



Francisco Miguel dos Santos Carreto
Resende Dias

Licenciado em Ciências de Engenharia Civil

Filtros em barragens de aterro: caracterização da sua permeabilidade

Dissertação para obtenção do Grau de Mestre
em Engenharia Civil - Perfil Geotecnia

Orientador: Professora Doutora Maria Teresa Teles Grilo Santana, FCT/UNL

Júri:

Presidente: Professor Doutor António Manuel Pinho Ramos, FCT/UNL

Arguente: Engenheira Ana Quintela Cruz, FCT/UNL

Vogal: Professora Doutora Maria Teresa Teles Grilo Santana, FCT/UNL



FACULDADE DE
CIÊNCIAS E TECNOLOGIA
UNIVERSIDADE NOVA DE LISBOA

Dezembro de 2015

**Filtros em barragens de aterro:
caracterização da sua permeabilidade**

Copyright © Francisco Miguel dos Santos Carreto Resende Dias, Faculdade de Ciências e Tecnologia, Universidade Nova de Lisboa

A Faculdade de Ciências e Tecnologia e a Universidade Nova de Lisboa tem o direito, perpétuo e sem limites geográficos, de arquivar e publicar esta dissertação através de exemplares impressos reproduzidos em papel ou de forma digital, ou por qualquer outro meio conhecido ou que venha a ser inventado, e de a divulgar através de repositórios científicos e de admitir a sua cópia e distribuição com objetivos educacionais ou de investigação, não comerciais, desde que seja dado crédito ao autor e editor.

Agradecimentos

À orientadora, Professora Doutora Maria Teresa Teles Grilo Santana, pela disponibilidade e clareza com que transmitiu conhecimento no decorrer de todo o meu percurso académico e, com especial ênfase, neste trabalho de final de curso.

Aos restantes docentes do Departamento de Engenharia Civil da FCT UNL, e em particular aos docentes dedicados à especialidade de Geotecnia.

Aos meus amigos e colegas que, direta ou indiretamente, contribuíram com o seu companheirismo e conhecimento, ao longo de todo este caminho.

À Sofia, pela paciência invejável e apoio em todo este percurso.

Um muito obrigado à minha família, em especial aos meus Pais pela oportunidade proporcionada e apoio que sei estar sempre presente, em qualquer ocasião; pelos bons exemplos, força e confiança sempre transmitida e depositada em mim.

Resumo

A determinação do coeficiente de permeabilidade de filtros de barragens de aterro é feita com a aplicação de equações empíricas. Dado que estas equações variam com o índice de vazios, a sua aplicação a um mesmo filtro, pode originar variações do coeficiente de permeabilidade, consoante o valor de índice de vazios que lhe é atribuído. Neste trabalho é feita uma análise, aplicando diferentes formulas empíricas devidamente selecionadas a dois filtros construídos para o controlo do movimento de partículas e analisam-se os resultados obtidos. Os dois filtros são ainda sujeitos a ensaios de permeabilidade em laboratório com uso do permeâmetro de parede rígida a carga constante, variando o seu índice de vazios, de modo a perceber qual das equações adotadas melhor se adequa aos resultados obtidos no laboratório. Por fim, é feita uma análise da estabilidade hidráulica de uma barragem de aterro zonada, modelada com base num programa de elementos finitos, da qual fazem parte um filtro chaminé e um filtro horizontal, aos quais se aplicou uma gama de coeficientes de permeabilidade inserida nos resultados obtidos nas equações anteriores.

Palavras-chave: Barragens de aterro, filtros, coeficiente de permeabilidade, granulometria, caudal, gradiente hidráulico, pressões intersticiais.

Abstract

The determination of embankment dams filter permeability coefficient is done by applying empirical equations. Since these equations vary with the void ratio, its application to the same filter may cause permeability coefficient variations, depending on the void ratio value assigned to it. In this work an analysis is executed by applying different empirical formulas to two filters built for this purpose. The two filters are also subject to laboratory permeability tests, varying its void ratio, so as to realize the equation which best fits the results obtained in laboratory. Finally, an analysis of the hydraulic stability of a dam landfill is made, with vertical shaped filter and an horizontal filter, to which a range of different permeability coefficient,s inserted in the previous results were applied.

Keywords: Zoned embankment dams, Filters, permeability coefficient, granulometric curves, flow, hydraulic gradient , pore pressure.

Conteúdo

Agradecimentos	i
Resumo	iii
Abstract	v
Lista de Figuras	x
Lista de Tabelas	xi
Lista de Símbolos	xiv
1 Introdução	1
1.1 Enquadramento do tema	1
1.2 Objetivos	2
1.3 Organização do trabalho	3
2 Dimensionamento dos materiais de filtro	5
2.1 Enquadramento geral	5
2.1.1 Introdução	5
2.1.2 Métodos construtivos	6
2.1.3 Observação	6
2.1.4 O coeficiente de permeabilidade dos filtros	8
2.1.5 Capacidade de vazão	10
2.2 Funcionamento dos filtros	12
2.2.1 Localização e função desempenhada	12
2.2.2 Regras de dimensionamento	15
2.2.3 Consequências do mau funcionamento de um filtro	18
3 Estimativa do coeficiente de permeabilidade	21
3.1 Componentes necessários	21
3.2 Equações empíricas	22
3.3 Comparação das equações apresentadas	26
3.4 Estudo Realizado	29

3.4.1	Definição do fuso granulométrico	29
3.4.2	Resultados obtidos	32
3.4.3	Conclusões	38
4	Estudo experimental desenvolvido	39
4.1	Organização	39
4.2	Construção dos filtros	40
4.2.1	Materiais utilizados	40
4.2.2	Metodologia	41
4.3	Ensaio de Permeabilidade	44
4.3.1	Procedimento laboratorial	44
4.3.2	Montagem do provete e índice de vazios	47
4.3.3	Cuidados Laboratoriais	49
4.4	Análise de Resultados	51
4.4.1	Dados obtidos	51
4.4.2	Comparação com os resultados empíricos	52
5	Modelação de uma barragem de aterro como caso prático	57
5.1	Considerações gerais	57
5.2	Modelação em elementos finitos	58
5.2.1	SEEP e o modelo usado	58
5.2.2	Compatibilidade do programa	59
5.2.3	Coefficientes de permeabilidade a testar	60
5.2.4	Escolha das secções a estudar	61
5.3	Análise de resultados	63
5.3.1	Modelo	63
5.3.2	Capacidade de vazão	63
5.3.3	Caminhos de percolação	67
5.3.4	Alterações no gradiente hidráulico	69
5.3.5	Alterações nas pressões intersticiais	70
5.4	Conclusões	71
6	Considerações finais	73
6.1	Relativamente ao estudo realizado	73
6.2	Desenvolvimentos futuros	74
	Bibliografia	75

Lista de Figuras

2.1	Núcleo impermeável localizado um nível acima do filtro (a) e filtro localizado um nível acima dos materiais adjacentes (b)	7
2.2	Execução de vala um nível acima e preenchimento com material de filtro	7
2.3	Efeito do índice de vazios sobre o coeficiente de permeabilidade	9
2.4	Nível freático numa barragem de aterro com permeabilidade adequada	10
2.5	Caudal percolado pelos filtros "chaminé"/inclinados e horizontais	10
2.6	Mecanismos usuais de percolação através de uma barragem de aterro	13
2.7	Solo base e critérios de dimensionamento segundo Terzaghi & Peck (1948)	15
2.8	Esquema de dimensionamento definido por Lafluer et al. para filtros convencionais e compostos por geotêxteis	18
2.9	Erosão interna e os seus níveis	19
2.10	Instalação de elevado gradiente hidráulico (a) e relação na dimensão granulométrica que estabelece a estabilidade interna(b)	20
3.1	Funcionamento da equação de Kozeny-Carman com o conhecimento da superfície específica	25
3.2	Grau de saturação, variação do índice de vazios e granulometria na equação de Navfac DM7 na determinação do coeficiente de permeabilidade	25
3.3	Comparação da aproximação em 6 das 7 equações escolhidas	27
3.4	Condições associadas a cada equação para uma melhor percepção da qualidade dos resultados obtidos	28
3.5	Esquema a seguir para escolha do método com melhor aproximação real esperada	28
3.6	Intervalos de valores de permeabilidade k_{sat} dados pelos métodos recomendados para solos não coesivos	29
3.7	Núcleos usados como base de estudo, retirados de um estudo experimental, provenientes da barragem de Odelouca	30
3.8	Limites granulométricos usados como caso de estudo	31
3.9	Valores de k obtidos com as equações empíricas, para a curva granulométrica de dimensões mínimas	33
3.10	Valores de k obtidos com as equações empíricas, para a curva granulométrica de dimensões máximas	33
3.11	Intervalos de permeabilidade para filtro de dimensões mínimas	34
3.12	Intervalos de permeabilidade para filtro de dimensões máximas	34

3.13	Intervalos de permeabilidade para filtro de dimensões mínima e máxima representados sob escala logarítmica	35
3.14	Valores de k obtidos pelas equações dos diferentes autores e índices de vazios, para as curvas granulométricas de dimensões mínimas e máximas	37
4.1	Curva de distribuição granulométrica de todas as areias testadas	41
4.2	Material retido nos peneiros para a composição escolhida para o filtro nº1 .	42
4.3	Exemplo dos materiais retidos em cada peneiro para a areia APA 18 (constituição do filtro nº2)	43
4.4	Composição granulométrica referente aos quatro filtros estudados	44
4.5	Esquema de montagem do permeâmetro de parede rígida, tubos piezométricos, manômetros e reservatórios de carga	45
4.6	Gráfico exemplo, para determinação do coeficiente de permeabilidade, com base em 3 pontos obtidos laboratorialmente.	46
4.7	Exemplo da montagem faseada das 4 camadas de cada provete	47
4.8	Permeâmetro de parede rígida, tubos piezométricos e reservatórios de carga	50
4.9	Coefficientes de permeabilidade obtidos para a granulometria do filtro nº1 com base nas equações empíricas e resultado experimental	53
4.10	Intervalos de permeabilidade obtidos para o filtro nº1	53
4.11	Coefficientes de permeabilidade obtidos para a granulometria do filtro nº2 e resultado experimental com valor de R	54
4.12	Intervalos de permeabilidade para o filtro nº2	54
4.13	Intervalos de permeabilidade para todas as granulometrias	56
5.1	Geometria e fronteiras do modelo usado	58
5.2	Malha definida para o modelo	59
5.3	Comportamento do SEEP perante alterações significativas no valor de k do filtro, quando comparado com k do núcleo	60
5.4	Coefficientes de permeabilidades para os 3 filtros levados a teste	61
5.5	Cortes efetuados	62
5.6	Cortes transversais efetuadas para recolha dos caudais percolados	63
5.7	Representação dos caudais percolados no núcleo, no filtro horizontal e necessário para cumprir o coeficiente de segurança de 100	66
5.8	Representação dos caudais percolados no núcleo, no filtro chaminé e necessário para cumprir o coeficiente de segurança de 100	66
5.9	Alteração dos caminhos de percolação com a alteração do coeficiente de permeabilidade	68
5.10	Gradientes hidráulicos verificados ao longo do fundo da barragem para os coeficientes de permeabilidade dos 3 filtros modelados	69
5.11	Valores de pressão intersticial verificados ao longo do fundo da barragem para os 3 filtros modelados	70
5.12	Valores de pressão intersticial verificados no filtro de jusante afetados pela alteração da permeabilidade do filtro	71

Lista de Tabelas

2.1	Valores médios de permeabilidade	8
2.2	Condições, consequências e tipo de filtro necessário	12
2.3	Tipo de filtro críticos ou não críticos mediante a sua localização, função e tipo de percolação ou carga	14
2.4	Critérios filtros	17
3.1	Tipos de solos e limitações associadas a cada autor e sua fórmula	22
3.2	Limites cumpridos para a curva granulométrica de dimensões mínimas	32
3.3	Limites cumpridos para a curva granulométrica de dimensões máximas	32
3.4	Coefficiente de permeabilidade nos limites granulométricos definidos	36
3.5	Comparativo dos valores máximos e mínimos de k para os filtros Dim. mín e máx	36
4.1	Desempenho declarado das areias APA, por AREIPOR	40
4.2	Material passado em cada peneiro para cada uma das areias APA	40
4.3	Limites cumpridos para a composição granulométrica do filtro nº1	42
4.4	Limites cumpridos para a composição granulométrica do filtro nº2	43
4.5	Granulometria final dos filtros	43
4.6	Características dos provetes testados	48
4.7	Índice de vazios pretendido e obtido após montagem dos provetes	49
4.8	Coefficientes de permeabilidade obtidos para os índices de vazios atingidos no filtro nº1	51
4.9	Coefficientes de permeabilidade obtidos para os índices de vazios atingidos no filtro nº2	52
5.1	Coefficientes de permeabilidade do modelo usado	60
5.2	Intervalos de permeabilidade para cada fuso	61
5.3	Verificação do coeficiente de segurança do filtro chaminé	64
5.4	Verificação do coeficiente de segurança do filtro horizontal	65

Lista de Símbolos

Abreviaturas

<i>ASTM</i>	American Society for Testing and Materials
<i>CNPGB</i>	Comissão Nacional Portuguesa das Grandes Barragens
<i>GSDC</i>	Curva de distribuição granulométrica
<i>ICOLD</i>	International Commission on Large Dams
<i>NAVFAC</i>	Naval Facilities Engineering Command
<i>NPA</i>	Nível de pleno armazenamento
<i>RSB</i>	Regulamento de Segurança de Barragens
<i>USBR</i>	United States Bureau of Reclamation

Símbolos

δ_R	Dimensão partícula mínima
γ_b	Peso específico saturado do solo menos peso específico da água
γ_w	Peso específico da água
μ_w	Viscosidade dinâmica da água
μ_T	Viscosidade da água a temperatura T
μ_{10}	Viscosidade da água a 10°C
ρ_w	Densidade da água
ρ_s	Densidade dos sólidos
D_{10}	Dimensão das partículas de material de filtro correspondente a 10%, em peso, do material passado numa análise granulométrica - (mm)
D_{15B}	Dimensão das partículas de material base correspondente a 15%, em peso, do material passado numa análise granulométrica - (mm)
D_{15F}	Dimensão das partículas de material de filtro correspondente a 15%, em peso, do material passado numa análise granulométrica - (mm)

D_{85B}	Dimensão das partículas de material base correspondente a 85%, em peso, do material passado numa análise granulométrica - (mm)
e	Índice de vazios
g	Aceleração da gravidade
G_s	Densidade relativa dos sólidos
i_c	Gradiente hidráulico crítico
k	Coefficiente de permeabilidade
k_x	Coefficiente de permeabilidade na direção x
k_y	Coefficiente de permeabilidade na direção y
n	Porosidade
$P_{No.D}$	Percentagem de sólidos de dimensão D
$P_{No.d}$	Percentagem de sólidos da dimensão seguinte d
S_r	Grau de saturação
S_s	Superfície específica
T	Temperatura da água
V_V	Volume vazios
V_w	Volume água
w	Teor em água

Capítulo 1

Introdução

1.1 Enquadramento do tema

As barragens de aterro compostas por barragens de terra, enrocamento e mistas, representam uma grande parcela naquilo que se considera uma grande necessidade dos dias de hoje a construção de grandes barragens capazes de armazenar volumes de água significativos. A construção deste tipo de barragens é uma alternativa a ter em conta, quando se têm disponíveis grandes áreas com os recursos necessários para a execução da mesma, sendo a sua execução também associada a custos mais reduzidos que os existentes numa barragem de betão. .

A segurança necessária nas barragens e regulamentação cada vez mais presente, impulsionaram grandes avanços na geotecnia, no estudo do materiais de aterro, nos ensaios laboratoriais, nos equipamentos envolvidos, nas técnicas de impermeabilização, aproveitamento dos materiais, integração paisagística e adaptação a fundações menos resistentes, algo que pode ser agora analisado previamente e com maior certeza com programas de modelação que recorrem a elementos finitos, conseguindo assim prever-se de forma mais realista o que poderá ocorrer. Nos filtros, a caracterização do seu material e respetivo coeficiente de permeabilidade, permite a estimativa dos caudais e consequente capacidade de vazão, aspeto que mais peso terá no seu dimensionamento, pois este parâmetro além da dependência direta do coeficiente de permeabilidade, define o modo como ocorrerá a percolação na barragem de aterro.

No âmbito do presente estudo, relativo aos filtros e, visto que são necessários dados de entrada para que se realize de forma correta o recurso à modelação, é importante que previamente se restrinja a informação já existente na bibliografia, relativamente à

estimativa do valor do coeficiente de permeabilidade, focando-se a mesma na parte da estrutura que são os filtros considerados críticos.

É conhecida a afirmação e posição tomada por vários autores sobre este assunto, na medida em que após diversas estudos por parte dos mesmos, afirmam que o bom desempenho de um filtro numa barragem de aterro é caracterizado principalmente pela sua permeabilidade, pelo que este será o parâmetro em que se irá centrar este trabalho.

1.2 Objetivos

A previsão do coeficiente de permeabilidade nos filtros e a verificação das alterações que ocorrem, com a alteração do coeficiente de permeabilidade nos mesmos, afetam a sua estabilidade e dimensionamento, pelo que se desejou atingir os seguintes objetivos:

- Revisão do modo como o solo base afeta o dimensionamento do filtro ao nível granulométrico e quais os critérios de dimensionamento a ter em conta;
- Análise da influência global da granulometria e índice de vazios na determinação do coeficiente de permeabilidade, através de:
 - Uma análise, individual e pormenorizada de cada equação empírica conhecida para determinação do coeficiente de permeabilidade;
 - Definição das equações mais adequadas e erros esperados;
 - Uma análise global, da totalidade das equações adequadas a filtros em conjunto com resultados obtidos experimentalmente.
- Conhecidos os valores de permeabilidade para o filtro e intervalos extremos do coeficiente de permeabilidade associado, tentar verificar de que modo surgem na barragem de aterro, alterações ao nível hidráulico, determinando-se se a causa está relacionada com a alteração do coeficiente de permeabilidade, este estudo é realizado através da análise de alguns parâmetros considerados chave, como a capacidade de vazão, caudal percolado, pressão intersticial e gradientes hidráulicos instalados.

1.3 Organização do trabalho

A dissertação está organizada em 6 capítulos, sendo o primeiro capítulo constituído pela presente introdução e os seguintes com o conteúdo descrito em seguida.

– Capítulo 2

Neste capítulo é feita uma breve apresentação dos fundamentos teóricos e conceitos que se julgam essenciais para o conhecimento dos filtros e fatores que podem afetar direta ou indiretamente o seu funcionamento. Nas barragens de aterro em Portugal está presente regulamentação aplicável aos filtros, pelo que, são também descritos os cuidados a ter na execução de filtros em barragens de aterro. Inicialmente, são abordados de forma mais aprofundada os critérios conhecidos no dimensionamento dos filtros, mostrando como se representam sob a forma da sua distribuição granulométrica. As regras de dimensionamento surgem depois descritas e resumidas para diferentes materiais base, que se julgam cruciais neste estudo.

– Capítulo 3

Neste capítulo inicia-se a estimativa da permeabilidade com o recurso às diversas equações empíricas consideradas aplicáveis aos materiais de filtro. Estas são selecionadas e descritas em pormenor, verificando-se a sua capacidade de aproximação, através de uma comparação entre as equações empíricas, consideradas adequadas para a determinação do coeficiente de permeabilidade de materiais de filtro. São destacadas as equações que se julgam mais adequadas aos materiais de filtro consoante os requisitos de cada autor, sendo aplicadas para os dois filtros com granulometrias consideradas representativas de situações limite, filtros estes definidos com base nos critérios de dimensionamento do capítulo 2.

– Capítulo 4

Neste quarto capítulo, é apresentado o estudo experimental desenvolvido com base em filtros com curvas granulométricas cumprem os limites granulométricos provenientes do dimensionamento do filtro feito com base no material de núcleo da barragem de Odelouca. É explicitado o método utilizado para a composição dos dois filtros ensaiados; descrito o ensaio de permeabilidade realizado com o permeâmetro de parede rígida de carga constante, a metodologia e cuidados laboratoriais adotados. De seguida são aplicadas as equações empíricas a estes filtro montados laboratorialmente, permitindo saber os intervalos de permeabilidade para cada um dos filtros. É também realizada uma análise dos resultados obtidos laboratorialmente para averiguar se os valores de coeficiente de permeabilidade dos dois filtros montados laboratorialmente aproximam os resultados das equações

empíricas, permitindo a escolha das equações que efetivamente podem ser utilizadas para a determinação do coeficiente de permeabilidade para materiais de um filtro.

– Capítulo 5

Sobre os intervalos dos coeficientes de permeabilidade obtidos nos capítulos 3 e 4, são escolhidos os valores que realmente são adequados para filtros, procedendo-se a uma análise de elementos finitos, através de uma modelação em elementos finitos, sendo possível verificar na análise dos resultados, do caudal percolado nos filtros e no núcleo, dos gradientes hidráulicos e das pressões intersticiais, se a escolha de várias equações capazes de determinar coeficientes de permeabilidade, sobre a mesma granulometria, afetam a estabilidade hidráulica da barragem e órgãos que a compõem.

– Capítulo 6

Neste capítulo são apresentadas as observações finais e conclusões obtidas deste estudo. Sugerem-se por fim, trabalhos e desenvolvimentos futuros que se considerem relevantes.

Capítulo 2

Dimensionamento dos materiais de filtro

2.1 Enquadramento geral

2.1.1 Introdução

A localização e função desempenhada por cada filtro, mediante a carga a que o filtro é sujeito, define se este é crítico ou não. Serão revistos os critérios necessários para que seja feito um correto dimensionamento ao nível da permeabilidade, filtração e resistência, baseados nas curvas de distribuição granulométrica dos materiais base e de filtro, permitem saber, se o filtro ficou devidamente dimensionado ao nível granulométrico, sendo capaz de garantir a segurança e evitar fenómenos como a erosão interna.

Ocorrências como a percolação concentrada, são uma das razões da existência dos filtros, sendo a presença da água no dimensionamento de barragens de aterro, o fator com mais influência na sua estabilidade hidráulica, no entanto, os corretos métodos construtivos e de observação, podem ser determinantes, pois garantem na fase de execução em obra, que o coeficiente de permeabilidade definido seja atingido, não colocando em causa a capacidade de vazão dos filtros e correto nível a que se deverá encontrar o nível freático nas várias zonas da barragem.

2.1.2 Métodos construtivos

O cuidado na execução de um filtro em obra nunca deve ser descurado, pois poderá originar problemas, colocando em causa a eficiência da barragem e, no pior dos casos, levar mesmo à sua rotura. É ainda necessário, um adequado controlo das características atribuídas em fase de dimensionamento, como o índice de vazios pretendido, distribuição granulométrica e dimensões.

Fatores como a segregação do material arenoso, contaminação de outros materiais, mais especificamente nas zonas adjacentes ao filtro, geometria, dimensão vertical, espessura de material solto, compactação, número necessário de passagens de cilindros, materiais adjacentes ao filtro bem compactados, quantidades em excesso de material, devido ao espalhamento de areia durante a compactação e minimização da quebra de partículas. Tendo em conta todos estes fatores, são agora descritos três métodos construtivos:

- 1º Núcleo impermeável situado um nível acima do filtro, representado na Figura 2.1 (a), minimiza o espalhamento de areia durante a compactação, o que faz com que seja mais fácil atingir a percentagem de compactação desejada. No entanto, é mais propício à contaminação do filtro com materiais do núcleo com o decorrer do tempo e com o surgimento de chuvas, ou qualquer outro fenómeno hidráulico. Outra desvantagem, é a dificuldade que existe na manutenção da largura do filtro ao longo do desenvolvimento da barragem.
- 2º Filtro um nível situado acima dos materiais adjacentes, representado na Figura 2.1 (b), corrige os problemas do método anteriormente referido, contudo pode ocorrer um espalhamento de areia para fora dos supostos limites do filtro, o que pode levar à necessidade de uma uniformização da largura do mesmo e, conseqüentemente, a um aumento nos custos.
- 3º A execução de valas, representada na Figura 2.2, perante um núcleo homogéneo é o método mais apropriado, consistindo na escavação de 1 a 1,5 m em profundidade até se atingir o material de filtro já colocado. Apenas é exequível, se todos os materiais se encontrarem devidamente compactados, proporcionando-se assim uma elevada qualidade de construção e garantindo ótimas ligações do filtro com os materiais adjacentes.

2.1.3 Observação

O controlo de construção de um filtro em obra, além dos métodos construtivos, precisa de ser complementado com uma constante observação e fiscalização, o que implica a execução

2.1 Enquadramento geral

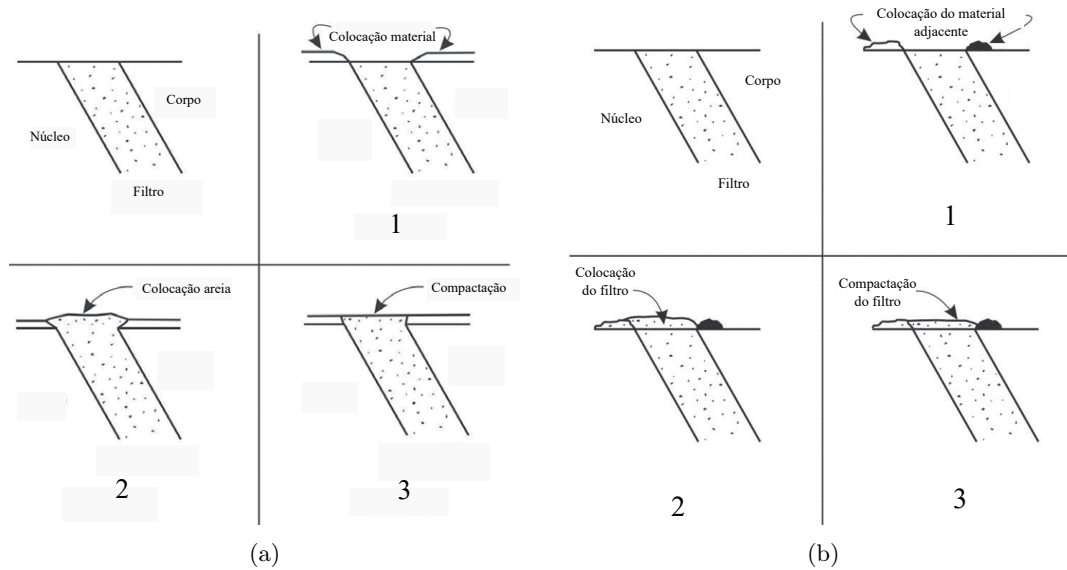


Figura 2.1: Núcleo Impermeável um nível acima do filtro (a) e filtro um nível acima dos materiais adjacentes (b) (FEMA, 2011)

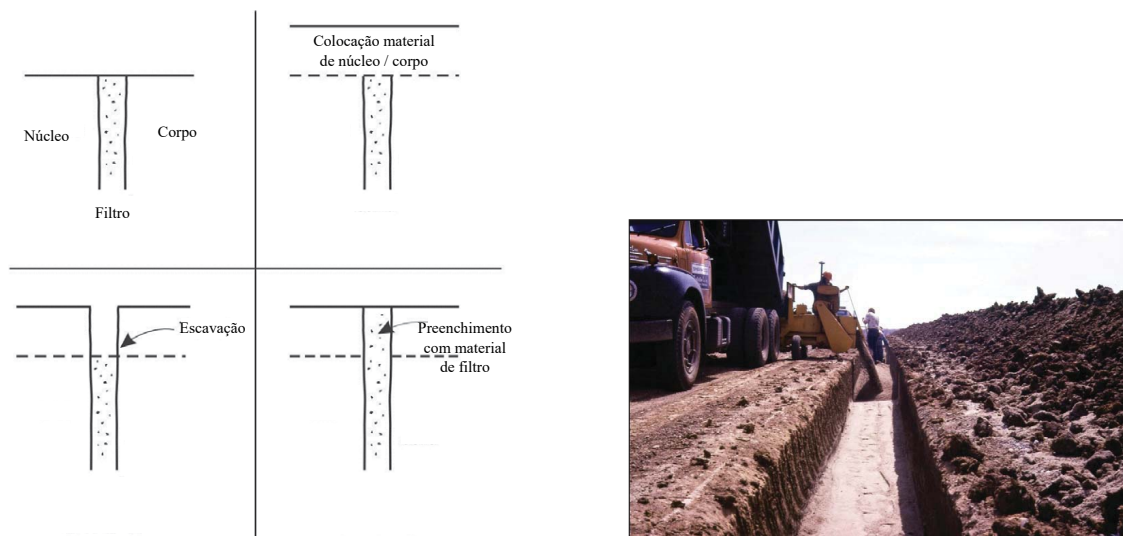


Figura 2.2: Execução de vala um nível acima e preenchimento com material de filtro (FEMA, 2011)

de ensaios in-situ complementados pelos ensaios laboratoriais, que devem ser executados no decorrer de toda a obra e não apenas após a construção, garantindo assim um constante controlo de qualidade.

O parâmetro a testar in-situ mais relevante, e importante para a observação e conseqüente controlo de construção e bom comportamento hidráulico, após realização da barragem, é a medição das cargas hidráulicas recolhidas nos piezómetros, quando é possível a sua colocação. Os resultados a obter devem estar de acordo com as

especificações e requerimentos mínimos para as zonas de filtro e dreno. Relativamente à compactação, o grau da mesma e o teor em água devem situar-se dentro dos valores especificados no projeto, devendo a espessura das camadas ser experimentalmente ajustada às características do material de aterro e ao tipo dos equipamentos de compactação, podendo no local ser efetuados testes com o método nuclear (ASTM D6938) ou com o método do cone de areia (ASTM D1556). A escolha dos lugares de teste, deve ser feita, tendo em conta o futuro da obra e nos locais que se julguem chave, acessíveis e mais propícios a problemas ou grandes variações de valores, em zonas de fácil acesso.

2.1.4 O coeficiente de permeabilidade dos filtros

Os valores de coeficiente de permeabilidade associados aos diferentes materiais e solos variam de forma bastante grosseira, e analisando a Tabela 2.1, é dado que, os materiais utilizados nos filtros, desde as areias finas a materiais mais permeáveis que as britas, definem um intervalo para o coeficiente de permeabilidade ainda bastante amplo, e que deve ser abordado mais em detalhe.

Tabela 2.1: Valores médios de permeabilidade, baseado em (Fell et al., 2005)

Material	Coefficiente de permeabilidade k (m/s)
Rochas maciças	$< 10E-10$
Argilas sedimentares	$10E-9$ a $10E-10$
Solos compactados (kv)	$10E-8$ a $10E-9$
Siltos	$10E-08$
Solos compactados (kh)	$10E-6$ a $10E-8$
Areias finas	$10E-05$
Areias grossas	$10E-04$
Brita	$> 10E-3$

O índice de vazios, é um fator que afeta o coeficiente de permeabilidade, podendo ter uma influência nos resultados obtidos bastante significativa, na medida em que se sabe que com o aumento do nível de saturação do solo a permeabilidade também aumenta, características mais intrínsecas dos materiais de filtro como o índice de vazios, permitem prever de que modo o é facilitado ou não o fluxo de água, as seguintes equações ajudam a melhor perceber o peso destas características no coeficiente de permeabilidade.

2.1 Enquadramento geral

$$S_r = \frac{V_w}{V_v} = \frac{G_s \frac{W}{100}}{e} \cdot 100 \quad (2.1)$$

V_w Volume água;

V_v Volume vazios;

G_s Densidade relativa dos sólidos;

w Teor em água.

É importante relembrar que quando se atingem elevados valores de compactação, a consequente redução do índice de vazios pode afetar o valor do coeficiente de permeabilidade. Na Figura 2.3, é possível visualizar que a alteração da permeabilidade com o índice de vazios, ocorre de forma distinta para cada tipo de material.

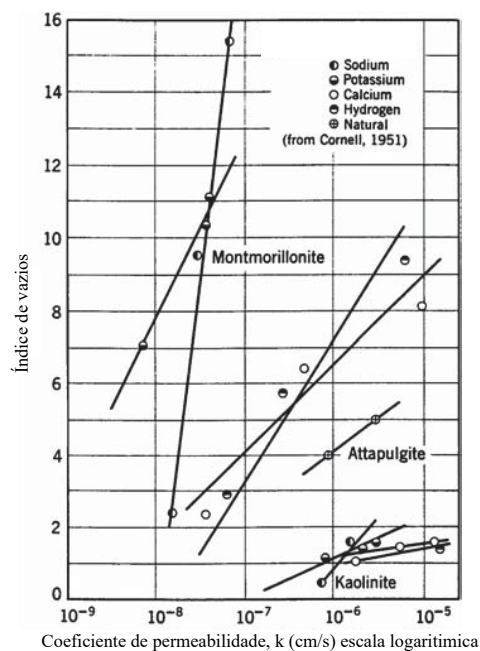


Figura 2.3: Efeito do índice de vazios sobre o coeficiente de permeabilidade (Fell et al., 2005)

2.1.5 Capacidade de vazão

A capacidade de vazão nos filtros varia diretamente com o seu coeficiente de permeabilidade e irá ditar o seu bom funcionamento; a correta estimativa da capacidade de vazão irá também garantir que seja possível o controlo da pressão nos poros e a percolação existente no interior da barragem. Percolação que quando ocorre corretamente, deverá ocorrer no interior do filtro como representado na Figura 2.4.

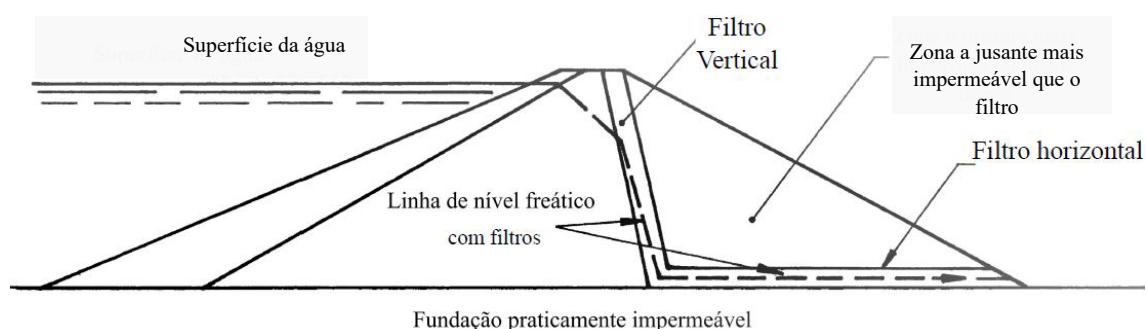


Figura 2.4: Nível freático numa barragem de aterro com permeabilidade adequada (Fell et al., 2005)

Está representada na Figura 2.4, uma barragem zonada tipo, onde se pode verificar a existência dos filtros "chaminé" e horizontal, sendo possível verificar onde se deverá situar a linha de saturação deste tipo de estruturas. Na Figura 2.5, estão representados os dois tipos de filtro mais utilizados, mais especificamente o filtro "chaminé" que representa um filtro vertical com um ligeiro declive, conseguindo assim ficar paralelo ao perfil do núcleo e, o filtro horizontal, que se encontra usualmente a jusante da barragem, junto à fundação.

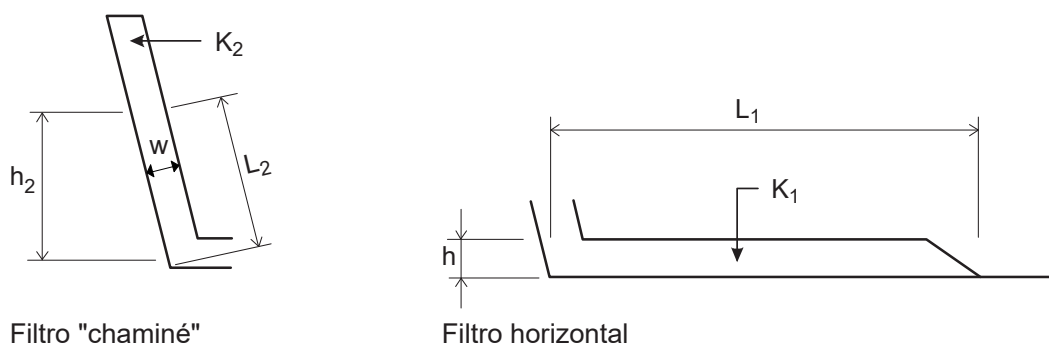


Figura 2.5: Caudal percolado pelos filtros "chaminé"/inclinados e horizontais (Fell et al., 2005)

Tendo por base as dimensões representadas na Figura 2.5, são apresentadas as equações 2.1

2.1 Enquadramento geral

e 2.2, que com o conhecimento do valor dek , permitem a determinação do caudal máximo que o filtro é capaz de percolar.

- Filtro horizontal

$$q_1 = \frac{k_1 h^2}{2L_1} \quad (2.2)$$

k_1 representa a permeabilidade do material $-(m/s)$;

h espessura vertical do filtro $-(m)$;

L_1 comprimento do filtro $-(m)$;

q descarga por metro de espessura $-(m^3/m/sec)$.

- Filtro chaminé

$$q_2 = \frac{k_2 h_2 w}{L_2} \quad (2.3)$$

k_2 permeabilidade do filtro vertical $-(m/s)$;

w largura do filtro $-(m)$;

L_2 comprimento diagonal do filtro $-(m)$.

Como é referido nas normas do Regulamento de Segurança de Barragens (NPB, 1993), nos filtros, a capacidade de vazão deve ser 100 vezes superior à do núcleo na situação de pleno armazenamento. E este o valor é usado também, para a determinação da secção mínima útil para o sistema de drenagem.

A equação 2.3, que se apresenta de seguida, é aplicável a qualquer filtro, pelo que além da área, alterações no gradiente hidráulico devem-se também à geometria do mesmo.

$$A \geq \frac{q \cdot 100}{ki} \quad (2.4)$$

$$q = kia \quad (2.5)$$

i gradiente hidráulico, igual a 1 para filtros horizontais.

2.2 Funcionamento dos filtros

2.2.1 Localização e função desempenhada

Tendo em conta a sua localização, existem filtros considerados mais adequados para a prevenção dos fenómenos geralmente associados, de roturas e erosão. Na Tabela 2.2 apresenta-se um resumo dos locais onde usualmente se colocam os filtros chaminé e horizontal, já abordados anteriormente relativamente à sua capacidade de vazão.

Local	Condição	Consequência possível	Tipo de filtro necessário
Corpo	Núcleo impermeável composto por materiais não plásticos	Erosão das partículas e sua quebra	Filtro chaminé, tapete drenante e dreno de pé
Corpo e ou fundação	Composto por argilas dispersivas	Erosão das partículas	Filtro chaminé, tapete drenante e dreno de pé
Fundação sem corte	Composto por materiais erosíveis	Erosão das partículas	Tapete drenante e dreno de pé
Corpo e/ou fundação	Potencial de assentamento diferencial no núcleo impermeável	Rotura vertical do núcleo impermeável	Filtro chaminé, tapete drenante e dreno de pé
Corpo	Fratuza hidráulica do núcleo impermeável	Rotura horizontal do núcleo impermeável	Tapete drenante e dreno de pé
Fundação	Pressão	Erosão das partículas e rebentamento do pé	Tapete drenante e dreno de pé
Corpo	Penetração na estrutura	Rotura e erosão das partículas	Diafragma da condução de drenagem
Fundação	Materiais permeáveis	Erosão das partículas	Tapete drenante e dreno de pé
Fundação	Material angular ou rocha esmagada	Erosão das partículas	Tapete drenante e dreno de pé
Corpo e/ou fundação	Cargas sistemáticas em zonas de possível rotura	Rotura	Filtro chaminé, tapete drenante e dreno de pé
Fundação	Zonas de tração perto da superfície de fundo	Rotura	Filtro chaminé, tapete drenante e dreno de pé
Corpo	Fundada em materiais permeáveis da fundação	Erosão das partículas	Filtro invertido

Tabela 2.2: Condições, consequências e tipo de filtro necessário, baseado em (FEMA, 2011)

Consoante a sua localização, e sabendo agora as consequências associadas, existem 3 grandes tipos de filtros, os filtros de drenagem, de proteção e anti-fissuras.

Os filtros de drenagem, cujo propósito é interceptarem a água percolada pela barragem e sua fundação, são sujeitos a níveis de caudal bastante elevados. A sua composição é feita à base de materiais uniformemente graduados, requerendo, no entanto, o controlo

Dimensionamento dos materiais de filtro

- N_1 , percolação normal ao solo base/núcleo, ou seja, nas zonas de interface do filtro, onde se verificam elevados gradientes, podendo-se dizer que representam o fluxo que ocorre devido às elevadas diferenças de carga.
- N_2 , onde é em tudo semelhante a N_1 , mas com gradientes hidráulicos mais baixos, ocorrendo o fluxo apenas devido às forças da gravidade.
- P , a representar a percolação paralela à interface.

Localização Filtro	Função	Tipo de percolação ou carga	Importância do filtro
A jusante da proteção do talude	Controlo da erosão provocada pela chuva	P – Fluxo superficial ocasional	Não crítico
A jusante dos drenos de superfície	Remoção da percolação superficial	P – Fluxo contínuo ou ocasional	Não crítico. Zonas locais molhadas podem aparecer
A montante da proteção do talude	Controlo da erosão devido à acção das ondas, fluxo durante o esvaziamento	P – Fluxo ciclico devido às ondas N_2 – Fluxo baixo durante o esvaziamento	Usualmente não crítico
Drenagem interna temporária durante a construção	Dissipação da pressão excessiva nos poros durante a construção	N_2 – Fluxo temporario em quantidade limitada. Alguma migração de finos permitida se os drenos estiverem limpos	Não crítico. A sua falha pode levar à instabilidade durante a construção, ou atrasos
Preenchimento interno a montante da fronteira	Prevenção da migração de finos em direção a jusante no caso de esvaziamento	N_2 – Fluxo baixo ou de transição durante o esvaziamento	Não crítico. Apenas significativo se a migração de finos for grande e contínua
A jusante da interface interna	Prevenção da migração de finos para os filtros	N_2 – Fluxo apenas devido à infiltração da chuva na fundação	Crítico, mas apenas se a erosão for grande
A jusante da interface, p. ex. a jusante da fronteira do núcleo ou na fundação perto do núcleo	Prevenção da erosão interna do núcleo, incluindo efeitos das fugas concentradas nas fissuras e e etc.	N_1 – Fluxo contínuo do reservatório que poderá aumentar com o desenvolvimento da erosão	Crítico
A montante na interface entre o corpo e a fundação	Prevenção da erosão interna do núcleo para a fundação	N_1 – Fluxo contínuo do reservatório	Crítico
A montante da interface interna	Prevenção da migração de finos para o corpo de montante	N_2 – aproxima-se de N_1	Crítico, mas apenas se a erosão for grande

Tabela 2.3: Tipo de filtro críticos ou não críticos mediante a sua localização, função e tipo de percolação ou carga (ICOLD, 1994)

2.2 Funcionamento dos filtros

2.2.2 Regras de dimensionamento

Estando agora cientes do funcionamento dos filtros, da função que cada um desempenha e dos pontos mais críticos dos mesmos, é agora possível começar a dar importância ao trabalho feito no dimensionamento com uso de métodos que se baseiam em critérios ao nível da granulometria, tendo como objetivo a garantia de estabilidade hidráulica da barragem. Tendo por base publicações de (Schleiss e Boes, 2011) e (Santos, 2014), sabe-se da existência de 3 critérios chave:

- Critérios de retenção / drenagem

Evitam a migração de materiais do núcleo para o filtro, pelo que, é necessário a determinação de uma granulometria capaz de reter as partículas mais finas, usualmente presentes nas argilas do núcleo, mas também permitir a percolação, controlando a instalação de elevadas pressões intersticiais, respetivamente. A condição que geralmente representa este critério é:

$$\frac{D_{15Filtro}}{D_{85Base}} < 4 \quad \text{ou} \quad 5 < \frac{D_{15Filtro}}{D_{15Base}} \quad (2.6)$$

A Figura 2.7 representa o dimensionamento de um filtro, segundo Terzaghi e Peck (1948), autores que representam e localização e forma de um fuso granulométrico de um filtro em relação a um solo base, cumprindo deste modo, os critérios de retenção e drenagem em questão.

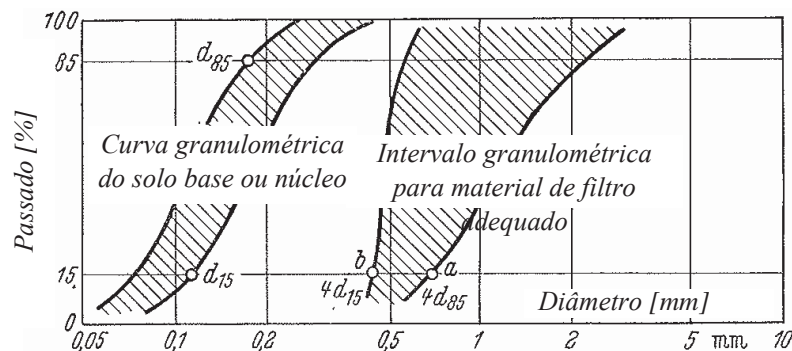


Figura 2.7: Solo base e critérios de dimensionamento segundo Terzaghi & Peck (1948) (Messerklinger, 2013)

- Critérios de filtração

Afetam a escolha do fuso granulométrico correto para o filtro, o fuso do filtro deve ser baseado, não só no material base, mas também ajustado de forma, a que não ocorram no interior do filtro arrastamentos de partículas e se proporcionem ao mesmo tempo condições mínimas, para que ocorra alguma recuperação do mesmo, existindo aquilo a que se chama, usualmente, de um controlo de finos (Indraratna, Trani e Khabbaz, 2008).

- Critérios de resistência e durabilidade

Surgem principalmente devido à localização dos filtros, que é na maioria das vezes, a jusante ou montante do núcleo, onde estão sujeitos a elevadas tensões, devendo estes ser resistentes ao esmagamento e à ação dos restantes elementos durante o tempo de vida projetado para a barragem.

A imposição destes critérios sobre o solo base, vai permitir que através do cruzamento de todos eles, se crie um fuso granulométrico com baseado no material de núcleo, fuso este onde se poderá inserir um filtro considerado "perfeito", teoricamente livre de qualquer consequência de um mau dimensionamento.

Existem mais métodos de dimensionamento na bibliografia atual, baseados também no solo base do núcleo e com restrições ao nível granulométrico, descritos de seguida.

O filtro perfeito, apresenta-se como um método de dimensionamento básico da granulometria para filtros com base em núcleos argilosos, (Vaughan e Bridle, 2004), estudaram este conceito e resumiram a sua aplicação em apenas dois passos:

- 1º: Determinação da dimensão das partículas a reter;
- 2º: Graduação necessária para as reter.

$$\delta_R = 1,49 \cdot 10^3 (k)^{0,658} \quad (2.7)$$

Onde δ_R é a dimensão da partícula mínima do material de filtro, em microns e k , a permeabilidade do filtro em m/s .

Os métodos USBR (1977), de Sherard e Dunnigan (1985) e de Lafleur e autores (1993), são aplicáveis a solos base bastante finos, e apresentam limitação ao nível granulométrico, pois por vezes, valores como D_{15Base} , não são possíveis de retirar, mostrando a limitação da aplicabilidade deste método.

2.2 Funcionamento dos filtros

O método USBR original (1977), tem especial atenção ao controlo de finos, erosão interna no núcleo e cuidados com a boa gradação da curva do filtro.

- $D_{15F}/D_{15B} = 5$ a 40 com um filtro com menos de 5% de finos a passar o peneiro 0,075 mm, os finos não devem ter coesão, garantindo-se que o filtro é mais permeável que o solo base;
- $D_{15F}/D_{85B} \leq 5$ irá controlar a erosão do solo base;
- A curva do filtro deverá ser paralela à do material base controlando-se assim a erosão do solo base;
- Tamanho máximo das partículas de 75 mm para controlo da erosão do solo base;
- D_{15B} e D_{85B} analisados com base numa gradação menor que 4.7mm.

O método de Sherard e Dunnigan (1985), de forma semelhante, à aproximação realizada pelo método USBR, Sherard e Dunnigan, como se pode visualizar na Tabela 2.4, usam o fuso granulométrico do núcleo como base, mas posteriormente, é efetuada uma distinção entre 4 tipos de solo, distintos com base na % de finos de deixam passar no peneiro 200, sendo este método geralmente aplicado sobre solos argiloso e siltes.

<i>Tipo de solo</i>	<i>% finos Peneiro #200 <0.075mm</i>	<i>Critérios de filtro determinados depois dos testes de Sherard & Dunnigan (1989)</i>	<i>Critérios</i>
1	85-100	$D_{15Filtro} = 7D_{85Base}$ a $12D_{85Base}$	$D_{15Filtro} \leq 9D_{85B}$
2	40-80	$D_{15Filtro} = 0,7$ a $1,5$ mm	$D_{15Filtro} \leq 0,7$ mm
3	0-15	$D_{15Filtro} = 7D_{85Base}$ a $10D_{85Base}$	$D_{15Filtro} \leq 4$ a $5 D_{85Base}$
4	15-40	Interpolação entre grupo 2 e 3	Interpolação entre grupo 2 e 3

Tabela 2.4: Critérios filtros, baseado em (Messerklinger, 2013) e (Santana, 2014)

Por fim, o método de Lafleur e co-trabalhadores (1993), bastante completo, e resumido no esquema presente na Figura 2.8, aborda não só a gradação da curva granulométrica com base no coeficiente de uniformidade, mas também através de toda a curva de distribuição, com uma análise visual da concavidade, conseguindo deste modo, tentar prever a instabilidade interna do filtro e medidas necessárias ao nível da granulometria se tal ocorrer, terminando com a aplicação do critério já referido de retenção / drenagem.

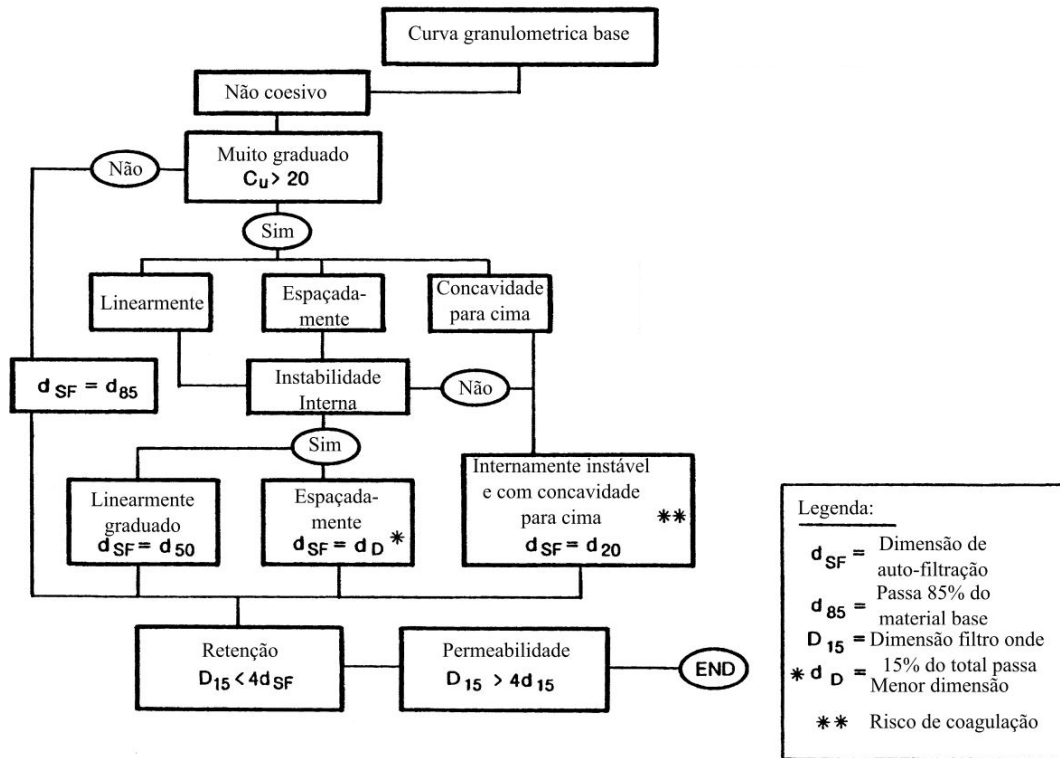


Figura 2.8: Esquema de dimensionamento definido por Lafluer et al. para filtros convencionais e compostos por geotêxteis (ICOLD, 1994)

2.2.3 Consequências do mau funcionamento de um filtro

É importante o conhecimento dos fenômenos que ocorrem com o mau funcionamento dos filtros, mais especificamente, a erosão interna, que pode ser o resultado, de uma ultrapassagem do gradiente hidráulico crítico, e a rotura hidráulica, como resultado de um deficiente alívio de pressões intersticiais.

A erosão interna, representa o arrastamento de partículas que ocorre no interior dos materiais de aterro, ou seja, uma erosão mecânica originada, devido à existência de uma elevada carga hidráulica, o que pode ser também representado por uma ultrapassagem do gradiente crítico. O prolongamento deste fenômeno, em conjunto com a percolação contínua, leva à origem do piping. É sabido, que a alteração na percentagem de areias e sua dimensão é que vai permitir evitar este fenômeno, no entanto, e porque estaremos sempre limitados por equações empíricas, as alterações não são quantificadas em toda a granulometria, criando-se espaço para que ocorra a erosão interna. Concluindo, a erosão interna apesar de ser evitável, é apenas possível de controlar até determinado ponto.

2.2 Funcionamento dos filtros

De modo a representar da melhor maneira a influência da distribuição granulométrica no problema em questão, temos na Figura 2.9 representadas as fronteiras que definem o nível de erosão existente com base na dimensão das partículas do solo base onde passa 85% do material, D_{85B} , em relação à dimensão das partículas do filtro onde passa 15% do material, D_{F15} .

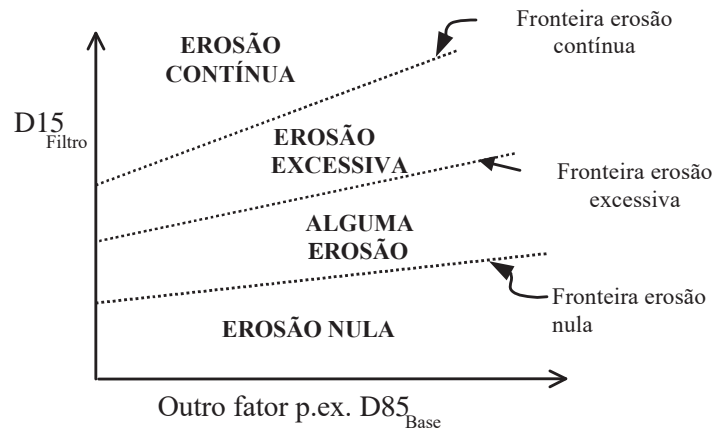


Figura 2.9: Erosão interna e os seus níveis (Guide, 1996)

Como consequência da erosão interna, e segundo a perspectiva de (ICOLD, 1994, Neves, 1991, Sherard e Dunningan 1898 e Vaughan e Soares, 1982), é geralmente assumido, que o uso de filtros adequados em barragens de aterro previne a contínua erosão interna em áreas, onde gradientes hidráulicos importantes se podem instalar. Numa barragem de aterro deve existir especial atenção às forças de percolação ascendentes, que podem a qualquer altura, sobrepôr as da gravidade, dando início à separação das partículas facto representado pela seguinte equação:

$$i_c = \frac{\gamma_b}{\gamma_w} \quad (2.8)$$

i_c gradiente hidráulico crítico

γ_b peso específico saturado do solo menos peso específico da água

γ_w peso específico da água

A verificação de valores de gradientes hidráulicos reduzidos indica também o quão lentamente poderá estar a acontecer o piping. Na Figura 2.10 (a), é possível observar, como se poderá instalar um elevado gradiente hidráulico após a reparação de uma fissura,

podendo originar de novo erosão interna, na Figura 2.10 (b), está representada um curva, que varia para cada material de filtro e deve ser definida para que se verifique, a partir de que ponto e dimensão, a percentagem de finos mais elevada, pode começar a ter implicações na estabilidade hidráulica dos filtros.

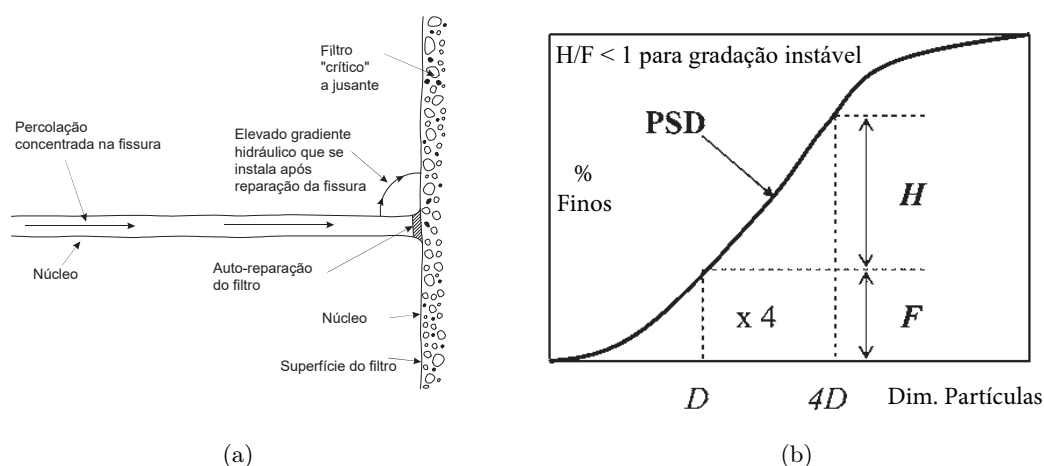


Figura 2.10: Instalação de elevado gradiente hidráulico (a) e relação na dimensão granulométrica que estabelece a estabilidade interna (b) (Indraratna e Raut, 2006) e (Fell et al., 2005)

Surge também, devido ao mau funcionamento dos filtros, a rotura hidráulica, representada pela existência, de tensões efetivas negativas em locais chave como por exemplo na interface núcleo/filtro. A instalação de valores elevados de gradiente hidráulico provoca mais facilmente a ocorrência deste fenómeno, pelo que a auto-reparação do filtro deverá sempre funcionar em conjunto com a retenção e drenagem necessárias para que se estabeleça um equilíbrio de tensões e seja possível evitar este fenómeno.

Capítulo 3

Estimativa do coeficiente de permeabilidade

3.1 Componentes necessários

A escolha das equações que mais se adequam à determinação do valor do coeficiente de permeabilidade deve ser feita tendo em conta também, que se está a lidar com materiais arenosos, não coesivos e com elevados graus de saturação, característicos de um filtro. A comparação das equações apresentadas, aplicadas sempre ao mesmo material, permite, com o cumprimento dos limites definidos pelos autores das equações empíricas, saber se a equação será mais precisa e realista relativamente aos valores reais.

Serão abordados também, em pormenor alguns parâmetros de entrada, comuns à maioria das equações escolhidas, assim como o modo como cada uma das equações, consegue realmente aproximar os resultados de permeabilidade obtidos com os ensaios laboratoriais realizados por vários autores.

Conhecidos os métodos de dimensionamento dos filtros, com base em regras granulométricas e critérios de aceitação, é possível, após a definição das curvas granulométricas que ditam o fuso do filtro, determinar através das equações empíricas apresentadas, os intervalos de k entre $1E - 1$ e $1E - 6$ m/s. Aos materiais de filtro são agora aplicadas as equações empíricas, capazes de determinar o valor do coeficiente de permeabilidade para os materiais de filtro, estas equações empíricas, são o resultado de inúmeros ensaios laboratoriais realizados pelos diversos autores.

3.2 Equações empíricas

O ponto de partida, da escolha da granulometria de um filtro, deve resultar de uma combinação de dados, entre os métodos de dimensionamento apresentados no capítulo anterior com base na distribuição granulométrica do material base, apresentados no capítulo anterior. Esta escolha, complementada com a informação da Tabela 3.1, onde estão representados, para cada autor, os tipos de material e limites ao nível granulométrico e do índice de vazios, para os quais é conhecido o bom funcionamento das suas equações. A escolha de equações que são granulometricamente adequadas a um material de filtro, que é resultado da aplicação de vários métodos de dimensionamento distintos, irá garantir boas aproximações ao nível teórico com o uso destas equações.

Tabela 3.1: Tipos de solos e limitações associadas a cada autor e sua fórmula

	Tipo material	d10 (mm)	d10/d5	Cu	e
Hazen-Taylor (e)	Areia Uniforme	0,1 - 3	-	≤5	-
Terzaghi	Areia	-	-	-	-
Kozeny-Carman	Qualquer	-	-	-	-
Navfac DM7	Areia e Gravelha	0,1 - 2	1,4	2 - 12	0,3 - 0,7
Shahabi et al.	Areia	0,15 - 0,59	-	-	0,38 - 0,73
Mbonimpa et al.	Qualquer	-	-	-	-
Chapuis	Natural $I_p=0$	0,003 - 3	-	-	0,3 - 1

Da totalidade das 45 equações conhecidas para a determinação do coeficiente de permeabilidade, apresentadas por (Chapuis, 2012), (Dolzyk e Chmielewska, 2014), (Odong, 2008), apenas 7 se consideram adequadas aos materiais arenosos, não coesivos, e saturados, próprio dos filtros.

Apresenta-se de seguida as equações em detalhe:

Hazen (1892), em conjunto com Taylor (1948) criaram a equação 3.1, para a determinação do coeficiente de permeabilidade com e sem variação do índice de vazios, equação esta considerada adequada para areias uniformes.

$$k_{sat}(D_{10}) = 1.157 (D_{10})^2 (0.70 + 0.03T) \quad (3.1)$$

k_{sat} coeficiente de permeabilidade - (cm/s)

D_{10} Dimensão das partículas de material de filtro correspondente a 10%, em peso, do material passado numa análise granulométrica - (mm)

3.2 Equações empíricas

T Temperatura da água - ($^{\circ}C$)

Terzaghi, criou a equação 3.2, sobre a qual não definiu limites ao nível da distribuição granulométrica, e sobre a qual se sabe que é aplicável à generalidade das areias.

$$k_{sat}(n; D_{10}) = C_0 \frac{\mu_{10}}{\mu_T} \left(\frac{n - 0,13}{\sqrt[3]{1 - n}} \right)^2 D_{10}^2 \quad (3.2)$$

k_{sat} coeficiente de permeabilidade - (cm/s)

μ_{10} e μ_T viscosidade da água a determinada temperatura - ($^{\circ}C$)

D_{10} Dimensão das partículas de material de filtro correspondente a 10%, em peso, do material passado numa análise granulométrica - (mm)

C_0 constante de Terzaghi relativa a materiais com grãos redondos e suaves = 8

n porosidade.

Kozeny-Carman, apresentou uma atualização à fórmula de Hazen, com recurso a toda a distribuição granulométrica e não apenas a dimensão D_{10} , equação 3.3, o que a torna mais precisa. .

$$k_{sat}(e; S_s) = C \frac{g}{\mu_{\omega} \rho_{\omega}} \frac{e^3}{S_s^3 G_s^2 (1 + e)} \quad (3.3)$$

g aceleração da gravidade - (m/s^2)

μ_{ω} viscosidade dinâmica da água - ($Pa.s$)

ρ_{ω} densidade da água - (kg/m^3)

S_s superfície específica - (m^2/kg)

G_s densidade relativa dos sólidos

Na equação de Kozeny-Carman, tem-se como já foi referido, um uso de toda a distribuição granulométrica, neste caso, através do conceito de superfície específica. A determinação da superfície específica pode ser feita laboratorialmente a partir da curva granulométrica, ou estimada com métodos numéricos, pelo que, para a equação de Kozeny-Carman, tendo

como base a curva de distribuição granulométrica do filtro, os inúmeros ensaios realizados por Chapuis e Aubertin (2003), dizem ser possível a determinação da superfície específica com base no seguinte método proposto por Chapuis e Légaré (1992):

$$S_S(d) = \frac{6}{d\rho_s} \quad (3.4)$$

onde d representa o diâmetro em metros de uma esfera sólida de densidade ρ_s , para o caso de solos plásticos. No entanto, e trabalhando com materiais granulares que representam melhor a constituição dos filtros e tendo desta vez em conta, aspetos geométricos, tais como a forma e a rugosidade, encontra-se a seguinte adaptação sustentada na equação acima referida proposta pelos mesmos autores (Chapuis, 2012):

$$S_S(d) = \frac{6}{\rho_s} \sum \frac{P_{No.D} - P_{No.d}}{d} \quad (3.5)$$

$P_{No.D}$ percentagem de sólidos de dimensão D

$P_{No.d}$ percentagem de sólidos da dimensão seguinte d

$P_{No.D} - P_{No.d}$ percentagem sólida menor que a dimensão maior D , $P_{No.D}$

Na Figura 3.1, é possível verificar, como a equação de Kozeny-Carman, (3.3), se mostra eficiente, quando é conhecido o valor preciso da superfície específica do material. São apresentados exemplos de bentonites e areias siltosas, onde se pode verificar, que seja para valores baixos ou elevados de permeabilidade, ocorre a aproximação à igualdade entre o valor de k previsto e determinado laboratorialmente.

A equação de Navfac DM7, (3.6), surge associada ao estudo da saturação do material e, de entre as 7 equações escolhidas, é a que mais requisitos terá de cumprir, para que seja provado o seu bom funcionamento.

$$k_{sat}(e; D_{10}) = 10^{1,291e-0,6435} (D_{10})^{10^{0,5504-0,2937e}} \quad (3.6)$$

Na Figura 3.2 (a), está também representada a aproximação que é possível obter com a equação de Navfac DM7, quando são obtidos laboratorialmente graus de saturação elevados de 85 e 100%, sendo assim possível, verificar graficamente, a importância da alteração do índice de vazios do grau de saturação na determinação do valor do coeficiente de permeabilidade.

3.2 Equações empíricas

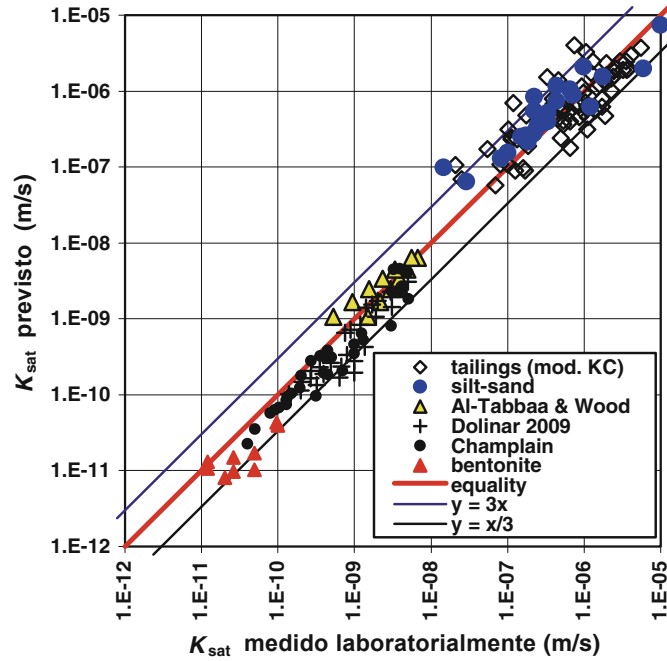


Figura 3.1: Funcionamento da equação de Kozeny-Carman com o conhecimento da superfície específica (Chapuis, 2012)

Na Figura 3.2 (b) é proposta, uma estimativa do valor do coeficiente de permeabilidade, para materiais com índices de vazios e a variar desde 0,3 a 0,7 e com uma distribuição granulométrica, com alteração de D_{10} .

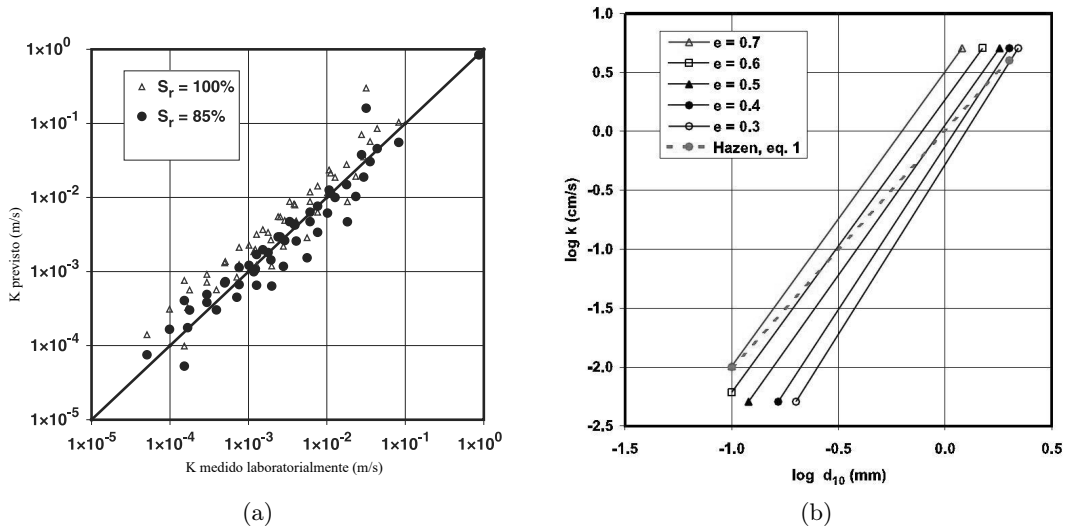


Figura 3.2: Grau de saturação e a variação do índice de vazios e granulometria na equação de Navfac DM7 na determinação do coeficiente de permeabilidade (Chapuis, 2004)

Shahabi et al. (1984), (3.7), fizeram uso principalmente, de procedimentos laboratoriais, sobre várias amostras de areia, cada uma com uma única dimensão D_{10} , sobre as quais realizaram ensaios utilizando permeâmetros de parede rígida a carga constante para a determinação do coeficiente de permeabilidade.

$$k_{sat}(C_U; e; D_{10}) = 1,2 C_U^{0,735} D_{10}^{0,89} \frac{e^3}{1+e} \quad (3.7)$$

Mbonimpa et al. (2002), (3.8), apresenta-se como um dos poucos autores, a não definir qualquer condição ao nível do tipo de material sobre o qual dá bons resultados, não existindo também nenhuma condição na distribuição granulométrica e índice de vazios. Esta equação é fortemente baseada em ensaios de permeabilidade, realizados em permeâmetros com piezômetros laterais, o que garante mais fiabilidade aos resultados atingidos com o uso da mesma.

$$k_{sat}(e; D_{10}) = C_G \frac{\gamma_w}{\mu_w} C_U^{1/3} D_{10}^2 \frac{e^{3+x}}{1+e} \quad (3.8)$$

A equação (3.9), de Chapuis (2004), apresenta-se como a mais recente equação empírica capaz de prever o coeficiente de permeabilidade em solos saturados, homogéneos e não coesivos.

$$k_{sat}(e; D_{10}) = 2,4622 \left(\frac{D_{10}^2 e^3}{1+e} \right)^{0,7825} \quad (3.9)$$

3.3 Comparação das equações apresentadas

A Figura 3.3 apresenta um exemplo de uma série de valores de k , recolhidos por (Chapuis, 2004), que foram utilizados para o estudo da aproximação da sua equação, (Chapuis, 2012), onde é abordado o coeficiente de permeabilidade com 6 das 7 equações aqui escolhidas, por serem consideradas pelo autor também adequadas aos materiais não plásticos, para os quais dimensionou a sua equação. Nesta Figura 3.3, é possível verificar que apesar de um ligeiro desfasamento da curva de Mbonimpa et al., para um material com a mesma curva de distribuição granulométrica, e com características semelhantes a um material de filtro, todas as equações se adequam e conseguem fazer boas aproximações.

O uso destas equações é regido pelo cumprimento ou não de uma ou mais condições, imposta pelos autores já apresentada previamente na Tabela 3.1, sendo lógico que, o maior número de limitações cumpridas, levam a uma maior certeza de que o valor de k

3.3 Comparação das equações apresentadas

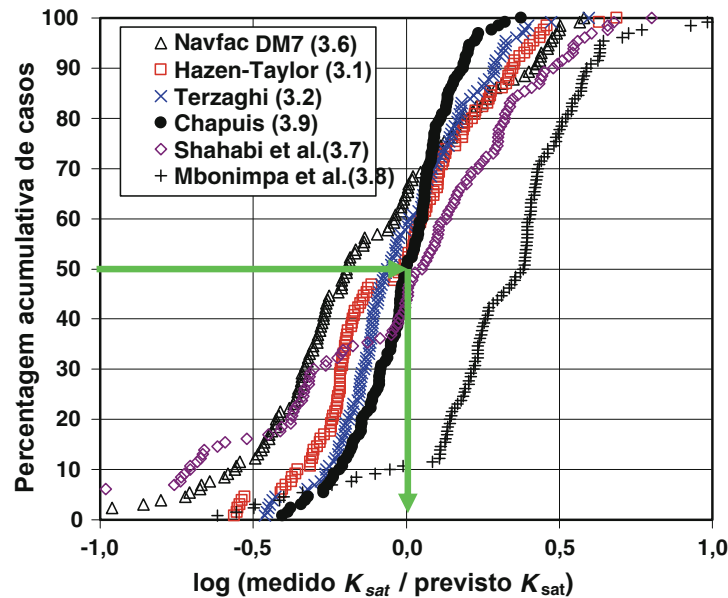


Figura 3.3: Comparação da aproximação em 6 das 7 equações escolhidas (Chapuis, 2012)

será o mais aproximado da realidade, como se pode verificar na Figura 3.4 onde se pode usar como exemplo a equação de Chapuis, que cumpre a totalidade das condições impostas pelo autor, ou seja 3/3, devendo portanto ser considerada como a equação que mais se aproxima do valor real do coeficiente de permeabilidade.

Na Figura 3.5, é apresentado um esquema, que com base em alguns estudos realizados sobre o material a ser testado, diz quais as equações mais apropriadas a utilizar, sendo portanto desejável o conhecimento de toda a informação possível. Para um caso em que seja conhecida a curva granulométrica, índice de vazios e limites de Atterberg, é possível, para um solo não plástico, determinar a superfície específica e conseqüentemente aplicar o método de Kozeny-Carman para a determinação de k .

Por fim, é também interessante verificar a aplicabilidade destas equações ao nível dos intervalos de permeabilidade que conseguem obter. Na Figura 3.6, estão representados os intervalos de permeabilidade definidos por (Chapuis, 2012), obtidos após a aplicação das várias equações empíricas sobre vários materiais, permitindo assim também, uma primeira noção das variações significativas de k , que podem ocorrer apenas com a escolha das diferentes equações empíricas, tendo cada uma, para o solo para que foi dimensionado intervalos distintos.

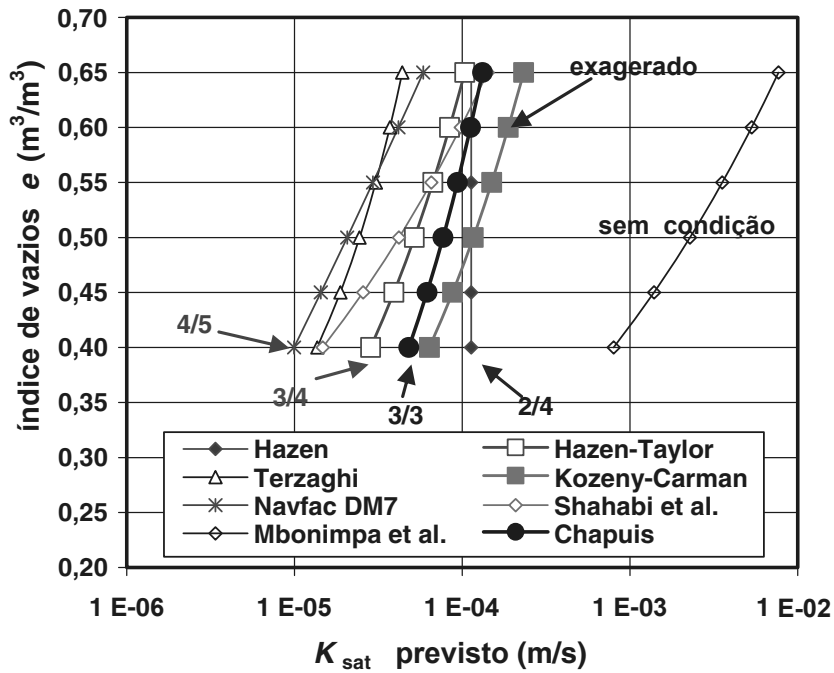


Figura 3.4: Condições associadas a cada equação para uma melhor percepção da qualidade dos resultados obtidos (Chapuis, 2012)

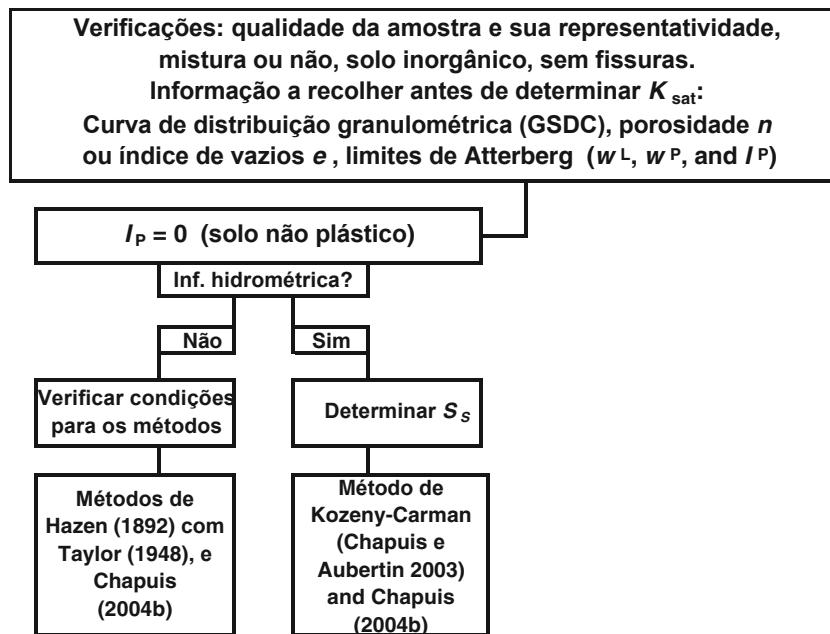


Figura 3.5: Esquema a seguir para escolha do método com melhor aproximação real esperada (Chapuis, 2012)

3.4 Estudo Realizado

Hazen-Taylor, para o caso das areias, comporta variações entre 100 a 1000 vezes no valor de k , por outro lado, a equação de Kozeny-Carman, apenas com base na granulometria e limites de Atterberg, apresenta um intervalo realmente muito grande para o coeficiente de permeabilidade, o que não é desejado, pois mostra muita variação apenas com a alteração do material em estudo, o que poderá levar a problemas abordados nos seguintes capítulos deste estudo.

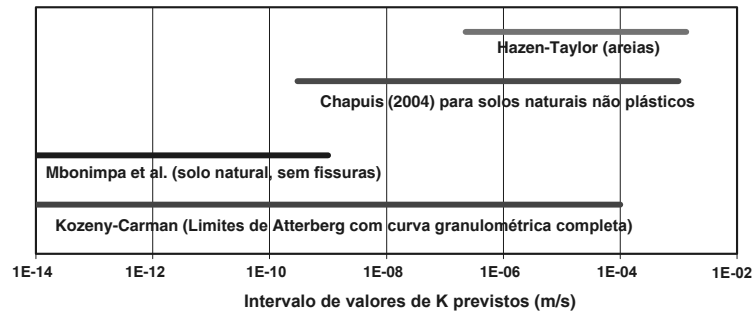


Figura 3.6: Intervalos de valores de permeabilidade k_{sat} dados pelos métodos recomendados para solos não coesivos (Chapuis, 2012)

Ficou comprovado, que o uso das várias dimensões retiradas da curva granulométrica e o índice de vazios são uma constante em todas as equações que foram até agora referidas, pelo que será importante abordar mais em detalhe através do estudo experimental, quais as alterações que surgem no coeficiente de permeabilidade com a alteração da distribuição granulométrica do filtro e índice de vazios.

3.4 Estudo Realizado

3.4.1 Definição do fuso granulométrico

Santos, 2014, recolheu material do núcleo na barragem de Odelouca para dar assim início ao seu trabalho experimental na limitação da progressão da erosão interna em barragens zonadas. Após aplicação dos critérios de retenção, drenagem, percentagem mínima de finos, controlo da segregação e máxima dimensão das partículas e limites de aceitação definidos pelo USBR 2011, referidos no capítulo 2, foi possível, um intervalo granulométrico adequado à construção de um filtro, que se poderá considerar "perfeito". Aproveitando a informação recolhida, estão representadas na Figura 3.7 duas diferentes distribuições granulométricas existentes nos dois materiais de núcleo distintos recolhidos da barragem de Odelouca.

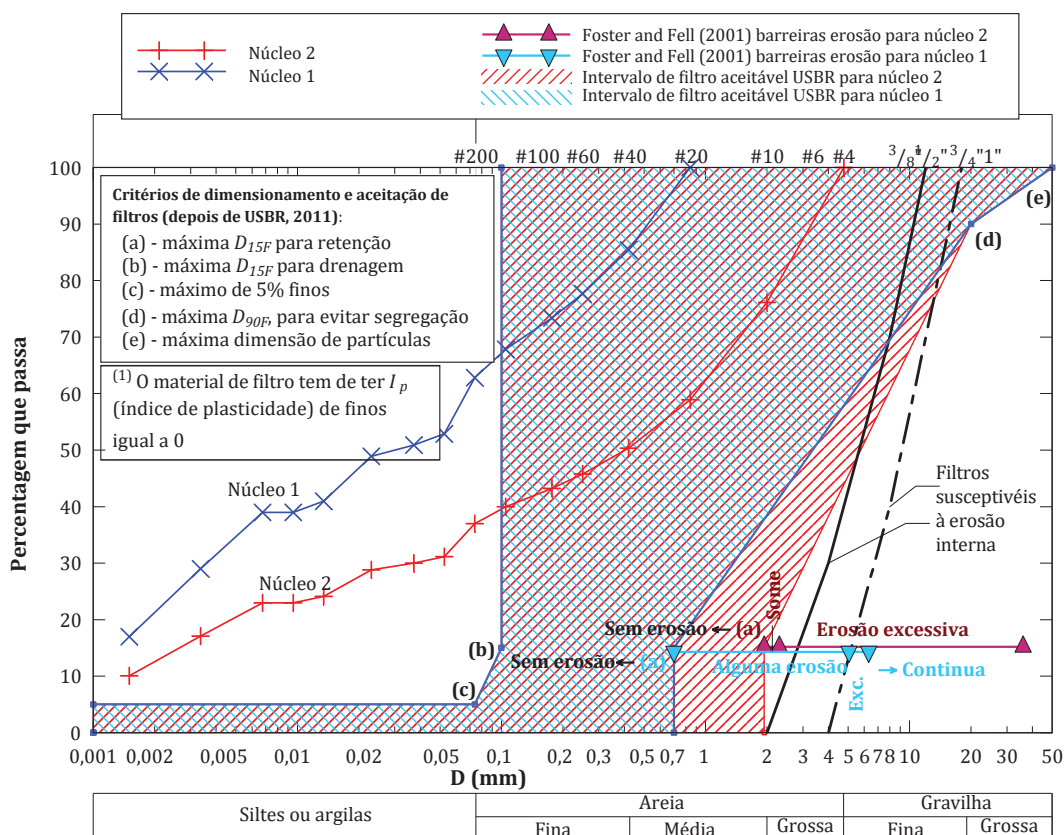


Figura 3.7: Núcleos usados como base de estudo, retirados de um estudo experimental, provenientes da barragem de Odelouca por (Santos, 2014)

O cálculo dos valores de coeficiente de permeabilidade que se apresentam neste capítulo, irão incidir sobre o fuso granulométrico de um filtro, que tem como base o solo do núcleo 1 da Figura 3.7, sendo este fuso a azul dimensionado para este material de núcleo. De seguida, na Figura 3.8, estão desenhadas as fronteiras impostas pelas linhas contínuas, que delimitam o fuso superior à esquerda e inferior à direita. As fronteiras serão denominadas a partir de agora, como as granulometrias para os filtros de distribuição / curva granulométrica de dimensão mínima e máxima respetivamente.

3.4 Estudo Realizado

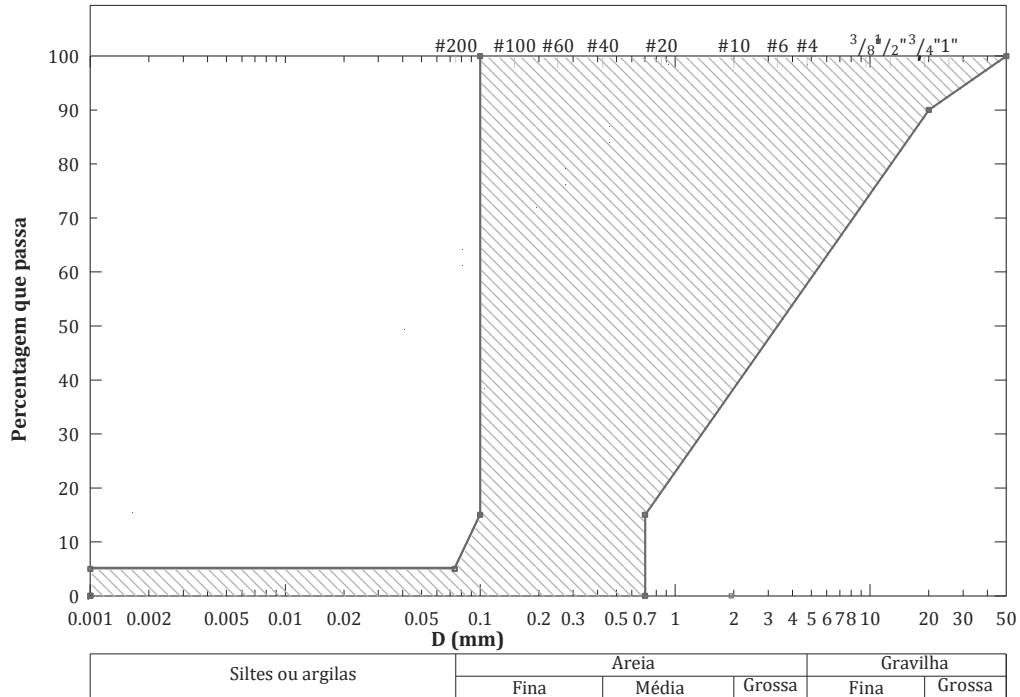


Figura 3.8: Limites granulométricos usados como caso de estudo, adaptados do trabalho realizado por (Santos, 2014)

Foi feita uma aplicação das 7 equações empíricas referidas anteriormente a estas fronteiras destes dois filtros limite, com os quais o objetivo será a verificação, de que modo a variação da curva de distribuição granulométrica afeta cada equação. Para complementar o estudo, e visto que também existem limites a cumprir ao nível do índice de vazios, referidos já na Tabela 3.1, o seu valor será também alterado entre 0,35 a 0,65, para que se encontre assim dentro dos limites da totalidade das equações para a mesma granulometria, permitindo assim uma ainda melhor aproximação do que ocorre nos filtros em barragens de aterro.

Nas Tabelas 3.2 e 3.3, estão representados os limites cumpridos para os dois filtros, com curva granulométrica de dimensões mínimas e máximas, sendo possível verificar que em ambos os casos, a aplicação do índice de vazios entre 0,35 a 0,65, associado a porosidades realistas e verificadas geralmente em aterros entre 0,25 e 0,35, não apresenta qualquer problema, destacando-se apenas a dimensão onde passam 10% do total da amostra, algo que no filtro com curva granulométrica de dimensões mínimas era esperado, visto que esta curva limite se encontra mal graduada para um material de filtro.

Estimativa do coeficiente de permeabilidade

Tabela 3.2: Limites cumpridos para a curva granulométrica de dimensões mínimas

	D10 (mm)	D10/D5	Cu	e	Limites
Hazen-Taylor	Não	-	Sim	-	1/2
Terzaghi	-	-	-	-	-
Kozeny-Carman	-	-	-	-	-
Navfac DM7	Não	Sim	Não	Sim	2/4
Shahabi et al.	Não	-	Sim	Sim	2/3
Mbonimpa et al.	-	-	-	-	-
Chapuis	Sim	-	-	Sim	2/2

Tabela 3.3: Limites cumpridos para a curva granulométrica de dimensões máximas

	D10 (mm)	D10/D5	Cu	e	Limites
Hazen-Taylor	Sim	-	Sim	-	2/2
Terzaghi	-	-	-	-	-
Kozeny-Carman	-	-	-	-	-
Navfac DM7	Não	Sim	Sim	Sim	3/4
Shahabi et al.	Não	-	Sim	Sim	2/3
Mbonimpa et al.	-	-	-	-	-
Chapuis	Sim	-	-	Sim	2/2

3.4.2 Resultados obtidos

Representam-se seguidamente nas Figuras 3.9 a 3.12, os resultados de coeficientes de permeabilidade obtidos para os dois filtros limite definidos de dimensões mínimas e máximas.

Os resultados obtidos para o coeficiente de permeabilidade, são feitos de duas formas distintas, primeiramente, com recurso a curvas compostas pelos vários valores calculados para cada equação e respetivo índice de vazios nas Figuras 3.9 e 3.10, e depois através de um gráfico de barras, que representa os mesmos intervalos do coeficiente de permeabilidade referidos anteriormente nas Figuras 3.11 e 3.12.

Para o filtro de dimensões mínimas, os valores de k obtidos na Figura 3.9, mostram para a maioria das equações um comportamento semelhantes, excetuando nos casos das equações de Kozeny-Carman e Shababi et. al., pelo que, nesta ultima equação, detetam-se bastante alterações de k , com a mudança do índice de vazios, ocorrendo o oposto na equação de Kozeny-Carman.

3.4 Estudo Realizado

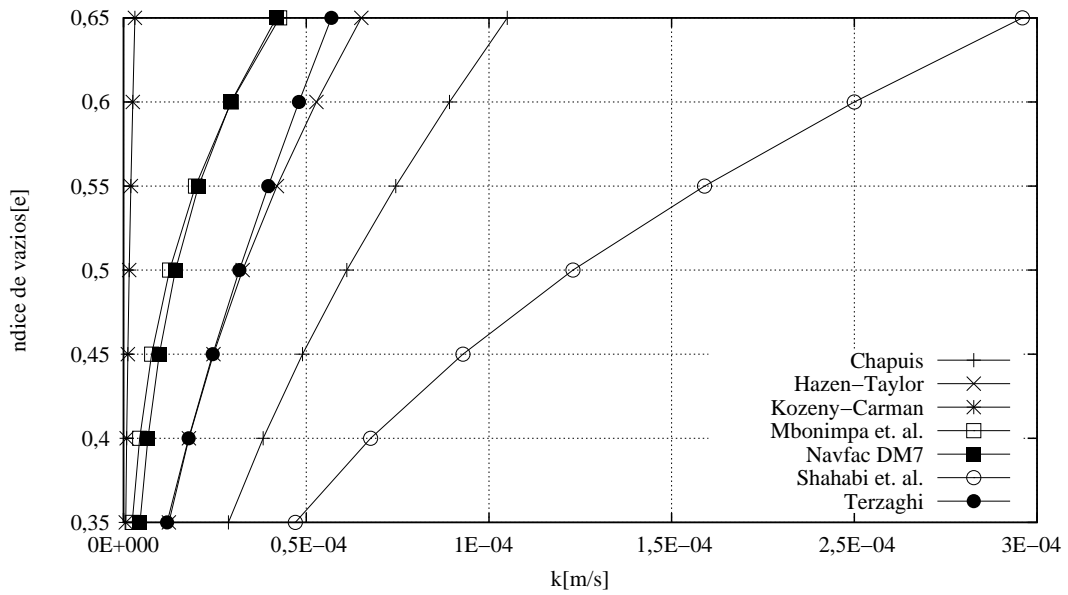


Figura 3.9: Valores de k obtidos com as equações empíricas, para a curva granulométrica de dimensões mínimas

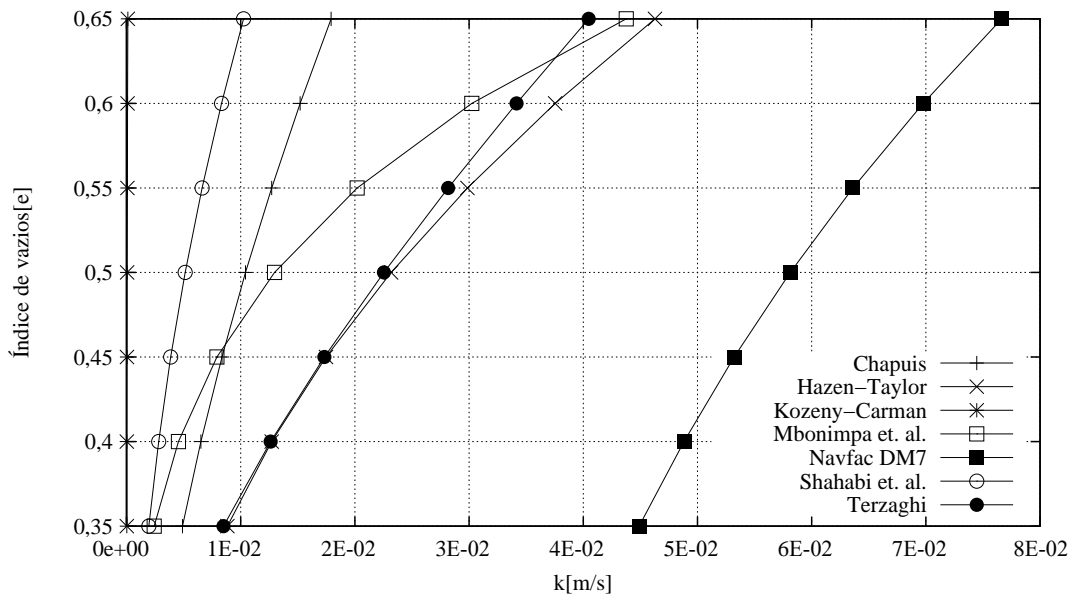


Figura 3.10: Valores de k obtidos com as equações empíricas, para a curva granulométrica de dimensões máximas

Para o filtro com curva granulométrica de dimensões máximas da Figura 3.10, novamente a equação de Kozeny-Carman, volta a ter pouca ou nenhuma alteração no índice de vazios, pelo que, neste caso a equação de Navfac DM7, ao não cumprir o limite D_{10} faz com que se distancie mais das restantes equações.

Estimativa do coeficiente de permeabilidade

Relativamente às Figuras 3.12 e 3.13, que espelham os valores de k obtidos nas Figuras 3.9 e 3.10, pode concluir-se que de um modo geral, com o avançar na curva granulométrica para curvas com materiais mais grosseiros, é mais acentuado o aumento dos intervalos de permeabilidade para cada equação, destacando-se novamente, a equação de Kozeny-Carman, que como já foi dito apresenta alterações mínimas.

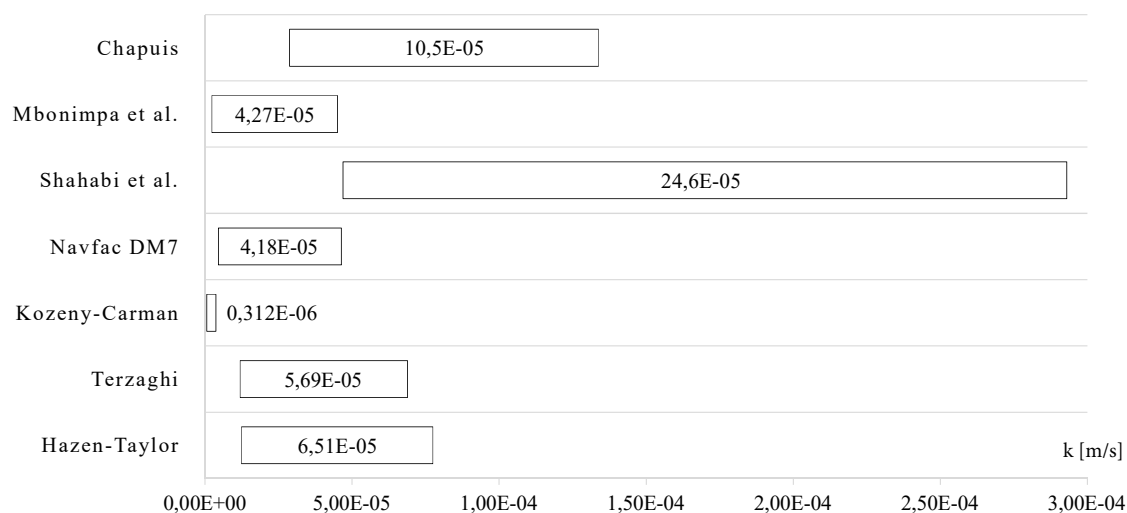


Figura 3.11: Intervalos de permeabilidade para filtro de dimensões mínimas

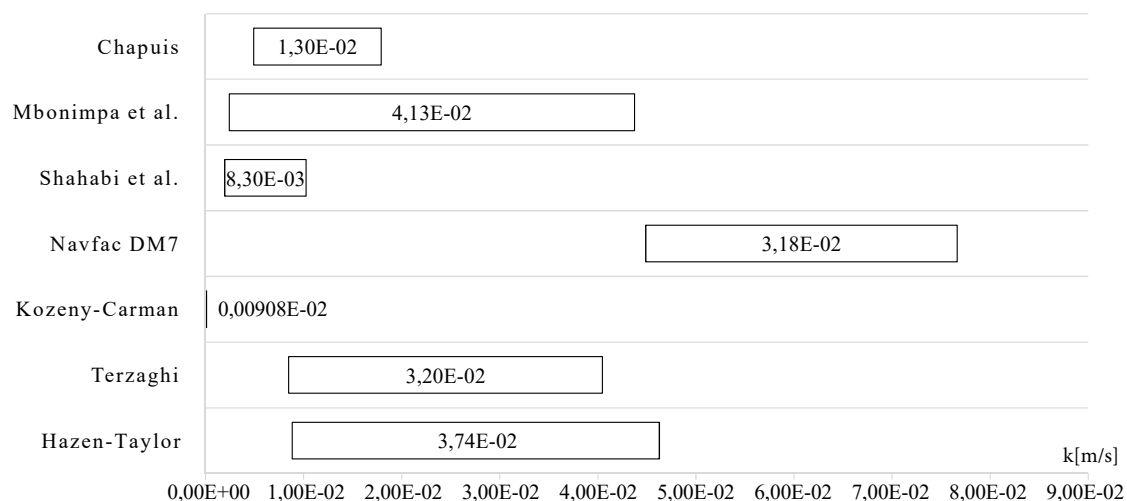


Figura 3.12: Intervalos de permeabilidade para filtro de dimensões máximas

3.4 Estudo Realizado

Nas Tabelas 3.4 e 3.5, estão também resumidos os valores de permeabilidade calculados, com os mínimos, variações e máximos valores de k atingidos. Os resultados obtidos, apresentam-se também na Figura 3.14 de forma mais abrangente, onde se pode verificar simultaneamente para as duas distribuições granulométricas de dimensão mínima e máxima, qual o desfasamento ao nível dos valores do coeficiente de permeabilidade, para iguais variações de índice de vazios.

Por fim, com recurso à Figura 3.14 e ao gráfico de barras da Figura 3.13, é possível de forma global verificar quando se sobrepõem todos os resultados de k obtidos, qual a amplitude total de valores obtida e as alterações no comportamento de cada equação com o aumento da permeabilidade, desde os valores mais reduzidos de $5E - 7$ até um máximo de $1E - 1$.

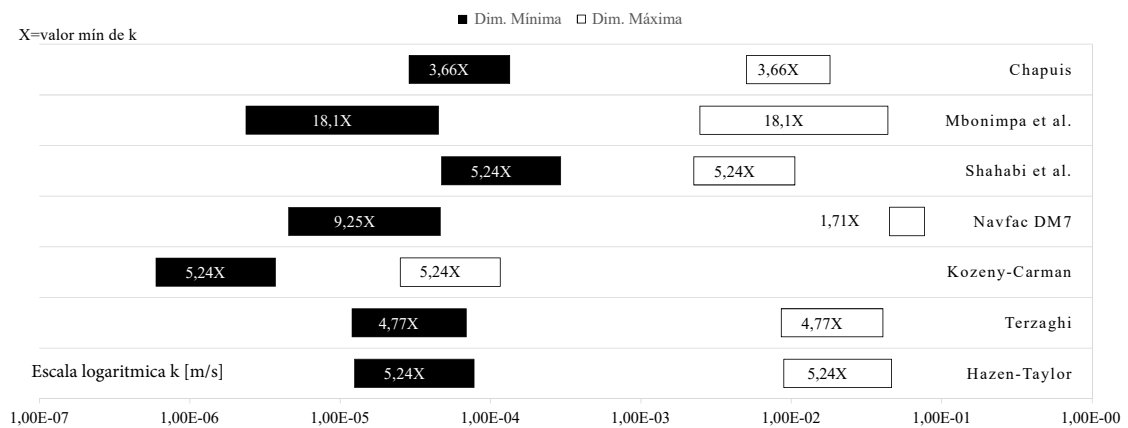


Figura 3.13: Intervalos de permeabilidade para filtro de dimensões mínima e máxima representados sob escala logarítmica

Tabela 3.4: Coeficiente de permeabilidade nos limites granulométricos definidos

Intervalos do coeficiente de permeabilidade para o Filtro de Dimensões Máximas (m/s)							
Autor	Hazen-Taylor	Terzaghi	Kozeny-Carman	Navfac DM7	Shahabi et al.	Mbonimpa et al.	Chapuis
Mínimo	8,83E-03	8,49E-03	2,14E-05	4,49E-02	1,96E-03	2,42E-03	4,90E-03
Varição	3,74E-02	3,20E-02	9,08E-05	3,18E-02	8,30E-03	4,13E-02	1,30E-02
Máximo	4,63E-02	4,05E-02	1,12E-04	7,66E-02	1,03E-02	4,38E-02	1,79E-02
Intervalos do coeficiente de permeabilidade para o Filtro de Dimensões Mínimas (m/s)							
Mínimo	1,24E-05	1,19E-05	5,95E-07	4,52E-06	4,70E-05	2,36E-06	2,87E-05
Varição	6,51E-05	5,69E-05	3,12E-06	4,18E-05	2,46E-04	4,27E-05	1,05E-04
Máximo	7,75E-05	6,88E-05	3,71E-06	4,64E-05	2,93E-04	4,50E-05	1,34E-04

Tabela 3.5: Comparativo dos valores máximos e mínimos de k para os filtros Dim. mín e máx

Extremos do coeficiente de permeabilidade para ambos os filtros (m/s)							
Autor	Hazen-Taylor	Terzaghi	Kozeny-Carman	Navfac DM7	Shahabi et al.	Mbonimpa et al.	Chapuis
Mínimo	1,24E-05	1,19E-05	5,95E-07	4,52E-06	4,70E-05	2,36E-06	2,87E-05
Máximo	4,63E-02	4,05E-02	1,12E-04	7,66E-02	1,03E-02	4,38E-02	1,79E-02

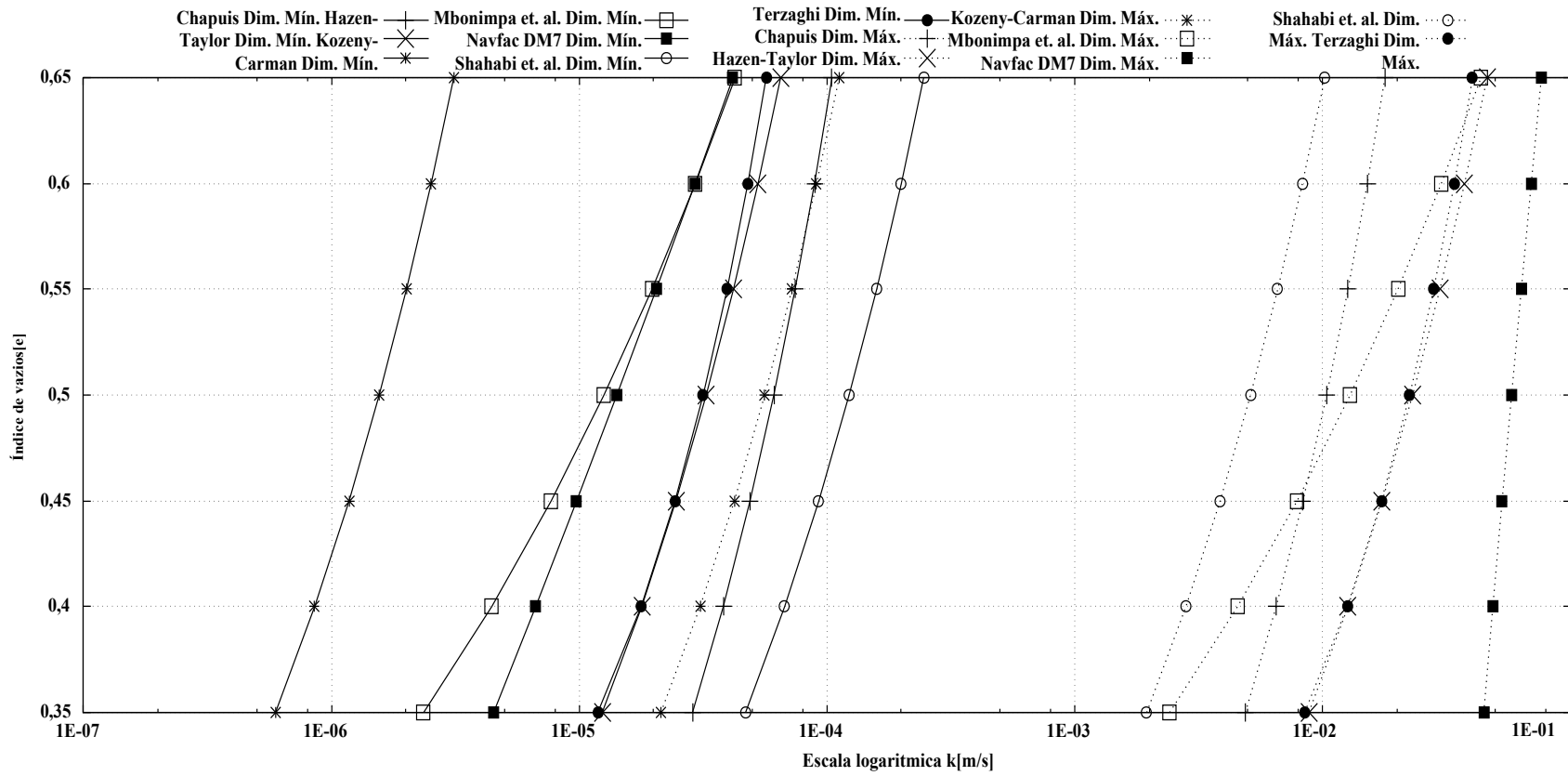


Figura 3.14: Valores de k obtidos pelas equações dos diferentes autores e índices de vazios, para as curvas granulométricas de dimensões mínimas e máximas

3.4.3 Conclusões

Após aplicação, sobre as curvas granulométricas de materiais de filtro, definidas de dimensões granulométricas mínimas e máximas, é relevante verificar como a variação do coeficiente de permeabilidade em m/s , sofre alterações tão significativas entre autores e granulometrias diferentes para o material.

- Em todos os resultados, é claramente visível que os extremos de permeabilidade para cada autor se separam por intervalos maiores, na ordem das 100 vezes o valor mais baixo;
- A equação de Hazen-Taylor (1892-1948), sendo a mais básica e ainda bastante usada, continua a proporcionar valores intermédios e aceitáveis em ambos os casos, apesar de apenas cumprir todos os teus limites no filtro com granulometria de dimensões máximas;
- A equação de Terzaghi (1925) varia apenas com o índice de vazios, pelo que, como se pode verificar, não apresenta grandes variações relativamente à equação de Hazen-Taylor, sendo que o intervalo de valores não se distancia entre ambos;
- A equação de Kozeny-Carman (1927-1956), dá resultados praticamente inalterados nos dois casos, não sendo portanto, uma equação que possa servir de base na realidade, não se mostrando portanto muito fiável, para estes intervalos granulométricos;
- Navfac-DM7 surge como já foi apresentado por (Dolzyk e Chmielewska, 2014), como a equação que mais parâmetros tem de cumprir, pelo que em ambos os casos, apenas não se cumpre D_{10} e no filtro de dimensão mínima também o coeficiente de uniformidade, C_U , pelo que, no geral, podemos assumir que os resultados serão bastante adequados à realidade.
- Shahabi et al., cumpre em ambos os casos o mesmo número de condições, pelo que apesar de coerente neste aspeto, e de se aproximar em parte dos resultado obtidos, deve assumir-se, que os resultados não serão os mais precisos do grupo;
- Mbonimpa et al. (2002) surge sem condições e a acompanhar a tendência das equações de Chapuis, Terzaghi e Hazen-Taylor;
- Chapuis (2004b), cumpre em ambos os casos todos os limites impostos, e é sem dúvida, a equação que mais fiabilidade terá, quando comparada com as restantes, considerando as alterações ao nível do índice de vazios e mais intrínsecas como o nível de saturação, a presença de piezómetros laterais e a possível existência de erosão interna.

Capítulo 4

Estudo experimental desenvolvido

4.1 Organização

O trabalho experimental desenvolvido tem como principal objetivo a determinação experimental do coeficiente de permeabilidade de filtros que se encontrem nos intervalos definidos na Figura 3.8, onde está representado o fuso granulométrico que define os filtros limite com granulometria de dimensões mínima e máxima. No intervalo referido foram construídos dois filtros distintos, efetuando-se de seguida a sua composição a partir de areias graduadas. Estes dois materiais de filtro são ensaiados com diferentes índices de vazios, também usados na Figura 3.14.

Foi utilizado o permeâmetro de parede rígida a carga constante, considerado apropriado para os materiais de filtro. É também referido, o modo de obtenção da granulometria desejada para cada um dos filtros e descrito resumidamente o procedimento laboratorial. Para a montagem do provete no permeâmetro, com o índice de vazios pretendido, é necessário efetuar uma compactação em camadas, descrevendo-se o processo e referindo-se as diferenças obtidas entre os índices de vazios finais.

Também neste capítulo, serão calculados valores de k para os dois novos filtros definidos neste capítulo, aplicando as fórmulas empíricas e tendo em conta os diferentes índices de vazios. Estes valores foram comparados com os obtidos laboratorialmente.

4.2 Construção dos filtros

4.2.1 Materiais utilizados

As areias escolhidas para a construção dos filtros, provêm da AREIPOR - Areias Portuguesas, LDA, e são as mesmas areias utilizadas no trabalho de (Santos, 2014). São conhecidas a dimensão das partículas, a descrição petrográfica, o teor de finos, a massa específica seca, a absorção de água, presentes na declaração de desempenho fornecida e descrito na Tabela 4.1

Tabela 4.1: Desempenho declarado das areias APA, por AREIPOR

Características	Desempenho
Tamanho das partículas	Variável
Descrição petrográfica	Areia quartzosa com dureza elevada Elemento rolado de forma alongada
Teor de finos	Reduzido
Massa específica	26,8 kN/m ³
Absorção de água	0,30%

Sobre as areias escolhidas, APA 8-12, 4, 6, 12, 14 e 18, foram realizadas análises granulométricas com base no ensaio normalizado LNEC E 196 - 1966, adequado para o estudo da granulometria neste tipo de materiais mais grosseiros e granulares. A curva granulométrica obtida, é o resultado de uma primeira peneiração grossa, seguida de uma peneiração fina, que representa os dados obtidos da Tabela 4.2, representados sobre a forma de curva granulométrica na Figura 4.1.

Tabela 4.2: Material passado em cada peneiro para cada uma das areias APA

	3/4"	3/8"	#4	#10	#40	#80	#200
PENEIROS (mm)	19,1	9,52	4,76	2	0,42	0,177	0,074
APA 8-12	100	47,77	0,21	0,10	0,07	0,04	0,02
APA 4	100	100	46,93	0,87	0,30	0,02	0,01
APA 6	100	100	99,03	5,20	0,02	0,00	0,00
APA 12	100	100	100	97,47	5,49	0,01	0,00
APA 18	100	100	100	98,38	55,38	0,00	0,00
APA 14	100	100	100	99,06	48,87	0,05	0,01

4.2 Construção dos filtros

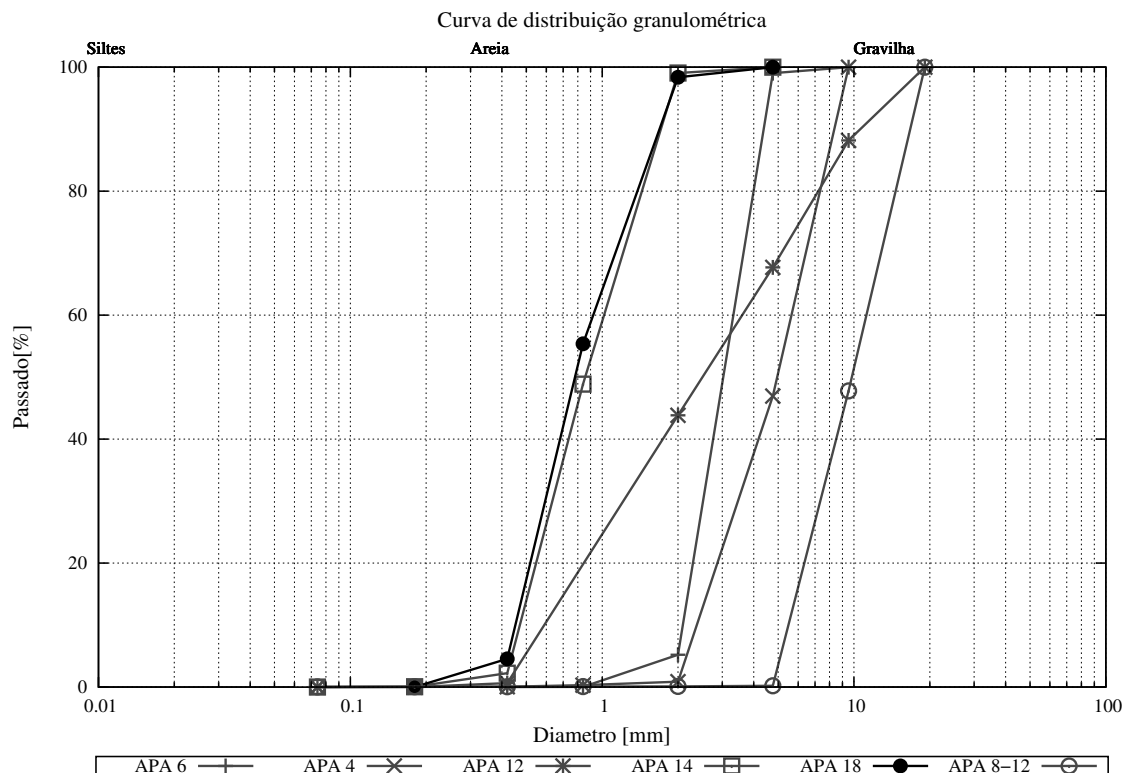


Figura 4.1: Curva de distribuição granulométrica de todas as areias testadas

4.2.2 Metodologia

Conhecidas as curvas de distribuição granulométrica das várias areias adquiridas, é necessário definir a granulometria adequada para um filtro através de um ajuste das percentagens de cada areia APA já conhecida até que se atinja a curva com a distribuição granulométrica desejada.

Foram montados dois filtros distintos, pois, julga-se que abrangem intervalos granulométricos suficientemente abrangentes, para uma comparação do coeficiente de permeabilidade medido e teórico.

- Filtro n^o1

O filtro n^o1 é composto por: 20% APA 8-12, 20% APA 4, 15% APA 6 e 45% APA 12. Na Figura 4.2, é possível ter uma ideia dos materiais recolhidos em cada peneiro como resultado da composição escolhida a sua curva de distribuição granulométrica e percentagem retida em cada peneiro, pode também ser vista na Figura 4.4 e na Tabela 4.5, estão também representados os limites definidos no capítulo anterior e o filtro n^o2, estando também na Tabela 4.3 representados os limites granulométricos e de índice de vazios cumpridos pelo filtro composto n^o1.



Figura 4.2: Material retido nos peneiros para a composição escolhida para o filtro n^o1

Tabela 4.3: Limites cumpridos para a composição granulométrica do filtro n^o1

	D10 (mm)	D10/D5	Cu	e	Limites
Hazen-Taylor	Sim	-	Sim	-	2/2
Terzaghi	-	-	-	-	0/0
Kozeny-Carman	-	-	-	-	0/0
Navfac DM7	Sim	Não	Sim	Sim	3/4
Shahabi et al.	Não	-	Sim	Não	1/3
Mbonimpa et al.	-	-	-	-	0/0
Chapuis	Sim	-	-	Sim	2/2

- Filtro n^o2

Para o filtro n^o2, foi definida uma curva que se inserisse no meio dos limites granulométricos definidos, tentando assim refletir da melhor forma, e de igual modo ao filtro n^o1, um filtro ideal para o solo do núcleo. Este filtro, é composto 100% pela areia APA18, como se pode constatar na Figura 4.4, o que facilitar bastante a sua aplicação, visto que não será necessária nenhuma mistura em obra. A Tabela 4.4 representa os limites granulométricos cumpridos pelo filtro n^o2, verificando-se que apenas para o valor mais reduzido de índice de vazios, de 0,35, é que não é

4.2 Construção dos filtros

cumprido o limite na equação de Shahabi et al..



Figura 4.3: Exemplo dos materiais retidos em cada peneiro para a areia APA 18 (constituição do filtro n^o2)

Tabela 4.4: Limites cumpridos para a composição granulométrica do filtro n^o2

	D10 (mm)	D10/D5	Cu	e	Limites
Hazen-Taylor	Sim	-	Sim	-	2/2
Terzaghi	-	-	-	-	0/0
Kozeny-Carman	-	-	-	-	0/0
Navfac DM7	Sim	Sim	Sim	Sim	4/4
Shahabi et al.	Sim	-	Sim	Não	2/3
Mbonimpa et al.	-	-	-	-	0/0
Chapuis	Sim	-	-	Sim	2/2

Tabela 4.5: Granulometria final dos filtros

PENEIROS	3/4"	3/8"	#4	#10	#40	#80	#200
	19,1	9,52	4,76	2	0,42	0,177	0,074
Filtro n ^o 1	100	89,55	69,28	44,83	2,55	0,02	0,01
Filtro n ^o 2	100	100,00	100,00	98,38	55,38	0,00	0,00

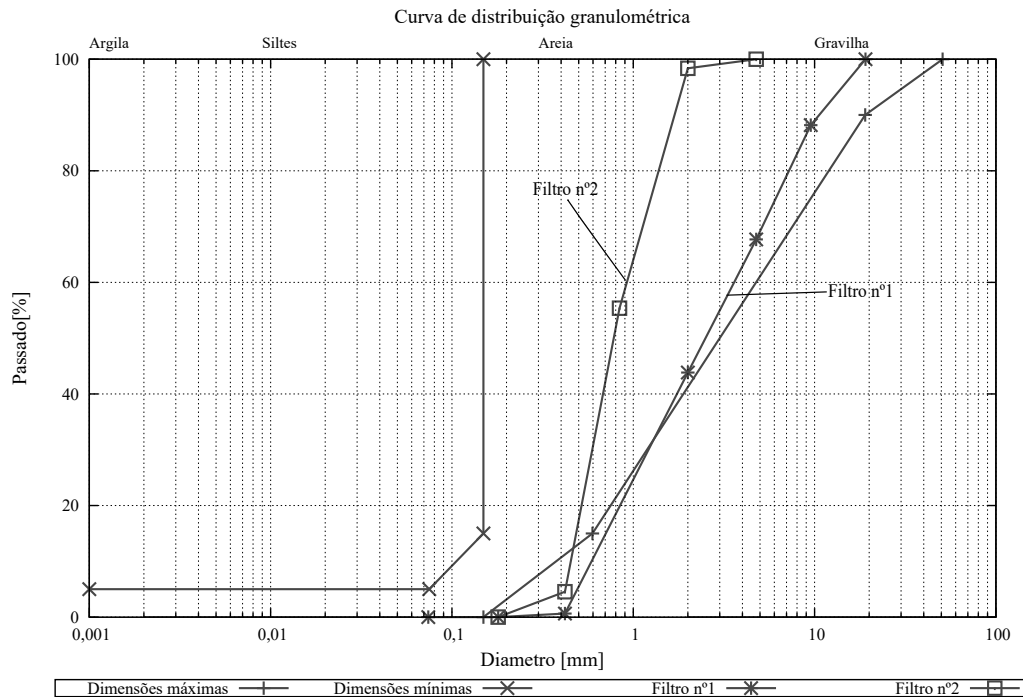


Figura 4.4: Composição granulométrica referente aos quatro filtros estudados

4.3 Ensaios de Permeabilidade

4.3.1 Procedimento laboratorial

Conhecidas todas as propriedades dos dois filtros a testar, é agora possível iniciar a montagem dos provetes a utilizar no ensaio de permeabilidade, com o uso da norma ASTM D2434. Esta norma descreve os procedimentos a seguir para a determinação de k em materiais granulares sujeitos a um fluxo laminar. O ensaio é adequado para solos colocados em aterro, e onde no peneiro número 200, não deverá passar mais de 10%, condições estas cumpridas pelos filtros definidos como resultado da composição efetuada e representada na Figura 4.4.

Na Figura 4.5, está desenhado o esquema do permeâmetro usado, em que é possível ver um primeiro reservatório que alimenta um segundo que será móvel e permitirá as alterações de carga desejada. Mais à esquerda no esquema, está o permeâmetro propriamente dito, e os três tubos piezométricos, onde são realizadas as leituras das cargas hidráulicas. Por fim, à saída da célula, existe uma proveta graduada capaz de recolher até um litro de água.

Neste ensaio, o provete é submetido a carga hidráulica com 3 valores distintos, onde a cada

4.3 Ensaios de Permeabilidade

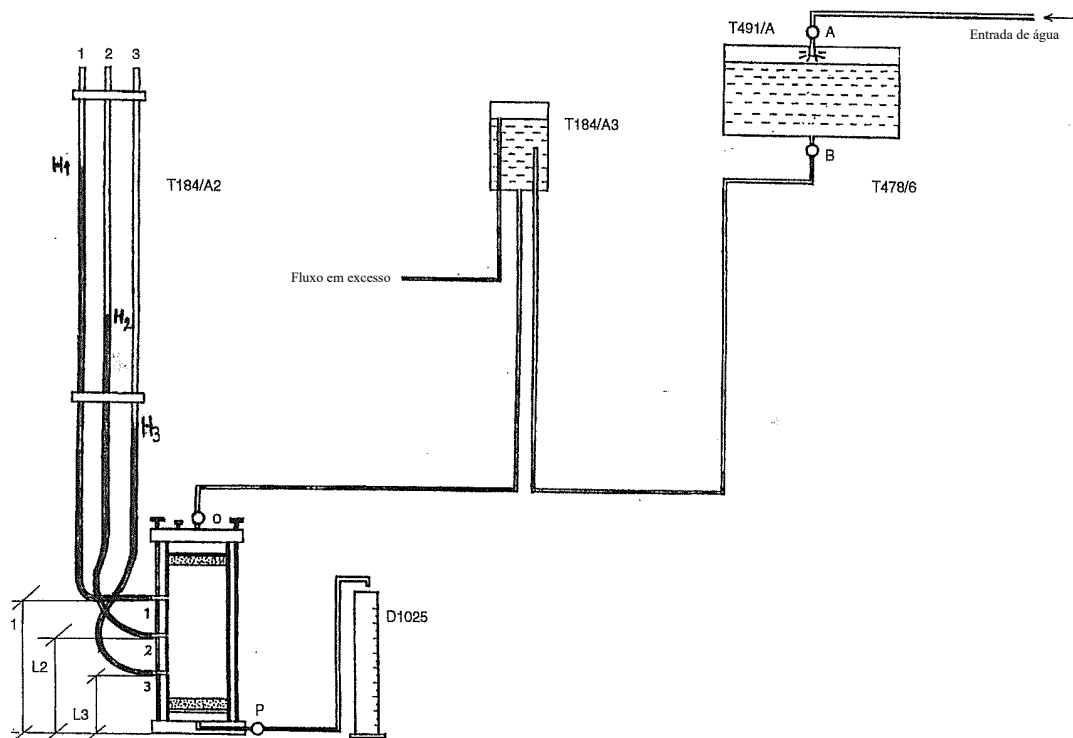


Figura 4.5: Esquema de montagem do permeâmetro de parede rígida, tubos piezométricos, manômetros e reservatórios de carga

recolha de dados, é possível obter também 3 pontos, constituído cada um pelo gradiente hidráulico no eixo das abcissas retirado da diferença de carga existente, verificada nos tubos piezométricos e a velocidade de escoamento no eixo das ordenadas, calculada através da determinação do caudal escoado pela secção circular. Como se pode ver na Figura 4.6, obtém-se uma reta como resultado de uma regressão linear, sendo o declive da reta o valor de k obtido.

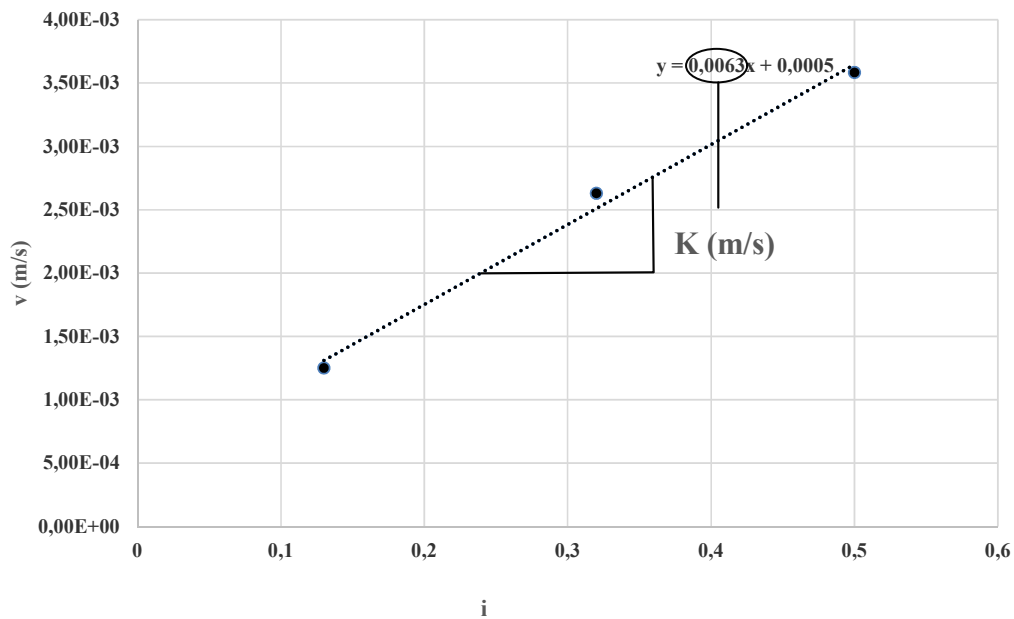


Figura 4.6: Gráfico exemplo, para determinação do coeficiente de permeabilidade, com base em 3 pontos obtidos laboratorialmente.

O coeficiente de permeabilidade é determinado pela quantidade de água que percola através da amostra, sendo que com o uso de um cronómetro e uma proveta de 1 litro, é possível determinar a quantidade de água, determinando-se assim o caudal Q .

$$Q = \frac{V}{t} \quad (4.1)$$

Com o conhecimento também das cargas hidráulicas verificadas nos 3 tubos piezométricos.

$$i = \frac{h}{L} \quad (4.2)$$

$$Q = k \frac{h}{L} A \quad (4.3)$$

i gradiente hidráulico

Q caudal / capacidade de vazão

L altura do provete

4.3 Ensaios de Permeabilidade

A área da secção transversal do provete

h carga hidráulica verificada entre o nível superior e inferior verificado nos tubos piézométricos

$$k = \frac{QL}{hA} = \frac{VL}{hAt} \quad (4.4)$$

t tempo gasto na medição do volume V

V volume escoado através do provete

4.3.2 Montagem do provete e índice de vazios

Foram definidos intervalos semelhantes de índice de vazios a testar laboratorialmente, de 0,35 a 0,55, que se julgaram exequíveis ao nível do que é possível montar num provete a ensaiar, com os materiais escolhidos.

As quantidades de material a usar são calculadas com base no peso seco das amostras, pelo que, foi necessário fazer uso da estufa para que o material fique totalmente seco e, se possa assim colocar as quantidades certas para as 4 camadas definidas, podendo verificar-se um exemplo das mesmas na Figura 4.7.



Figura 4.7: Exemplo da montagem faseada das 4 camadas de cada provete

Definido o índice de vazios pretendido, o peso do material a colocar, é determinado com base na dimensão do provete, altura, diâmetro, área da secção, volume e altura de cada camada definida, características estas resumidas na Tabela 4.6.

Tabela 4.6: Características dos provetes testados

Proвете	
h (mm)	240
D (mm)	70
A (mm ²)	3848,45
V (mm ³)	923628,24
V (m ³)	9,24E-04
N ^o de Camadas	4
h (cada camada em mm)	60,0

Na determinação do índice de vazios real, é necessária a determinação da densidade relativa, G , realizada com o uso das seguintes equações;

$$\gamma_g = \frac{\rho_g}{g} \quad (4.5)$$

$$G = \frac{\rho_g}{\rho_w} = \frac{\gamma_g}{\gamma_w} \quad (4.6)$$

De seguida, e fazendo uso do peso específico seco, γ_D , é possível com o volume já conhecido do provete, determinar o peso específico do material a colocar:

$$\gamma_D = \frac{\rho_g}{1 + e_0} \quad (4.7)$$

Conhecido o peso seco a colocar necessário para atingir a altura definida do provete, usando amostras com um total de cerca de dois kg , iniciou-se a montagem das 4 camadas definidas, todas elas com o mesmo peso, ou seja $1/4$, do peso específico seco determinado, γ_{Dfinal} , valor este que terá de ser constantemente verificado, pois poderão ocorrer ligeiras variações na montagem, dado por:

$$\gamma_{Dfinal} = \frac{m_{proвете}}{V_{proвете(fixo)}} \quad (4.8)$$

Após a colocação do material na célula do permeâmetro e sua respetiva compactação manual com recurso a um pilão, é possível atingir a altura definida de cada camada com as quantidades conhecidas de material para o respetivo índice de vazios a atingir, verificando-se depois se o valor de índice de vazios pretendido foi realmente atingido com o cálculo do

4.3 Ensaios de Permeabilidade

índice de vazios real da amostra a testar:

$$e_{final} = \frac{G\gamma_w - \gamma_D}{\gamma_D} \quad (4.9)$$

Nos casos em que o índice de vazios não foi atingido, foi necessário adicionar material nas situações em que não foi atingida a altura, sendo o índice de vazios inferior ao pretendido. Um acerto na altura da camada também se poderá dever à impossibilidade física de mais compactação sobre a amostra, sendo o acerto de índice de vazios determinado com base na nova altura das camadas, refletindo um índice de vazios superior ao pretendido. Na Tabela 4.7, estão os valores índice de vazios pretendidos e realmente obtidos após a montagem dos provetes dos dois filtros construídos. Conclui-se portanto que a correção do valor de e , será sempre feita com base na diferença entre a altura teórica e a real, no final de cada camada na montagem do provete, possibilitando a determinação do volume específico na fase de compressão.

Tabela 4.7: Índice de vazios pretendido e obtido após montagem dos provetes

Índice de vazios		
Pretendido	Obtido	
	Filtro nº1	Filtro nº2
0,35	0,35	0,41
0,4	0,39	0,46
0,45	0,42	0,56
0,5	0,47	0,62
0,55	0,50	0,65

4.3.3 Cuidados Laboratoriais

Para além do problema da montagem do provete, os bons resultados poderão depender do equipamento e procedimentos cumpridos, pelo que, além dos cuidados explicados no acerto do índice de vazios, se apresentam também alguns cuidados efetuados, referidos por vários autores e combinados com o verificado com o decorrer da execução de vários ensaio. Apresenta-se também na Figura 4.8, o ensaio montado, para uma melhor perceção de onde poderão ocorrer problemas.

- 1º Foi usada uma amostra remexida, esta deve ser compactada com o pilão, de modo a encostar as partículas da melhor forma às paredes do permeâmetro, já que este não tem membranas laterais para interromper a percolação, pela parede. Esta percolação deve-se sobretudo, à presença de partículas mais grossas que encostam à parede rígida



Figura 4.8: Permeâmetro de parede rígida, tubos piezométricos e reservatórios de carga

que não simulam corretamente a proximidade com mais material do mesmo tipo. Este problema, foi solucionado com recurso a vaselina nas paredes do permeâmetro;

- 2º É importante garantir a saturação do material, pelo que é imprescindível a realização de uma saturação do provete de baixo para cima a baixa velocidade, permitindo-se assim, a saída da grande maioria do volume de ar que é gradualmente substituído por água. Para a obtenção de melhores resultados, é também importante, antes que se inicie a recolha de dados, se verifique visualmente com o sistema já em funcionamento, se ocorre a saída de ar do provete testado para algum dos reservatórios;
- 3º O uso de equipamento com piezómetros laterais permitiu verificar se há perda ou não de carga nos tubos, válvulas ou recipientes, que afetem a carga hidráulica. Apesar de ser um requisito na norma ASTM (2011a), é muitas vezes um erro cometido e que afeta seriamente os resultados finais;
- 4º A colocação do material em poucas camadas é propícia a níveis necessários de compactação diferentes ao longo da altura do provete. A melhor forma de evitar esta situação, é evitar a compactação em excesso ou aumento do número de camadas, que para além de poderem afetar os resultados, poderão provocar

4.4 Análise de Resultados

alterações na granulometria com a quebra ou desgaste das partículas;

- 5º A alteração de carga instalada no sistema, pode por vezes, necessitar de um ajuste no caudal de entrada para que não se chegue ao limite, em que entre ar novamente para o sistema, algo que obviamente não é desejado;
- 6º Após o ensaio, o procedimento para retirar o material testado e limpeza do mesmo, foi feito cuidadosamente, para que se mantenham dentro do possível, as condições ótimas e semelhantes com que foi efetuado cada ensaio anterior com diferente índice de vazios, sendo necessária a limpeza dos filtros de topo e fundo do permeâmetro e reaplicação da vaselina.

4.4 Análise de Resultados

4.4.1 Dados obtidos

Estão representados nas Tabelas 4.8 e 4.9, os valores obtidos para o coeficiente de permeabilidade e respetivo índice de vazios. No total são 10 resultados, 5 para cada filtro e todos eles, como já foi comprovado, com diferente valor de índice de vazios do desejado inicialmente.

Nos ensaios de permeabilidade do filtro nº1 e nº2, onde a alteração do índice de vazios é apenas entre de 0,15 ou 0,25 respetivamente, limitada pela maneabilidade do material, foram atingidos valores de k , a variar 2,5 e 1,5 vezes o valor mínimo obtido para cada filtro.

Tabela 4.8: Coeficientes de permeabilidade obtidos para os índices de vazios atingidos no filtro nº1

e	Coeficiente de Permeabilidade (m/s)
0,35	6,30E-03
0,39	8,70E-03
0,42	1,03E-02
0,47	1,30E-02
0,50	1,43E-02

Tabela 4.9: Coeficientes de permeabilidade obtidos para os índices de vazios atingidos no filtro n^o2

e	Coeficiente de Permeabilidade (m/s)
0,41	3,00E-03
0,46	3,10E-03
0,56	3,20E-03
0,62	3,40E-03
0,65	3,50E-03

4.4.2 Comparação com os resultados empíricos

De igual modo ao apresentado no capítulo 3, obtiveram-se gráficos, com os coeficientes de permeabilidade dos dois filtros construídos obtidos a partir das equações empíricas, mas também são introduzidas novas curvas, compostas pelos valores do coeficiente de permeabilidade recolhidos laboratorialmente. Para demonstrar, a variação do valor do coeficiente de permeabilidade, com a alteração do índice de vazios, é necessário também, verificar de que modo os resultados experimentais aproximam as equações, e qual a sua aplicabilidade, para os intervalos granulométricos escolhidos.

Com base nas Figuras 4.9 e 4.10, onde estão os resultados e intervalos obtidos para k , para o filtro n^o1, através das equações empíricas, e a curva obtida laboratorialmente, pode constatar-se que têm em tudo um comportamento, semelhante ao das equações de Terzaghi, Navfac DM7, Hazen-Taylor e Mbonimpa et al., e que os resultados obtidos pelo ensaio laboratorial, são bastante bons e coerentes, tendo uma tendência para a obtenção de coeficientes de permeabilidade ligeiramente superiores à maioria, na ordem das 3 vezes o valor mínimo obtido das equações, o que não se considera portanto significativo.

Também no filtro n^o1, dada a sua curva de distribuição granulométrica, entre os limites de dimensões mínimas e máximas, como esperado o comportamento das curvas é bastante semelhante.

4.4 Análise de Resultados

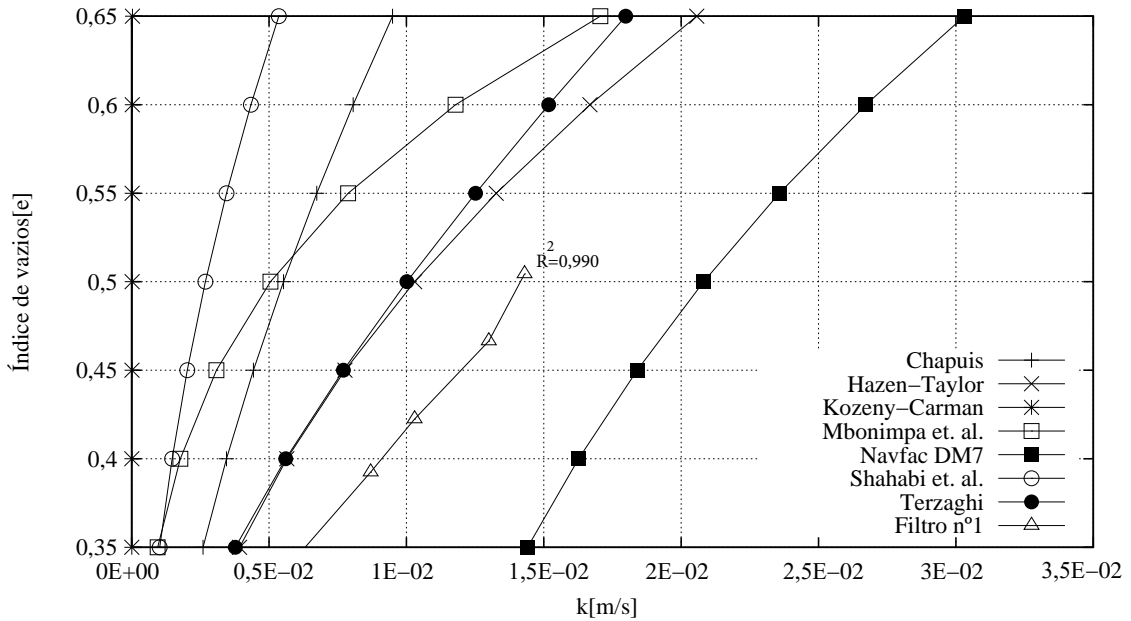


Figura 4.9: Coeficientes de permeabilidade obtidos para a granulometria do filtro nº1 com base nas equações empíricas e resultado experimental

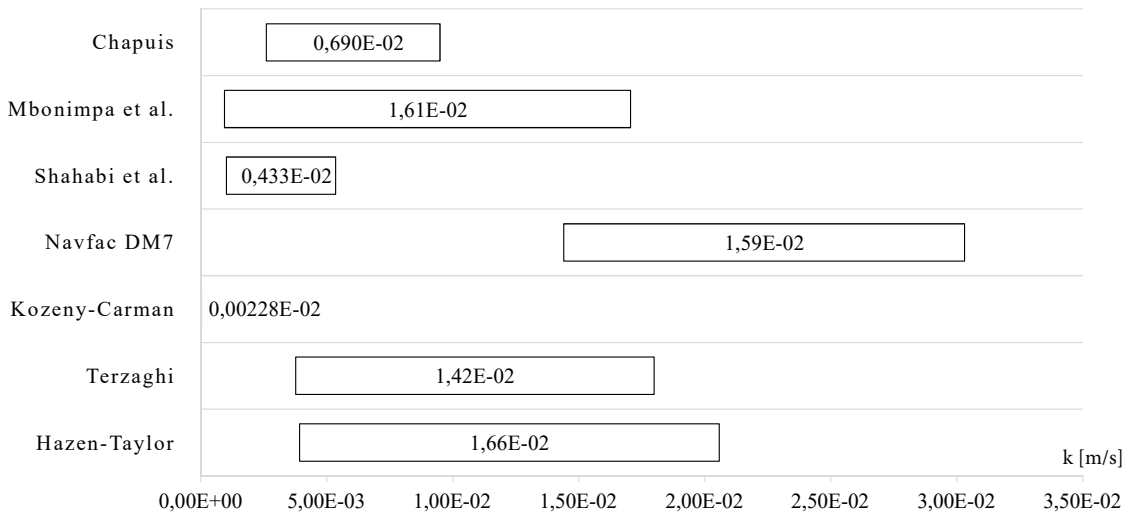


Figura 4.10: Intervalos de permeabilidade obtidos para o filtro nº1

Para o filtro nº2, como se pode ver nas Figuras 4.11 e 4.12, onde estão novamente apresentados os resultados e intervalos obtidos para k , através das equações empíricas, assim como a nova curva obtida laboratorialmente, cujo coeficiente de aproximação tem neste caso o valor de 0,982, ou seja, ligeiramente inferior ao obtido no filtro nº1. Verifica-se também, que seguindo a tendência verificada no filtro nº1, da obtenção de

coeficientes de permeabilidade mais elevados que a maioria, no ensaio com o permeâmetro de parede rígida. Neste ensaio, os resultados obtidos, encontram-se todos eles bastante longe das linhas das equações empíricas, algo que ao nível do procedimento laboratorial apenas será explicável pelo considerável aumento de caudal de entrada, que foi necessário para um funcionamento contínuo do circuito.

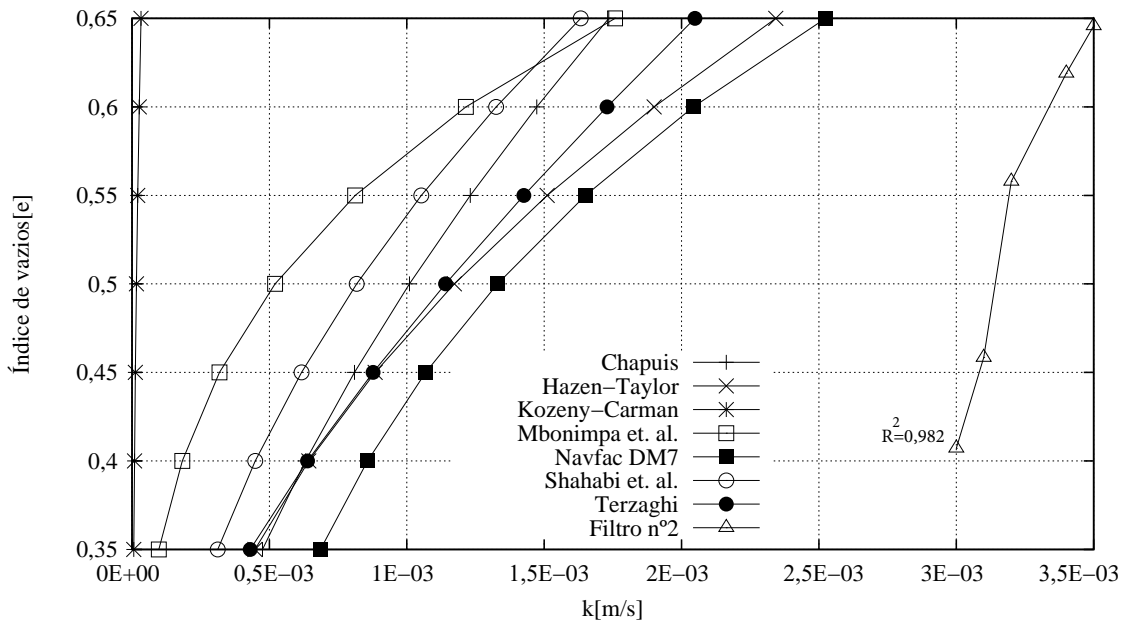


Figura 4.11: Coeficientes de permeabilidade obtidos para a granulometria do filtro n°2 e resultado experimental com valor de R

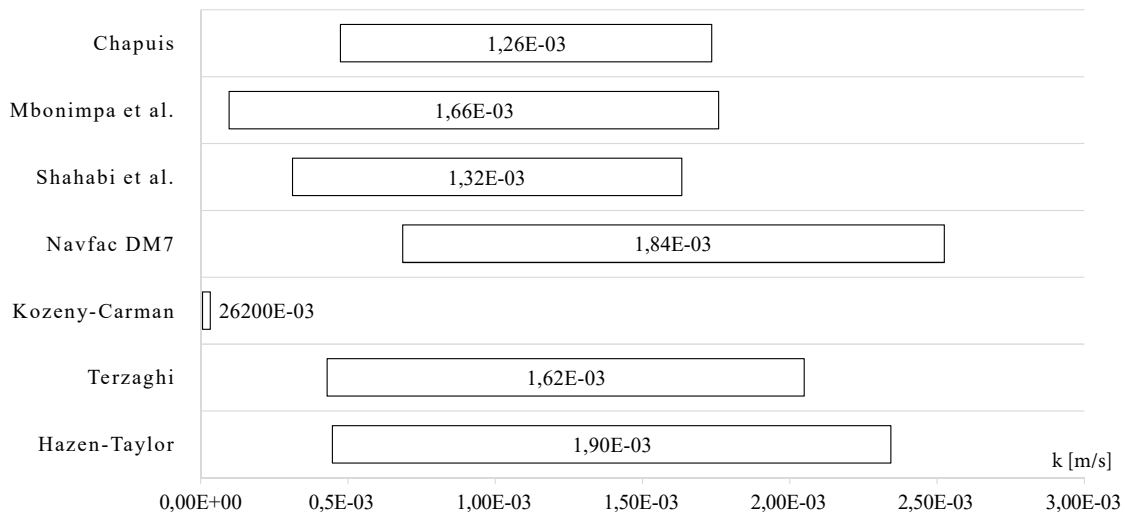


Figura 4.12: Intervalos de permeabilidade para o filtro n°2

4.4 Análise de Resultados

Convém ainda referir, que para o ensaio em questão existe uma grande vantagem, a possibilidade de replicação constante do gradiente hidráulico, que poderá ocorrer no filtro em barragens de aterro, a variar entre 0,1 a 0,4 aproximadamente.

Apresentadas as curvas obtidas teoricament,e em paralelo com a curva obtida laboratorialmente nas Figuras 4.9 e 4.11, confirma-se deste modo, o bom funcionamento, geral de todas as equações em ambos os filtros, existindo no entanto mais alguns aspetos a destacar:

Por fim, na Figura 4.13, estão também representados através de um gráfico de barras, os intervalos de k em que se enquadram todos os filtros estudados até ao momento, permitindo também a verificação dos intervalos de permeabilidade que cada equação apresenta à medida que se vai andando na curva granulométrica para dimensões cada vez mais grosseiras, e sobre o qual, se podem retirar as seguintes conclusões:

- Ambos os filtros n^o1 e n^o2, têm uma granulometria muito próxima da que compõe o filtro com distribuição granulométrica de dimensões máximas, e onde foram obtidos obviamente os valores mais elevados de k , verificando-se valores de permeabilidade apenas 10 vezes mais reduzidos;
- Com o avançar da curva granulométrica, para materiais de maiores dimensões, verifica-se, que em todas as equações, existe uma redução no intervalo de k , exceto para o filtro n^o1, onde a curva granulométrica já entra numa zona, descrita por (Santos, 2014), que propicia à ocorrência de alguma erosão interna, além de que a percentagem de finos é nula e por isso, influencia bastante as equações empíricas utilizadas.

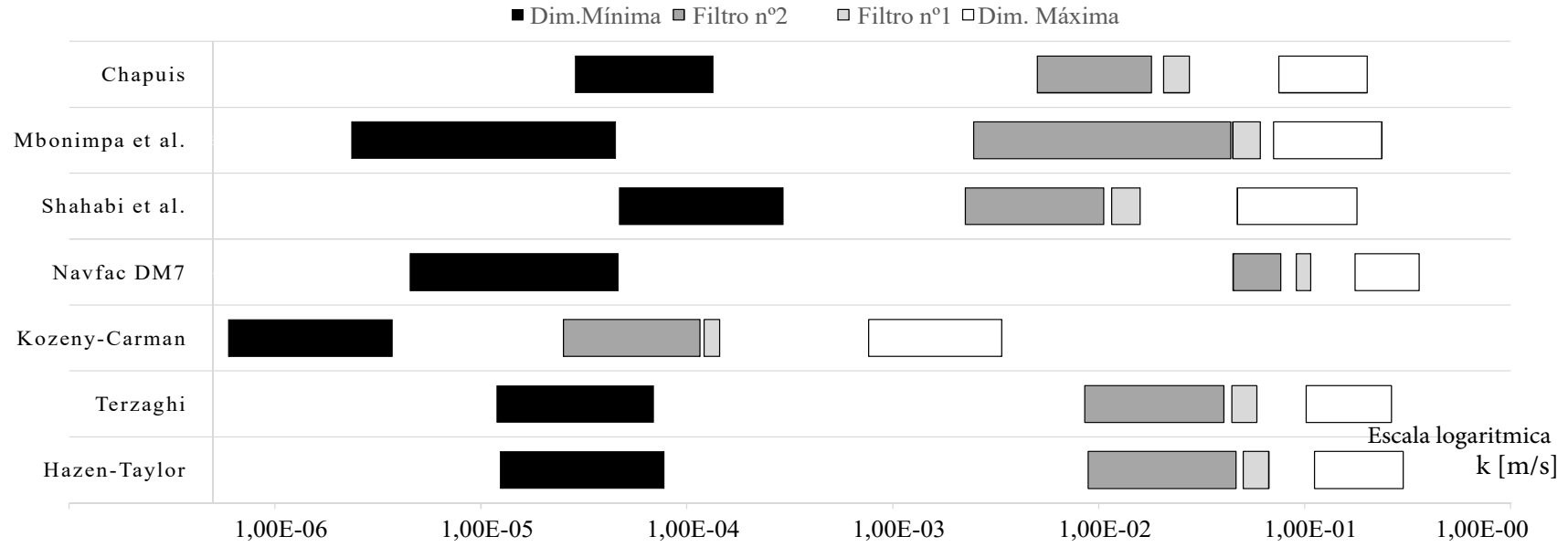


Figura 4.13: Intervalos de permeabilidade para todas as granulometrias

Capítulo 5

Modelação de uma barragem de aterro como caso prático

5.1 Considerações gerais

O coeficiente de permeabilidade dos materiais de filtro, com granulometrias já estudadas nos capítulos anteriores abrange um grande intervalo de valores como foi representado na Figura 4.13, a variar entre $5E-1$ a $1E-6$ m/s aproximadamente. Com o objetivo de se modelar o que representará esta variabilidade do coeficiente de permeabilidade numa barragem de aterro real, é feito um estudo da percolação numa barragem zonada, em que se mantém k para o núcleo e para o corpo, variando-se os valores de k para o filtro chaminé e para o filtro horizontal. Para o efeito, fez-se uma nova análise aos valores seleccionados para o estudo, sendo escolhidos aqueles que se julgam os mais indicados para materiais de filtro, ou seja, com valores de k superiores ao do núcleo em até $5E + 08$ vezes.

O uso da modelação com elementos finitos, onde o programa é sujeito a uma análise com o uso dos coeficientes de permeabilidade definidos, permitiu uma análise do modelo de uma barragem zonada permitindo o estudo da mesma ao nível hidráulico e, do estudo de parâmetros como os gradientes hidráulicos, as pressões intersticiais e os valores de caudal. Para o estudo consideram-se relevantes a capacidade de vazão e coeficiente de segurança dos filtros para uma clara definição do bom ou mau comportamento dos filtros com diferentes permeabilidades na barragem de aterro específica.

5.2 Modelação em elementos finitos

5.2.1 SEEP e o modelo usado

O SEEP/W é um software de elementos finitos pertencente à GEO-SLOPE International Ltd., para a análise da percolação em meios porosos. O programa permite o estudo dos valores de pressões intersticiais instaladas, gradientes hidráulicos e caudais em todos os pontos na estrutura de uma barragem de aterro,

O modelo estudado neste capítulo, assume os materiais de filtro totalmente saturados, exigindo apenas o valor do coeficiente de permeabilidade como dado de entrada para os materiais a definir.

Na Figura 5.1, apresenta-se o modelo da barragem de aterro analisada, com as dimensões e identificação dos vários elementos mais relevantes. Foi aplicado sobre a barragem o nível de pleno armazenamento (NPA), impondo a montante, a carga hidráulica máxima e a jusante foi apenas colocada a fronteira de pressão nula no pé do aterro. Por fim, foi também aplicada uma fronteira impermeável, com um valor reduzido de coeficiente de permeabilidade, mas não nulo, em redor da fundação do modelo, para permitir que se desenvolvam também correntes de percolação através da mesma.

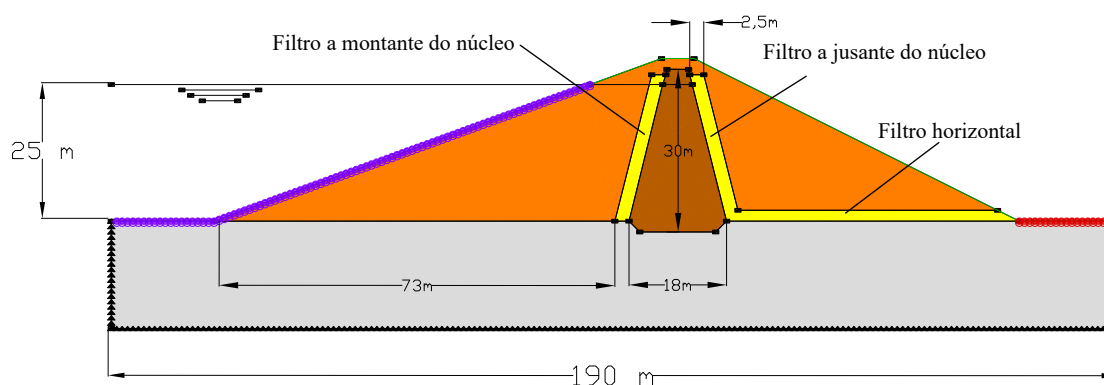


Figura 5.1: Geometria e fronteiras do modelo usado

Na Figura 5.2, está a malha do mesmo modelo usado, em que dimensão aproximada de cada elemento, composto por 4 lados, é de 1m, dando um total de 6282 nós e 6144 elementos.

5.2 Modelação em elementos finitos

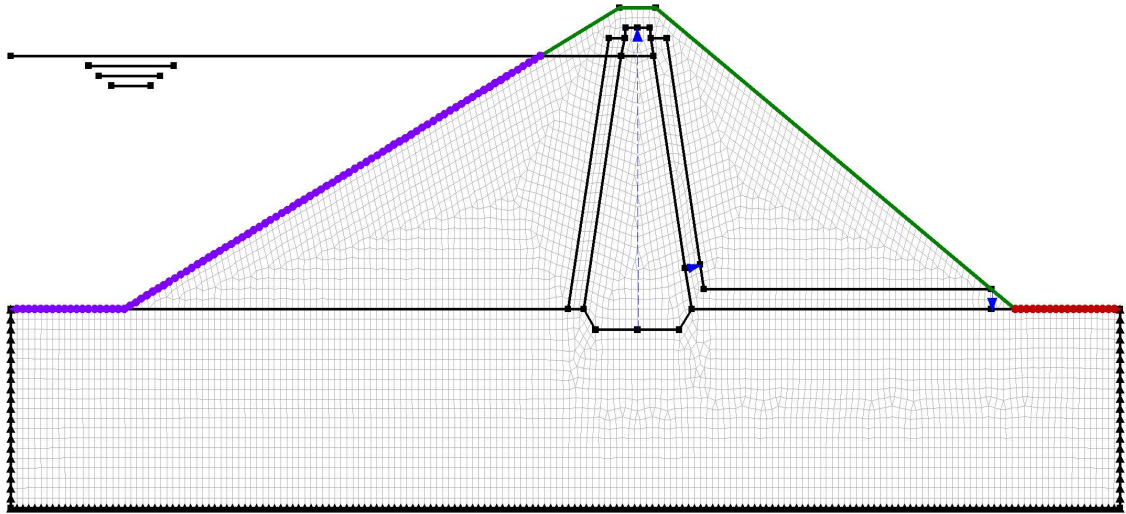


Figura 5.2: Malha definida para o modelo

5.2.2 Compatibilidade do programa

Foi realizado um primeiro teste com o programa para a análise da possibilidade de variação em grande escala, do valor do coeficiente de permeabilidade entre as várias zonas da barragem. Para o efeito, comparou-se o valor do caudal obtido para o caso de um coeficiente de permeabilidade do corpo 10 vezes superior ao do núcleo, e valores de k no filtro, 1000 vezes a $1E + 08$ o do núcleo, de que modo o programa conseguia comportar alterações ao nível dos caudais, sendo verificadas as discrepâncias obtidas na Figura 5.3.

Ao contrário do primeiro programa testado, PLAXIS, onde se verificou que apenas consegue modelar corretamente alterações de k , até 100 vezes o do núcleo, o SEEP, mostrou resultados bastante coerentes, e onde é possível verificar, que para valores de $K_{\text{filtro}} / K_{\text{núcleo}}$ desde 1000 a $1,0E + 05$, ocorrem realmente alterações no caudal percolado através do núcleo, algo que não foi possível no outro programa.

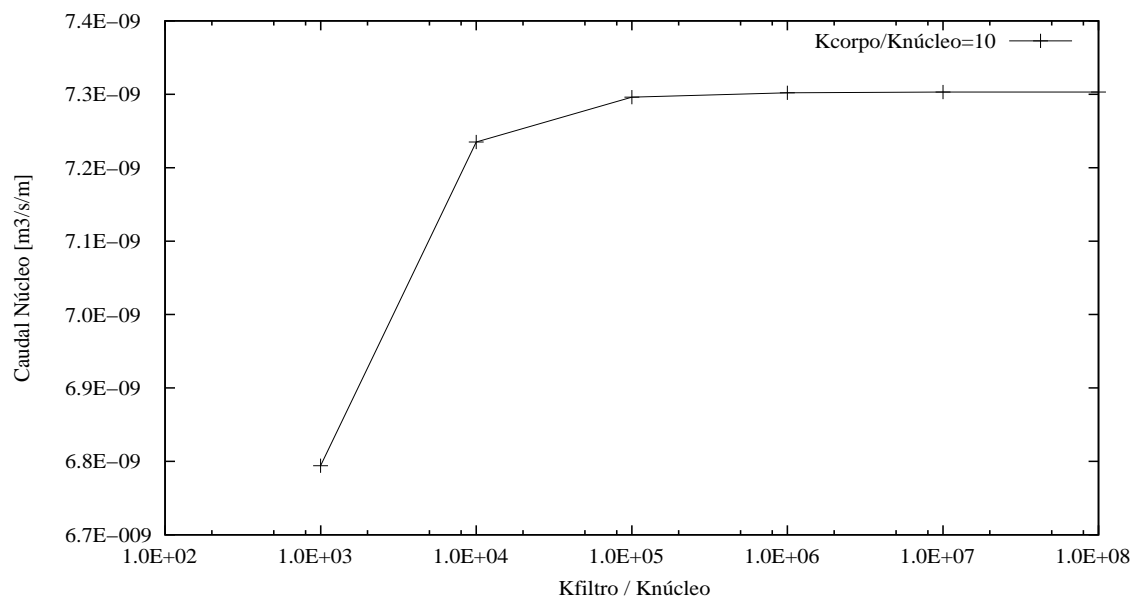


Figura 5.3: Comportamento do SEEP perante alterações significativas no valor de k do filtro, quando comparado com k do núcleo

5.2.3 Coeficientes de permeabilidade a testar

Na Tabela 5.1, representam-se os valores do coeficiente de permeabilidade, utilizados para o núcleo e para o corpo da barragem, coeficientes 10 e 100 vezes superiores respetivamente ao da fundação; já o filtro será abordado inicialmente, com uma gama de intervalos de permeabilidade de $5E + 03$ a $5E + 08$ vezes a permeabilidade do núcleo.

Tabela 5.1: Coeficientes de permeabilidade do modelo usado

	Corpo	1E-08
	Núcleo	1E-09
Coeficientes de permeabilidades em m/s	Fundação	1E-10
	Filtro	Variável

A definição dos intervalos de k a usar foi feita com base nos valores obtidos e representados na Figura 4.13, onde estão todos os 4 filtros estudados no fim do capítulo 4. Foram utilizados todos os intervalos de permeabilidade associados aos 4 filtros testados, retirado-se apenas os valores do coeficiente de permeabilidade da equação de Kozeny-Carman, devido ao desfasamento que apresentavam em todos os filtros estabelecidos, dado que foram obtidos valores de coeficiente de permeabilidade, até 100 vezes mais reduzidos que a globalidade dos restantes valores. O desfasamento desta equação deve-se à elevada amplitude de valores para o qual foi dimensionada, no entanto,

5.2 Modelação em elementos finitos

é usualmente conservativa. Do exposto, resultam os limites de k apresentados na Figura 5.4, sendo estes intervalos relativos aos filtros nº1, nº2 e de curva granulométrica limite de dimensões máximas e dimensões mínimas.

Os intervalos de permeabilidade usados na modelação, são descritos resumidamente na Tabela 5.2, relativos aos filtros nº1, nº2 e de curva granulométrica de dimensões máximas e mínimas. Também através da Figura 5.4, é possível ver que há filtros com valores de k em comum, pelo que, para uma melhor compreensão estão representados todos os intervalos que contêm os valores de k abrangidos pelo 4 filtros.

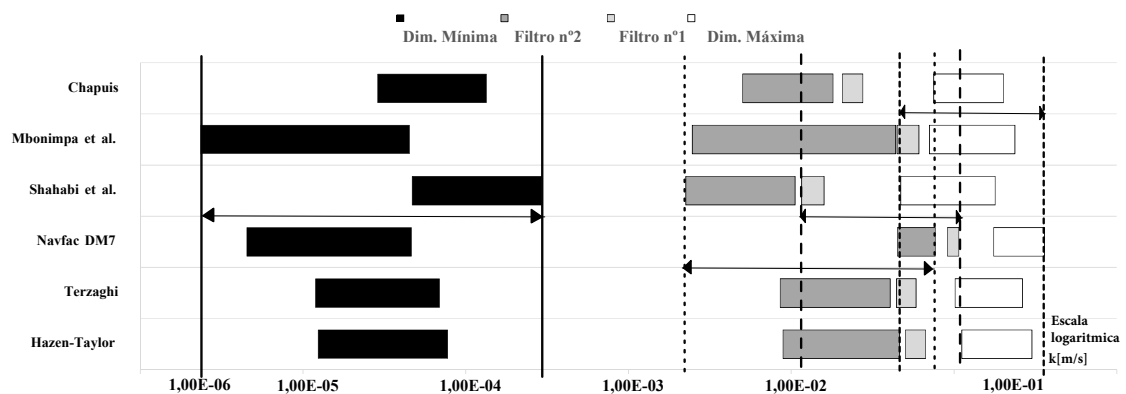


Figura 5.4: Coeficientes de permeabilidades para os 3 filtros levados a teste

Tabela 5.2: Intervalos de permeabilidade para cada fuso

		Intervalo permeabilidade (m/s)	
		Mínima	Máxima
Granulometria	Dim. Mín	5,00E-06	5,00E-04
	Filtro nº1	1,00E-02	1,00E-01
	Filtro nº2	1,00E-03	1,00E-01
	Dim. Máx.	5,00E-02	5,00E-01

5.2.4 Escolha das secções a estudar

Para que seja possível uma completa análise de resultados, foram efetuadas 3 secções de observação representadas na Figura 5.5: a secção número 1, onde se verifica o caudal a montante da barragem, a secção número 2 onde se verifica o caudal a jusante, que irá necessariamente ser igual ao verificado a montante devido à fronteira impermeável aplicada na fundação e a secção horizontal número 3 que atravessa o aterro de montante, o filtro de montante, o núcleo, o filtro chaminé e o filtro horizontal, servirá para uma

análise pormenorizada da percolação. A disposição das secções vai permitir a análise do gradiente hidráulico e pressões intersticiais. No caso da secção 3 vai também coincidir com os caminhos de percolação obtidos na análise de resultados, pelo que, do SEEP é também importante retirar os valores de gradiente hidráulico, reduzidos para os filtros e elevados para o núcleo. A secção 3, nos seus pontos de cota mais baixa, permite retirar os valores de pressão intersticial principalmente a montante e jusante do núcleo, fator considerado crucial, pois é desejável que se verifiquem valores reduzidos a jusante. A escolha deste local para o estudo aborda os mecanismos descritos na Figura 2.6, onde se verifica que nestas áreas, os valores são reduzidos para o gradiente hidráulico em filtros e elevados para o núcleo.

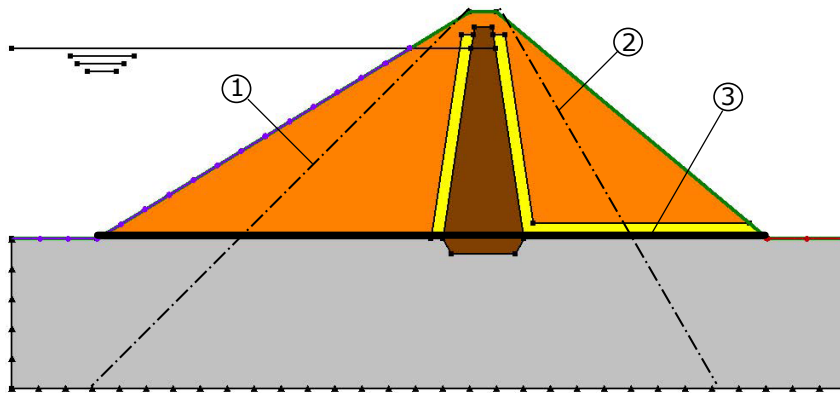


Figura 5.5: Cortes efetuados

Para que seja possível verificar de que modo o caudal percolado no filtro, satisfaz a capacidade de vazão para que foi dimensionado, foram realizados mais 3 cortes transversais indicados na Figura 5.6, sendo eles: um sobre o núcleo, que irá fornecer o caudal que consegue atravessar o mesmo, outro no fim do filtro chaminé, a jusante paralelo ao núcleo, e por fim, um corte transversal no filtro horizontal, sendo estes dois últimos, os que irão fornecer valores que possibilitam o cálculo da capacidade de vazão dos filtros em barragens de aterro, explicada de seguida na análise de resultados.

5.3 Análise de resultados

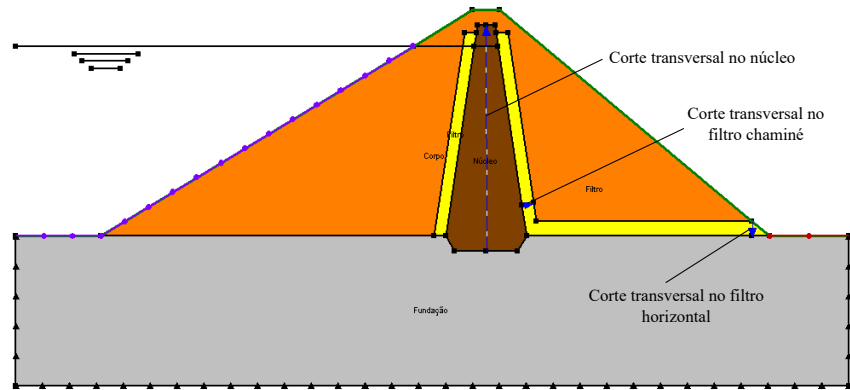


Figura 5.6: Cortes transversais efetuadas para recolha dos caudais percolados

5.3 Análise de resultados

5.3.1 Modelo

Para a análise dos efeitos dos diferentes coeficientes de permeabilidade, foi utilizado o mesmo modelo da Figura 5.1, na situação de pleno armazenamento já referida.

Os valores de k , atribuídos ao corpo, núcleo e fundação estão indicados na Tabela 5.1. Para os materiais de filtro foram adotados valores entre $5E - 6$ e $5E - 1$ m/s com base nos intervalos definidos na Tabela 5.2.

Como a análise efetuada incide sobre a percolação, os resultados a obter vão ser independentes das curva granulométrica adotadas neste estudo, sendo portanto o dependente dos valores de k que, podem estar associados a várias curvas granulométricas.

5.3.2 Capacidade de vazão

A capacidade de vazão determina a capacidade do filtro em escoar o caudal a que é sujeito, sendo que, segundo o RSB referido no capítulo 2, a capacidade de vazão do filtro mais condicionante terá de ser 100 vezes superior ao caudal percolado verificado no núcleo, como se indica na equação (5.1) e (5.2).

$$Q_{filtro} > 100Q_{nucleo} \quad (5.1)$$

Q_{filtro} caudal percolado no filtro - (m^3/s)

Q_{nucleo} caudal percolado no núcleo - (m^3/s)

E o coeficiente de segurança é dado por:

$$FS = \frac{Q_{filtro}}{Q_{nucleo}} \quad (5.2)$$

Os cortes transversais, representados na Figura 5.6, permitiram obter para os coeficientes de permeabilidade definidos, o caudal percolado através das várias secções. Após determinação teórica do valor da capacidade de vazão teórica dos dois filtros, chaminé e horizontal, é possível proceder à verificação da segurança.

Nas Tabelas 5.3 e 5.4, são apresentados os resultados obtidos no SEEP do caudal percolado no núcleo, só depois com o cálculo da capacidade de vazão teórica calculada dos materiais de filtro com as permeabilidades definidas é que se avançou para a verificação dos valores de k para que o fator de segurança é igual ou superior a 100. Concluiu-se que, para o caso específico da barragem modelada, o filtro condicionante será o filtro horizontal da Tabela 5.4, que entre $5E-06$ e $5E-05$ m/s não consegue atingir o coeficiente de segurança desejado, algo que pode ser resolvido com uma alteração da geometria deste filtro horizontal através do aumento da sua altura, ou criação de um novo filtro horizontal, sendo ambos separados por um dreno.

Tabela 5.3: Verificação do coeficiente de segurança do filtro chaminé

Permeabilidade (m/s)	Caudal Núcleo (m ³ /s)	Capacidade vazão (m ³ /s)	Coeficiente segurança	Verifica
5,00E-06	5,5178E-08	9,00E-06	163	Sim
5,00E-05	5,5857E-08	9,00E-05	1611	Sim
5,00E-04	5,5944E-08	9,00E-04	16088	Sim
5,00E-03	5,6013E-08	9,00E-03	160677	Sim
5,00E-02	5,6022E-08	9,00E-02	1606512	Sim
5,00E-01	5,6029E-08	9,00E-01	16063110	Sim

5.3 Análise de resultados

Tabela 5.4: Verificação do coeficiente de segurança do filtro horizontal

Permeabilidade (m/s)	Caudal Núcleo (m ³ /s)	Capacidade vazão (m ³ /s)	Coeficiente segurança	Verifica
5,00E-06	5,5178E-08	2,00E-07	4	Não
5,00E-05	5,5857E-08	2,00E-06	36	Não
5,00E-04	5,5944E-08	2,00E-05	358	Sim
5,00E-03	5,6013E-08	2,00E-04	3571	Sim
5,00E-02	5,6022E-08	2,00E-03	35700	Sim
5,00E-01	5,6029E-08	2,00E-02	356958	Sim

Nas Figuras 5.7 e 5.8 estão representados; os caudais percolados no núcleo, a capacidade de vazão teórica do filtro horizontal ou chaminé, a capacidade de vazão dos dois filtros necessária para que se garanta o coeficiente de segurança de 100, e o caudal percolado no filtro.

Em ambas as figuras estão representados os valores recolhidos no SEEP do caudal percolado no núcleo (linha azul), assim como os valores de caudal calculados que garantem o coeficiente de segurança de 100 definido pelo RSB (linha rosa).

Na Figura 5.7, relativa ao filtro horizontal, é possível verificar que a capacidade de vazão do filtro, ou seja, o caudal máximo que consegue percolar pelo mesmo (linha a preto) para algumas permeabilidades, se encontra abaixo do coeficiente de segurança de 100 (linha rosa), pelo que, apenas após o cruzamento destas duas linhas é que o coeficiente de permeabilidade do filtro garante a capacidade de vazão e segurança.

Na Figura 5.8, relativa ao filtro vertical, é possível verificar que a capacidade de vazão do filtro (linha a preto) consegue para qualquer intervalo de coeficiente de permeabilidade abordado encontrar-se acima da linha a rosa, pelo que, qualquer coeficiente de permeabilidade do filtro utilizado garante sempre a capacidade de vazão e segurança relativa ao caudal percolado no núcleo.

Modelação de uma barragem de aterro como caso prático

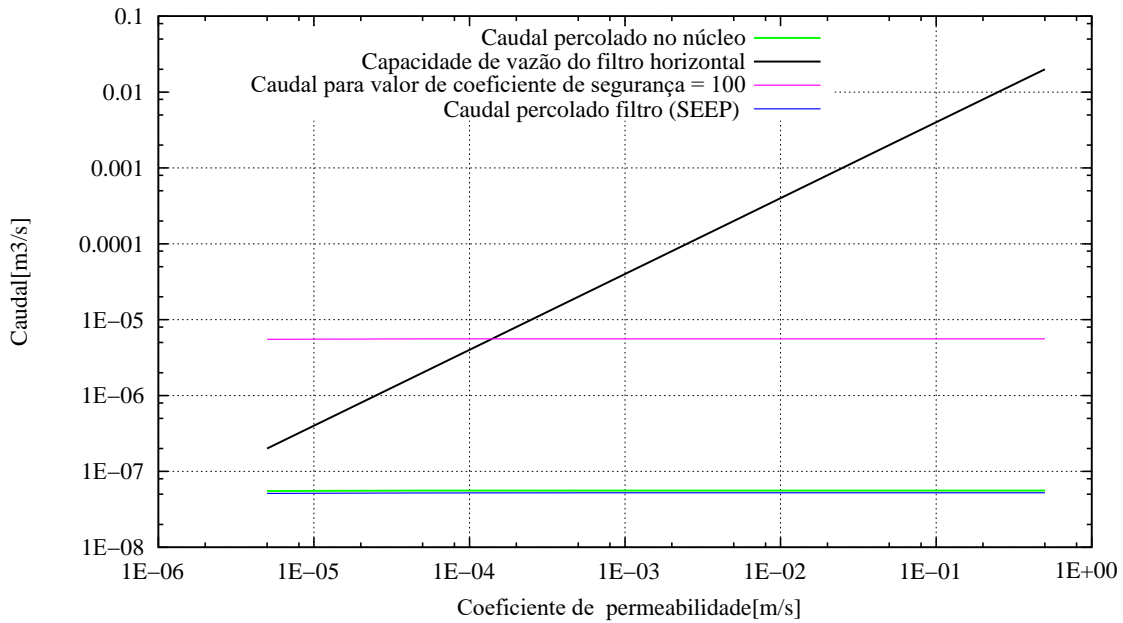


Figura 5.7: Representação dos caudais percolados no núcleo, no filtro horizontal e necessário para cumprir o coeficiente de segurança de 100

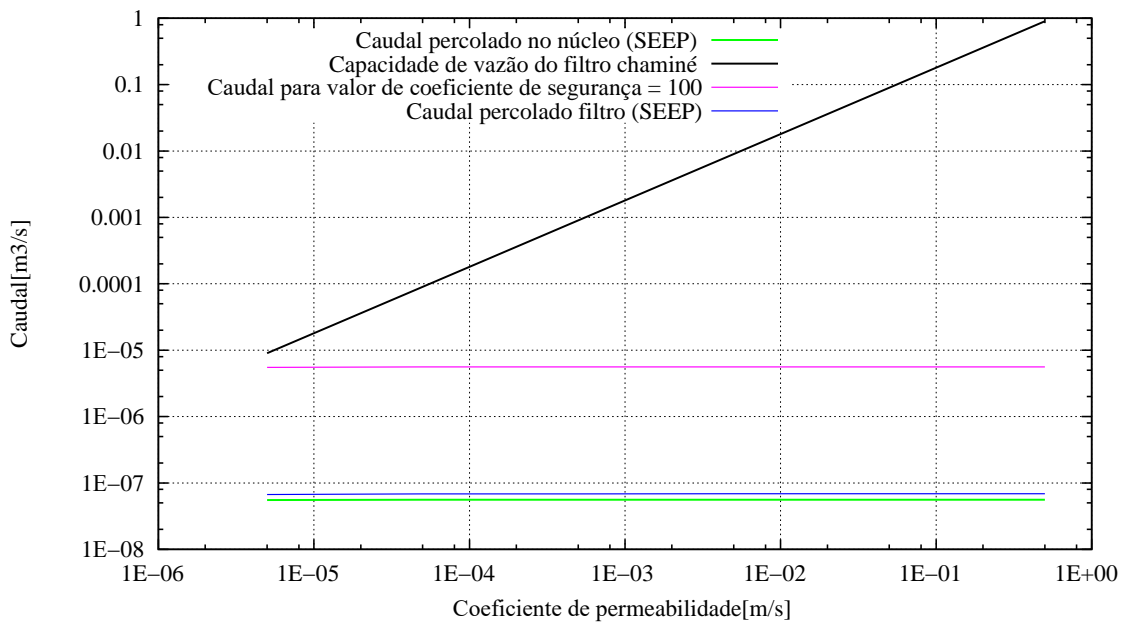


Figura 5.8: Representação dos caudais percolados no núcleo, no filtro chaminé e necessário para cumprir o coeficiente de segurança de 100

5.3 Análise de resultados

5.3.3 Caminhos de percolação

Na Figura 5.9, apresentam-se os diferentes caminhos de percolação para os valores de k definidos na Tabela 5.2. No programa, os caminhos de percolação aqui referidos não são uma representação gráfica das linhas de percolação que fazem parte da tradicional rede de percolação, mas sim o caminho que uma partícula de água existente nesse ponto teria de percorrer até à zona de saída (Salmasi e Mansuri, 2015).

Foi possível constatar que a alteração do coeficiente de permeabilidade em apenas 1000 vezes pode levar a alterações bastante significativas, tornando-se os caminhos de percolação mais longos e propícios a instabilidades hidráulicas. É também possível concluir que, para o modelo da barragem estudada, apenas estão garantidos bons resultados do ponto de vista da percolação a partir de coeficientes de permeabilidade onde $k_{filtro}/k_{nucleo} > 1E + 5$.

Modelação de uma barragem de aterro como caso prático

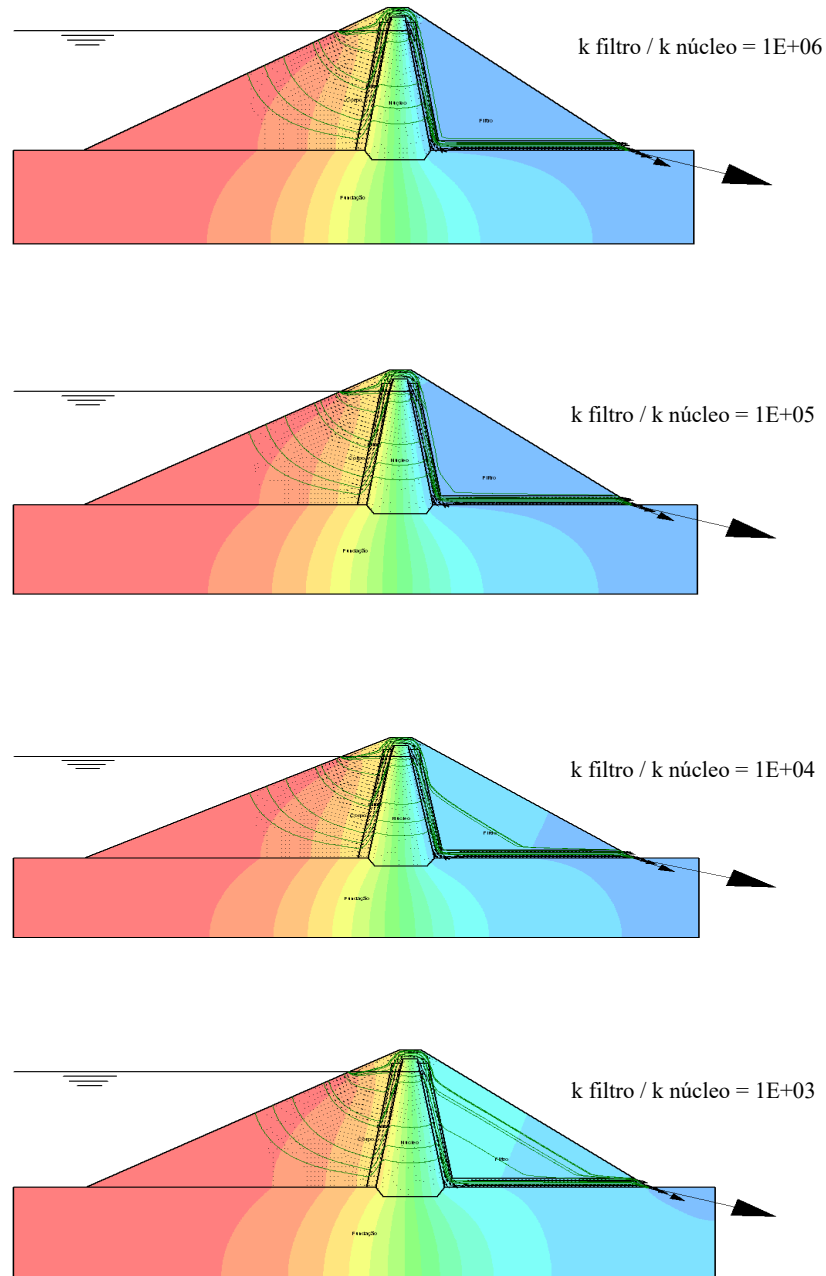


Figura 5.9: Alteração dos caminhos de percolação com a alteração do coeficiente de permeabilidade

5.3 Análise de resultados

5.3.4 Alterações no gradiente hidráulico

São esperados valores elevados de gradiente hidráulico para solos argilosos quando comparados com os dos filtros. Estes, são conhecidos por promoverem uma redução da carga hidráulica mais acentuada, assegurada pela sua elevada permeabilidade e apresentando consequentemente valores mais reduzidos do gradiente.

De seguida, apresentam-se os resultados conseguidos através do SEEP ao longo de toda a extensão do corte número 3, representados com uma linha contínua composta pelos valores obtidos em cada ponto do corte. Na Figura 5.10, estão os pontos em destaque relativamente aos gradientes hidráulicos na barragem, ou seja, para o núcleo e para os filtros intercetados. Na Figura 5.10 estão também representadas 5 curvas, uma para cada valor de coeficiente de permeabilidade modelado, podendo constatar-se que todas as curvas se encontram sobrepostas para os diferentes valores de k .

Conclui-se que, relativamente ao gradiente hidráulico, a escolha de qualquer uma das 6 equações empíricas consideradas adequadas a materiais de filtro, para determinação do coeficiente de permeabilidade é válida, não provocando alterações fora do expectável e que provoquem alterações no valor do gradiente nas zonas críticas.

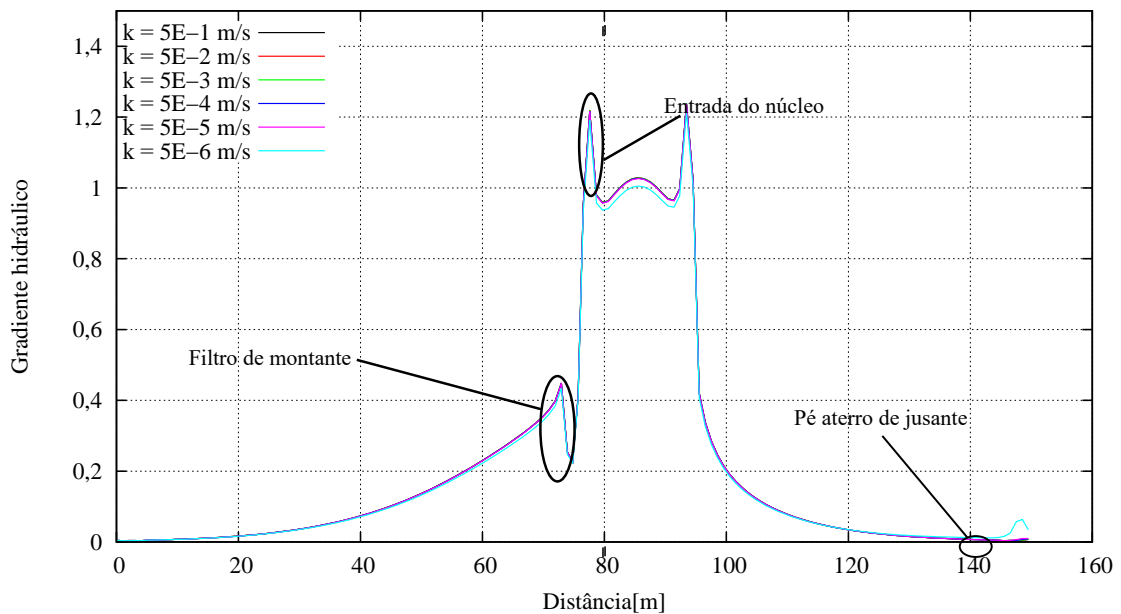


Figura 5.10: Gradientes hidráulicos verificados ao longo do fundo da barragem para os coeficientes de permeabilidade dos 3 filtros modelados

5.3.5 Alterações nas pressões intersticiais

Ao nível das pressões intersticiais, consideraram-se relevantes para o estudo as zonas junto ao pé do núcleo, ou seja, o filtro de montante e o filtro de jusante, sendo que é dada mais atenção ao valor verificado no filtro de jusante, pois é no filtro onde são esperados os níveis de permeabilidade inferiores, e onde caso fossem verificadas pressões intersticiais significativas, estas representam o mau funcionamento do filtro já que uma das principais funções do mesmo é o alívio das pressões intersticiais.

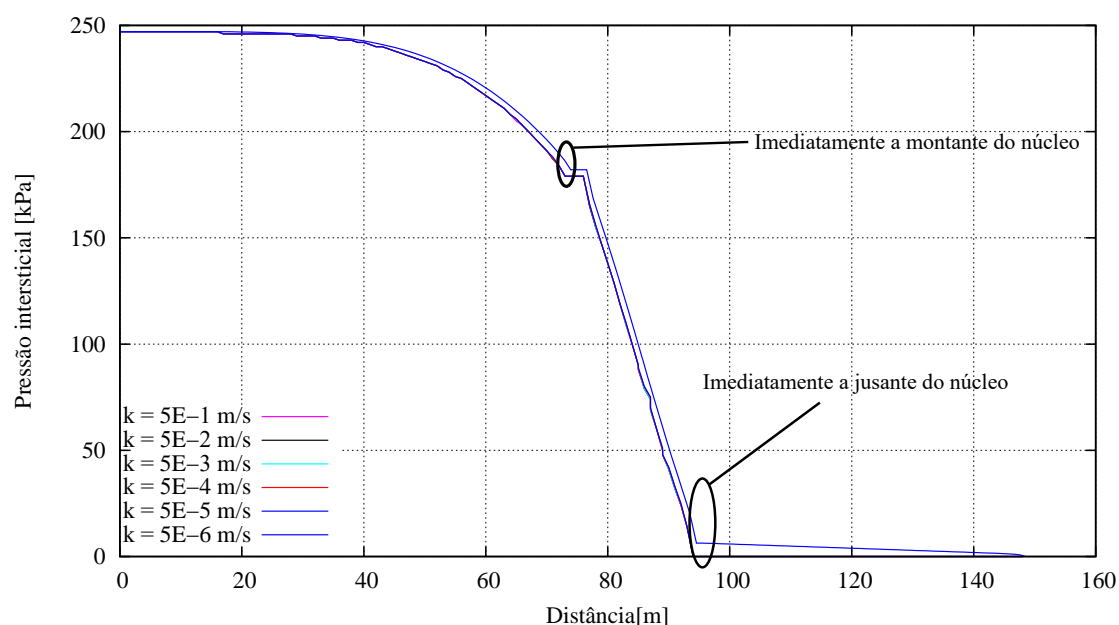


Figura 5.11: Valores de pressão intersticial verificados ao longo do fundo da barragem para os 3 filtros modelados

Na Figura 5.12, apresentam-se os valores de pressão intersticial obtidos na base da barragem, com destaque para as zonas imediatamente a montante e a jusante do núcleo, onde se comprova novamente que numa barragem com um filtro e coeficiente de permeabilidade devidamente dimensionados, está sempre garantida a segurança, ou seja, as pressões intersticiais verificadas no filtro de jusante são bastante reduzidas, tendo o filtro um bom funcionamento que será determinante para a segurança ao nível hidráulico da barragem de aterro ocorrendo um alívio das pressões intersticiais prejudiciais que assim não se instalam.

5.4 Conclusões

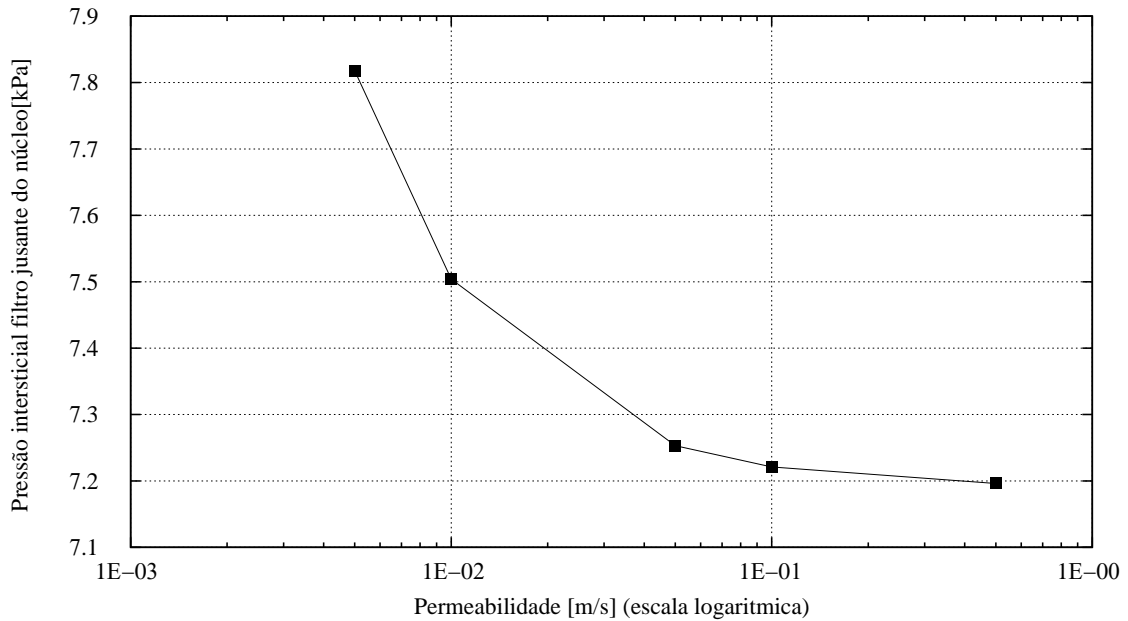


Figura 5.12: Valores de pressão intersticial verificados no filtro de jusante afetados pela alteração da permeabilidade do filtro

5.4 Conclusões

Com a barragem zonada modelada neste capítulo, cujos valores de k do núcleo ($1E-9$ m/s), corpo ($1E-8$ m/s) e fundação ($1E-10$ m/s) são inalterados ao contrário do que acontece nos filtros que têm grandes variações entre $5E-6$ e $5E-1$ m/s, consideraram-se estes modelos testados representativos de uma possível barragem de aterro, pelo que, a partir da análise dos resultados obtidos nos vários cortes, é possível concluir qual o nível de impacto que a alteração do coeficiente de permeabilidade pode ter na estabilidade hidráulica.

Foi inicialmente testada a compatibilidade do SEEP, concluindo-se que consegue simular de melhor forma que o PLAXIS as alterações que realmente ocorrem no caudal percolado entre duas superfícies com valores de k bastante distintos (>100 vezes o mínimo), com especial ênfase para o que ocorre na transição núcleo / filtro, onde k_{filtro}/k_{nucleo} modelados foram sempre superiores ou iguais a 100.

Após aplicação de 6 das 7 equações empíricas estudadas durante o desenvolvimento deste trabalho a curvas granulométricas de filtros, os intervalos de coeficiente de permeabilidade para os filtros a utilizar na modelação resultaram num intervalo entre $5E-6$ e $5E-1$ m/s, ou seja, em valores de coeficiente de permeabilidade que podem variar até $1E+5$ vezes o valor mínimo.

Também foi estudada a capacidade de vazão com base nos dados retirados no SEEP, comparando-se os mesmos com cálculos teóricos baseados nos valores de k , verificando-se que para os filtros utilizados, no filtro horizontal o fator de segurança de 100 definido no RSB não foi atingido para permeabilidades inferiores a $5E - 5$ m/s, algo que para o filtro chaminé não ocorre, estando sempre garantida a segurança.

De acordo com os caminhos de percolação retirados do SEEP foi possível verificar para k inferiores a $5E - 5$ m/s que corresponde a $k_{filtro}/k_{nucleo}=1E + 4$ comportamentos fora do desejado, onde os caminhos se tornam mais longos e detetáveis com mais incidência no aterro de jusante, situação não desejável.

Por fim, ao nível dos gradientes hidráulicos e pressões intersticiais o problema da segurança já não existe, sendo que, para ambos os parâmetros qualquer valor de k utilizado que se encontre no intervalo de $5E - 6$ e $5E - 1$ m/s definido, não provoca alterações significativas nos valores, representando um adequado funcionamento dos filtros.

Capítulo 6

Considerações finais

6.1 Relativamente ao estudo realizado

Este trabalho permitiu desenvolver uma abordagem semelhante à realizada por vários autores, em que são utilizadas equações empíricas para determinar o coeficiente de permeabilidade, neste caso específico de materiais de filtro. A aplicação destas equações a curvas de distribuição granulométrica de filtros devidamente dimensionados, levou à obtenção de intervalos de k para filtros entre $5E - 06$ e $5E - 01$ m/s, valores portanto muito distantes. Para uma mesma curva granulométrica de filtro e para a mesma equação empírica, o coeficiente de permeabilidade obtido pode variar (verificando-se variações até cerca de 20 vezes para cada equação) devido apenas à alteração do índice de vazios. Já a adoção das diferentes equações empíricas, também sobre a mesma granulometria, provocam variações até 500 vezes.

O ensaio experimental realizado sobre os dois filtros, cujas curvas granulométricas se situam dentro de um fuso granulométrico definido com base no material de núcleo da barragem de Odelouca, filtros estes que foram submetidos a diferentes valores de índice de vazios, levantaram problemas ao nível da montagem do provete, pelo que, o valor de e teve de ser retificado para os valores de coeficiente de permeabilidade retirados. O ensaio com o permeâmetro de parede rígida, além dos cuidados laboratoriais a que deve ser sujeito, mostra a grande vantagem de conseguir replicar os gradientes hidráulicos que ocorrem nos filtros em barragens de aterro.

Com os valores de k , obtidos laboratorialmente para os filtros n^o1 e n^o2, em paralelo com os das equações empíricas, é possível concluir que, o permeâmetro consegue valores de k sem grandes diferenças dos obtidos teoricamente.

Através de uma análise global das quatro curvas granulométricas distintas, estudadas ao nível de k - curva de dimensão mínima, máxima, filtro n^o1 e n^o2 - foi possível verificar que, a generalidade das equações, com o avanço para distribuições granulométricas mais grosseiras, continuam a mostrar-se com boas aproximações.

Uma vez que se pretendia um estudo sobre um material de filtro que se espera permeável e com uma curva devidamente graduada, para a modelação de um caso real em elementos finitos, foram retirados os resultados de Kozeny-Carman. Ao nível da modelação realizada, após a definição do modelo e dos valores de k de todos os elementos que constituem uma barragem zonada, foi possível, através da medição dos caudais percolados no núcleo, a determinação do coeficiente de segurança dos filtros chaminé e horizontal. O estudo realizado sobre a estabilidade hidráulica da barragem, permitiu a determinação dos gradientes hidráulicos instalados na base da mesma, e das pressões intersticiais a jusante do núcleo, concluindo-se que, para os intervalos de k finais entre $5E - 06$ e $5E - 01$ m/s não ocorrem problemas hidráulicos independentemente da escolha de qualquer valor de k .

6.2 Desenvolvimentos futuros

Associado ao estudo efetuado, e tendo em conta algumas das conclusões retiradas, onde se destaca a não verificação de qualquer alteração na estabilidade da barragem para elevadas permeabilidades, seria interessante aprofundar e verificar qual o efeito, caso se alterassem ainda mais estes limites de k ao nível do dimensionamento, seja a nível de alterações físicas dos materiais, seja a nível geométrico dos órgãos que compõem a barragem. Consoante o ensaio de mais filtros, seria possível o desenvolvimento de uma equação empírica que se adapte o mais possível a materiais de filtro, evitando-se o uso de equações aplicáveis a materiais semelhantes e tendo como dados de entrada os diferentes D_{10} e D_{15} , e que tenha como variáveis o índice de vazios e uma ou mais dimensões granulométricas do material.

Propõe-se portanto, um estudo pormenorizado do trabalho realizado, mas tendo em consideração o efeito da compactação, bem como a existência de material não homogéneo e com coeficientes de permeabilidade inferiores, eventualmente a replicar se possível também laboratorialmente.

Por fim, a recriação de diferentes granulometrias que respeitem as regras de filtro complementarizariam o estudo, aplicando-se sobre os materiais assim criados as equações empíricas aqui apresentadas, e analisando-se a variabilidade dos valores dos coeficiente de permeabilidade obtidos.

Bibliografia

- Carrier, W. David (2003). «Goodbye, Hazen; Hello, Kozeny-Carman». Em: *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, pp. 1054–1056.
- Chapuis, Robert P (2004). «Predicting the saturated hydraulic conductivity of sand and gravel using effective diameter and void ratio». Em: *Canadian Geotechnical Journal*, pp. 787–795.
- Chapuis, Robert P. (2012). «Predicting the saturated hydraulic conductivity of soils: A review». Em: *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, pp. 401–434.
- Chapuis, Robert P. e Michel Aubertin (2003). «Predicting the coefficient of permeability of soils using the Kozeny-Carman equation Robert P . Chapuis and Michel Aubertin». Em: *EPM-RT-2003-03*.
- Dolzyk, K. e I. Chmielewska (2014). «Predicting the Coefficient of Permeability of Non-Plastic Soils». Em: *Soil Mechanics and Foundation Engineering*, pp. 213–218.
- Fell, Robin et al. (2005). *Geotechnical Engineering of Dams*. Taylor & Francis Group.
- FEMA (2011). *Filters for Embankment Dams*. October.
- Guide, Product Selection (1996). «UNICIV Report - Assessing Embankment Dam Filters Which do not Satisfy Design Criteria». Em: *IV Repor - Assessing Embankment Dam Filters which do not Satisfy Design Criteria*.
- ICOLD (1994). «Embankment dams - Granular filters and drains». Em: *ICOLD. International Commission on Large Dams*.
- Indraratna, Buddhima, Vo Trong Nguyen e Cholachat Rujikiatkamjorn (2012). «Hydraulic conductivity of saturated granular soils determined using a constriction-based technique». Em: *Canadian Geotechnical Journal* 49.10, pp. 607–613.
- Indraratna, Buddhima e Ashok K. Raut (2006). «Enhanced Criterion for Base Soil Retention in Embankment Dam Filters». Em: *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, pp. 1621–1627.
- Indraratna, Buddhima, Laricar Dominic O. Trani e Hadi Khabbaz (2008). «A critical review on granular dam filter behaviour – from particle sizes to constriction-based design criteria». Em: *Geomechanics and Geoengineering*, pp. 279–290.

- Ltd., GEO-SLOPE International (2007). *Seepage modeling with SEEP/W*.
- Messerklinger, S (2013). «The Design of Filter Materials and their Importance in Geotechnical Engineering». Em: *La conception de matériaux filtrants et leur importance en géotechnique*, pp. 3313–3316.
- Neves, Emanuel Maranha das (1991). «Comportamento de Barragens de Terra Enrocamento». Tese de doutoramento. FCT/UNL.
- Odong, Justine (2008). «Evaluation of Empirical Formulae for Determination of Hydraulic Conductivity based on Grain-Size Analysis». Em: *The Journal of American Science*, pp. 1–6.
- Quintas, Fernando Eduardo Geraldês (2002). *FEUP, 2002, Quintas, Planeamento da construção de barragens de terra*. Porto: FEUP.
- Salmasi, Farzin e Behnam Mansuri (2015). «Comparision of hydraulic gradient and uplift pressure in three types of dams: homogeneous, heterogeneous, eathfill». Em: 1.October, pp. 91–103.
- Santana, Teresa (2014). «Percolação». Em: *Cadeira de Obras de Terra*. FCT/UNL.
- Santos, Ricardo Neves Correia (2014). «Experimental Investigation on Limitation of the Progression of Internal Erosion in Zoned Dams». Tese de doutoramento. IST.
- Schleiss, Anton J e Robert M Boes (2011). *Dams and Reservoirs under Changing Challenges*.
- Vaughan, P R e R C Bridle (2004). «An update on perfect filters». Em: *British Dam Society 13th Biennial Conference*.