de tensões possíveis, limitado pela contra pressão máxima utilizada.

Adensamento

No adensamento foi medida a variação volumétrica do corpo-de-prova quando aplicada a tensão efetiva média de 100kPa, conforme ASTM D 5084 (1990). Constituiu-se em aplicar um incremento de tensão confinante desejado, deixando a drenagem aberta, verificando-se assim o volume de água que saia da amostra, até atingir a estabilidade de volume.

Medição da condutividade hidráulica

Os ensaios para a determinação do coeficiente de condutividade hidráulica foram realizados com gradiente hidráulico constante de aproximadamente 10, sendo que foi admitida uma diferença máxima de 5% na medição da tensão de topo e base, conforme ASTM D 5084 (1990).

O gradiente hidráulico foi aplicado no corpo-de-prova através do incremento de tensão no topo da amostra e da diminuição, de mesma magnitude (carga hidráulica - h), em sua base, registrada pelos transdutores eletrônicos de pressão. Baseando-se na medição do volume de água que entra e que sai da amostra (vazão - Q), através de tubos graduados conectados aos acumuladores de entrada e saída de água e o tempo total de ensaio, calculou-se o coeficiente de condutividade hidráulica, de acordo com a lei de Darcy, utilizando a seguinte equação:

$$k = \frac{L.Q}{A.t.h} \quad \text{Equação (7)}$$

Sendo,

K = Condutividade hidráulica (m/s);

Q = Vazão de água passante pela amostra (m³)

A = Área transversal da amostra (m²) – constante do corpo-de-prova

L = comprimento da amostra (m) – constante do corpo-de-prova;

h = Carga Hidráulica (m);

t = Duração do ensaio (s).

No final do ensaio efetuou-se a correção da condutividade hidráulica segundo a viscosidade e temperatura da água, sabendo-se que a viscosidade da água a 20°C é igual a 1,0μ.

3.4.2.3 Ensaio de condutividade hidráulica in situ em furo de sondagem

O ensaio de condutividade hidráulica em furo de sondagens consiste na medida da vazão, representada pelo volume d'água absorvido ou retirado durante um intervalo de tempo, em função da aplicação de diferenciais de pressão induzidas por colunas d'água, resultante da injeção ou da retirada de água no furo.

Para realização deste ensaio foi necessário a implementação de um equipamento, que seguiu as orientações técnicas do boletim técnico da ABGE de 1996.

Para o ensaio de infiltração foram utilizados os seguintes equipamentos:

- a) 01 trado, composto por peças de aço e cobre, de diâmetro igual a 2 ½” (63,5 mm) e altura 1,60 metros;
- b) Tubo de acoplamento: composto por peças coladas de PVC rígido, diâmetro 75 mm e altura 0,80 metros;
- c) Tambor graduado em litros com capacidade de aproximadamente 200 litros;
- d) 01 proveta com capacidade de 1 litro;
- e) Escarificador composto por peças metálicas e extremidade com elementos metálicos pérfuro-cortantes, diâmetro 2 ½” (63,5 mm) e altura 1,10 metros.
- f) Cronômetro;
- g) Planilha para anotação dos dados.

Para a execução do ensaio seguiu-se os seguintes passos: primeiro faz-se o furo de aproximadamente 1 metro de profundidade com o auxílio de um trado (Figura 12); escarifica-se com o auxílio do escarificador (Figura 13); encaixa-se o tubo acoplador (Figura 14); enche-se o furo de água até a marca zero (determinada durante os ensaios), tomando-se este instante como tempo zero. O nível da água do furo foi mantido constante, alimentado por uma fonte apropriada, medindo-se o volume de água introduzido durante certo intervalo de tempo (vazão), e calculado através da equação (8). Na Figura 15 está representado um esquema do ensaio e a Figura 16 mostra a seqüência do ensaio descrita acima.

$$k = \frac{Q}{h} \frac{1}{cu.r} \quad \text{Equação (8).}$$

Onde:

Q= nível d'água

h= profundidade

cu= coeficiente de condutividade de meios não saturados (obtido do boletim 04, 1996 da ABGE)

r = raio



Figura 12: Trado

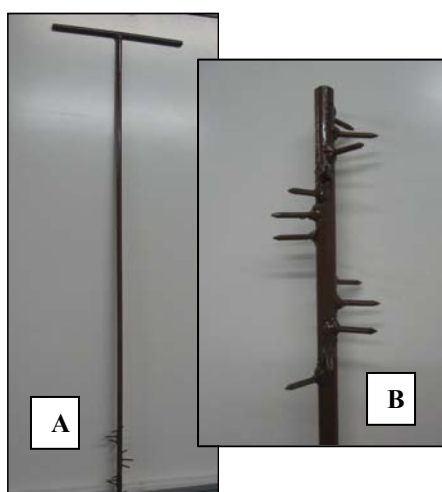


Figura 13: A- Escarificador completo; B-Detalhe dos elementos pérfuros cortantes



Figura 14- Tubo acoplador

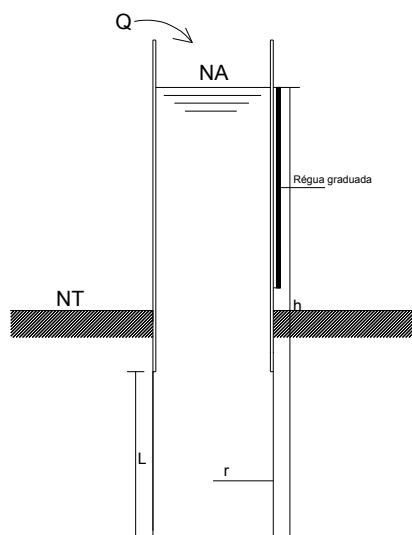


Figura 15: Esquema do ensaio em furo de sondagem

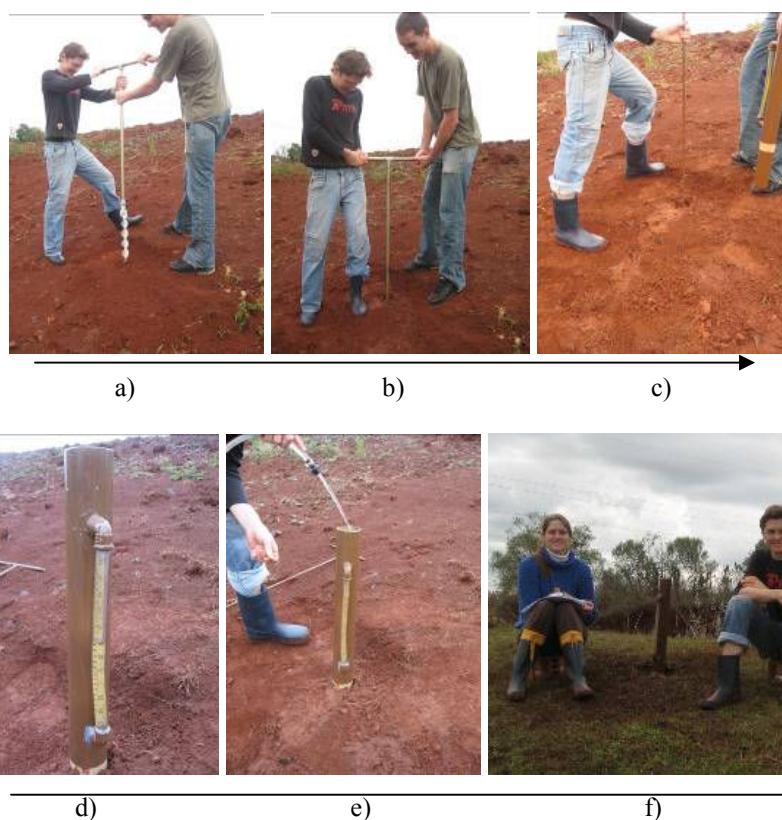


Figura 16: Seqüência de execução do ensaio em furo de sondagem – a) preparação do local; b) realização do furo; c) escarificação do furo; d) colocação do tubo acoplador; e) enchimento com água; f) leitura e anotações na planilha.

Após o ensaio elaborou-se um gráfico onde foi lançado na abscissa o tempo, e na ordenada o volume acumulado ou vazão. Este gráfico possibilita a observação da estabilização

da vazão, que é caracterizada por uma reta. Essa então será a vazão utilizada no cálculo da permeabilidade (vazão constante).

APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS

Neste capítulo são apresentados os resultados dos ensaios estabelecidos no programa experimental, ou seja, apresentação e análise dos resultados obtidos nos ensaios de condutividade hidráulica, objetivando determinar o valor do k do solo em estudo para aplicação em barreiras impermeáveis.

O coeficiente de condutividade hidráulica (k) representa a característica hidráulica dos solos, que indica a velocidade de percolação da água pelo interior do material.

O coeficiente de condutividade hidráulica varia de um solo para outro em função de suas características físicas, como: grau de saturação, em relação a estrutura e anisotropia, pois quanto maior o tamanho das partículas e os vazios do solo, maior o valor de k , quando o mesmo estiver submetido a uma diferença de potencial (carga hidráulica).

4.1 Coeficiente de condutividade hidráulica em permeâmetro de parede flexível

Os resultados do coeficiente de condutividade hidráulica (k) em permeâmetro de parede flexível da amostra do solo do talude do campus da UNIJUÍ, no estado natural são apresentados na Figura 17. Cada barra representa uma das leituras realizadas durante o ensaio.

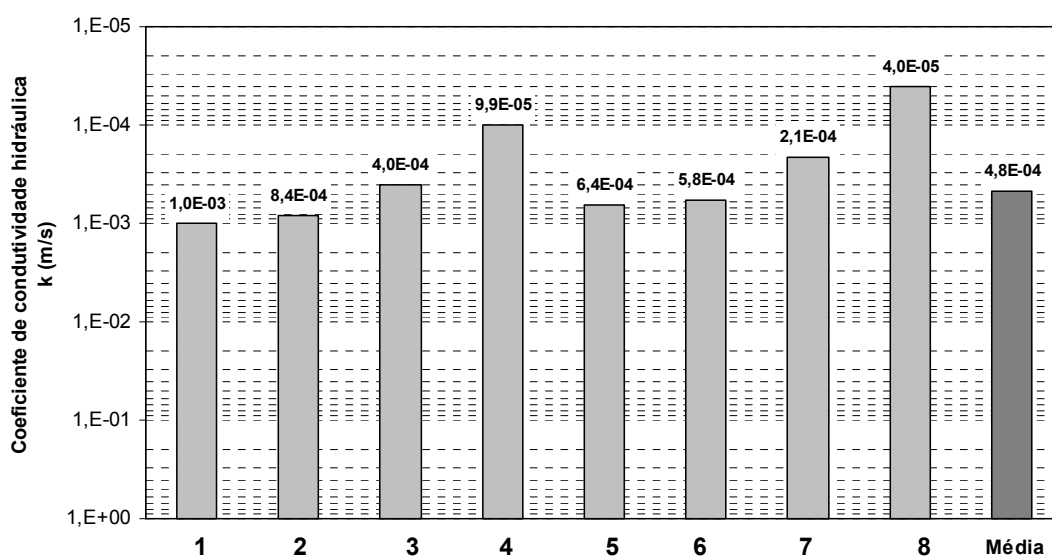


Figura 17: Coeficiente de condutividade hidráulica do solo do campus

Analisando os resultados encontrados, vimos que o coeficiente de condutividade hidráulica (k) deste solo em seu estado natural, utilizando este equipamento é na ordem de 10^{-4} m/s.

A partir destes resultados pode-se contestar nas tabelas clássicas de classificação de permeabilidades dos solos (como as apresentadas por Lambe, 1974) que diz que solos com alto teor de argila, que é o nosso caso, apresentam baixo valor de k . Porém não importa somente o teor de argila e sim a estrutura do solo, pois os solos residuais e solos evoluídos apresentam estrutura com macroporos, nos quais a água percola com bastante facilidade e se estes materiais tiverem sua estrutura desfeita mecanicamente e em seguida compactada, o k diminui consideravelmente.

4.2 Coeficiente de condutividade hidráulica em permeâmetro de parede rígida

4.2.1 Amostras indeformadas

Para realização deste ensaio foram utilizados dois tipos de fluidos: água e óleo. A amostra de solo, quando percolada com água apresentou uma condutividade na ordem de 10^{-7} m/s, conforme Figura 18, sendo que foi permeado na amostra um volume equivalente a 2 vezes o seu volume de vazios.

Quando se alterou o fluido percolado de água para óleo, observou-se uma redução no valor do coeficiente de condutividade hidráulica com valores na ordem de 10^{-8} m/s.

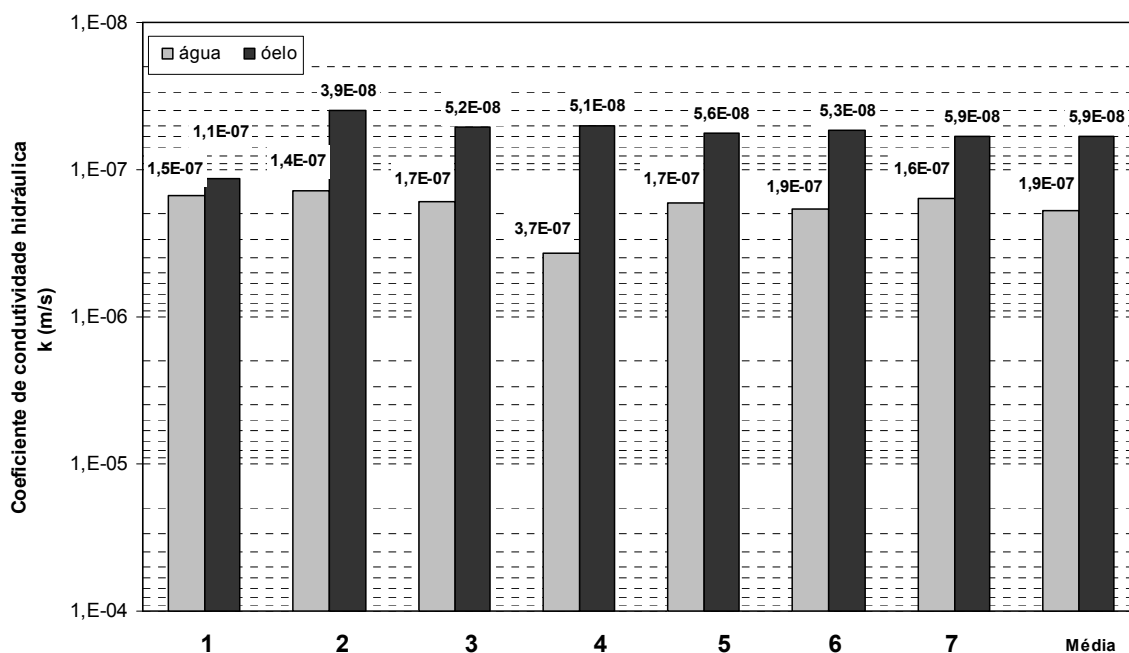


Figura 18: Resultados das leituras do ensaio da amostra indeformada.

Quando se comparam as amostras naturais ensaiadas, observa-se uma diferença nos valores encontrados quando comparado o permeâmetro de parede rígida ($1,91 \times 10^{-7} \text{m/s}$) e o permeâmetro de parede flexível ($4,77 \times 10^{-4} \text{m/s}$). Isto se deve a técnica empregada; o permeâmetro de parede flexível ser mais confiável em função do selamento que a membrana proporciona na amostra e a total saturação da amostra que não pode ser garantido no permeâmetro de parede rígida.

4.2.2 Amostras compactadas

Foram preparadas amostras (em duplicata) nas três energias de compactação (Proctor): normal, intermediária e modificada, onde a Tabela 6 apresenta os parâmetros utilizados para a moldagem.

Tabela 6: Parâmetros utilizados para moldagem das amostras compactadas

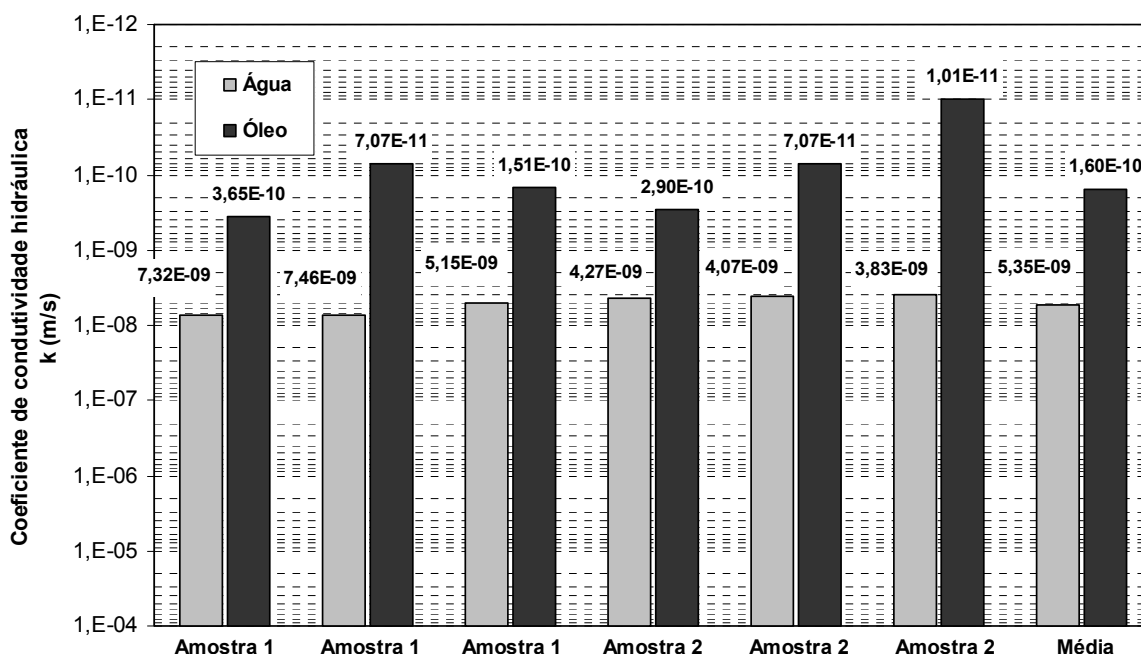
Fonte: Bernardi (2006)

Energia de compactação - Proctor	$h_{ót}$ (%)	$\gamma_{dmáx}$ (kN/m ³)	γ_n (kN/m ³)	e
Normal	32,30	13,93	18,43	1,04
Intermediária	30,0	14,73	19,15	0,93
Modificada	29,0	15,03	19,39	0,89

Em relação aos fluidos, foram utilizados água e óleo diesel onde suas características estão apresentadas na Tabela 2 do item 3.3.3.

As amostras moldadas na energia normal (EN) de compactação, percolando água, apresentaram um coeficiente de condutividade médio na ordem de 10^{-9} m/s, e quando alteramos o fluido percolado, passamos a ter um coeficiente de condutividade médio mais baixo, na ordem de 10^{-10} m/s.

A Figura 19 apresenta os resultados encontrados para energia normal de compactação.



As amostras moldadas na energia intermediária (EI) apresentaram resultados próximos da energia normal, na ordem de 10^{-9} m/s, e quando alteramos o fluido percolado, passamos a

ter um coeficiente de condutividade médio mais baixo, na ordem de 10^{-10} m/s, como pode ser visualizado na Figura 20.

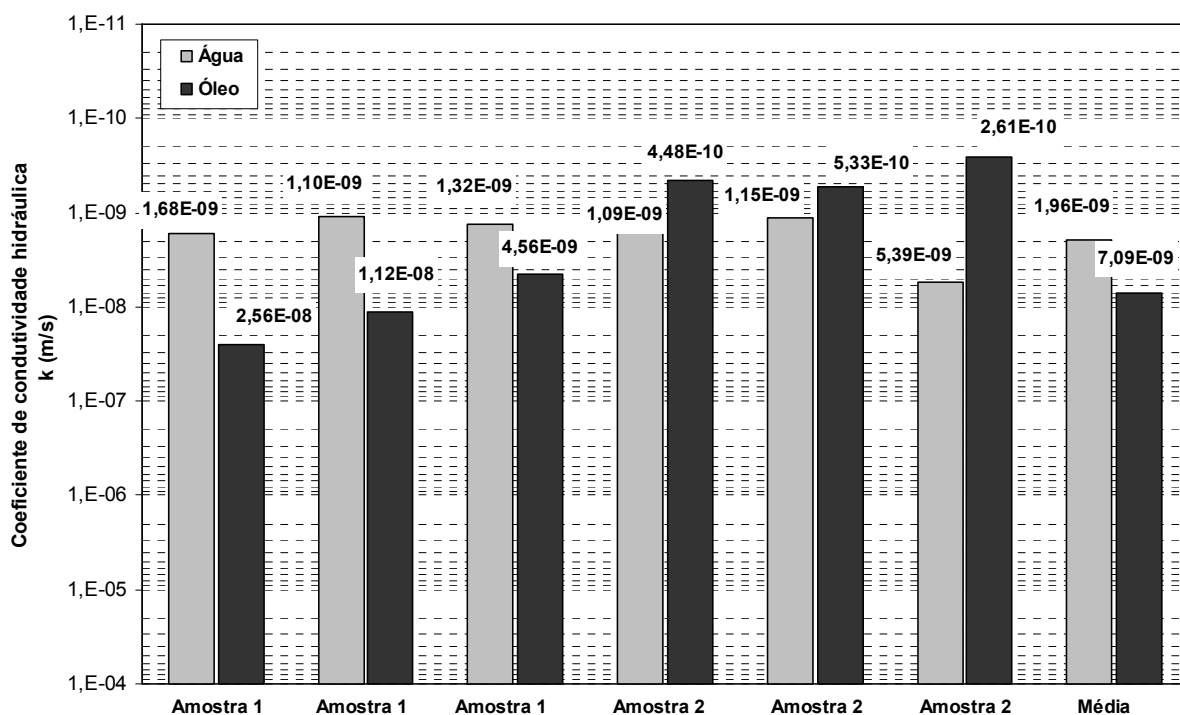


Figura 20: Coeficientes de condutividade hidráulica - EI

Para as amostras moldadas na energia modificada (EM), encontram-se valores para a condutividade hidráulica mais baixo daqueles encontrados anteriormente nas outras energias. Quando se percola com água, encontramos valores na ordem de 10^{-11} m/s e quando alteramos o fluido percolado, encontramos valores médios na ordem de 10^{-12} m/s, como pode ser visualizado na Figura 21.

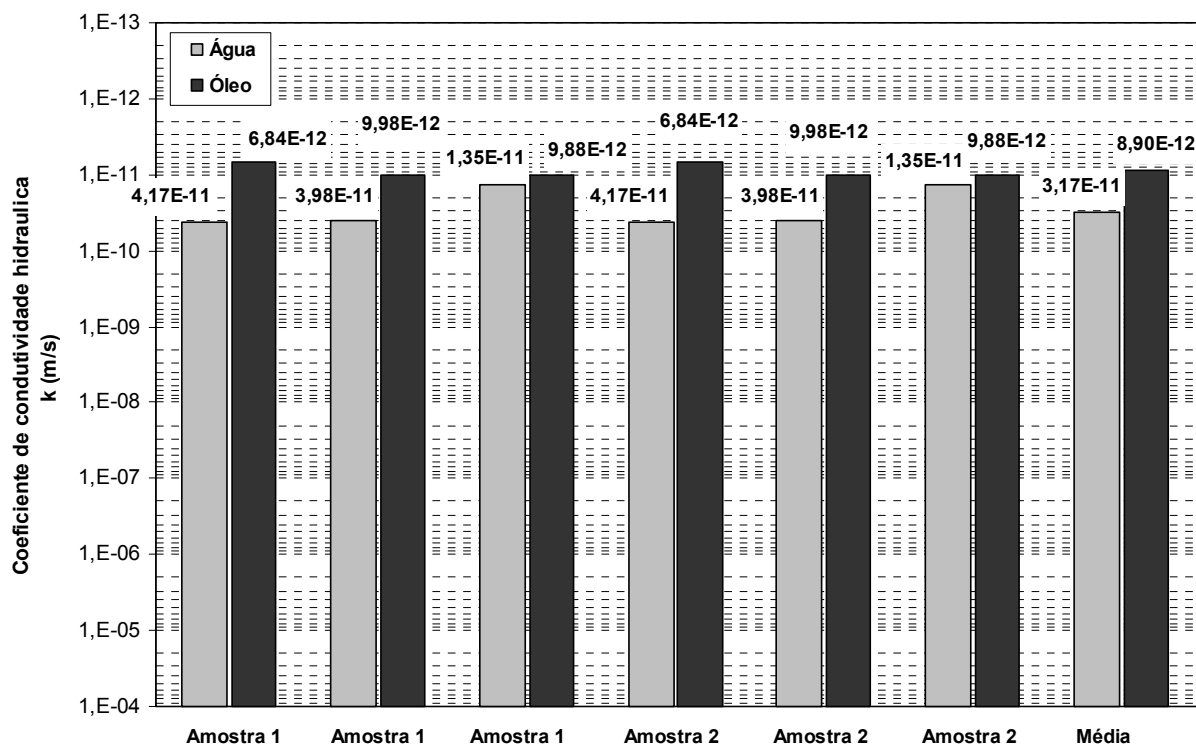


Figura 21: Coeficientes de condutividade hidráulica - EM

A Tabela 7 e a Figura 22 apresentam o resumo dos resultados globais encontrados do coeficiente de condutividade hidráulica (k) do solo em estudo. As planilhas com os dados obtidos nos ensaios de laboratório estão apresentadas no Anexo I.

Tabela 7: Resumo dos Coeficientes de Condutividade Hidráulica

Energia	Percolado	e	k (m/s)
Normal	Água	1,04	5,35E-09
Normal	Óleo	1,04	1,60E-10
Intermediária	Água	0,93	1,96E-09
Intermediária	Óleo	0,93	2,76E-10
Modificada	Água	0,89	3,17E-11
Modificada	Óleo	0,89	8,90E-12

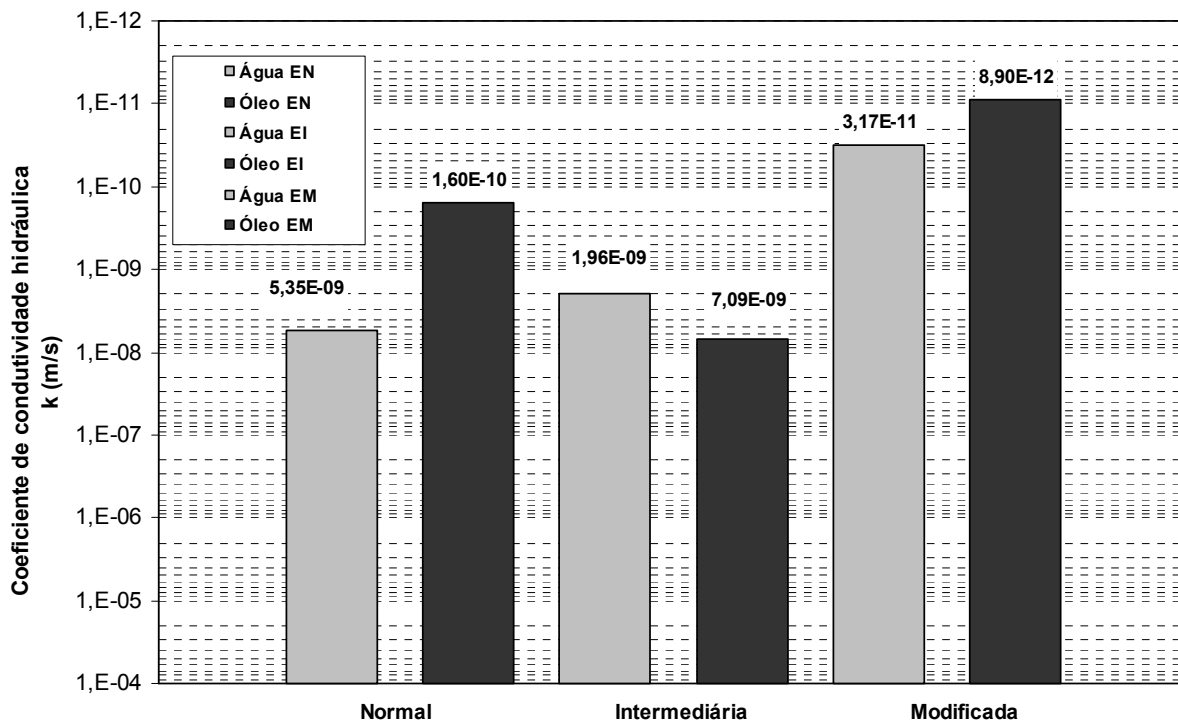


Figura 22: Média dos resultados encontrados nas 3 energias de compactação

Para as três energias foi observada a mesma tendência encontrada nos ensaios com o permeâmetro de parede flexível em que a alteração do fluido de água para óleo reduz os valores de k. Isso se deve provavelmente a maior viscosidade do óleo diesel ($\mu=1,8$ Pa.s) em comparação com a água ($\mu=1,0$ Pa.s).

Na Figura 23 são apresentados os valores de k encontrados *versus* a energia de compactação, onde percebe-se que quanto maior a energia de compactação menor o valor do k encontrado e na Figura 24 é apresentada uma relação entre o k *versus* o índice de vazios, que mostra que o k varia em função do índice de vazios, ou seja, quanto menor o índice de vazios mais baixo é o valor de k, como era de se esperar.

Também quando se altera a energia normal para a energia intermediária não se observa uma diferença significativa. As amostras compactadas ficaram na mesma ordem de grandeza, apenas quando se altera para a energia modificada é que se percebe uma diminuição significativa. Isso nos mostra que do ponto de vista prático é pouco importante, pois solos com k na ordem de 10^{-9} m/s são solos praticamente impermeáveis, então não valeria a pena gastar mais energia para ficarmos na mesma ordem de grandeza.

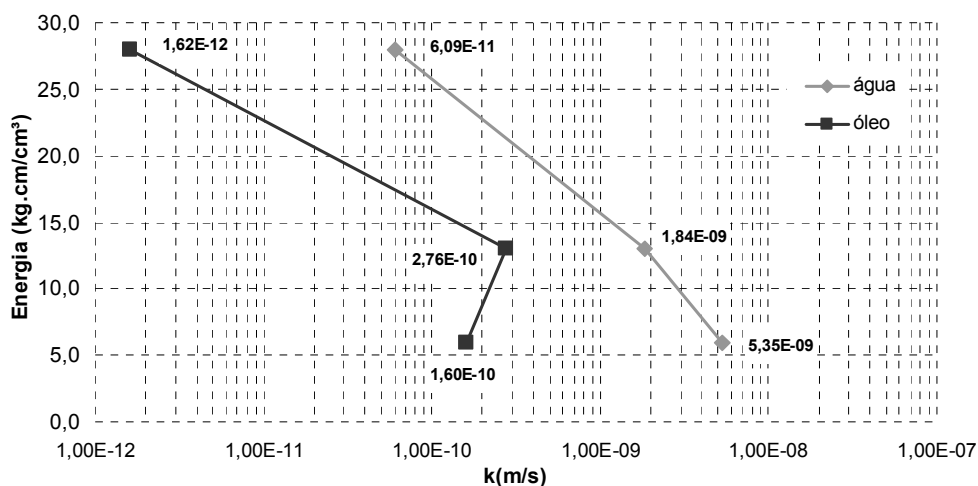


Figura 23: Energia versus k

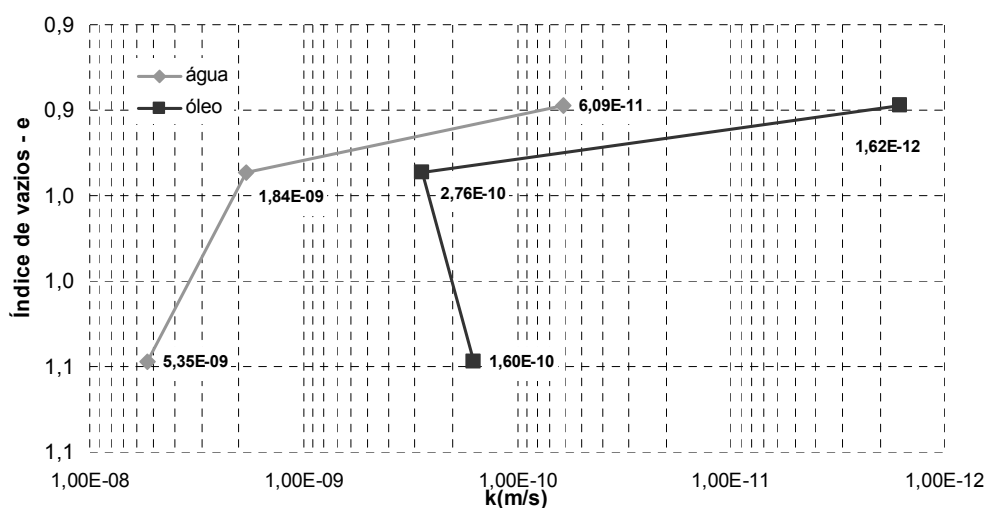


Figura 24: Índice de vazios versus k

Se compararmos o solo em seu estado natural ($k=10^{-7}$ m/s) e compactado na energia normal ($k=10^{-9}$ m/s) podemos afirmar que a condutividade hidráulica diminui consideravelmente, e se aumentarmos a energia para modificada, o k diminui mais ainda, o que podemos afirmar que este solo pode ser utilizado como barreiras impermeáveis verticais nas obras correntes de engenharia.

Quanto às amostras compactadas conclui-se que quanto maior a energia de compactação aplicada, menor é o valor encontrado de k, ou seja, o solo é mais impermeável. Então, alterando a energia da normal para intermediária não valeria a pena, pois a condutividade hidráulica não altera significativamente. Porém se alterar para a energia

modificada, terá um resultado satisfatório, pois o k diminui consideravelmente, podendo ser aplicado como barreiras impermeáveis.

Nota-se a redução de k quando se altera a energia de compactação de 10^{-9} m/s (água) 10^{-10} m/s (óleo) para 10^{-10} m/s (água) – 10^{-11} m/s (óleo) o que do ponto de vista prático pode ser pouco importante visto que nesta ordem de grandeza o material é praticamente impermeável.

4.3 Coeficiente de condutividade hidráulica in situ

Os ensaios realizados *in situ* foram realizados em furo de sondagens em três locais distintos da cidade de Ijuí, já estudados anteriormente por Sala (2007) e Diemer (2008).

O primeiro local a ser ensaiado foi o talude do Campus da Unijuí. As propriedades físicas médias deste solo estão apresentadas na Tabela 3 do item 3.3.1.

Foram realizados 5 furos ao longo do talude, como pode ser visualizado na Figura 25. Porém no furo 5 não foi possível realizar medições pois se enquadrava no horizonte c.

Para os furos ensaiados neste local encontrou-se um coeficiente de condutividade médio de $1,23 \times 10^{-6}$ m/s, que está representado na Figura 26, que nos mostra uma tendência de aumento no valor de k com a profundidade devido a variação nas propriedades do solo, o que é típico de solos residuais.



Figura 25: Locais ensaiados no talude do campus

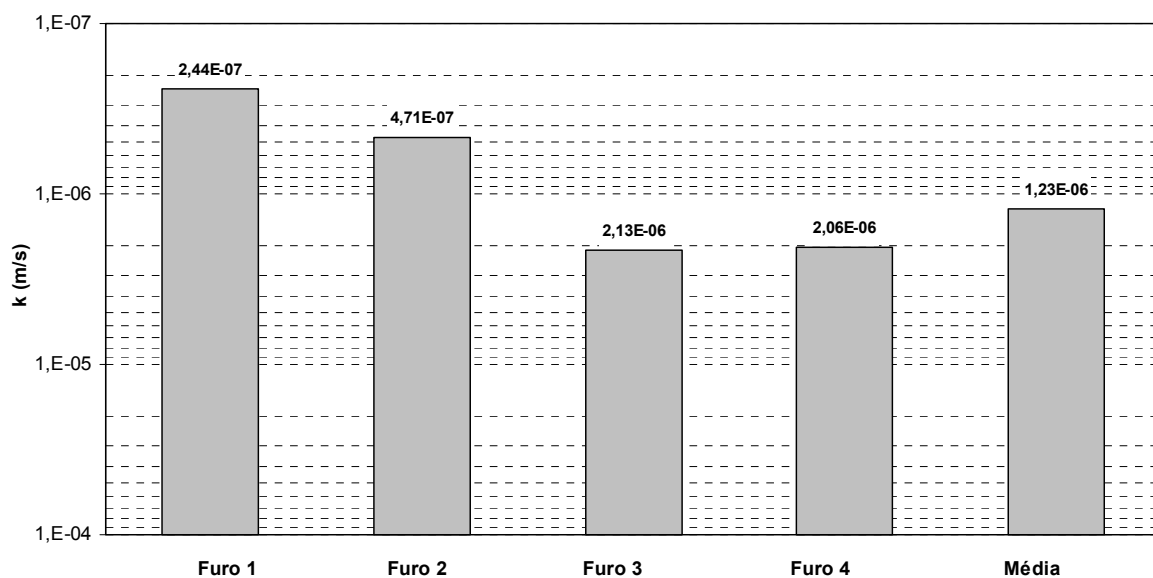


Figura 26: Condutividade Hidráulica Talude do Campus

O segundo local estudado foi na Rua José Gabriel no bairro Independência. A Figura 27 apresenta o local exato do ensaio, e as propriedades físicas médias deste solo estão apresentadas na Tabela 8.



Figura 27: Local do ensaio da Rua José Gabriel

Fonte: Sala (2007)

Tabela 8: Propriedades físicas médias do solo

Fonte: Sala (2007).

Propriedades	Valores Médios
Limite de Liquidez (LL)	81%
Limite de Plasticidade (LP)	60%
Índice de Plasticidade (IP)	21%
Peso específico real dos grãos (G)	29,04 kg/cm ³
Índice de Atividade (Ia)	0,25

Foram realizados 2 furos neste local, o qual apresentou um coeficiente de condutividade médio de $8,48 \times 10^{-7}$ m/s, podendo ser visualizado na Figura 28.

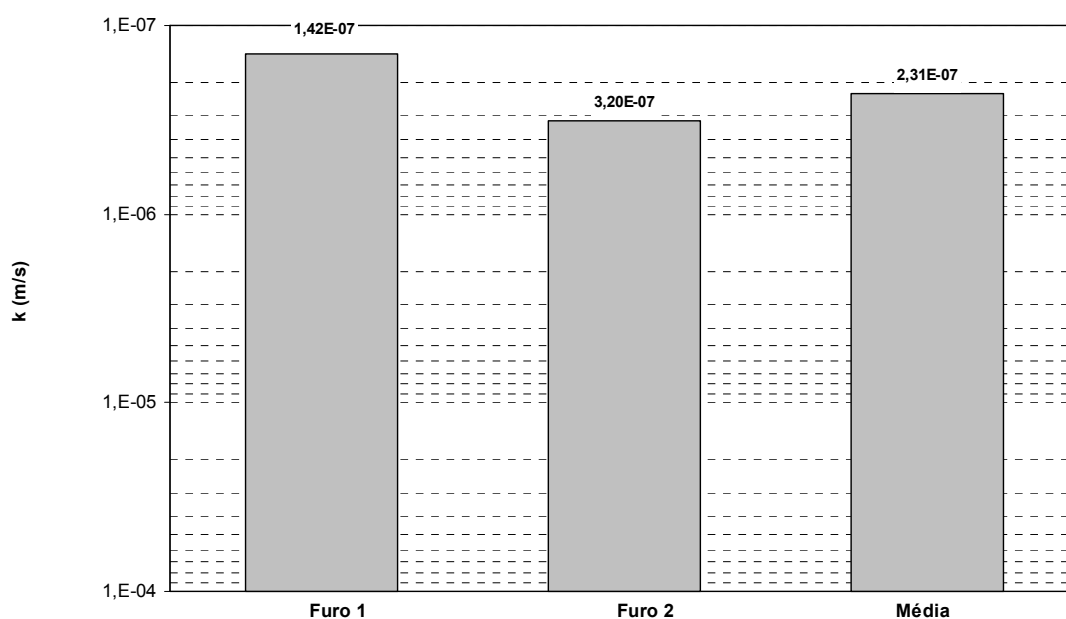


Figura 28: Condutividade Hidráulica da Rua José Gabriel

O terceiro local estudado foi na Rua Venâncio Aires nº 356 no centro da cidade de Ijuí. A Figura 29 apresenta o local exato do ensaio, e as propriedades físicas médias estão apresentadas na Tabela 9.



Figura 29: Local do ensaio da Rua Venâncio Aires nº 356

Fonte: Sala (2007)

Foram realizados 2 furos neste local, onde se encontraram valores médio de $8,48 \times 10^{-7} \text{m/s}$, conforme representado na Figura 30.

Tabela 9: Propriedades físicas médias do solo

Fonte: Sala (2007).

Propriedades	Valores Médios
Limite de Liquidez (LL)	57%
Limite de Plasticidade (LP)	25%
Índice de Plasticidade (IP)	32%
Peso específico real dos grãos (G)	$28,63 \text{ kg/cm}^3$
Índice de Atividade (Ia)	0,52

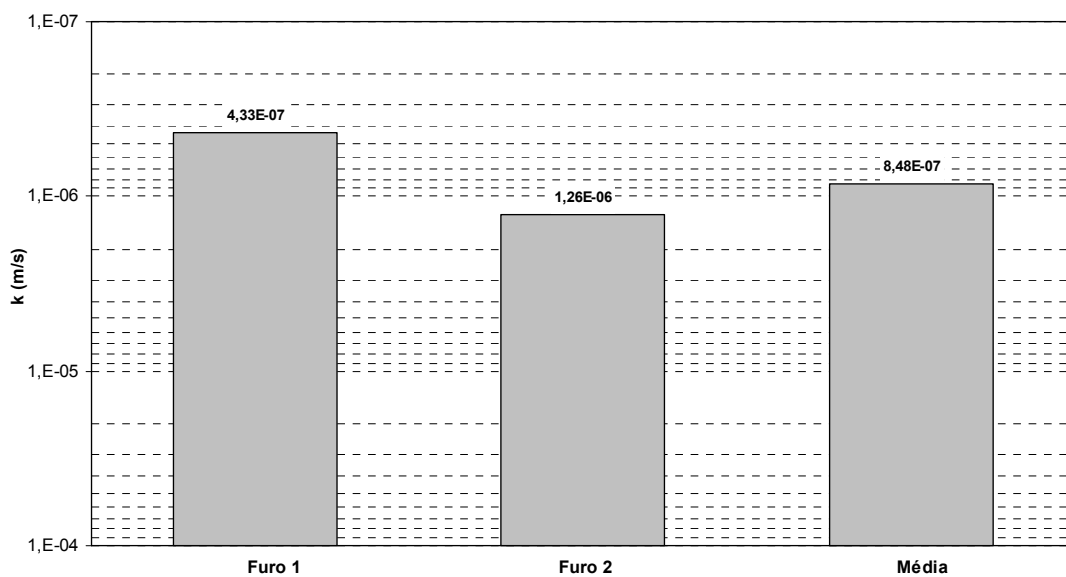


Figura 30: Condutividade Hidráulica Centro

A partir dos resultados apresentados anteriormente, foi possível extrair um valor médio para a condutividade hidráulica do solo de Ijuí. O qual ficou na ordem de $7,7 \times 10^{-7} \text{ m/s}$, como pode ser visualizado na Figura 31.

As planilhas dos ensaios estão no Anexo II.

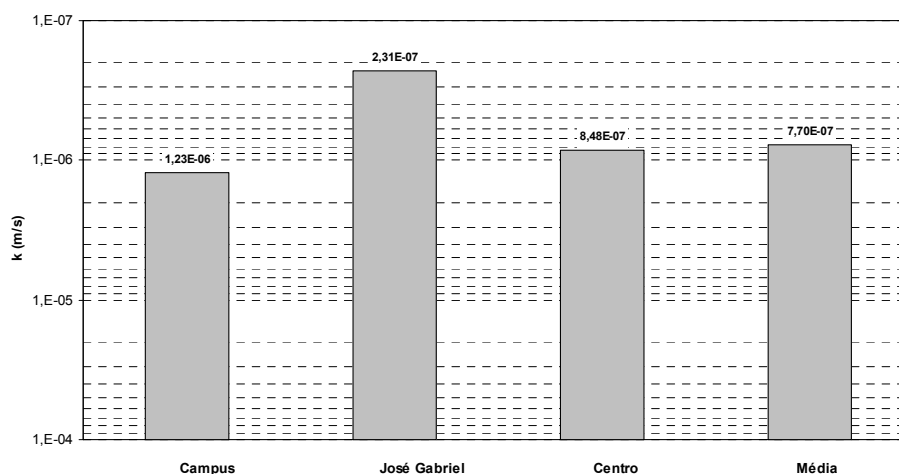


Figura 31: Média dos resultados

A implementação deste equipamento em furo de sondagem, por ser pioneiro na região, teve sua eficiência comprovada, pois os resultados nos mostram que o k médio para este solo encontrado no campo ficou na mesma ordem de grandeza (10^{-7} m/s) do encontrado em laboratório ($1,91 \times 10^{-7}$ m/s), na ordem de 10^{-7} m/s, indicando um solo de baixa permeabilidade como é o de Ijuí.

Porém se for comparada a amostra ensaiada em laboratório no permeâmetro de parede flexível ($k=10^{-4}$ m/s) e os ensaios *in situ* ($k=10^{-7}$ m/s) há uma diferença significativa no valor de k , pois existe a possibilidade de colmatação da argila durante a perfuração o que causa uma redução no valor do k .

CONSIDERAÇÕES FINAIS

5.1 Conclusão

Considerando o estudo realizado para o desenvolvimento desta pesquisa, cujos objetivos eram: determinar os parâmetros de condutividade hidráulica para o solo residual de basalto da região de Ijuí-RS em seu estado natural e compactado, percolando água e óleo diesel através de ensaios de laboratório; determinar o coeficiente de condutividade hidráulica (k) *in situ*; avaliar o efeito da estrutura no valor do k ; avaliar a possibilidade de utilizar este solo compactado como barreira impermeável na ocorrência de contaminação por óleo diesel estabeleceram-se as seguintes conclusões:

- Em relação as amostras naturais, observou-se uma diferença nos valores quando comparado o permeâmetro de parede rígida ($1,91 \times 10^{-7} \text{m/s}$) e o permeâmetro de parede flexível ($4,77 \times 10^{-4} \text{m/s}$). Isto se deve a técnica empregada; o permeâmetro de parede flexível ser mais confiável em função do selamento que a membrana proporciona na amostra, e a total saturação da amostra.
- Em relação ao permeâmetro de parede rígida, pode-se concluir que quando se altera o líquido percolado, o coeficiente de condutividade hidráulica (k) diminui, de $1,91 \times 10^{-7} \text{m/s}$ para $5,91 \times 10^{-8} \text{m/s}$, ou seja, o solo fica mais impermeável se percolado com óleo.
- Quanto às amostras compactadas conclui-se que quanto maior a energia de compactação aplicada, menor é o valor encontrado de k , ou seja, o solo é mais impermeável. Então, alterando a energia da normal para intermediária não valeria a pena, pois a condutividade hidráulica não altera significativamente, porém se alterarmos para a energia modificada, terá um resultado satisfatório, pois o k diminui consideravelmente, podendo ser aplicado como barreiras impermeáveis.

- Quanto menor o índice de vazios, mais baixo é o valor de k , pois solos com alto teor de argila, que é o nosso caso, não necessariamente apresentam baixo valor de k , pois os solos residuais e solos evoluídos apresentam estrutura com macroporos, nos quais a água percola com bastante facilidade e se estes materiais tiverem sua estrutura desfeita mecanicamente e em seguida compactada, o k diminui consideravelmente.
- E quando se considera o fluido percolado nestas amostras compactadas, conclui-se que o k diminui significativamente, passando da normal com $1,60 \times 10^{-10}$ m/s para a modificada com $8,90 \times 10^{-12}$ m/s, que segundo Head (1986), solos com k abaixo de 10^{-9} m/s são solos praticamente impermeáveis.
- Em relação aos ensaios *in situ*, conclui-se que para o solo de Ijuí, o coeficiente de condutividade hidráulica (k) encontrado foi de $7,7 \times 10^{-7}$ m/s, que segundo Lambe & Whitman (1974) (Quadro 1 item 2.2.3), são considerados solos praticamente impermeáveis.
- Sendo assim pode-se dizer que este solo pode ser utilizado como barreira vertical impermeável em obras correntes de engenharias se seguido uma correta técnica de compactação.

5.2 Sugestão para trabalhos futuros

- Estudar a condutividade hidráulica do solo de Ijuí considerando outros fluídos, como: gasolina, chorume, esgoto;
- Estudar a resistência ao cisalhamento de solos contaminados;
- Estudar a condutividade hidráulica de compósitos fibrosos percolando contaminantes.

REFERÊNCIAS

ABDANUR, Adriano. **Remediação de solo e água subterrânea contaminados por hidrocarbonetos de petróleo: Estudo de caso na refinaria Duque de Caxias/RJ**. Dissertação de Mestrado. UFPR - Universidade Federal do Paraná, 2005, 156p.

ABGE - **Associação Brasileira de Geologia de Engenharia**. Boletim 04. Junho de 1996.

ALVES, Gislaine P.M. **Capacidade de Atenuação do Solo de Fundo da Lagoa Anaeróbia da ETE de Passo Fundo/RS**. Dissertação de Mestrado, Universidade de Passo Fundo – UPF. Passo Fundo. 2005, 117p.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **Standard test method for measurement of hydraulic conductivity of porous material using a rigid-wall, compaction-mold permeameter: D 5084**. Philadelphia, 1990.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 10.004 (NB 66) **Resíduos Sólidos – Classificação – Elaboração**. Rio de Janeiro, 1987.

Agencia Brasil. www.agenciabrasil.gov.br Acesso disponível em 12/04/2008.

BERNARDI, Juarez. **Caracterização de Jazidas de solo Residual de Basalto visando seu emprego em Barragens de Terra**. Trabalho de Conclusão de Curso. Universidade Regional do Noroeste do Estado do Rio Grande do Sul – UNIJUÍ. Ijuí. 2006, 159p.

BRAGA, F. dos S.; FONSECA, M. H. G. P.; AGOSTINI, R, de M.; SILVA, V. V.; LOPES, V. L. **Encapsulamento: uma alternativa para o tratamento e destinação final de resíduos oleosos – Um enfoque ambiental (estudos preliminares)**. Simpósio Ítalo Brasileiro de Engenharia Sanitária e Ambiental, Vitória, 2002.

BONAFÉ, Leandro. **Estudo da Resistência de um Solo Residual de Basalto Estabilizado e Reforçado**. Trabalho de Conclusão de Curso. Universidade Regional do Noroeste do Estado do Rio Grande do Sul – UNIJUÍ. Ijuí. 2004, 101p.

CABERLON, R. C. **Condutividade hidráulica de solos contaminados encapsulados**. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – PPGEC/UFRGS, Porto Alegre. 2004, 95p.

CAPUTO, 1988 a, H. P. **Mecânica dos solos e suas aplicações**. Fundamentos. 6º edição, Rio de Janeiro: Livros Técnicos e Científicos. Volume 1, 1988.

CAPUTO, 1988 b, H. P. **Mecânica dos solos e suas aplicações**. Fundamentos. 6º edição, Rio de Janeiro: Livros Técnicos e Científicos. Volume 2, 1988.

CREDDO, Eleusis Bruder Di. **Casos históricos de aplicação de geossintéticos em sistemas de disposição de resíduos sólidos**. Anais do IV Simpósio Brasileiro de Geossintéticos – Geossintéticos’2003 e V Congresso Brasileiro de Geotecnia Ambiental – REGEO’2003. Centro de Eventos da PUC – Porto Alegre – RS. p. 226 a 233.

COMPANHIA DE TECNOLOGIA E SANEAMENTO AMBIENTAL (CETESB). **Manual de Gerenciamento de Áreas Contaminadas**. São Paulo, 389 p. 1999.

CETTRAN-RS. **Conselho Estadual de Trânsito**. <http://www.cetran.rs.gov.br>, acesso disponível em abril de 2008.

DIEMER, F. et al. **Propriedades geotécnicas do solo residual de basalto da região de Ijuí/RS**. Teoria e Prática da Engenharia Civil. Nº 12, pág 25-36. Outubro de 2008.

HEINECK, Carla. **Estudo do Comportamento Hidráulico e Mecânico de Materiais Geotécnicos para Barreiras Horizontais Impermeáveis**. Tese de Doutorado, Universidade Federal do Rio Grande do Sul – UFRGS. Porto Alegre. 2002, 275p.

HEAD, K. H. **Manual of Soil Laboratory Testing**. London: Pentech Press, 1986.

IBGE. **Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística**. www.ibge.gov.br/mapas.

LAMBE, T. W.; WHITMAN, R. V. **Mecânica de Suelos**. – México: Editorial Limusa S.A., 1974.

LEMOS, R. G. **Alteração do Comportamento Mecânico e Hidráulico do Solo Devido à Ação de Materiais Agressivos**. Tese de Doutorado em Engenharia – PPGEC/UFRGS, Porto Alegre. 2005.

MARIANO, Adriano Pinto. **Avaliação do potencial de biorremediação de solos e de águas subterrâneas contaminados com óleo diesel**. Tese de Doutorado, Universidade Estadual Paulista, Campus Rio Claro – SP. 2006, 162p.

PINTO, Carlos de Sousa. **Curso básico de mecânica dos solos em 16 aulas**/Carlos de Sousa Pinto. São Paulo: Oficina de Textos, 2000, 355p.

PINTO Carlos de Souza. **Curso Básico de Mecânica dos Solos**. São Paulo. Oficina de Textos. 247p. 2002.

ROJAS, José Valdomiro Jiménez. **Estudo da remediação de solo contaminado por borra oleosa utilizando a técnica de encapsulamento**. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal do Rio Grande do Sul – UFRGS. Porto Alegre. 2002, 150p.

SALA, Mariana. **Caracterização do solo residual de basalto encontrado na zona urbana do município visando seu emprego em estudos de fundações**. Trabalho de Conclusão de Curso. Universidade Regional do Noroeste do Estado do Rio Grande do Sul – UNIJUÍ. Ijuí. 2007, 148p.

SANTOS, Augusta Brenner. **Comportamento de Liners sob a influência de um contaminante orgânico**. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal do Rio Grande do Sul – UFRGS. Porto Alegre. 2005, 80p.

SOUZA, Julia Brazil. **Condutividade Hidráulica como subsídio na avaliação de área contaminada em Indústria Petroquímica**. 2º Congresso Brasileiro de P&D em petróleo & gás, 2003

VARGAS, M. **Introdução à Mecânica dos Solos**. São Paulo: McGraw Hill. 1977. 509p.

VIECILI, Cristiano. **Determinação dos parâmetros de resistência do solo de Ijuí a partir de ensaios de cisalhamento direto.** Trabalho de Conclusão de Curso. Trabalho de Conclusão de Curso. Universidade Regional do Noroeste do Estado do Rio Grande do Sul – UNIJUÍ. Ijuí. 2003, 76p.

VILAR, Orenco Monje. **Geossintéticos em Aplicações Ambientais.** Anais do IV Simpósio Brasileiro de Geossintéticos – Geossintéticos’2003 e V Congresso Brasileiro de Geotecnia Ambiental – REGEO’2003. Centro de Eventos da PUC – Porto Alegre – RS. p. 203 a 217.

ANEXOS

ANEXO I – PLANILHAS DE ENSAIOS AMOSTRAS COMPACTADAS

ENSAIO DE PERMEABILIDADE - Amostra 1 - ENERGIA NORMAL - água				
DETERMINAÇÃO DE TEOR DE UMIDADE HIGROSCÓPICA			DENSIDADE APARENTE SECA	
Cápsula número			Volume da amostra	2105,13
Peso úmido + cap			Peso do molde+solo+água	8070
Peso seco + cap			Peso do molde	4168
Peso da água			Peso do solo + água	3902
Peso da cápsula			Densidade solo úmido	18,53
Peso do solo seco			densidade solo seco	18,43
Teor de umidade			DETERMINAÇÃO DO TEOR DE UMIDADE DE MOLDAGEM	
Teor de um. médio		15,24%		
MOLDAGEM			Cápsula número	55
Peso amostra seca			Peso úmido + cápsula	109,39
peso amostra na umid. Ótima			Peso seco + cápsula	87,31
Peso amostra na um. Higroscópica		4051	Peso da água	22,08
ÁGUA	Teórica	601	Peso da cápsula	19,2
	Evaporação	4	Peso do solo seco	68,11
	Total	605	Teor de umidade	32,41814711
CARGA VARIÁVEL			Teor de umidade médio	32,38%
$K_T = 2,3 \frac{a.L}{A.t} \cdot \text{Log} \frac{h_0}{h_1}$				
DETERMINAÇÃO Nº	1	2	3	
DIA / MÊS / ANO	13/jun	13/jun	13/jun	
Hora / minuto / segundo (inicial)	0	0	0	
Hora / minuto / segundo (final)	02:14	05:43	03:00	
Área do tubo de carga (cm ²) - a	5,23	5,23	5,23	
Altura do corpo de prova (cm) - L	11,45	11,45	11,45	
Área do corpo de prova (cm ²) - A	183,85	183,85	183,85	
Altura de carga constante (cm) - h				
Altura inicial de água (cm) - h ₀	188,7	188,7	188,7	
Altura final de água (cm) - h ₁	185,3	180	185,5	
Volume de água percolada - (cm ³) - V				
Tempo de ensaio (segundos) - t	8078	20580	10800	
Coefficiente de Permeabilidade (cm/seg) - K _T	7,3232E-09	7,4622E-09	5,15251E-09	
Temperatura do Ensaio (°C)	15	15	15	
Observações				
K_{médio} (m/seg)	6,64597E-09			

ENSAIO DE PERMEABILIDADE - Amostra 1 - ENERGIA NORMAL c/ Contaminante				
DETERMINAÇÃO DE TEOR DE UMIDADE HIGROSCÓPICA			DENSIDADE APARENTE SECA	
Cápsula número			Volume da amostra	2105,13
Peso úmido + cap			Peso do molde+solo+água	8070
Peso seco + cap			Peso do molde	4168
Peso da água			Peso do solo + água	3902
Peso da cápsula			Densidade solo úmido	18,53
Peso do solo seco			densidade solo seco	18,43
Teor de umidade			DETERMINAÇÃO DO TEOR DE UMIDADE DE MOLDAGEM	
Teor de um. médio	15,24%			
MOLDAGEM			Cápsula número	55
Peso amostra seca			Peso úmido + cápsula	109,39
peso amostra na umid. Ótima			Peso seco + cápsula	87,31
Peso amostra na um. Higroscópica	4051		Peso da água	22,08
ÁGUA	Teórica	601	Peso da cápsula	19,2
	Evaporação	4	Peso do solo seco	68,11
	Total	605	Teor de umidade	32,41814711
CARGA VARIÁVEL			Teor de umidade médio	32,38%
$K_T = \frac{2,3 a.L}{A.t} \cdot \frac{\log h_0}{h_1}$				
DETERMINAÇÃO Nº	1	2	3	
DIA / MÊS / ANO	18/jun	18/jun	18/jun	
Hora / minuto / segundo (inicial)	0	0	0	
Hora / minuto / segundo (final)	22:00	23:58:00	23:50	
Área do tubo de carga (cm ²) - a	5,23	5,23	5,23	
Altura do corpo de prova (cm) - L	11,45	11,45	11,45	
Área do corpo de prova (cm ²) - A	183,85	183,85	183,85	
Altura de carga constante (cm) - h				
Altura inicial de água (cm) - h ₀	188,7	188,7	188,7	
Altura final de água (cm) - h ₁	187	188,35	187,95	
Volume de água percolada - (cm ³) - V				
Tempo de ensaio (segundos) - t	80573	85485	85659	
Coefficiente de Permeabilidade (cm/seg) - KT	3,65432E-10	7,06586E-11	1,51264E-10	
Temperatura do Ensaio (°C)	15	15	15	
Observações				
$k_{médio}$ (m/seg)	1,95785E-10			

ENSAIO DE PERMEABILIDADE - Amostra 2 - ENERGIA NORMAL - água				
DETERMINAÇÃO DE TEOR DE UMIDADE HIGROSCÓPICA			DENSIDADE APARENTE SECA	
Cápsula número			Volume da amostra	2105,13
Peso úmido + cap			Peso do molde+solo+água	8050
Peso seco + cap			Peso do molde	4168
Peso da água			Peso do solo + água	3882
Peso da cápsula			Densidade solo úmido	18,53
Peso do solo seco			densidade solo seco	18,44
Teor de umidade			DETERMINAÇÃO DO TEOR DE UMIDADE DE MOLDAGEM	
Teor de um. médio		15,24%		
MOLDAGEM			Cápsula número	55
Peso amostra seca			Peso úmido + cápsula	127,39
peso amostra na umid. Ótima			Peso seco + cápsula	101,54
Peso amostra na um. Higroscópica		4051	Peso da água	25,85
ÁGUA	Teórica	601	Peso da cápsula	19,2
	Evaporação	4	Peso do solo seco	82,34
	Total	605	Teor de umidade	31,39421909
CARGA VARIÁVEL			Teor de umidade médio	31,53%
$K_T = 2,3 \frac{a.L}{A.t} \cdot \frac{\log h_0}{h_1}$				
DETERMINAÇÃO Nº	1	2	3	
DIA / MÊS / ANO	20/jun	20/jun	20/jun	
Hora / minuto / segundo (inicial)	0	0	0	
Hora / minuto / segundo (final)	02:29	03:05	02:31	
Área do tubo de carga (cm ²) - a	5,23	5,23	5,23	
Altura do corpo de prova (cm) - L	11,45	11,45	11,45	
Área do corpo de prova (cm ²) - A	183,85	183,85	183,85	
Altura de carga constante (cm) - h				
Altura inicial de água (cm) - h ₀	188,7	188,7	188,7	
Altura final de água (cm) - h ₁	186,5	186,1	186,7	
Volume de água percolada - (cm ³) - V				
Tempo de ensaio (segundos) - t	8940	11100	9060	
Coeficiente de Permeabilidade (m/seg) - K _T	4,26789E-09	4,06671E-09	3,82646E-09	
Temperatura do Ensaio (°C)	15	15	15	
Observações				
k_{médio} (m/seg)	4,05369E-09			

ENSAIO DE PERMEABILIDADE - Amostra 2 - ENERGIA NORMAL c/ Contaminante				
DETERMINAÇÃO DE TEOR DE UMIDADE HIGROSCÓPICA			DENSIDADE APARENTE SECA	
Cápsula número			Volume da amostra	2105,13
Peso úmido + cap			Peso do molde+solo+água	8050
Peso seco + cap			Peso do molde	4168
Peso da água			Peso do solo + água	3882
Peso da cápsula			Densidade solo úmido	18,53
Peso do solo seco			densidade solo seco	18,44
Teor de umidade			DETERMINAÇÃO DO TEOR DE UMIDADE DE MOLDAGEM	
Teor de um. médio		15,24%		
MOLDAGEM			Cápsula número	55
Peso amostra seca			Peso úmido + cápsula	127,39
peso amostra na umid. Ótima			Peso seco + cápsula	101,54
Peso amostra na um. Higroscópica		4051	Peso da água	25,85
ÁGUA	Teórica	601	Peso da cápsula	19,2
	Evaporação	4	Peso do solo seco	82,34
	Total	605	Teor de umidade	31,39421909
CARGA VARIÁVEL			Teor de umidade médio	31,53%
$K_T = 2.3 \frac{a.L}{A.t} \cdot \log \frac{h_0}{h_1}$				
DETERMINAÇÃO N°	1	2	3	
DIA / MÊS / ANO	20/jun	20/jun	20/jun	
Hora / minuto / segundo (inicial)	0	0	0	
Hora / minuto / segundo (final)	22:22	23:44	23:47	
Área do tubo de carga (cm ²) - a	5,23	5,23	5,23	
Altura do corpo de prova (cm) - L	11,45	11,45	11,45	
Área do corpo de prova (cm ²) - A	183,85	183,85	183,85	
Altura de carga constante (cm) - h				
Altura inicial de água (cm) - h ₀	188,7	188,7	188,7	
Altura final de água (cm) - h ₁	187,35	188,35	188,65	
Volume de água percolada - (cm ³) - V				
Tempo de ensaio (segundos) - t	80573	85485	85659	
Coefficiente de Permeabilidade (m/seg) - K _T	2,89925E-10	7,06586E-11	1,00656E-11	
Temperatura do Ensaio (°C)	15	15	15	
Observações				
k_{médio} (m/seg)	1,2355E-10			

ENSAIO DE PERMEABILIDADE - Amostra 1 - ENERGIA INTERMEDIÁRIA - água				
DETERMINAÇÃO DE TEOR DE UMIDADE HIGROSCÓPICA			DENSIDADE APARENTE SECA	
Cápsula número			Volume da amostra	2105,13
Peso úmido + cap			Peso do molde+solo+água	8070
Peso seco + cap			Peso do molde	4168
Peso da água			Peso do solo + água	3902
Peso da cápsula			Densidade solo úmido	18,53
Peso do solo seco			densidade solo seco	18,43
Teor de umidade			DETERMINAÇÃO DO TEOR DE UMIDADE DE MOLDAGEM	
Teor de um. médio		15,24%		
MOLDAGEM			Cápsula número	51
Peso amostra seca			Peso úmido + cápsula	107,26
peso amostra na umid. Ótima			Peso seco + cápsula	86,12
Peso amostra na um. Higroscópica		4100	Peso da água	21,14
ÁGUA	Teórica	601	Peso da cápsula	19,71
	Evaporação	5	Peso do solo seco	66,41
	Total	606	Teor de umidade	31,83255534
CARGA VARIÁVEL $K_T = 2,3 a.L. \cdot \log \frac{h_0}{h_1}$ A.t h1			Teor de umidade médio	31,66%
DETERMINAÇÃO Nº	1	2	3	
DIA / MÊS / ANO	10/jul	20/jun	20/jun	
Hora / minuto / segundo (inicial)	0	0	0	
Hora / minuto / segundo (final)	07:44	05:43	03:00	
Área do tubo de carga (cm ²) - a	5,23	5,23	5,23	
Altura do corpo de prova (cm) - L	11,45	11,45	11,45	
Área do corpo de prova (cm ²) - A	183,85	183,85	183,85	
Altura de carga constante (cm) - h				
Altura inicial de água (cm) - h ₀	188,7	188,7	188,7	
Altura final de água (cm) - h ₁	186	185	186	
Volume de água percolada - (cm ³) - V				
Tempo de ensaio (segundos) - t	27840	58380	35640	
Coefficiente de Permeabilidade (cm/seg) - KT	1,68424E-09	1,1036E-09	1,31564E-09	
Temperatura do Ensaio (°C)	15	15	15	
Observações				
$k_{médio}$ (m/seg)	1,36783E-09			

ENSAIO DE PERMEABILIDADE - Amostra 1 - ENERGIA INTERMEDIÁRIA c/ Contaminante				
DETERMINAÇÃO DE TEOR DE UMIDADE HIGROSCÓPICA			DENSIDADE APARENTE SECA	
Cápsula número			Volume da amostra	2105,13
Peso úmido + cap			Peso do molde+solo+água	8050
Peso seco + cap			Peso do molde	4168
Peso da água			Peso do solo + água	3882
Peso da cápsula			Densidade solo úmido	18,53
Peso do solo seco			densidade solo seco	18,44
Teor de umidade			DETERMINAÇÃO DO TEOR DE UMIDADE DE MOLDAGEM	
Teor de um. médio	15,24%			
MOLDAGEM			Cápsula número	51
Peso amostra seca			Peso úmido + cápsula	107,26
peso amostra na umid. Ótima			Peso seco + cápsula	86,12
Peso amostra na um. Higroscópica	4100		Peso da água	21,14
ÁGUA	Teórica	601	Peso da cápsula	19,71
	Evaporação	5	Peso do solo seco	66,41
	Total	606	Teor de umidade	31,83255534
CARGA VARIÁVEL			Teor de umidade médio	31,66%
$K_T = \frac{2,3 a.L}{A.t} \cdot \frac{\log h_0}{h_1}$				
DETERMINAÇÃO Nº	1	2	3	
DIA / MÊS / ANO	20/jun	20/jun	20/jun	
Hora / minuto / segundo (inicial)	0	0	0	
Hora / minuto / segundo (final)	00:00			
Área do tubo de carga (cm ²) - a	5,23	5,23	5,23	
Altura do corpo de prova (cm) - L	11,45	11,45	11,45	
Área do corpo de prova (cm ²) - A	183,85	183,85	183,85	
Altura de carga constante (cm) - h				
Altura inicial de água (cm) - h ₀	188,7	188,7	188,7	
Altura final de água (cm) - h ₁	187	188	188,5	
Volume de água percolada - (cm ³) - V				
Tempo de ensaio (segundos) - t	115200	108000	75600	
Coefficiente de Permeabilidade (cm/seg) - K _T	2,5559E-10	1,11961E-10	4,56375E-11	
Temperatura do Ensaio (°C)	18	18	18	
Observações				
k _{médio} (cm/seg)	1,37729E-10			
k _{médio} (m/seg)	1,37729E-10			

ENSAIO DE PERMEABILIDADE -Amostra 2- ENERGIA INTERMEDIÁRIA - água				
DETERMINAÇÃO DE TEOR DE UMIDADE HIGROSCÓPICA			DENSIDADE APARENTE SECA	
Cápsula número	51	56	Volume da amostra	2105,13
Peso úmido + cap	129,44	127,03	Peso do molde+solo+água	8250
Peso seco + cap	115,2	113,3	Peso do molde	4168
Peso da água	14,24	13,9	Peso do solo + água	4082
Peso da cápsula	19,81	19,86	Densidade solo úmido	19,39
Peso do solo seco	95,39	93,27	Densidade solo seco	18,687
Teor de umidade	14,93	14,9	DETERMINAÇÃO DO TEOR DE UMIDADE DE MOLDAGEM	
Teor de um. médio	14,92%			
MOLDAGEM			Cápsula número	55
Peso amostra seca			Peso úmido + cápsula	128,32
peso amostra na umid. Ótima			Peso seco + cápsula	104,64
Peso amostra na um. Higroscópica	4100		Peso da água	23,68
ÁGUA	Teórica	537	Peso da cápsula	19,15
	Evaporação	3	Peso do solo seco	85,49
	Total	540	Teor de umidade	27,7
CARGA VARIÁVEL			Teor de umidade médio	27,81%
$K_T = \frac{2.3 a.L.}{A.t} \cdot \frac{\log h_0}{h_1}$				
DETERMINAÇÃO N°	1	2	3	
DIA / MÊS / ANO	7/ago	7/ago	11/ago	
Hora / minuto / segundo (inicial)	0	0	0	
Hora / minuto / segundo (final)	23:58	00:00	00:00	
Área do tubo de carga (cm ²) - a	5,23	5,23	5,23	
Altura do corpo de prova (cm) - L	11,45	11,45	11,45	
Área do corpo de prova (cm ²) - A	183,85	183,85	183,85	
Altura de carga constante (cm) - h				
Altura inicial de água (cm) - h ₀	188,7	188,7	188,7	
Altura final de água (cm) - h ₁	183,3	187,5	122,8	
Volume de água percolada - (cm ³) - V				
Tempo de ensaio (segundos) - t	86280	18000	259200	
Coefficiente de Permeabilidade (cm/seg) - K _T	1,09486E-09	1,15E-09	5,39245E-09	
Temperatura do Ensaio (°C)	15	15	15	
Observações				
K_m médio (m/seg)	2,54681E-09			

ENSAIO DE PERMEABILIDADE - Amostra 2 - ENERGIA INTERMEDIÁRIA c/ Contaminante				
DETERMINAÇÃO DE TEOR DE UMIDADE HIGROSCÓPICA			DENSIDADE APARENTE SECA	
Cápsula número	51	56	Volume da amostra	2105,13
Peso úmido + cap	129,44	127,03	Peso do molde+solo+água	8250
Peso seco + cap	115,2	113,3	Peso do molde	4168
Peso da água	14,24	13,9	Peso do solo + água	4082
Peso da cápsula	19,81	19,86	Densidade solo úmido	19,39
Peso do solo seco	95,39	93,27	densidade solo seco	18,687
Teor de umidade	14,93	14,9	DETERMINAÇÃO DO TEOR DE UMIDADE DE MOLDAGEM	
Teor de um. médio	14,92%			
MOLDAGEM			Cápsula número	55
Peso amostra seca			Peso úmido + cápsula	128,32
peso amostra na umid. Ótima			Peso seco + cápsula	104,64
Peso amostra na um. Higroscópica	4100		Peso da água	23,68
ÁGUA	Teórica	537	Peso da cápsula	19,15
	Evaporação	3	Peso do solo seco	85,49
	Total	540	Teor de umidade	27,7
CARGA VARIÁVEL			Teor de umidade médio	27,81%
$K_T = 2,3 \frac{a.L}{A.t} \cdot \frac{\log h_0}{h_1}$				
DETERMINAÇÃO Nº				
	1	2	3	
DIA / MES / ANO	19/ago	21/ago	22/ago	
Hora / minuto / segundo (inicial)	0	0	0	
Hora / minuto / segundo (final)	23:49	09:31	25:63	
Área do tubo de carga (cm ²) - a	5,23	5,23	5,23	
Altura do corpo de prova (cm) - L	11,45	11,45	11,45	
Área do corpo de prova (cm ²) - A	183,85	183,85	183,85	
Altura de carga constante (cm) - h				
Altura inicial de água (cm) - h ₀	188,7	188,7	188,7	
Altura final de água (cm) - h ₁	184,35	187,7	186,1	
Volume de água percolada - (cm ³) - V				
Tempo de ensaio (segundos) - t	169249	32431	172863	
Coefficiente de Permeabilidade (cm/seg) - KT	4,48334E-10	5,33061E-10	2,61135E-10	
Temperatura do Ensaio (°C)	18	18	18	
Observações				
k_m médio (m/seg)	4,14176E-10			



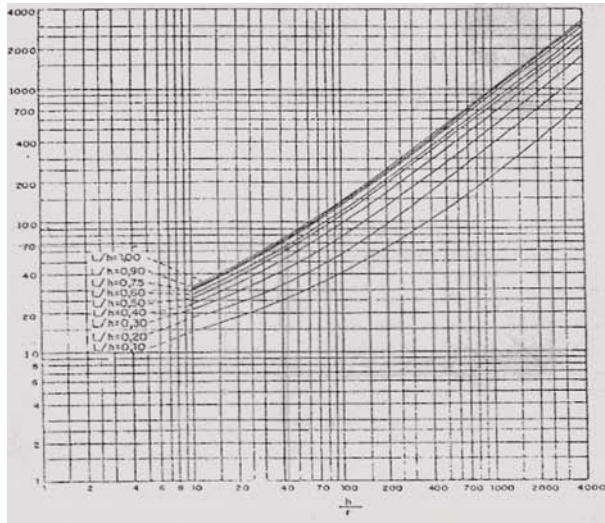
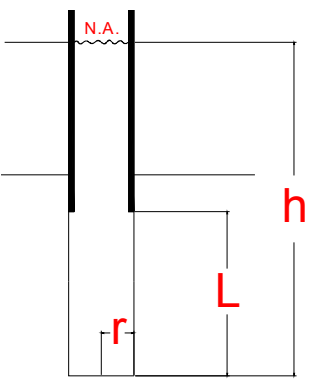
ENSAIO DE PERMEABILIDADE - Amostra 1 - ENERGIA MODIFICADA- água				
DETERMINAÇÃO DE TEOR DE UMIDADE HIGROSCÓPICA			DENSIDADE APARENTE SECA	
Cápsula número	56	51	Volume da amostra	2105,13
Peso úmido + cap	148,73	131,68	Peso do molde+solo+água	8340
Peso seco + cap	131,43	116,56	Peso do molde	4168
Peso da água	17,3	15,12	Peso do solo + água	4172
Peso da cápsula	19,8	19,7	Densidade solo úmido	19,81
Peso do solo seco	111,63	96,86	densidade solo seco	15,03
Teor de umidade	15,5	15,61	DETERMINAÇÃO DO TEOR DE UMIDADE DE MOLDAGEM	
Teor de um. médio	15,56%			
MOLDAGEM			Cápsula número	56
Peso amostra seca			Peso úmido + cápsula	116,17
peso amostra na umid. Ótima			Peso seco + cápsula	96,11
Peso amostra na um. Higroscópica	4500		Peso da água	20,06
ÁGUA	Teórica	523	Peso da cápsula	19,82
	Evaporação	4	Peso do solo seco	76,29
	Total	527	Teor de umidade	26,29
CARGA VARIÁVEL			Teor de umidade médio	26,19%
$K_T = 2,3 \frac{a.L}{A.t} \cdot \text{Log} \frac{h_0}{h_1}$				
DETERMINAÇÃO Nº	1	2	3	
DIA / MÊS / ANO	7/ago	8/ago	10/ago	
Hora / minuto / segundo (inicial)	0	0	0	
Hora / minuto / segundo (final)	23h	24h6min	70h61min	
Área do tubo de carga (cm ²) - a	5,23	5,23	5,23	
Altura do corpo de prova (cm) - L	11,45	11,45	11,45	
Área do corpo de prova (cm ²) - A	183,85	183,85	183,85	
Altura de carga constante (cm) - h				
Altura inicial de água (cm) - h ₀	188,7	188,5	188,3	
Altura final de água (cm) - h ₁	188,5	188,3	188,1	
Volume de água percolada - (cm ³) - V				
Tempo de ensaio (segundos) - t	82800	86760	255660	
Coeficiente de Permeabilidade (cm/seg) - K _T	4,16691E-11	3,98094E-11	1,35239E-11	
Temperatura do Ensaio (°C)	18	19	19	
Observações				
k_{médio} (m/seg)	3,16675E-11			



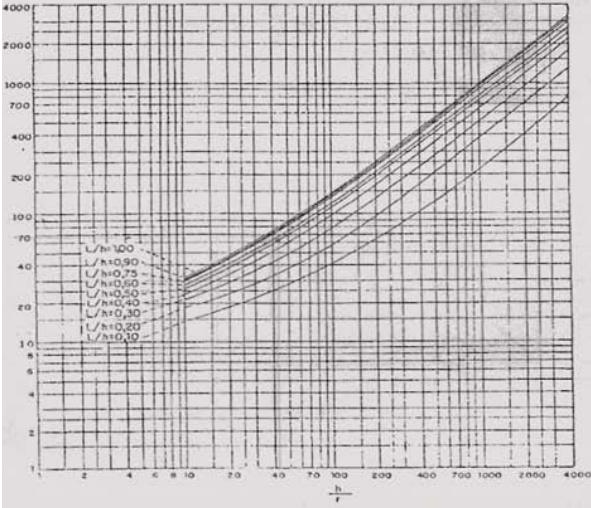
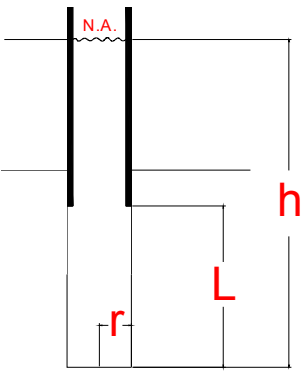
ENSAIO DE PERMEABILIDADE - Amostra 1 - ENERGIA MODIFICADA c/ Contaminante				
DETERMINAÇÃO DE TEOR DE UMIDADE HIGROSCÓPICA			DENSIDADE APARENTE SECA	
Cápsula número	56	51	Volume da amostra	2105,13
Peso úmido + cap	148,73	131,68	Peso do molde+solo+água	8340
Peso seco + cap	131,43	116,56	Peso do molde	4168
Peso da água	17,3	15,12	Peso do solo + água	4172
Peso da cápsula	19,8	19,7	Densidade solo úmido	19,81
Peso do solo seco	111,63	96,86	densidade solo seco	15,03
Teor de umidade	15,5	15,61	DETERMINAÇÃO DO TEOR DE UMIDADE DE MOLDAGEM	
Teor de um. médio	15,56%			
MOLDAGEM			Cápsula número	56
Peso amostra seca			Peso úmido + cápsula	116,17
peso amostra na umid. Ótima			Peso seco + cápsula	96,11
Peso amostra na um. Higroscópica	4500		Peso da água	20,06
ÁGUA	Teórica	523	Peso da cápsula	19,82
	Evaporação	4	Peso do solo seco	76,29
	Total	527	Teor de umidade	26,29
CARGA VARIÁVEL			Teor de umidade médio	26,19%
$K_T = 2,3 \frac{a.L}{A.t} \cdot \frac{\log h_0}{h_1}$				
DETERMINAÇÃO Nº	1	2	3	
DIA / MÊS / ANO	12/ago	14/ago	16/ago	
Hora / minuto / segundo (inicial)	0	0	0	
Hora / minuto / segundo (final)	35h	73h	97h	
Área do tubo de carga (cm ²) - a	5,23	5,23	5,23	
Altura do corpo de prova (cm) - L	11,45	11,45	11,45	
Área do corpo de prova (cm ²) - A	183,85	183,85	183,85	
Altura de carga constante (cm) - h				
Altura inicial de água (cm) - h ₀	188,7	188,7	188,7	
Altura final de água (cm) - h ₁	188,65	188,6	188,5	
Volume de água percolada - (cm ³) - V				
Tempo de ensaio (segundos) - t	126000	172800	349200	
Coefficiente de Permeabilidade (cm/seg) - K _T	6,84291E-12	9,98057E-12	9,88029E-12	
Temperatura do Ensaio (°C)	18	18	18	
Observações				
k_{médio} (m/seg)	8,90126E-12			


ENSAIO DE PERMEABILIDADE - Amostra 2 - ENERGIA MODIFICADA- água				
DETERMINAÇÃO DE TEOR DE UMIDADE HIGROSCÓPICA			DENSIDADE APARENTE SECA	
Cápsula número	56	51	Volume da amostra	2105,13
Peso úmido + cap	148,73	131,68	Peso do molde+solo+água	8340
Peso seco + cap	131,43	116,56	Peso do molde	4168
Peso da água	17,3	15,12	Peso do solo + água	4172
Peso da cápsula	19,8	19,7	Densidade solo úmido	19,81
Peso do solo seco	111,63	96,86	densidade solo seco	15,03
Teor de umidade	15,5	15,61	DETERMINAÇÃO DO TEOR DE UMIDADE DE MOLDAGEM	
Teor de um. médio	15,56%			
MOLDAGEM			Cápsula número	56
Peso amostra seca			Peso úmido + cápsula	116,17
peso amostra na umid. Ótima			Peso seco + cápsula	96,11
Peso amostra na um. Higroscópica	4500		Peso da água	20,06
ÁGUA	Teórica	523	Peso da cápsula	19,82
	Evaporação	4	Peso do solo seco	76,29
	Total	527	Teor de umidade	26,29
CARGA VARIÁVEL			Teor de umidade médio	26,19%
$K_T = 2,3 \frac{a.L}{A.t} \cdot \text{Log} \frac{h_0}{h_1}$				
DETERMINAÇÃO Nº				
DIA / MES / ANO	1	2	3	
Hora / minuto / segundo (inicial)	7/ago	8/ago	10/ago	
Hora / minuto / segundo (final)	0	0	0	
Área do tubo de carga (cm ²) - a	23h	24h6min	70h61min	
Altura do corpo de prova (cm) - L	5,23	5,23	5,23	
Área do corpo de prova (cm ²) - A	11,45	11,45	11,45	
Altura de carga constante (cm) - h	183,85	183,85	183,85	
Altura inicial de água (cm) - h ₀				
Altura final de água (cm) - h ₁	188,7	188,5	188,3	
Volume de água percolada - (cm ³) - V	188,5	188,3	188,1	
Tempo de ensaio (segundos) - t				
Coeficiente de Permeabilidade (cm/seg) - KT	82800	86760	255660	
Temperatura do Ensaio (°C)	4,16691E-11	3,98094E-11	1,35239E-11	
Observações	18	19	19	
$k_{\text{médio}}$ (m/seg)				
	3,16675E-11			

ENSAIO DE PERMEABILIDADE - Amostra 2 - ENERGIA MODIFICADA c/ Contaminante				
DETERMINAÇÃO DE TEOR DE UMIDADE HIGROSCÓPICA			DENSIDADE APARENTE SECA	
Cápsula número	56	51	Volume da amostra	2105,13
Peso úmido + cap	148,73	131,68	Peso do molde+solo+água	8340
Peso seco + cap	131,43	116,56	Peso do molde	4168
Peso da água	17,3	15,12	Peso do solo + água	4172
Peso da cápsula	19,8	19,7	Densidade solo úmido	19,81
Peso do solo seco	111,63	96,86	densidade solo seco	15,03
Teor de umidade	15,5	15,61	DETERMINAÇÃO DO TEOR DE UMIDADE DE MOLDAGEM	
Teor de um. médio	15,56%			
MOLDAGEM			Cápsula número	56
Peso amostra seca			Peso úmido + cápsula	116,17
peso amostra na umid. Ótima			Peso seco + cápsula	96,11
Peso amostra na um. Higroscópica	4500		Peso da água	20,06
ÁGUA	Teórica	523	Peso da cápsula	19,82
	Evaporação	4	Peso do solo seco	76,29
	Total	527	Teor de umidade	26,29
CARGA VARIÁVEL			Teor de umidade médio	26,19%
$K_T = 2,3 \frac{a.L}{A.t} \cdot \frac{\log h_0}{h_1}$				
DETERMINAÇÃO Nº	1	2	3	
DIA / MÊS / ANO	12/ago	14/ago	16/ago	
Hora / minuto / segundo (inicial)	0	0	0	
Hora / minuto / segundo (final)	35h	73h	97h	
Área do tubo de carga (cm ²) - a	5,23	5,23	5,23	
Altura do corpo de prova (cm) - L	11,45	11,45	11,45	
Área do corpo de prova (cm ²) - A	183,85	183,85	183,85	
Altura de carga constante (cm) - h				
Altura inicial de água (cm) - h ₀	188,7	188,7	188,7	
Altura final de água (cm) - h ₁	188,65	188,6	188,5	
Volume de água percolada - (cm ³) - V				
Tempo de ensaio (segundos) - t	126000	172800	349200	
Coefficiente de Permeabilidade (cm/seg) - K _T	6,84291E-12	9,98057E-12	9,88029E-12	
Temperatura do Ensaio (°C)	18	18	18	
Observações				
k_{médio} (m/seg)	8,90126E-12			


ANEXO II: PLANILHAS DOS ENSAIOS IN SITU

		Rua do Comércio 3000		 Laboratório de Engenharia Civil	
Ensaio de Infiltração In Situ					
Trabalho de Conclusão de Curso					
Operador:		Dimas e Francielle			
Data:		jul/08			
Obs:		Talude do Campus da Unijuí		Furo 1	
IMPORTANTE: Células em azul podem ser modificadas					
1 - PARÂMETROS REFERENTES AO INSTRUMENTO UTILIZADO					
L (m)	0,80	h/r	42,59		
h (m)	1,35	L/h	0,59		
r (m)	0,03	Cu	68,00		
					
2 - CALCULO DOS COEFICIENTES DE CONDUTIVIDADE HIDRAULICA (K1, K2, K3)					
K1		K2		K3	
T1 (s)	1451	T2 (s)	1401	T3 (s)	1380
Q (m³/s)	6,8918E-07	Q (m³/s)	7,13776E-07	Q (m³/s)	7,24638E-07
V (m/s)	6,8918E-05	V (m/s)	7,13776E-05	V (m/s)	7,24638E-05
Volume	0,001	Volume	0,001	Volume	0,001
Área (m²)	0,003156955	Área (m²)	0,003156955	Área (m²)	0,003156955
K1	2,4E-07	K2	2,5E-07	K3	2,5E-07
MÉDIA (K1, K2, K3)					
K1	2,37E-07				
K2	2,45E-07				
K3	2,49E-07				
K(MÉDIO)	2,44E-07				

		Rua do Comércio 3000		 Laboratório de Engenharia Civil	
Ensaio de Infiltração In Situ					
Projeto:		Trabalho de Conclusão de Curso			
Operador:		Dimas e Francielle			
Data:		jul/08			
Obs:		Talude do Campus da Unijuí		Furo 2	
IMPORTANTE: Células em azul podem ser modificadas					
1 - PARAMETROS REFERENTES AO INSTRUMENTO UTILIZADO					
L (m)	0,80	h/r	42,59		
h (m)	1,35	L/h	0,59		
r (m)	0,03	Cu	68,00		
					
2 - CALCULO DOS COEFICIENTES DE CONDUTIVIDADE HIDRAULICA (K1, K2, K3)					
K1		K2		K3	
T1 (s)	729	T2 (s)	731	T3 (s)	729
Q (m³/s)	1,37174E-06	Q (m³/s)	1,36799E-06	Q (m³/s)	1,37174E-06
V (m/s)	0,000137174	V (m/s)	0,000136799	V (m/s)	0,000137174
Volume	0,001	Volume	0,001	Volume	0,001
Área (m²)	0,003156955	Área (m²)	0,003156955	Área (m²)	0,003156955
K1	4,714E-07	K2	4,701E-07	K3	4,714E-07
MÉDIA (K1, K2, K3)					
K1	4,71E-07				
K2	4,70E-07				
K3	4,71E-07				
K(MÉDIO)	4,71E-07				



Rua do Comércio 3000



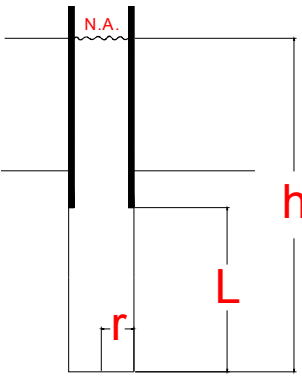
Ensaio de Infiltração In Situ

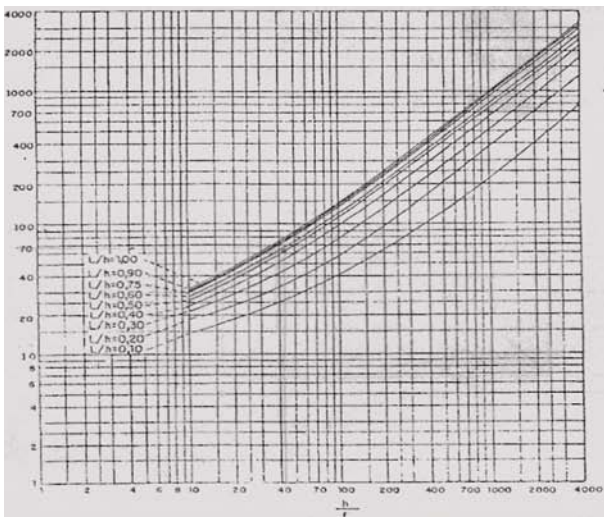
Projeto:	Trabalho de Conclusão de Curso		
Operador:	Dimas e Francielle		
Data:	jul/08		
Obs:	Talude do Campus da Unijuí	Furo 3	
Obs:			

IMPORTANTE: Células em azul podem ser modificadas

1 - PARÂMETROS REFERENTES AO INSTRUMENTO UTILIZADO

L (m)	0,80	h/r	42,52
h (m)	1,35	L/h	0,59
r (m)	0,0318	Cu	68,00



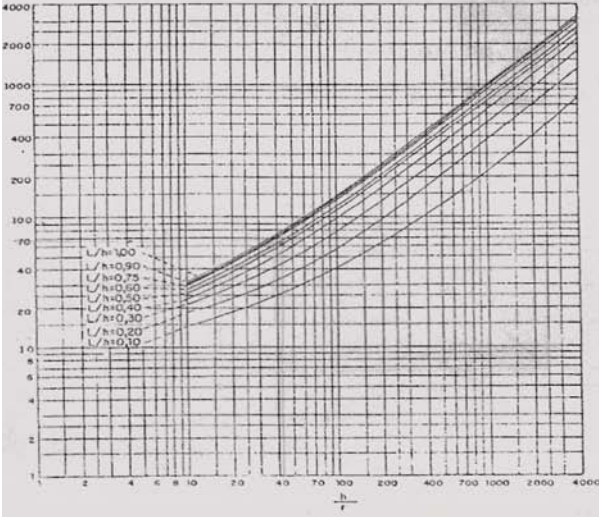
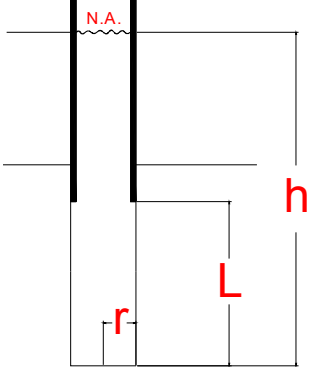




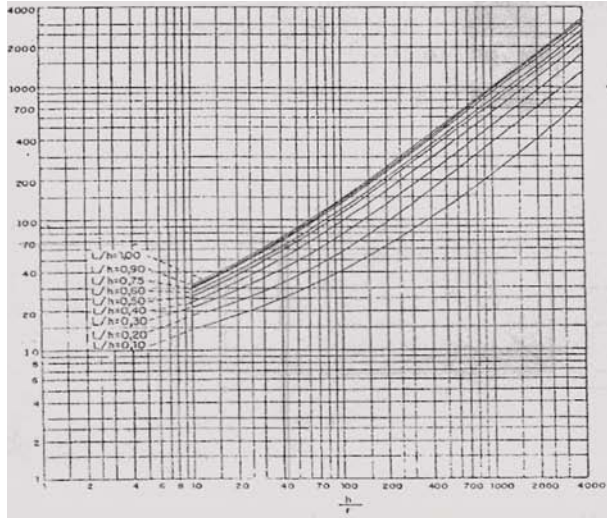
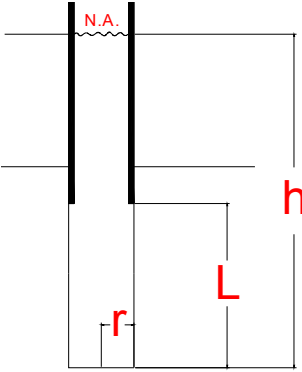


2 - CALCULO DOS COEFICIENTES DE CONDUTIVIDADE HIDRAULICA (K1, K2, K3)

K1		K2		K3	
T1 (s)	315	T2 (s)	165	T3 (s)	162
Q (m³/s)	6,34921E-06	Q (m³/s)	6,06061E-06	Q (m³/s)	6,17284E-06
V (m/s)	0,00031746	V (m/s)	0,000606061	V (m/s)	0,000617284
Volume (m³)	0,002	Volume (m³)	0,001	Volume (m³)	0,001
Área (m²)	0,003166922	Área (m²)	0,003166922	Área (m²)	0,003166922
K1	2,1784E-06	K2	2,079E-06	K3	2,118E-06

MÉDIA (K1, K2, K3)	
K1	2,178E-06
K2	2,079E-06
K3	2,118E-06
K(MÉDIO)	2,13E-06

		Rua do Comércio 3000 Foz de Ijuí, RS - Brasil			
Ensaio de Infiltração In Situ					
Projeto:		Trabalho de Conclusão de Curso			
Operador:		Dimas e Francielle			
Data:		jul/08			
Obs:		Talude do Campus da Unijuí		Furo4	
Obs:					
IMPORTANTE: Células em azul podem ser modificadas					
1 - PARÂMETROS REFERENTES AO INSTRUMENTO UTILIZADO					
L (m)	0,80	h/r	42,52		
h (m)	1,35	L/h	0,59		
r (m)	0,0318	Cu	68,00		
					
2 - CALCULO DOS COEFICIENTES DE CONDUTIVIDADE HIDRAULICA (K1, K2, K3)					
K1		K2		K3	
T1 (s)	169	T2 (s)	165	T3 (s)	165
Q (m³/s)	5,91716E-06	Q (m³/s)	6,06061E-06	Q (m³/s)	6,06061E-06
V (m/s)	0,000591716	V (m/s)	0,000606061	V (m/s)	0,000606061
Volume (m³)	0,001	Volume (m³)	0,001	Volume (m³)	0,001
Área (m²)	0,003166922	Área (m²)	0,003166922	Área (m²)	0,003166922
K1	2,0301E-06	K2	2,079E-06	K3	2,079E-06
MÉDIA (K1, K2, K3)					
K1	2,030E-06				
K2	2,079E-06				
K3	2,079E-06				
K(MÉDIO)	2,06E-06				

		Rua do Comércio 3000 <small>UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL</small>		 <small>Laboratório de Engenharia Civil</small>	
Ensaio de Infiltração In Situ					
Projeto:		Trabalho de Conclusão de Curso			
Operador:		Dimas e Francielle			
Data:		ago/08			
Objetivo:		José Gabriel		Furo1	
Obs:					
IMPORTANTE: Células em azul podem ser modificadas					
1 - PARAMETROS REFERENTES AO INSTRUMENTO UTILIZADO					
L (m)	0,80	h/r	42,59		
h (m)	1,35	L/h	0,59		
r (m)	0,03	Cu	68,00		
					
2 - CALCULO DOS COEFICIENTES DE CONDUTIVIDADE HIDRAULICA (K1, K2, K3)					
K1		K2		K3	
T1 (s)	1842	T2 (s)	1800	T3 (s)	
Q (m³/s)	2,71444E-07	Q (m³/s)	5,55556E-07	Q (m³/s)	#DIV/0!
V (m/s)	5,42888E-05	V (m/s)	5,55556E-05	V (m/s)	#DIV/0!
Volume	0,0005	Volume	0,001	Volume	0,001
Área (m²)	0,003156955	Área (m²)	0,003156955	Área (m²)	0,003156955
K1	9,3E-08	K2	1,9E-07	K3	#DIV/0!
MÉDIA (K1, K2, K3)					
K1	9,33E-08				
K2	1,91E-07				
K3					
K(MÉDIO)	1,42E-07				



Rua do Comércio 3000



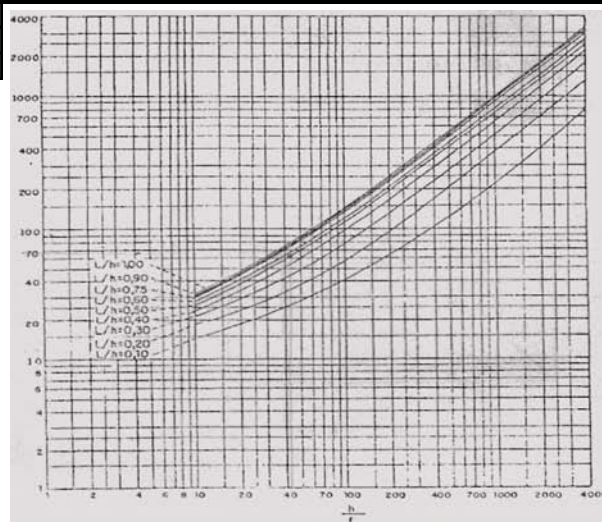
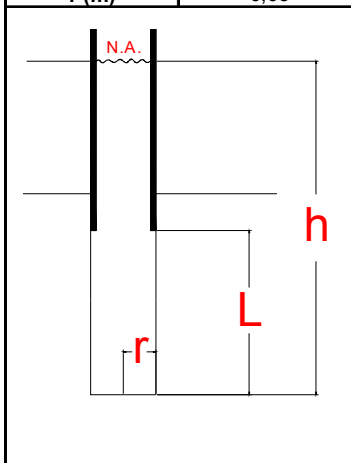
Ensaio de Infiltração In Situ

Projeto:	Trabalho de Conclusão de Curso
Operador:	Dimas e Francielle
Data:	ago/08
Objetivo:	José Gabriel Furo 2
Obs:	

IMPORTANTE: Células em azul podem ser modificadas

1 - PARAMETROS REFERENTES AO INSTRUMENTO UTILIZADO


L (m)	0,80	h/r	42,59
h (m)	1,35	L/h	0,59
r (m)	0,03	Cu	68,00




2 - CALCULO DOS COEFICIENTES DE CONDUTIVIDADE HIDRAULICA (K1, K2, K3)

K1		K2		K3	
T1 (s)	863	T2 (s)	780	T3 (s)	
Q (m³/s)	5,79374E-07	Q (m³/s)	1,28205E-06	Q (m³/s)	#DIV/0!
V (m/s)	0,000115875	V (m/s)	0,000128205	V (m/s)	#DIV/0!
Volume	0,0005	Volume	0,001	Volume	0,001
Área (m²)	0,003156955	Área (m²)	0,003156955	Área (m²)	0,003156955
K1	2,0E-07	K2	4,4E-07	K3	#DIV/0!

MÉDIA (K1, K2, K3)	
K1	1,99E-07
K2	4,41E-07
K3	
K(MÉDIO)	3,20E-07



Rua do Comércio 3000



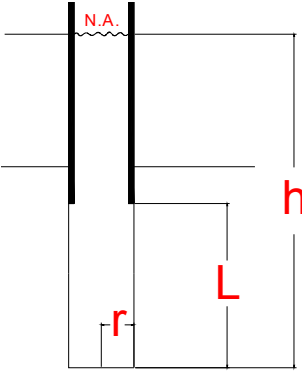
Ensaio de Infiltração In Situ

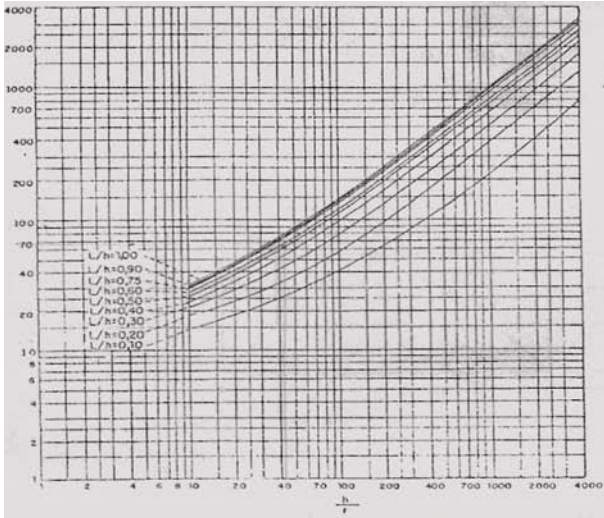
Projeto:	Trabalho de Conclusão de Curso		
Operador:	Dimas e Francielle		
Data:	ago/08		
Objetivo:	Centro	Furo 1	
Obs:			

IMPORTANTE: Células em azul podem ser modificadas

1 - PARAMETROS REFERENTES AO INSTRUMENTO UTILIZADO

L (m)	0,80	h/r	42,59
h (m)	1,35	L/h	0,59
r (m)	0,03	Cu	68,00



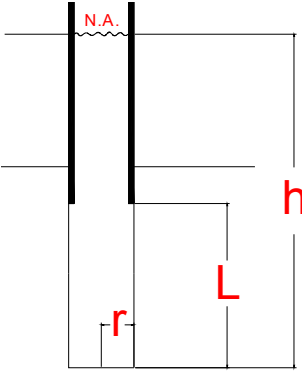
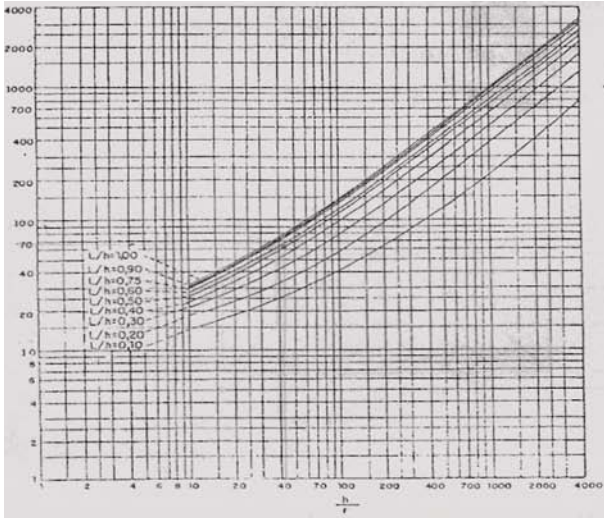




2 - CALCULO DOS COEFICIENTES DE CONDUTIVIDADE HIDRAULICA (K1, K2, K3)

K1		K2		K3	
T1 (s)	672	T2 (s)	667	T3 (s)	650
Q (m³/s)	7,44048E-07	Q (m³/s)	1,49925E-06	Q (m³/s)	1,53846E-06
V (m/s)	0,00014881	V (m/s)	0,000149925	V (m/s)	0,000153846
Volume	0,0005	Volume	0,001	Volume	0,001
Área (m²)	0,003156955	Área (m²)	0,003156955	Área (m²)	0,003156955
K1	2,6E-07	K2	5,2E-07	K3	5,3E-07

MÉDIA (K1, K2, K3)	
K1	2,56E-07
K2	5,15E-07
K3	5,29E-07
K(MÉDIO)	4,33E-07

	Rua do Comércio 3000		 <small>Laboratório de Engenharia Civil</small>		
Ensaio de Infiltração In Situ					
Projeto:	Trabalho de Conclusão de Curso				
Operador:	Dimas e Francielle				
Data:	ago/08				
Objetivo:	Centro	Furo 2			
Obs:					
IMPORTANTE: Células em azul podem ser modificadas					
1 - PARAMETROS REFERENTES AO INSTRUMENTO UTILIZADO					
L (m)	0,80	h/r	42,59		
h (m)	1,35	L/h	0,59		
r (m)	0,03	Cu	68,00		
					
2 - CALCULO DOS COEFICIENTES DE CONDUTIVIDADE HIDRAULICA (K1, K2, K3)					
K1		K2		K3	
T1 (s)	202	T2 (s)	230	T3 (s)	238
Q (m³/s)	2,47525E-06	Q (m³/s)	4,34783E-06	Q (m³/s)	4,20168E-06
V (m/s)	0,00049505	V (m/s)	0,000434783	V (m/s)	0,000420168
Volume	0,0005	Volume	0,001	Volume	0,001
Área (m²)	0,003156955	Área (m²)	0,003156955	Área (m²)	0,003156955
K1	8,5E-07	K2	1,5E-06	K3	1,4E-06
MÉDIA (K1, K2, K3)					
K1	8,51E-07				
K2	1,49E-06				
K3	1,44E-06				
K(MÉDIO)	1,26E-06				