

4

MATERIAIS E MÉTODOS

4.1.Introdução

A pesquisa foi realizada em duas etapas distintas. Na primeira foram realizados ensaios de laboratório em que se investigou a eficiência do material. Para tanto foram preparados corpos de prova avaliando-se o comportamento a fluência do geocomposto drenante em relação à sua capacidade de vazão, foram realizados ensaios de permeabilidade planar e transmissividade onde à medida que o geossintético era comprimido, sua vazão planar decrescia, obtendo-se assim a variação da capacidade de vazão. Com esses dados obtidos no laboratório se procedeu a calcular o valor das deformações $\epsilon(\%)$, e se obter o gráfico da Fluência do geocomposto.

Como extensão do programa de ensaios experimentais e buscando uma análise prática do sistema proposto, usando-se o Método dos Elementos Finitos, se fez a verificação de um estudo de caso com os parâmetros obtidos no laboratório.

Neste capítulo é feita também a descrição dos equipamentos e materiais utilizados para a elaboração da pesquisa.

4.2.

Geocomposto

O geocomposto MacDrain 2L TD, foi o geossintético utilizado no laboratório. Este material possui filtros geotêxteis nos dois lados, sendo que estes sobressaem 10 cm do núcleo nas laterais dos rolos, para que durante a instalação seja garantida a continuidade do filtro e proteção do núcleo drenante, formado por uma geomanta tridimensional com mais de 90% de vazios, de elevada capacidade drenante.

Na figura 4.1 e na tabela 4.1 se apresenta a forma e características do material para o estudo.

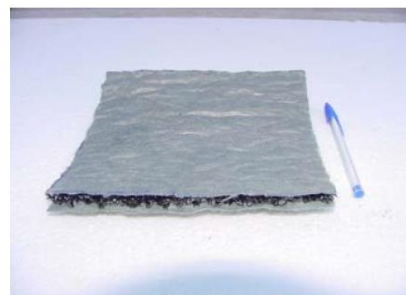
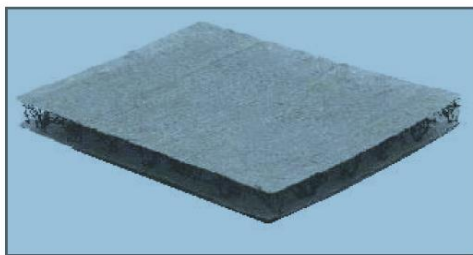


Figura 4.1 Vista geral do geocomposto utilizado nos ensaios

Tabela 4.1 Características gerais do geocomposto

Característica	Norma	Valor médio	Coeficiente de variação
Gramatura	NBR12568	848 (g/m ²)	2,72
Espessura	NBR12569	15,62 mm	2,74

4.3.

ETAPA EXPERIMENTAL

4.3.1.Descrição do ensaio de permeabilidade planar e transmisividade

4.3.1.1.

Normas

O ensaio está baseado nas seguintes normas:

- ISO 12958 -Geotêxteis e produtos relacionados com geotêxteis - Determinação da capacidade de vazão de água no plano.

- ASTM D 4716 - Método de ensaio para determinação da taxa de fluxo (no-plano) por unidade de comprimento e transmisividade hidráulica de um geossintético usando um carregamento constante.

4.3.1.2.

Método

O ensaio consiste na passagem de água ao longo de um corpo de prova geossintético, e a medição desta vazão em função de uma força normal aplicada a este elemento, pois à medida que o geossintético é comprimido, sua vazão planar decresce, na figura 4.3 é apresentado o procedimento do ensaio.

A transmissividade é expressa como o produto da permeabilidade no plano do geossintético pela sua espessura (t), sob determinada tensão normal de confinamento; na figura 4.2 se apresenta o esquema do ensaio de permeabilidade planar.

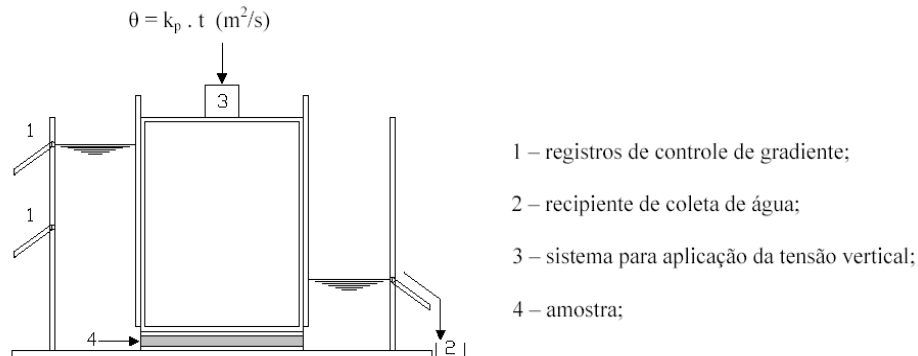


Figura 4.2 Ensaio de permeabilidade planar e transmissividade



Figura 4.3 Esquema do ensaio de permeabilidade planar e transmissividade

O corpo de prova é colocado em uma calha que liga o reservatório de água ao local de saída da água (figura 4.4). O material ensaiado deve adentrar cerca de 5 cm no reservatório, e ocupar toda a seção da calha. O reservatório tem a função de controlar o gradiente hidráulico a que o corpo de prova estará submetido (figura 4.5).

O ensaio é executado aplicando-se tensões normais entre 10 e 500 kPa ao corpo de prova, e gradientes hidráulicos de 0,1 a 1. Porém, essas grandezas podem ser ajustadas de acordo com necessidades específicas de projeto.



Figura 4.4 Equipamento para ensaio de transmissividade - detalhe da calha

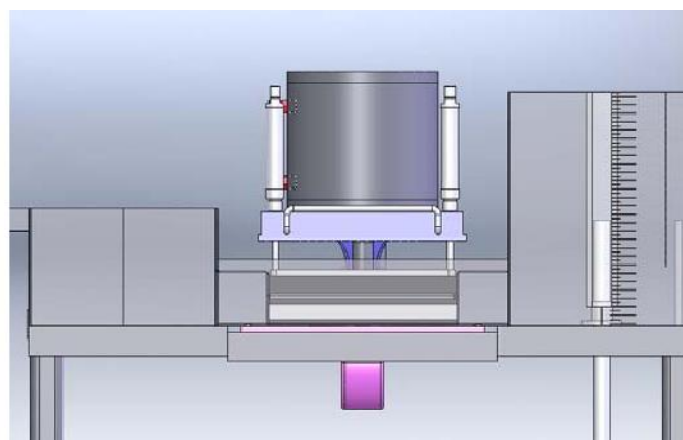


Figura 4.5 Equipamento para ensaio de transmissividade - detalhe do reservatório

4.3.1.3. Especificações

O ensaio de permeabilidade planar e transmissividade é principalmente aplicados a geotêxteis não tecidos, geomantas, georredes e geocompostos drenantes.

4.3.1.4. Equipamento

O equipamento deve ser capaz de manter diferentes níveis d'água, e respectivamente diferentes gradientes hidráulicos, variando de 0,1 a 1.

Deve ter a capacidade de chegar à tensão normal de compressão proposta, sobre o corpo de prova, sem deformações que possam influenciar o resultado do teste.

O mecanismo de carregamento tem que estar construído para manter uma tensão normal de compressão de 10 kPa, 100 kPa e 200 kPa, e de acordo com os padrões europeus, 500 kPa, sobre a amostra, com uma precisão de + 5 % .

As superfícies em contato com a amostra devem ser seladas por uma borracha-esponja as quais as propriedades satisfazem a envoltória de compressão deformação ilustradas na figura 4.7, quando testada em acordo com a EM 964-1.

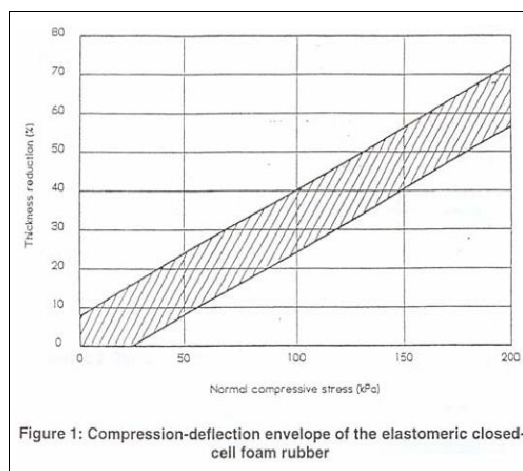


Figura 4.6 Gráfico de compressão-deflexão do geotêxtil

Para amostras com uma espessura menor que 10 mm, uma borracha-esponja com espessura nominal de 10 mm deve ser utilizada em cada face.

Para amostras de espessura entre 10 mm e 25 mm, uma borracha-esponja de espessura nominal de 1 a 1,25 vezes a espessura da amostra deverá ser utilizada em cada face.

Para amostras com espessura superior a 25 mm, a borracha-esponja em cada face deve ter uma espessura nominal de 25 mm.

Duas camadas de borracha-esponja podem ser combinadas para se alcançar a espessura desejada.

A largura da borracha-esponja deve ser igual a da plataforma de carga e o comprimento da borracha-esponja deveria ser o mesmo da plataforma de carga, todavia, para evitar obstruções na entrada e na saída, devido à compressão da esponja, é recomendado, quando necessário, reduzir o comprimento para 0,4 vezes o comprimento nominal.

Quando o geocomposto a ser testado for projetado para exercer suas funções hidráulicas pressionado contra uma superfície rígida, a membrana de borracha-esponja não deve ser utilizada, devendo ser substituída por uma superfície adequada, como uma geomembrana ou um panel rígido.

Produtos para este tipo de aplicação podem ser facilmente identificados pelo fato de não haver uma camada de geotêxtil em um, ou em ambos de seus lados, para preveni-los da intrusão do solo.

Quando a borracha-esponja não for utilizada, a superfície então utilizada deverá ser descrita no relatório de resultados.

De acordo com a Norma ISO, o equipamento deve ter um comprimento mínimo de 0,2 m, mas com comprimento de rede hidráulica mínimo de 0,3 m. Também deve ser capaz de aceitar uma borracha esponja com um comprimento de 25 mm em contato com ambas as faces do material a ser testado.

Já a atual ASTM que descreve os procedimentos para este tipo de ensaio, pede que o comprimento mínimo do ensaio seja de 0,30 m.

O equipamento deve ser essencialmente estanque, ou seja, não apresentar vazamentos.

4.3.1.4.1. Água

Para fluxos de água de até 0,3 l/m.s, a água utilizada deve ser “desaerada” (ter seu ar retirado) ou alimentada de um tanque de água destilada. A água deve estar a uma temperatura entre 18° C e 22° C, e deve ser igual ou aproximadamente a temperatura ambiente do laboratório de teste. A água não deve ser constantemente reciclada. A quantidade de oxigênio não deve ultrapassar 10 mg/kg, quando medida no ponto onde a água entre no aparelho.

Para fluxo de água maior que 300 mls/s , água da rede de abastecimento deve ser utilizada (água da torneira, água da rua).

A temperatura deve ser anotada e todas as medidas necessárias devem ser tomadas a fim de evitar inclusão de ar na água de torneira.

Como as correções de temperatura são relacionadas apenas para fluxo laminar, é aconselhável se trabalhar a temperaturas mais próximas possíveis de 20° C, para minimizar inexatidões associadas a fatores de correção inapropriados, quando o fluxo não for laminar.

A água deve ser filtrada se partículas sólidas suspensas forem visíveis a olho nu, ou se sólidos acumulados sobre ou na amostra estiverem inibindo o fluxo.

4.3.1.4.2.

Recipiente de medida

Para determinação do volume de água com acurácia de 10 ml.

Alternativamente, quando medidas de fluxo baixo são tomadas, a massa da água pode ser determinada com uma balança para uma precisão de 1 %.

Onde é realizada diretamente a medida da descarga, a medida do fluxo deve ser calibrada para uma acurácia de 5 % da leitura.

4.3.1.5.

Amostra

A amostra deve ser manuseada o mínimo possível e não ser dobrada, a fim de se prevenir distúrbios em sua estrutura. Anteriormente ao ensaio, a amostra deve ser mantida em um plano, isenta de carregamentos.

Devem ser cortados 3 corpos de prova da amostra com comprimento paralelo a direção da máquina, e 3 corpos de prova com comprimento transversal ao sentido da máquina.

De acordo com a Norma ISO, os corpos de prova devem medir 0,3 m no sentido do comprimento, ou direção do fluxo, e 0,2 m no sentido transversal.

Já para a Norma ASTM, os corpos de prova devem medir 0,35 m no sentido longitudinal e 0,30m na transversal.

Quando a largura do produto for menor que 0,2 m, então o produto deverá ser testado em toda a sua largura, modificando o equipamento.

É importante que a largura do corpo de prova não seja menor que o esperado, ou seja, que preencha sem folgas a plataforma de ensaio.

4.3.1.5.1.

Condição dos corpos de prova

Os corpos de prova devem estar limpos, livres de sedimentos superficiais e danos visíveis, ou marcas de dobra.

4.3.1.6.

Procedimento do ensaio

Inicialmente mede-se a espessura nominal do corpo de prova sobre uma pressão de 2 kPa de acordo com a EN 964-1.

Insere-se o corpo de prova em água contendo um agente umectante à temperatura ambiente do laboratório, suavemente movimenta-se a amostra para a retirada de bolhas e em seguida deixa-se a amostra saturando por ao menos 12 horas.

Define-se a espessura da esponja de contato da superfície em relação à espessura nominal do corpo de prova.

Coloca-se a esponja de contato na superfície inferior da base do equipamento então se coloca o corpo de prova sobre ela. Coloca-se a esponja de contato superficial sobre o corpo de prova da mesma maneira. Abaixa-se a plataforma de carregamento ou pressiona-se a membrana sobre o corpo de prova.

Aplica-se uma pré-tensão de 2 kPa (incluindo a plataforma de carregamento) sobre a amostra, se abastece o reservatório de entrada de água do equipamento para permitir que a água flua através do corpo de prova e removendo o ar contido na amostra. Tomam-se todas as precauções necessárias a fim de se evitar fluxos preferenciais sobre os limites do corpo de prova. Caso um fluxo desta natureza seja observado, o corpo de prova deve ser recolocado ou descartado.

Ajusta-se a tensão normal para 10 kPa e mantém-se esta pressão por 360 s.

Enche-se o reservatório de entrada de água a um nível correspondente ao gradiente hidráulico 0,1. Como já mencionado, usa-se água “desareada” ou de um tanque de água destilada, para valores de fluxo de até 0,3 l/m.s e para fluxos maiores que 0,3 (l/m.s), utiliza-se água da rede de abastecimento pública.

Não é necessário correções na temperatura, porém a temperatura deverá ser anotada e registrada.

Permite-se que a água flua através do corpo de prova sob estas condições por 120 s.

Para alguns materiais, especialmente aqueles que exibem deformação lenta sob compressão, a tensão pode tender a decair durante o ensaio, neste caso, será necessário o ajuste contínuo da tensão, para se manter um valor constante durante o ensaio.

A medição é realizada posicionando-se o recipiente de medida sobre o sistema por um período fixo de tempo. O volume de água coletado deve ser no mínimo de 0,5 l, e para materiais que apresentem vazões muito altas, o tempo de coleta deve ser de no mínimo 5 s. Para produtos com capacidade de fluxo muito baixa, o tempo de coleta deve ser limitado em 600 s e a água coletada deve ser pesada com uma acurácia de 1 %.

Anota-se o volume de água coletado e a temperatura da água. Repete-se o procedimento mais 2 vezes, num total de 3 leituras, e retira-se uma média do volume de água coletado.

Caso um medidor de vazão seja utilizado, então a média de vazão deverá ser retirada de 3 leituras consecutivas com um intervalo mínimo de 15 s entre cada medida.

Aumenta-se o gradiente hidráulico para o próximo valor a ser verificado, enquanto se mantém o valor de tensão, e repete-se o procedimento de medição da vazão.

Reduz-se o gradiente hidráulico para 0,1 aumenta-se a tensão de compressão normal para o próximo valor e a mantém por 120 s até a estabilização do fluxo.

Repetem-se os procedimentos de leitura de vazão e mudança de gradiente.

Realizam-se estes procedimentos até que o corpo de prova tenha sido testado para cada gradiente hidráulico e para cada nível de tensão.

Todo o procedimento é repetido para o ensaio dos demais corpos de prova.

4.3.1.7. Cálculos

O relatório de resultados deve incluir as seguintes informações:

- O numero e o ano de publicação da norma seguida.
- O laboratório onde foi realizado o ensaio e o operador do ensaio.

- Descrição do geossintético de acordo com a EM 30320.
- Detalhes do equipamento utilizado, incluindo um diagrama.
- A largura do corpo de prova, caso seja diferente 0,2 m;
- Se requerido, os dados experimentais e cálculos para cada corpo de prova podem ser tabelados;
- Uma coletânea de resultados impressos em apenas um gráfico tensão x transmissividade, caso se tenha sido medida a transmissividade para vários gradientes hidráulicos.
- Os valores principais de transmissividade para gradientes hidráulicos definidos e tensões normais, e se requerido, os valores individuais.
- O raio de temperatura da água.
- O tipo de água (desaerada, destilada ou de rede de abastecimento).
- Algum desvio no procedimento descrito em Norma.
- Alguma anomalia no comportamento hidráulico do geossintético.

4.3.2.

Ensaio de determinação de espessura

4.3.2.1.

Normas

Está baseado nas seguintes normas:

- ASTM D 5199/01 – Método de Teste Padrão para medir a espessura nominal de Geossintéticos.
- ASTM D 6525/00 – Método de Teste Padrão para medir a espessura nominal de Laminados Permanente.

4.3.2.2.

Procedimento

A espessura nominal de um geossintético é determinada pela observação da distância perpendicular entre um plano móvel e uma superfície paralela, provocada pela ocupação desse espaço por um geossintético, sob uma pressão específica (2 kPa para geotêxteis e 20 kPa para geomembranas por 5 segundos).



Figura 4.7 Detalhe do ensaio de espessura com pressões de 20 kPa

4.3.2.3.

Aplicação

O ensaio é aplicável nos seguintes tipos de geossintéticos:

- Geomantas MacMat
- Georredes MacNet
- Geomembranas MacLine
- Geocompostos MacDrain
- Geotêxteis MacTex

4.4.

Verificação de caso

Neste item é feita a descrição dos procedimentos utilizados para a elaboração da verificação da pesquisa realizada, que corresponde a modelagem no programa plaxis de um estudo de caso citado no manual técnico da Maccaferri (2009), referente a rebaixamento do lençol freático numa estrutura de pavimento com aplicação do geocomposto no sistema de drenagem.

No plaxis foram feitos dois casos de modelagens onde se tomou como variável de cálculo a permeabilidade a primeira foi àquela usada no estudo de caso e a segunda foi calculada com os valores obtidos nos ensaios de laboratório obtendo o tempo total em dias do rebaixamento do lençol freático, a variação da vazão e da fluência ao longo do período de rebaixamento, adicionalmente também se adotou como segunda variável o número de drenos para atingir toda a região saturada.

Os resultados foram comparados com os valores obtidos no estudo de caso que foi calculado com as relações de McClelland o que será explicado no seguinte capítulo.

4.4.1. Introdução

O processo de modelação é uma parte importante no projeto. Onde com ajuda da modelação matemática ou física vai se considerar uma simplificação da realidade. Neste caso se pretende analisar a drenagem nos solos argilosos pelos modelos.

Para fazer esta análise foi considerado algumas hipóteses significativas enquanto à geometria, às condições de fronteira e as equações constitutivas, baseado num exemplo dado no Manual Técnico da Macafferri.

As equações constitutivas para definir o comportamento dos materiais representando o fenómeno real através de uma relação entre tensões e deformações, é representado na figura 4.9; onde a equação constitutiva vai ser modelado com o programa Plaxis 2D que recorre ao método de elementos finitos. E ao modelar o problema de valores na fronteira, a sua geometria é representada por um conjunto de pequenas regiões denominadas elementos finitos.

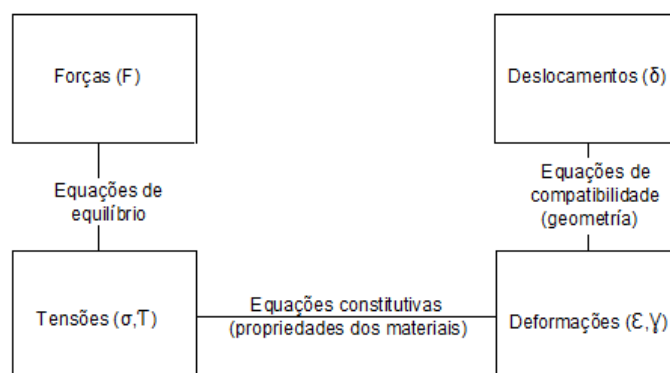


Figura 4.8 Ligação entre tensão e deformação: equação constitutiva

Para usar o método introduz-se uma variável, que nosso problema vai ser os deslocamentos nos nós, e estabelece-se o modo como estes variam de ponto para ponto no interior do elemento finito. As equações constitutivas permitem relacionar o campo de deslocamentos com o campo de tensões, onde a precisão de análise depende, assim, da capacidade das funções adotadas representarem com precisão o modo como o material se deforma nos problemas em questão. Pode-se

melhorar a precisão usando mais elementos menores, ou utilizando elementos com um maior número de nós, mas à custa de maior tempo e custo de cálculo.

Ao longo desta subseção descrevem-se as análises numéricas efetuadas, nomeadamente os modelos constitutivos, os parâmetros adoptados, geometria, condições de fronteira e sequência construtiva.

4.4.2. Software Plaxis2D

O software Plaxis2D é um programa de elementos finitos de análise bidimensional usado para calcular o campo de tensões e deformações e também analisar a estabilidade das obras geotécnicas. O programa permite fazer a análise axissimétrica ou em estado plano de deformações.

Segundo o tutorial do Plaxis 2D é importante conhecer os seguintes parâmetros para a realização de nosso exercício de modelação:

-Definição geométrica dos modelos, é importante definir as camadas de solo, estruturas fases de construção, carregamentos e condições de fronteira que está baseada no sistema de desenho CAD (Computer-Aided Design) permitindo a modelação detalhada das secções. Sendo fácil a geração da malha pelo programa.

-Advanced Soil Models, o programa tem um conjunto de modelos constitutivos avançados para solos. No estudo que aqui se apresenta recorreu-se ao modelo Soft Soil Creep que tem a variabilidade da rigidez do solo com o nível de tensão e considera o efeito da fluência.

-Staged Construction, esta opção do Plaxis permite uma simulação realista das fases de construção ou escavação bastando para isso ativar ou desativar parte ou partes do modelo, bem como carregamentos. Nos modelos desta dissertação esta ferramenta é utilizada para aplicar o carregamento e impor a ocorrência de determinados intervalos de tempo. Desta forma cada instante de tempo pode representar uma fase de carregamento.

- Consolidation Analysis, o decaimento do excesso de pressão intersticial ao longo do tempo pode ser simulado usando este tipo de simulação. Esta potencialidade do Plaxis2D permite simular de forma simples os modelos executados nesta dissertação. Para isto basta introduzir a permeabilidade do solo e o programa cria automaticamente passos que simulam a evolução do

comportamento do solo ao longo do tempo. Isto é feito através da realização de uma análise com consolidação acoplada, em que a magnitude dos excessos de pressão intersticial gerados e o seu decaimento no tempo são calculados. Neste tipo de análise, as incógnitas são os deslocamentos em cada nó e os excessos de pressão intersticial nos nós.

4.4.3. Modelos Constitutivos

No estudo que aqui se apresenta recorreu-se ao modelo Soft Soil Creep já que este modelo faz o análise acoplado da variação de fluxo e o efeito da fluência ao longo do tempo.

4.4.3.1. Modelo Soft Soil Creep

Este modelo constitutivo tem por base o modelo Cam Clay Modificado sendo preferencialmente aplicado a casos em que existe compressão de solos moles (argilas, siltes argilosos e turfas). As principais características do modelo são:

- A rigidez depende do nível de tensão (comportamento não linear).
- A resposta do solo em carregamento primário é diferente da resposta em descarga-recarga. Na primeira situação o comportamento é plástico e na segunda é elástico.
- A tensão de pré-consolidação é memorizada.
- O comportamento na rotura obedece ao critério de Mohr-Coulomb.

A relação entre a deformação volumétrica, ε_v , e tensão efetiva média, P' , obedece a uma lei logarítmica graficamente representada na Fig.4.10. Ao contrário do que acontece com o modelo Cam Clay Modificado o modelo Soft Soil Creep utiliza o índice de compressibilidade modificado λ^* e não o índice λ (Burland, 1965). Desta forma, no ramo de compressão virgem a variação de extensões rege-se pela equação (4.1) :

$$\varepsilon_v - \varepsilon_{vo} = \lambda^* \cdot \ln\left(\frac{p'}{p'_{o0}}\right) \quad (4.1)$$

A descarga-recarga rege-se pela equação que se apresenta na equação (4.2):

$$\varepsilon_v^e - \varepsilon_{vo}^e = k^* \cdot \ln\left(\frac{p'}{p'_{o0}}\right) \quad (4.2)$$

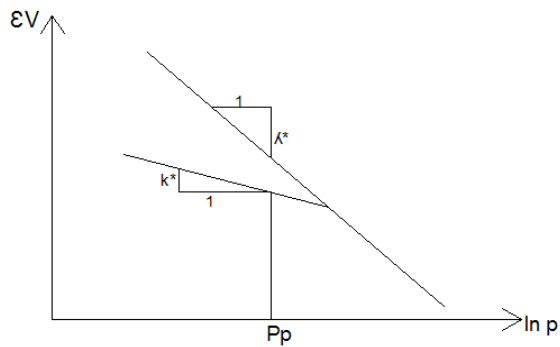


Figura 4.9 Relação logarítmica entre a deformação volumétrica e a tensão efetiva média (Brinkgreve, Broere, & Waterman, 2002)

O parâmetro k^* representa o índice de expansibilidade modificado, e caracteriza o solo durante a descarga e a recarga, em que o solo se comporta de forma elástica. A equação (4.3) implica a seguinte relação linear:

$$k_{dr} = \frac{E_{dr}}{3(1-2\nu_{dr})} = \frac{p'}{k'} \quad (4.3)$$

K_{dr} representa o módulo de rigidez volumétrica, E_{dr} o módulo de deformabilidade e ν_{dr} é o coeficiente de Poisson. O índice dr remete para o fato de estes parâmetros serem representativos do ramo carga-descarga. Para a análise computacional através do modelo Soft Soil Creep os parâmetros introduzidos são K^* e o ν_{dr} , e não K_{dr} e E_{dr} . De notar que a razão entre $\frac{\lambda^*}{k^*}$ no modelo Soft Soil Creep é igual à razão entre $\frac{\lambda}{k}$ no modelo Cam Clay modificado.

Para cada valor de tensão de pré-consolidação isotrópica, P_p , existe uma linha de descarga-recarga correspondente, pelo que o número destas linhas é infinito. Esta tensão representa o nível máximo de tensão já experimentado pelo solo. Num ciclo de descarga e/ou recarga, P_p é constante. No ramo virgem esta vai aumentando à medida que aumenta o nível de tensão, dando lugar à ocorrência de deformações volumétricas plásticas (irreversíveis).

A função de cedência do modelo Soft Soil é definida pela equação (4.4)

$$f = p'^{eq} - p_p'^{eq} \quad (4.4)$$

Na equação (4.4), p'^{eq} representa o valor da tensão média efetiva para $q=0$ (tensão desviatória nula) na superfície de carregamento que passa pelo estado atual de tensão e $p_p'^{eq}$ representa a tensão equivalente de pré-consolidação, cujo

significado geométrico é ilustrado na Fig.4.11. As duas variáveis desta expressão são resultado das expressões (4.5) e (4.6).

$$p'^{eq} = \frac{q^2}{M^2(p' + c' \cot g(\varphi'))} + (p' + c' \cot g(\varphi')) \quad (4.5)$$

$$p'_p = p'^{eq} \exp\left(\frac{\Delta \varepsilon_v^p}{\lambda^* - k^*}\right) \quad (4.6)$$

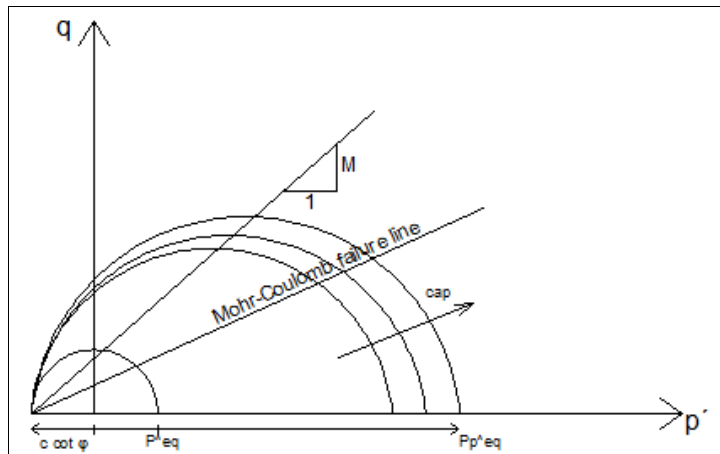


Figura 4.10 Superfícies de Rotura do modelo Soft Soil no plano p'-q (Brikgreve, Broere, & Waterman, 2002)

A função de cedência (equação 4.4) pode ser descrita como uma série de elipses no plano p' - q, cujos topos (pontos correspondentes a q máximo) estão localizados numa linha com inclinação M. Esta linha no modelo Cam Clay modificado (Burland 1965) representa a linha de estados críticos, descrevendo os estados de tensão na rotura pós-pico. No entanto, no modelo Soft Soil Creep, a rotura é descrita de Mohr-Coulomb.

O modelo Soft Soil Creep adicionalmente consegue reproduzir uma lei única de tensão-deformação-taxa de deformação. Esta modalidade é então capaz de reproduzir o fenómeno da fluência, da relaxação e o efeito da taxa de extensão no comportamento de argilas.

Uma vez que os assentamentos dos solos moles não podem na totalidade ser explicados pelo princípio das tensões efetivas e pela teoria clássica da consolidação, foram publicadas desde o início do século XX algumas leis para tentar descrever a fluência neste tipo de solos.

Em 1936 Buisman propôs a equação (4.7) para descrever a fluência (compressão secundária) sob tensão efetiva constante.

$$\varepsilon = \varepsilon_c - C_B \log\left(\frac{t_c + t'}{t_c}\right) \text{ para } t' > 0 \quad (4.7)$$

Em que ε_c é a extensão volumétrica no fim da consolidação primária, t_c o tempo até ao fim dessa consolidação primária, C_B uma constante do material e t' a diferença entre o tempo medido desde o início do carregamento e t_c , que é o mesmo que dizer, o tempo efetivo em que decorre a fluência. Nesta equação assume-se que uma diminuição de volume correspondendo a uma extensão volumétrica negativa.

A partir do trabalho de outros dois autores (Bjerrum, 1967) e (Garlanger, 1972) foi proposta uma nova equação de fluência, como se apresenta na equação (4.8).

$$e = e_c - C_\alpha \log\left(\frac{t_c + t'}{t_c}\right) \text{ com } C_\alpha = C_B(1 + e_0), \text{ para } t' \geq 0 \quad (4.8)$$

Nesta equação, as extensões são substituídas pelo índice de vazios e t_c pelo parâmetro τ_c , cujo significado se ilustra graficamente na figura:

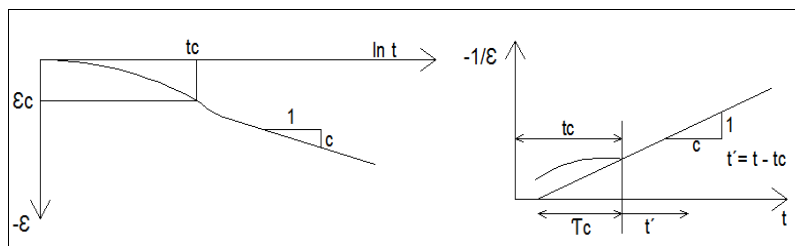


Figura 4.11 Consolidação e fluência em ensaio edométrico (Brinkgreve, Broere, & Waterman, 2002)

Outra possibilidade para descrever a compressão secundária é proposta por (Butterfield, 1979) na equação (4.9):

$$\varepsilon^H = \varepsilon^H - C \cdot \ln\left(\frac{t_c + t'}{t_c}\right) \quad (4.9)$$

Onde ε_H é a deformação volumétrica logarítmica definida por:

$$\varepsilon^H = \ln\left(\frac{v}{v_0}\right) = \ln\left(\frac{1+e}{1+e_0}\right) \quad (4.10)$$

O índice “0” refere-se aos valores iniciais e o expoente “H” a Hencky, pois foi ele o primeiro a usar a deformação logarítmica. Para o caso das pequenas deformações pode demonstrar-se que:

$$C = \frac{C_\alpha}{(1 + e_0) \ln 10} = \frac{C_B}{\ln 10} \quad (4.11)$$

No caso de grandes deformações, uma deformação logarítmica é superior à deformação tradicional. Para determinar o valor do parâmetro C pode ser usado o método tradicional, recorrendo à Fig. 4.12 (a) e determinando o declive, ou através da construção desenvolvida por (Janbu, 1969) na Fig. 4.12 (b).

Para a realização das simulações o programa Plaxis2D faz uso das equações 4.9 e 4.12.

Seguidamente apresentam-se algumas equações indicadas no manual do programa que relacionam os parâmetros do modelo Soft Soil com os parâmetros normalizados de ensaios edométricos.

$$\lambda^* = \frac{\lambda}{1+e} \quad \lambda^* = \frac{C_c}{2.3 \times (1+e)} \quad k^* = \frac{k}{1+e} \quad k^* = \frac{2}{2.3} \frac{C_s}{1+e} \quad \mu^* = \frac{C_\alpha}{2.3 \times (1+e)}$$

Em que μ^* é o índice de compressão secundária modificada.

4.4.4. Geometria do modelo

No âmbito deste trabalho, foram realizados vários modelos de cálculo com o objetivo de simular a variação da fluência do geocomposto respeito a sua capacidade de vazão sujeito a consolidação vertical do solo e rebaixamento do lençol freático; descreve-se seguidamente a geometria consideradas em cada caso:

Em todos os modelos realizados a malha é composta por elementos finitos de 15 nós (Fig. 4.12). Este tipo de malha é gerada automaticamente pelo programa e pode ser mais ou menos refinada, dependendo da exigência dos resultados que se pretende obter. Contudo, um maior refinamento da malha vai aumentar o tempo de cálculo.

Pelo carregamento aplicado vão acontecer deformações verticais e horizontais onde vai ser analisada principalmente a interação solo – geocomposto drenante, no estado plano de deformações, verificando desse jeito a variação da vazão no dreno de geocomposto drenante.

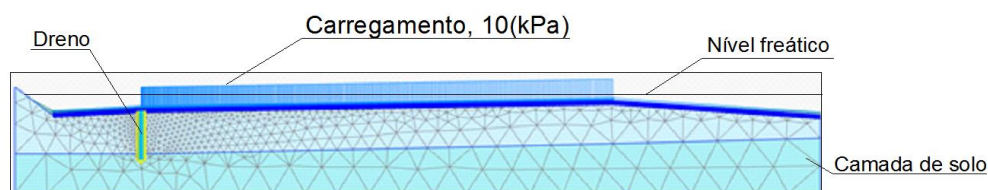


Figura 4.12 Exemplo de malha de elementos finitos adoptada

Da figura 4.12 podemos ver que, a posição do nível freático está 0.5 m acima do topo da estrutura de pavimento, referente ao estudo de caso dado.

O solo é considerado normalmente consolidado (grau de sobre consolidação OCR=1), no caso de Soft Soil Creep.

4.4.5. Materiais

Os valores dos parâmetros geotécnicos adoptados para o solo argiloso na realização deste trabalho são os que se apresentam na tabela 4.2 e correspondem, em geral a valores da dissertação de Durán (2012), para uma argila normalmente consolidada.

Tabela 4.2 Propriedades do solo

Símbolo (unidades)	Variável	Valores
$\gamma_{\text{seco}}(\text{kN/m}^3)$	Peso volumétrico seco	19
$\gamma_{\text{saturado}}(\text{kN/m}^3)$	Peso volumétrico saturado	15,55
e_o	Índice de vazios	0,75
ϕ	Ângulo de resistencia ao corte	25°
$C(\text{kPa})$	Coesão	1

4.4.6. Obtenção de dados para interpretação

Para proceder à análise do processo de consolidação em solos moles, para todas as situações analisadas e para todas as fases de consolidação, foram retirados do programa de elementos finitos Plaxis 2D, os seguintes dados: deslocamentos, deformações, rede de fluxo, distribuição dos excessos de pressão intersticial em toda a massa de solo.

Através dos valores de deslocamentos registrados, elaboram-se curvas de evolução do grau de deslocamento com o tempo de consolidação.

Com os valores dos excessos de pressão intersticial elaboram-se as curvas referentes à evolução do excesso de pressão intersticial na fronteira impermeável e a evolução do grau meio de consolidação. As primeiras tratam os dados de forma

direita, bastando para isso associar o excesso de pressão ao instante de tempo correspondente.

Também se obteve uma tabela de valores da vazão no tempo, e com ele se fez o gráfico de variação da vazão ao longo do tempo.