



FCTUC DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL
FACULDADE DE CIÊNCIAS E TECNOLOGIA
UNIVERSIDADE DE COIMBRA

Influência do teor em matéria orgânica na redução da fluência por pré-carga: análise laboratorial

Dissertação apresentada para a obtenção do grau de Mestre em Engenharia Civil na Especialidade de Geotecnia

Autor

Andreia Filipa Vicente Vieira

Orientadores

Professor Doutor Paulo José da Venda Oliveira

Professor Doutor António Alberto Santos Correia

Esta dissertação é da exclusiva responsabilidade do seu autor, não tendo sofrido correções após a defesa em provas públicas. O Departamento de Engenharia Civil da FCTUC declina qualquer responsabilidade pelo uso da informação apresentada

Coimbra, Março, 2016

AGRADECIMENTOS

Com a defesa da presente dissertação chega ao fim mais um capítulo da minha vida, capítulo esse que não foi fácil, mas que com a ajuda, força e dedicação de algumas pessoas tornou tudo bem mais fácil. Por isso, resta-me prestar um sincero reconhecimento às pessoas que sempre estiveram do meu lado.

Ao professor Doutor Paulo José da Venda que me orientou, transmitindo-me conhecimentos imprescindíveis para a conclusão do presente trabalho, nomeadamente nas correções e ajustes prestados na última fase do trabalho.

Ao professor Doutor António Alberto Correia pela sua enorme disponibilidade e boa disposição, apoio e pelas dúvidas esclarecidas durante a elaboração da dissertação.

Ao Senhor José António pela sua total e constante disponibilidade em todo o trabalho laboratorial executado, foi sem dúvida uma ajuda muito importante.

A todos os professores do perfil de Geotecnia pela excelência do trabalho realizado nas aulas e fora delas.

Aos meus companheiros de grupo e laboratório, João Carmona e Manuel Porém, obrigado pela paciência e ajuda prestada durante este último ano.

Às grandes amigas, que tenciono levar para a vida, Sara Cardoso, Patrícia Fernandes e Susana Almeida, obrigado pelo vosso apoio e amizade ao longo destes anos, principalmente quando as coisas corriam menos bem. Ao meu namorado, André Silva, por toda a paciência e carinho demonstrada.

Por último, mas sem dúvida as pessoas mais importantes da minha vida, aos meus pais e irmã por todo o amor, ajuda e compreensão constante, bem como me terem dado todas as condições e incentivo para a conclusão deste curso, não esquecendo um especial agradecimento aos meus avós, pela dedicação e apoio ao longo deste percurso, contribuindo todos eles para a pessoa que sou hoje.

A todos o meu sincero, **MUITO OBRIGADO!**

RESUMO

A construção de aterros sobre solos moles acarreta problemas de estabilidade e elevados deslocamentos, tanto verticais como horizontais. Nestes solos, a presença de matéria orgânica contribui para a amplificação dos assentamentos, e que estes se prolonguem indefinidamente no tempo, mesmo sob carga constante.

Para tal, a construção de estruturas sobre este tipo de solos só é possível com a utilização de técnicas de melhoramento e reforço de solos. Uma das técnicas mais antigas que tem sido aplicada é a metodologia da pré-carga, que tem como objetivo principal acelerar os assentamentos devidos à consolidação primária, bem como reduzir os assentamentos por consolidação secundária.

Na dissertação apresentada, pretende-se analisar, por via laboratorial, a influência do teor de matéria orgânica na redução dos assentamentos por fluência do solo mole do Baixo Mondego quando submetido a pré-carga. Os parâmetros objeto de análise são o teor em matéria orgânica e o nível de pré-carga utilizado. A avaliação da compressibilidade, com particular enfoque na componente volumétrica da fluência, será efetuada por intermédio de ensaios edométricos.

Depois de realizado o estudo, conclui-se que a presença da matéria orgânica influencia sobremaneira os assentamentos devido à fluência. Verificou-se que os solos com maior percentagem de teor em matéria orgânica apresentam um coeficiente de consolidação secundária mais elevado que aqueles em que a presença desta não é tao significativa, logo os assentamentos por fluência são de maior magnitude. No que diz respeito à metodologia da pré-carga, constatou-se que a sua utilização reduz os assentamentos por fluência, sendo que esta redução é mais eficiente quando usado o nível de pré-carga de maior magnitude.

ABSTRACT

The construction of embankments over soft soils is associated with stability problems and higher displacement that can occur vertically or horizontally. In these soils, the greater presence of organic matter contributes to the magnitude of the settlements, and these extend indefinitely over time even under constant load.

To built this type of structures over this kind of soils is only possible with the use of improvements reinforcement and improvements techniques. One of the oldest techniques that have been applied is the preloading methodology that aims to speed up the settlements in time as well as reduce the settlements by secondary consolidation.

The presented dissertation, is intended to analyze the influence of organic matter in the creep settlements reduction, using laboratory methods, reproducing the preloading method. The parameters of analysis are the amount of organic matter and the pre loading charge level used. The evaluation of compressibility, expressed by the volumetric creep component, will be obtained by edometric tests.

After the performed study, it is concluded that the presence of organic matter greatly influences the settlement due to creep. In this experience, it has been verified that the soils with the biggest percentage of organic matter presents a higher coefficient of secondary consolidation that the ones where that organic matter is not so significant, so the settlements by creep are of greater magnitude. Concerning about the methodology of the pre-loading, it was verified that the reduction by pre-loading change was bigger for the level of pre-loading with highest magnitude.

ÍNDICE

AGRADECIMENTOS	ii
RESUMO	iii
ABSTRACT	iv
ÍNDICE.....	v
ÍNDICE DE FIGURAS	vii
ÍNDICE DE QUADROS	ix
SIMBOLOGIA	x
ABREVIATURAS	xi
1 INTRODUÇÃO.....	1
1.1 Contexto do trabalho	1
1.2 Estrutura da dissertação	2
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	3
2.1 Aterros sobre solos moles.....	3
2.2 Método da Pré-carga.....	5
2.3 Fluência	6
2.4 Impacto da pré-carga na fluência.....	10
2.5 Parâmetros que influenciam a fluência.....	15
3 CARACTERIZAÇÃO GEOTÉCNICA DO SOLO	17
3.1 Solo mole do Baixo Mondego	17
3.2 Análise e caracterização do solo em estudo	18
3.2.1 Índices físicos	19
3.2.2 Características de identificação	19
3.2.2.1 Curva granulométrica	19
3.2.2.2 Limites de consistência.....	20
3.2.2.3 Teor em matéria orgânica	21
3.2.3 Classificação do solo	22
4 PROCEDIMENTO LABORATORIAL.....	25
4.1 Preparação das amostras	25
4.2 Ensaios efetuados	29
4.2.1 Procedimento do ensaio.....	29
4.2.2 Descrição dos ensaios	32
5 ANÁLISE DE RESULTADOS.....	33
5.1 Introdução.....	33
5.2 Ensaio clássico.....	33

5.3	Ensaio de fluência.....	37
5.3.1	Sem pré-carga.....	37
5.3.2	Influência da pré-carga.....	39
5.3.2.1	Pré-carga de 25 kPa.....	40
5.3.2.2	Pré-carga de 50 kPa.....	41
5.3.3	Análise conjunta da fluência.....	43
6	CONCLUSÕES E TRABALHOS FUTUROS.....	46
6.1	Conclusões.....	46
6.2	Trabalhos futuros.....	47
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	48

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2.1- Assentamento resultante da pré-carga (Stapelfedt e Vepsäläinen, 2007).....	6
Figura 2.2- Caracterização das 3 fases de fluência sob tensões desviatórias constantes (Kuhn e Mitchell,1993).	7
Figura 2.3- Valor de C_{ae}/C_c para as turfas de Middleton Mesri et al., (1997).	9
Figura 2.4- Interpretação da razão C_{ae}/C_c na teoria de Mesri e Castro (1987).....	10
Figura 2.5- Modelo das “linhas de tempo” (Bjerrum, 1967) adaptado.	11
Figura 2.6- Evolução dos assentamentos verticais medidos quando usado a pré-carga.....	12
Figura 2.7- Relação do OCR do solo com C_{ae} (Alonso et al., 2000).	12
Figura 2.8- Influência do nível de pré-carga nos assentamentos por fluência no solo do Baixo Mondego (Mira,2008).....	13
Figura 2.9- Deformações axiais e volumétricas obtidas em ensaios triaxiais de fluência, com e sem recurso a pré-carga no solo mole do Baixo Mondego (Mira, 2008).....	14
Figura 2.10- Aumento da capacidade de carga não drenada com a aplicação da pré-carga (Lehane e Jardine, 2003).....	14
Figura 2.11-Influência da pré-carga na tensão de rotura do solo mole do Baixo Mondego (Mira, 2008). 15	
Figura 2.12- Influência da σ'_v para a determinação de C_u (Mesri et al.,1997).	16
Figura 3.1- Curva granulométrica do solo em estudo.	20
Figura 3.2- Determinação do w_l	21
Figura 3.3- Determinação do w_p	21
Figura 3.4- Carta de Plasticidade de Casagrande.	22
Figura 3.5- Classificação granulométrica do solo segundo o triângulo de Feret.	23
Figura 4.1- Aspeto do solo antes a) e depois b) da homogeneização.....	26
Figura 4.2- Redução a “pó” do solo queimado a 400°C.....	26
Figura 4.3- Mistura com OM=4,1% antes a) e depois b) da homogeneização.	27
Figura 4.4- Algumas das etapas respeitantes à reconstituição das amostras.	29
Figura 4.5- Edométrico clássico a) e de fluência b).	29
Figura 4.6- Célula de consolidação preenchida por água (saturação da amostra).....	31
Figura 4.7- Aspeto da água presente na célula de consolidação no final do ensaio.....	31
Figura 5.1- Comparação de curvas e-log- σ'_v para os solos em estudo.....	34
Figura 5.2- Variação de C_c , C_r e C_r/C_c em função da %OM.	35
Figura 5.3- Aplicação do método de Casagrande.....	36
Figura 5.4- Variação do e_0 e do c_v com a %OM.....	36

Figura 5.5- Variação do e_0 e do c_v com a %OM.....	36
Figura 5.6- Variação da deformação volumétrica com o logaritmo do tempo.....	38
Figura 5.7- Variação dos assentamentos por fluência ao longo do tempo com recurso à pré-carga de 25 kPa.	40
Figura 5.8- Variação do C_{ae} com OM, com e sem recurso a pré-carga 25 kPa.....	41
Figura 5.9- Variação dos assentamentos por fluência ao longo do tempo com recurso à pré-carga de 50 kPa.	42
Figura 5.10- Variação do C_{ae} com OM, com e sem recurso a pré-carga 50 kPa.....	42
Figura 5.12- Variação dos assentamentos por fluência para OM=6.4% e OM=8.3%, com e sem pré-carga.....	43
Figura 5.11- Variação dos assentamentos por fluência para OM=1.2% e OM=4.1%, com e sem pré-carga.....	43
Figura 5.13- Variação de C_{ae} para cada % OM, com e sem pré-carga.....	44
Figura 5.14- Eficiência da pré-carga para cada % OM.	45

ÍNDICE DE QUADROS

Quadro 2.1- Classificação de técnicas de melhoramento de solos por Terashi e Miki (1999).	4
Quadro 2.2- Valores C_{ae}/C_c e respectivas referências Mesri et al, (1997).	9
Quadro 3.1- Classificação do solo (LPC).....	23
Quadro 3.2- Principais propriedades do depósito de solos moles do Baixo Mondego.	24
Quadro 4.1- Características dos 4 solos com diferentes %OM.	27
Quadro 4.2- Síntese dos ensaios efetuados.	32
Quadro 5.1- Valores de C_{ae} obtidos sem pré-carga.	39

SIMBOLOGIA

- C_c - Índice de compressibilidade
 C_r - Índice de recompressibilidade
 C_{ae} - Coeficiente de consolidação secundária
 e - Índice de vazios
 e_0 - índice de vazios inicial
 h_0 - altura inicial da amostra
 G - Densidade das partículas sólidas
 IL - Índice de Liquidez
 IP - Índice de plasticidade
 OCR - Grau de sobreconsolidação
 OM - Teor em matéria orgânica
 OH - Argila orgânica
 $P_{cáps}$ - Massa da cápsula usada no ensaio
 $P_s^{50^\circ C}$ - Massa da cápsula com o solo seco a 50°C
 $P_s^{400^\circ C}$ - Massa da cápsula com o solo seco a 400°C
 S - Grau de saturação
 t_{50} - Tempo correspondente a 50% da consolidação
 t_p - instante no qual se pretende calcular o assentamento por consolidação secundária
 T_v - Factor tempo
 w - Teor em água
 w_1 - Limite de liquidez
 w_p - Limite de plasticidade
 γ_{sat} - Peso volúmico saturado
 ΔH_{cs} - Assentamento por consolidação secundária
 Δe - Variação do índice de vazios
 $\Delta \log t$ - Variação do logaritmo da tensão efetiva vertical

ABREVIATURAS

DEC-UC – Departamento de Engenharia Civil

EN – Norma Europeia (European Standard)

LNEC – Laboratório Nacional de Engenharia Civil

NP – Norma Portuguesa

PVC – Policloreto de Vinilo

1 INTRODUÇÃO

1.1 Contexto do trabalho

Com a evolução da sociedade e, com o crescente sedentarismo, o Homem passou a ter a necessidade de construir infra e superestruturas em número e diversidade crescentes. Dado que, anteriormente a ocupação dos solos privilegiava os de melhores características geotécnicas, existe agora uma necessidade de ocupar solos que outrora foram considerados inadequados, designados de solos moles, objeto de estudo no presente trabalho.

Estes solos caracterizam-se pela sua baixa resistência e elevada compressibilidade quando sujeitos a aplicação de solicitações, acarretando graves problemas a nível de estabilidade e assentamentos das estruturas sobre eles construídas. Isto porque, características como baixa permeabilidade, grande superfície específica das partículas que o constituem, elevado teor em água e matéria orgânica, agravam ainda mais o processo natural de consolidação do solo quando sujeito a uma solicitação, tornando-o mais lento. Assim, é inevitável que se resolva esta problemática dos solos moles através de técnicas que aceleram a consolidação, logo os assentamentos.

Ao longo dos tempos foram encontradas algumas alternativas por forma a atenuar ou acelerar os assentamentos por consolidação primária, porém, os assentamentos por consolidação secundária, apesar de menor magnitude que os primeiros, são de grande importância uma vez que estes se manifestam na fase de serviço da obra. Uma das soluções encontradas para acelerar os assentamentos por consolidação primária e reduzir os assentamentos por consolidação secundária, consiste na implantação de uma carga temporária superior àquela que se pretende transmitir em fase definitiva ao solo, método designado por pré-carga.

Assim, com este trabalho pretende-se simular em laboratório, com base na execução de ensaios edométricos, a aplicação desta metodologia para dois níveis de pré-carga, em amostras reconstituídas do solo mole do Baixo Mondego, por forma a averiguar a eficiência do uso desta metodologia para diferentes teores de matéria orgânica (%OM=1,2; 4,1; 6,4; 8,3).

1.2 Estrutura da dissertação

Após o presente capítulo de carácter introdutório que pretende enquadrar o tema da presente dissertação, seguem-se cinco capítulos que pormenorizam o trabalho efetuado.

No capítulo 2 pretende-se efetuar o ponto de situação sobre o estado de conhecimento e as investigações mais recentes, abordando a temática da pré-carga com particular destaque nas deformações por fluência.

No capítulo 3 proceder-se-á à caracterização/descrição dos materiais utilizados na elaboração desta dissertação, incidindo principalmente na caracterização geotécnica do solo mole do “Baixo Mondego”.

No capítulo 4 apresenta-se o procedimento laboratorial e experimental, desde a homogeneização do solo, preparação dos provetes até à realização dos ensaios edométricos clássicos e de fluência.

O capítulo 5 contempla a análise e discussão dos resultados obtidos para cada tipo de ensaios laboratoriais realizados.

Por último, o capítulo 6 apresenta as conclusões mais relevantes e propostas para a continuação do trabalho desenvolvido nesta dissertação.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 Aterros sobre solos moles

Os solos moles devidos às suas fracas características geotécnicas, nomeadamente elevada deformabilidade e baixa resistência, têm sido preteridos para a construção de infraestruturas sobre eles.

Porém, a pressão sobre as políticas de organização e ocupação dos solos e o sedentarismo tem conduzido muitas vezes à ocupação destes solos. Assim, ao longo dos tempos, tem sido necessário utilizar metodologias capazes de resolver a problemática destes solos, com a finalidade última de aumentar a estabilidade e reduzir os assentamentos. De seguida expõem-se algumas das metodologias atualmente existentes, bem como os solos a que se adequam, classificação essa feita por Terashi e Miki (1999) (Quadro 2.1).

Uma das técnicas que tem vindo a ser utilizada na mitigação dos problemas relacionados com a construção sobre solos moles, é a pré-carga, alvo de estudo nesta dissertação, em que o principal objetivo é acelerar os assentamentos por consolidação primária e reduzir os assentamentos por fluência. Além disso, a aceleração da consolidação pode ter outro objetivo, ou seja, a consolidação implica uma redução do índice de vazios e do teor em água, que por sua vez origina um novo arranjo das partículas que confere um aumento da resistência ao corte do solo, conferindo às estruturas sobre eles construídas maior estabilidade.

Quadro 2.1- Classificação de técnicas de melhoramento de solos por Terashi e Miki (1999).

CATEGORIA	TECNOLOGIA	MAIOR EFEITO DO MELHORAMENTO	SOLOS A QUE SE ADEQUA
TÉCNICAS DE MELHORAMENTO À SUPERFÍCIE USUALMENTE COMBINADAS COM TÉCNICAS DE MELHORAMENTO EM PROFUNDIDADE			
MELHORAMENTO À SUPERFÍCIE	Valas drenantes	Assegurar a transitabilidade através da drenagem	Argilosos e orgânicos
	Colocação de tapete arenoso	Assegurar a transitabilidade; funciona como superfície horizontal de drenagem	Argilosos e orgânicos
	Reforço com geossintéticos	Assegurar a estabilidade do tapete arenoso	Argilosos e orgânicos
	Misturas superficiais	Aumentar a resistência e assegurar a transitabilidade	Qualquer solo
TÉCNICAS DE MELHORAMENTO DOS SOLOS EM PROFUNDIDADE			
SUBSTITUIÇÃO	Escavação e substituição	Aumentar a resistência ao corte e assegurar a estabilidade; redução do assentamento	Argilosos e orgânicos
	Substituição por explosivos ou por deslocamento		
Aceleração da consolidação por PRÉ-CARGA com ou sem drenagem artificial	Aterro provisório	Aumentar a resistência ao corte e assegurar a estabilidade; redução do assentamento residual	Argilosos e orgânicos (elevada compressibilidade e baixa permeabilidade)
	Rebaixamento do NF		
	Vácuo		
DRENAGEM	Drenos de material grosseiro	Aumentar a resistência à liquefacção devido à redução do excesso de pressão intersticial	Areias soltas com elevado potencial de liquefacção
DENSIFICAÇÃO	<i>Compaction piles</i>	Aumentar a uniformidade do terreno para reduzir assentamentos diferenciais; aumentar a resistência ao corte; aumentar a resistência à liquefacção	Arenosos; aterros sanitários; solos com permeabilidade elevada
	<i>Sand compaction piles</i>		
	<i>Vibrating Rod Compaction</i>		
	Vibroflutuação		
	Compactação dinâmica		
INJEÇÕES	Injecção convencional	Aumentar a resistência ao corte; compensar assentamentos diferenciais; eliminar ou reduzir a percolação	Uniformes e permeáveis
	<i>Compaction grouting</i>		Areias soltas
	<i>Fracture grouting</i>		Siltosos e argilosos
	<i>Jet grouting</i>		Qualquer solo
MISTURAS	Método <i>Deep Mixing</i> incluindo <i>Swedish lime columns</i>	Aumentar a resistência ao corte; reduzir os assentamentos; reduzir o potencial de liquefacção por aumento da coesão e pelo confinamento acrescentado	Qualquer solo
	<i>Pre-mixing</i>	Diminuir o potencial de liquefacção através do aumento da coesão	Areias com potencial de liquefacção
	Geomateriais leves	Ajustar o peso volúmico do solo, aumentando a resistência ao corte e reduzindo o assentamento	Qualquer solo
TÉRMICOS	Aquecimento por combustão	Melhorar as características de resistência e deformação	Turfas
	Congelamento	Efeitos temporários; aumentar a resistência ao corte, impedir deformações e reduzir percolação	Saturados
	Vitrificação/ Injecção de ar ou água quente no solo	Remediar solos contaminados	Contaminados
INCLUSÕES	Geossintéticos, geogrelhas, ancoragens, pregagens, terra armada, micro-estacas, etc.	Melhorar as características de resistência e deformação do maciço; pode conferir resistência à tracção	
OUTROS	Uso combinado de vários métodos	Para fazer face às dificuldades impostas pelas condições do terreno	
	Uso de materiais leves como por exemplo <i>EPS</i> ou <i>Geoleca</i>	Reduzir o peso da massa de solo instabilizante	
	Uso de materiais pesados	Aumentar o peso do solo para balançar a tensão que actua no subsolo	

2.2 Método da Pré-carga

O método da pré-carga encaixa numa das metodologias usadas para resolver o problema de assentamentos, mais propriamente para acelerá-los no tempo. Existem duas formas para a sua aplicação, uma denominada por convencional com a colocação de uma sobrecarga temporária (Mesri et al., 1996) e outra com aplicação de vácuo (Chai et al., 2008).

Terashi e Miki (1999), como anteriormente referido, classificam esta técnica como uma das mais adequadas a solos argilosos e orgânicos (elevada compressibilidade e baixa permeabilidade), nos quais se pretende aumentar a resistência ao corte assegurando a estabilidade, e complementarmente reduzir o assentamento residual (assentamento secundário) verificado durante a fase de fluência do solo.

A metodologia através de vácuo é usada quando o solo de fundação possui características mecânicas muito fracas, que não permitem a construção de um pequeno aterro, sendo o aumento das tensões efetivas induzido através da aplicação de sucção ao solo.

A metodologia tradicional, alvo de estudo no presente trabalho, consiste na realização de um aterro temporário que transmite ao maciço uma carga superior aquela que se pretende aplicar em fase definitiva. A carga em excesso só deverá ser retirada quando se verificarem assentamentos de grandeza semelhante (referentes à consolidação primária) àqueles que seriam previsíveis após a construção da obra final (Matos Fernandes, 2006).

O princípio base do método, inerente à aceleração da consolidação primária, é ilustrado na Figura 2.1, observando-se que um dado valor de assentamento é obtido mais rapidamente quando induzido por uma carga superior, dado o grau de consolidação ser independente da magnitude da carga aplicada.

Em contrapartida, a utilização deste método requer um período de longa duração para que se dê todo o processo de consolidação, principalmente quando a permeabilidade do solo é reduzida. Por forma a colmatar este problema, pode-se conjugar o uso de drenos verticais que encurtam as distâncias de drenagem, diminuindo assim o tempo de consolidação. Por outro lado, este método só é viável quando o solo de fundação tem capacidade de carga suficiente para suportar o aterro e a pré-carga.

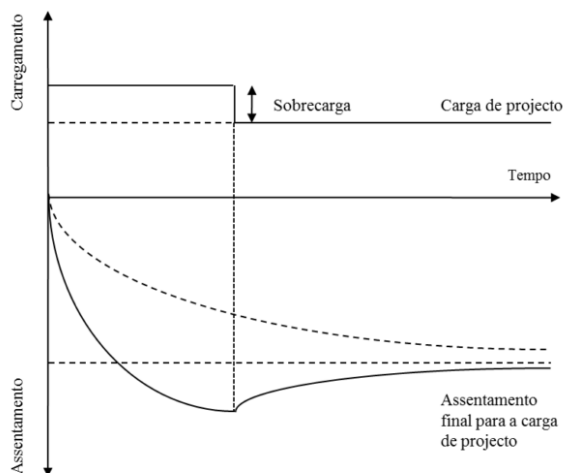


Figura 2.1- Assentamento resultante da pré-carga (Stapelfedt e Vepsäläinen, 2007).

Em suma, esta técnica para além de induzir a aceleração do processo de consolidação primária também contribui para o decréscimo do coeficiente de consolidação secundária, $C_{\alpha e}$, ou seja, mitiga as deformações por fluência (Taylor e Merchant, 1940). Além disso, confere uma maior resistência ao corte do solo.

2.3 Fluência

No estudo das deformações de um aterro assume especial relevo as deformações que se processam a tensão constante, sendo designadas deformações por fluência, as quais são irreversíveis (Silva, 1996).

A importância dos fenómenos derivados da fluência é relativa, pois depende da natureza dos materiais, nível de tensão instalado, etc.

Nos meios particulados, designados por solos, uma vez que se tratam de meios multifásicos constituídos por um esqueleto sólido e por uma fase fluída (assumindo que os vazios estão preenchidos por água), todo o comportamento estrutural destes materiais é condicionado pela sua constituição sendo que a fluência não foge a regra. Segundo Silva (1996) a fluência nos solos apresenta 3 fases distintas (primária, secundária e terciária) como se observa na Figura 2.2. Existe uma notória diferença na velocidade de deformação em cada uma destas fases, associada à alteração da relação entre tensões tangenciais e normais nos contactos entre as partículas (Kuhn e Mitchell, 1993). À medida que se processam as deformações as partículas são submetidas a um rearranjo estrutural, levando a uma diminuição das componentes tangenciais da tensão, traduzido numa diminuição da velocidade de deformação (Maranha das Neves, 1993), exceto na fase terciária.

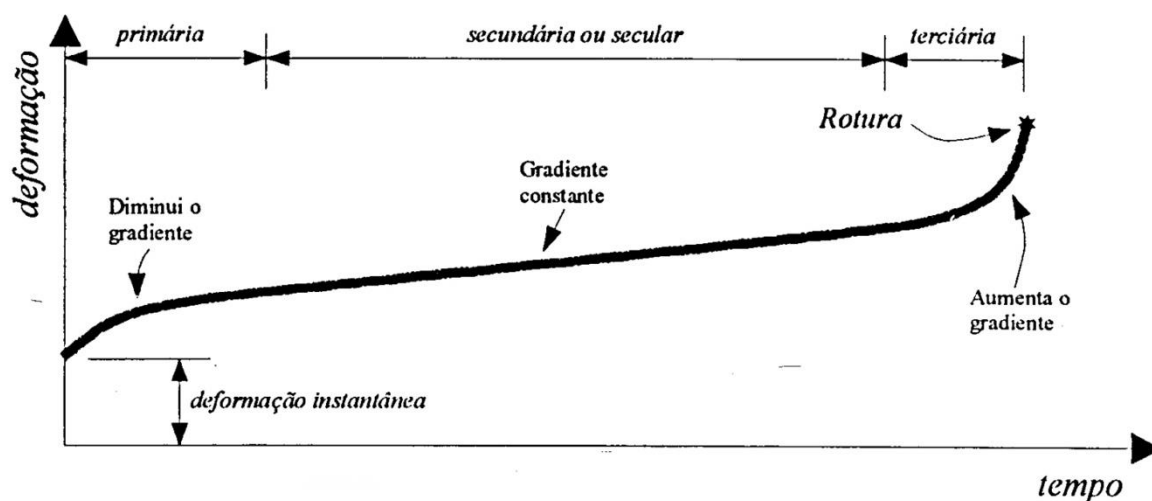


Figura 2.2- Caracterização das 3 fases de fluência sob tensões desviatórias constantes (Kuhn e Mitchell, 1993).

Após a colocação da carga sobre o solo inicia-se a fase primária que corresponde a um endurecimento do material (ganho de capacidade resistente) associado à componente volumétrica, que conduz a uma rápida redução da velocidade para um valor de deformação relativamente baixo e aproximadamente constante até se iniciar a fluência secundária, caracterizada por ser a fase de maior permanência no tempo, daí ser denominada também de fluência secular. A fase terciária corresponde a uma redução de resistência associada à componente distorcional da fluência, onde se verifica um aumento significativo das deformações até se atingir a ruptura. Assim, conclui-se que as três fases mencionadas anteriormente resultam da combinação entre parcelas volumétricas (em estudo nesta dissertação) e distorcionais de fluência (Silva, 1996).

Kuhn e Mitchell (1993) defendem que o mecanismo predominante que origina as deformações por fluência deve-se ao rearranjo das partículas, quer para materiais argilosos quer arenosos. No caso dos solos argilosos, Ter-Martirosyan (1992) refere a existência de uma fronteira no comportamento de fluência com base no grau de saturação (S). Para amostras com $S < 0,8$, as pressões intersticiais não influenciam as variações volumétricas, sendo a deformação apenas condicionada pelo comportamento do esqueleto sólido. Para valores superiores a 0,8 há que considerar dois mecanismos distintos. Um deles refere-se à consolidação primária/hidrodinâmica, que se encontra relacionado com o aumento das tensões efetivas devido à redução das tensões intersticiais, em resultado da expulsão da água dos vazios. O outro mecanismo é determinado pela natureza viscosa do solo que origina a consolidação secundária (Coelho, 2000).

É de referir que esta terminologia (consolidação primária e secundária) é ainda controversa entre a comunidade geotécnica uma vez que denuncia uma ordem de acontecimentos. Embora a fluência do solo seja detetada somente após o término da consolidação hidrodinâmica, existem indícios que os processos ocorrem em simultâneo. Assim existem terminologias diferentes adotadas por cada autor.

Haan (1994) defende que a consolidação primária seja denominada de hidrodinâmica, enquanto que a secundária por compressão secular, por forma a expressar a dependência deste fenómeno relativamente ao tempo. Lowe (1974) defende que em vez do termo compressão secular se deve adotar consolidação secundária, uma vez que este mecanismo revela semelhanças com a consolidação hidrodinâmica, dado que em qualquer um dos casos defende a existência de excesso de pressão neutra. A diferença reside na velocidade de deformação ser, na consolidação primária, controlada pelo excesso de pressão neutra e pela lei de Darcy, enquanto que na consolidação secundária, é essencialmente determinada pela natureza viscosa do esqueleto sólido. Porém segundo Leroueil et al., (1985) tal não impede que exista, durante a consolidação secundária, algum excesso de pressão neutra, ainda que tão pequeno que não seja possível medi-lo.

Tal controvérsia deu origem a duas correntes de opinião distintas, A e B, defendidas pela escola americana e canadiana, respetivamente. A hipótese A, usada neste estudo, defende a ordem de acontecimentos, em que primeiro se dá a consolidação hidrodinâmica, e que só após esta terminar se inicia os fenómenos de fluência. Em contrapartida, a hipótese B defende que os dois mecanismos se desenrolam em simultâneo.

Mesri et al., (1997) foi talvez o maior impulsionador no que diz respeito à quantificação do C_{ae} , utilizando para tal o conceito de compressibilidade C_{ae}/C_c , o qual se prevê ser constante para um dado solo. Repare-se que o valor de C_c , não tem neste caso o habitual significado de declive de ramo virgem da curva e-log σ'_v , mas sim o de declive tangente à curva no ponto correspondente ao da determinação de C_{ae} . No Quadro 2.2, é ilustrada a gama de valores sugerida na literatura para solos com características semelhantes ao do presente estudo, isto é, com elevado índice de vazios e teor em água, bem como presença de matéria orgânica.

Quadro 2.2- Valores C_{ae}/C_c e respectivas referências Mesri et al., (1997).

Peat (1)	w_o % (2)	k_{vo} m/s (3)	C_a/C_c (4)	Reference (5)
Fibrous peat	850	4×10^{-6}	0.06–0.10	Hanrahan (1954)
Peat	520	—	0.061–0.078	Lewis (1956)
Amorphous and fibrous peat	500–1,500	10^{-7} – 10^{-6}	0.035–0.083	Lea and Brawner (1963)
Canadian muskeg	200–600	10^{-5}	0.09–0.10	Adams (1965)
Amorphous to fibrous peat	705	—	0.073–0.091	Keene and Zawodniak (1968)
Peat	400–750	10^{-5}	0.075–0.085	Weber (1969)
Fibrous peat	605–1,290	10^{-6}	0.052–0.072	Samson and LaRochell (1972)
Fibrous peat	613–886	10^{-6} – 10^{-5}	0.06–0.085	Berry and Vickers (1975)
Amorphous to fibrous peat	600	10^{-6}	0.042–0.083	Dhowian and Edil (1981)
Fibrous peat	660–1,590	5×10^{-7} – 5×10^{-5}	0.06	Lefebvre et al. (1984)
Dutch peat	370	—	0.06	Den Haan (1994)
Fibrous peat	610–850	6×10^{-8} – 10^{-7}	0.052	Present study (1997)

Um dos estudos de Mesri et al., (1997) sobre as turfas de Middleton permitiram obter um valor de C_{ae}/C_c igual a 0,052 (Figura 2.3), que se encontra dentro do intervalo $C_{ae}/C_c = 0,06 \pm 0,01$, determinado pelos autores para a maioria das argilas orgânicas de alta plasticidade.

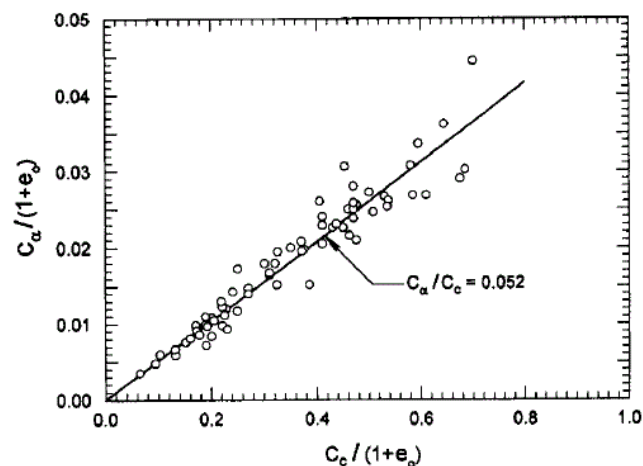


Figura 2.3- Valor de C_{ae}/C_c para as turfas de Middleton Mesri et al., (1997).

Alguns autores não concordam que a relação definida por Mesri e Castro (1987) seja constante para o mesmo solo, porém os autores tem conseguido provar que tal se deve a incorreta interpretação do significado da expressão, pois como se referiu anteriormente, o valor de C_c refere-se ao declive tangente à curva no ponto correspondente ao da determinação de C_{ae} e não ao habitual significado de declive do ramo virgem. A Figura 2.4 comprova que a razão C_{ae}/C_c se mantém constante e pode ser obtida indiferentemente por qualquer das seguintes relações:

$$\frac{C_a}{C_c} = \frac{C_{a1}}{C_{c1}} = \frac{C_{a2}}{C_{c2}} = \frac{C_{a3}}{C_{c3}}$$

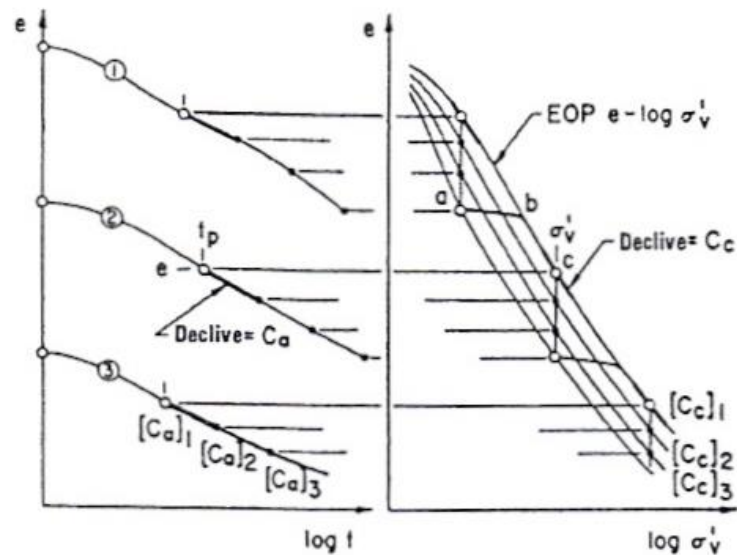


Figura 2.4- Interpretação da razão $C_{\alpha e}/C_c$ na teoria de Mesri e Castro (1987).

2.4 Impacto da pré-carga na fluência

Os estudos feitos sobre esta matéria indicam uma redução dos assentamentos por fluência (consolidação secundária) quando é usada a pré-carga. Estes assentamentos são calculados através da equação 2.1

$$\Delta H_{CS} = C_{\alpha e} \times \frac{H_0}{1 + e} \times \log \frac{t}{t_p} \quad (2.1)$$

em que $C_{\alpha e}$ define o coeficiente de consolidação secundária, H_0 é a altura do depósito, e representa o índice de vazios, t_p o tempo necessário para o fim da consolidação primária e t o tempo de cálculo do assentamento por fluência. O valor de $C_{\alpha e}$ é deduzido da evolução das deformações com o tempo (após o final da consolidação primária) para um dado escalão de carga do ensaio edométrico. Apesar da importância deste parâmetro, ainda existe alguma dificuldade para a sua correta obtenção. Sridharan e Rao (1982) apresentam algumas definições para $C_{\alpha e}$, tendo-se no presente estudo adotado a expressão 2.2.

$$C_{\alpha e} = \frac{\Delta e}{\Delta \log t} \quad (2.2)$$

$$C_{\alpha e} = \frac{\Delta e}{(1 + e_0) \times \Delta \log t} \quad (2.3)$$

Taylor (1942) e Bjerrum (1967) definiram o modelo de fluência das “linhas de tempo” para materiais argilosos (Figura 2.5), no qual existe um sistema de linhas paralelas entre si, representando cada uma delas uma relação entre o índice de vazios e a tensão efetiva para um dado tempo de aplicação de carga, e que permite explicar o comportamento do solo sujeito à aplicação de uma carga temporária (pré-carga).

O estado de tensão inicial do solo é representado por “a”, que ao sofrer uma solitação que aumente o valor da tensão efetiva ($\Delta\sigma_1$) se deforma segundo a linha “abc” (bc-curva de consolidação virgem). Caso se mantenha nesse último ponto (c) sob tensão constante (fluência), o ponto diminui o índice de vazios, descrevendo uma trajetória na vertical, “cd”. No caso em que é aplicada uma sobrecarga temporária, o comportamento do solo é semelhante ao anteriormente apresentado, sendo descrito pela trajetória “abd”. A diferença reside no momento em que é removida a pré-carga, em que após esse instante dá-se uma diminuição da tensão vertical, evoluindo ao longo da linha de expansibilidade (descompressão, linha “de”), originando uma reduzida variação de índice de vazios, correspondente ao ponto “e”. Este processo leva a que o solo apresente características que teria num instante temporal superior – “envelhecimento do solo”- o que faz com que, a partir daí, os assentamentos por fluência sejam menores que os obtidos sem pré-carga.

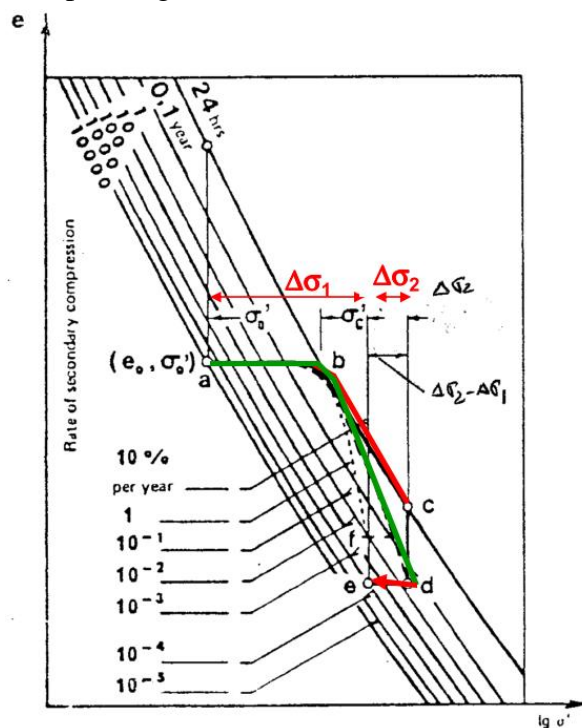


Figura 2.5- Modelo das “linhas de tempo” (Bjerrum, 1967) adaptado.

Alonso et al., (2000) constataram que a aplicação de pré-carga origina a redução do $C_{\alpha e}$. A análise de um caso de um aterro construído utilizando a pré-carga onde são estudados os assentamentos em vários pontos do maciço relativamente ao centro do aterro, permite constatar que após a retirada da pré-carga os assentamentos dão-se de forma bastante uniforme e a um ritmo mais lento, aparecendo oscilações em resposta às pressões intersticiais (Figura 2.6).

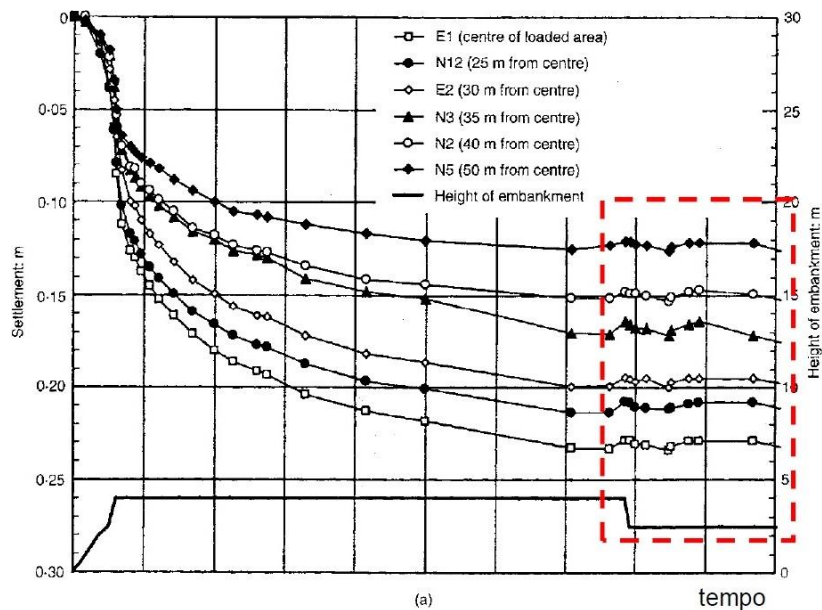


Figura 2.6- Evolução dos assentamentos verticais medidos quando usado a pré-carga (Alonso et al., 2000).

Esta redução de $C_{\alpha e}$ é dependente do tempo aplicação da carga e do grau de sobreconsolidação do solo (OCR). Estes autores também constataram que uma pré-carga de longa duração promove uma redução de $C_{\alpha e}$ mais acentuada que uma de curta duração (Figura 2.7).

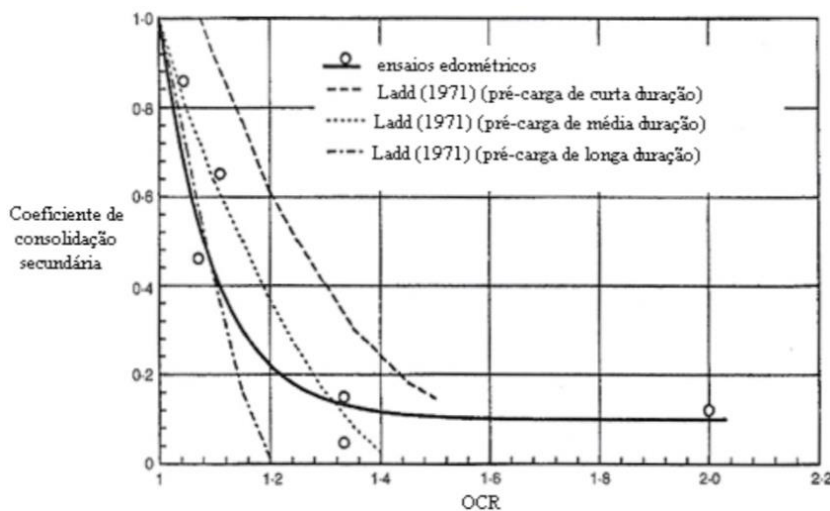


Figura 2.7- Relação do OCR do solo com $C_{\alpha e}$ (Alonso et al., 2000).

O aumento do tempo de atuação ou incremento da pré-carga são fatores que influenciam diretamente o uso do método. O aumento destes pode reduzir, ou mesmo anular, o coeficiente de consolidação secundária, isto porque, usando uma pré-carga de valor mais elevado do que a carga referente à construção da obra, fará com que o solo se encontre num estado sobreconsolidado, sendo $C_{\alpha e}$ menor para solos que se encontrem neste estado face aos solos normalmente consolidados.

Porém, segundo Mesri et al., (1997) o efeito da pré-carga não se mantém benéfico ao longo do tempo. Quando a pré-carga é retirada existe sim uma redução significativa do $C_{\alpha e}$, contudo este valor tende a aumentar com o passar do tempo.

Mira (2008) com base em ensaios edométricos de fluência realizados sobre o solo mole do Baixo Mondego, constatou que existe uma redução dos assentamentos por fluência, proporcionais ao aumento da pré-carga aplicada, em que o 1º nível de pré-carga toma o valor de 35 kPa, e o segundo de 75 kPa, porém este não é um efeito duradouro ao longo do tempo.

Como se observa pela Figura 2.8, verifica-se uma redução dos assentamentos quando é usada a pré-carga de maior valor. Porém, para valores superiores a sensivelmente 5000 min, o uso da pré-carga deixa de fazer sentido uma vez que o valor do coeficiente $C_{\alpha e}$ aumenta de tal forma, que chega a ser superior ao determinado quando não é usado a pré-carga ($C_{\alpha e}=0,16$).

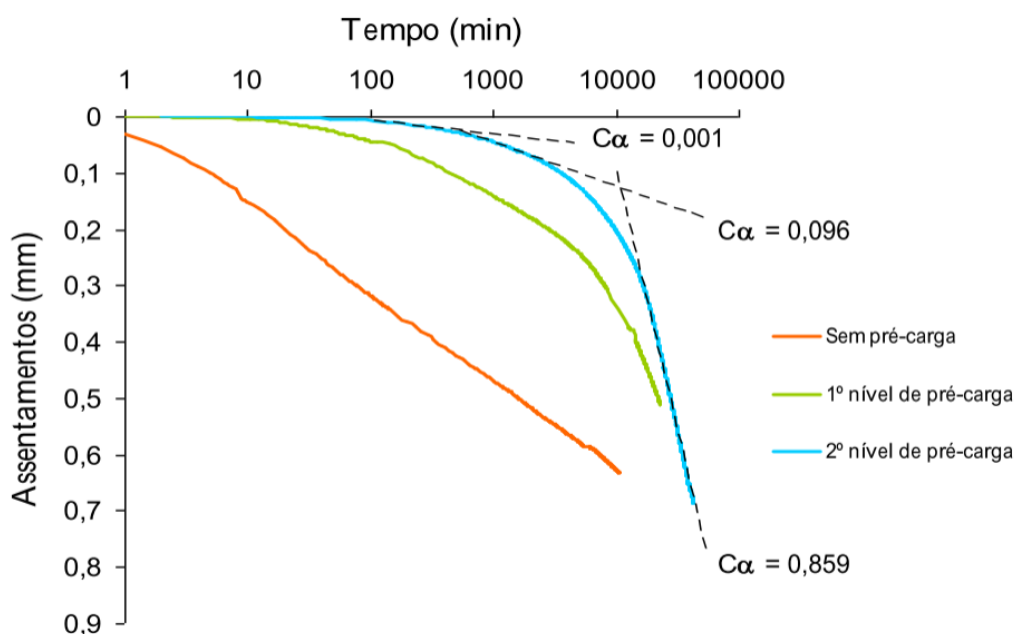


Figura 2.8- Influência do nível de pré-carga nos assentamentos por fluência no solo do Baixo Mondego (Mira,2008).

Além disso, Mira (2008) também realizou ensaios triaxiais nos quais se verificou a mesma tendência de redução da extensão volumétrica como da axial, quando usada a pré-carga (Figura 2.9).

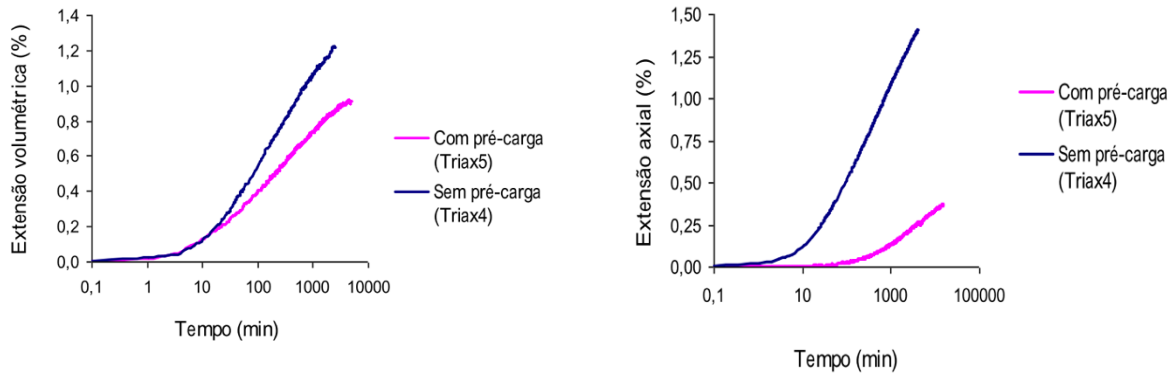


Figura 2.9- Deformações axiais e volumétricas obtidas em ensaios triaxiais de fluência, com e sem recurso a pré-carga no solo mole do Baixo Mondego (Mira, 2008).

Além da redução do coeficiente $C_{\alpha e}$ a utilização desta metodologia apresenta outras vantagens já comprovadas. Lehane e Jardine (2003) mostraram que há um aumento da capacidade de carga de fundações assentes em argila, variando este efeito com o nível de tensão instalado e o OCR, tal como ilustrado na Figura 2.10.

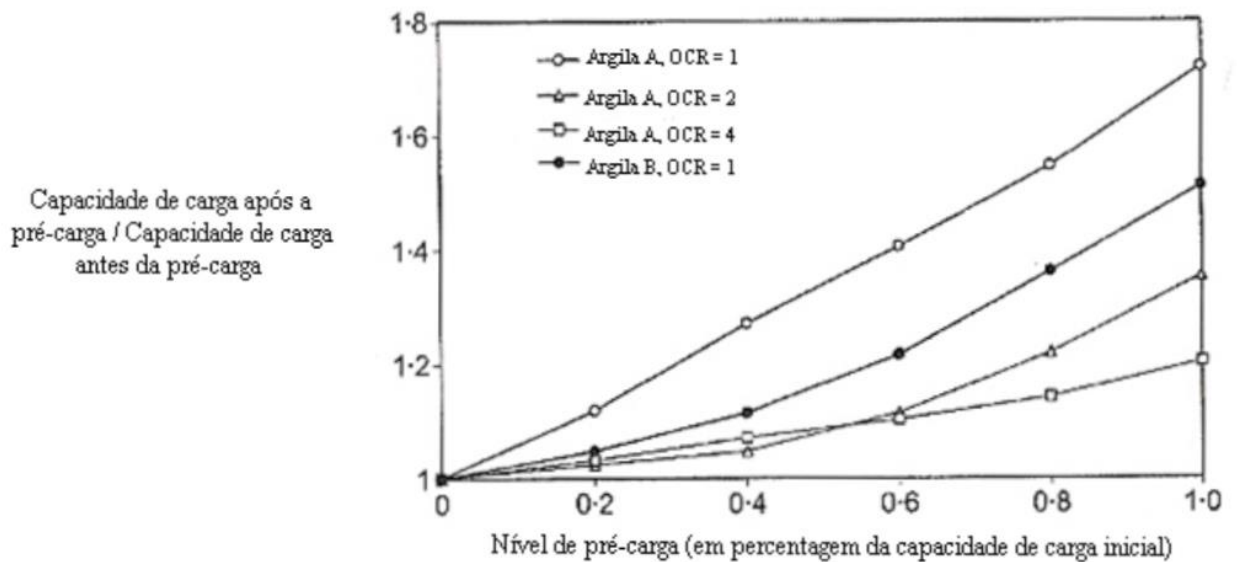


Figura 2.10- Aumento da capacidade de carga não drenada com a aplicação da pré-carga (Lehane e Jardine, 2003).

Mira (2008) através de ensaios triaxiais também verificou que a aplicação de uma pré-carga influencia positivamente a tensão de rotura que o solo pode experimentar. Os ensaios revelaram o aumento da tensão de rotura do solo, aumento esse induzido pela consolidação primária para um nível de tensão muito superior, como se observa na Figura 2.11.

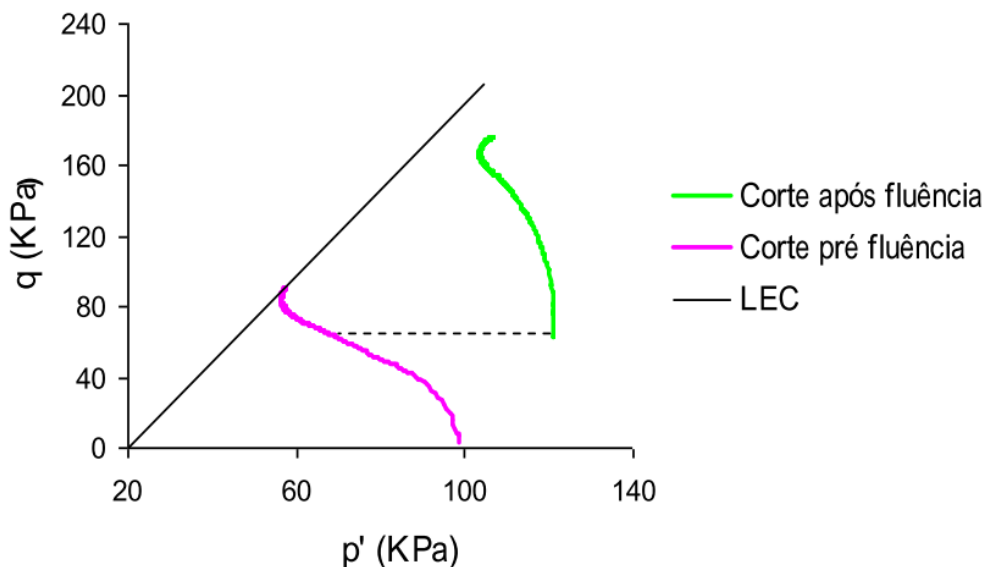


Figura 2.11-Influência da pré-carga na tensão de rotura do solo mole do Baixo Mondego (Mira, 2008).

2.5 Parâmetros que influenciam a fluência

Mesri et al., (1997) estudaram a influência da tensão vertical efetiva aplicada (σ'_v), isto é, realizaram ensaios nos quais sujeitavam a amostra a uma tensão inferior ou igual à tensão de pré-consolidação (σ'_p) e para valores superiores a esta. Verificou-se que os valores mais baixos de C_{ae} são encontrados no ramo de recompressão (isto é, para tensões iguais ou inferiores a σ'_p), enquanto que valores mais elevados de C_{ae} são atingidos para tensões efetivas superiores a σ'_p , onde C_c é máximo, corroborando a proporcionalidade de C_c e C_{ae} . Além disso, perto de σ'_p (ramo de recompressão) o valor de C_c aumenta com o tempo, logo o mesmo acontece com C_{ae} . No ramo de compressão virgem, C_c diminui gradualmente com o incremento da tensão aplicada e C_{ae} decresce ligeiramente ou permanece constante com o tempo, sendo que este decréscimo é provavelmente devido a biodegradação da matéria orgânica em ambiente de laboratório.

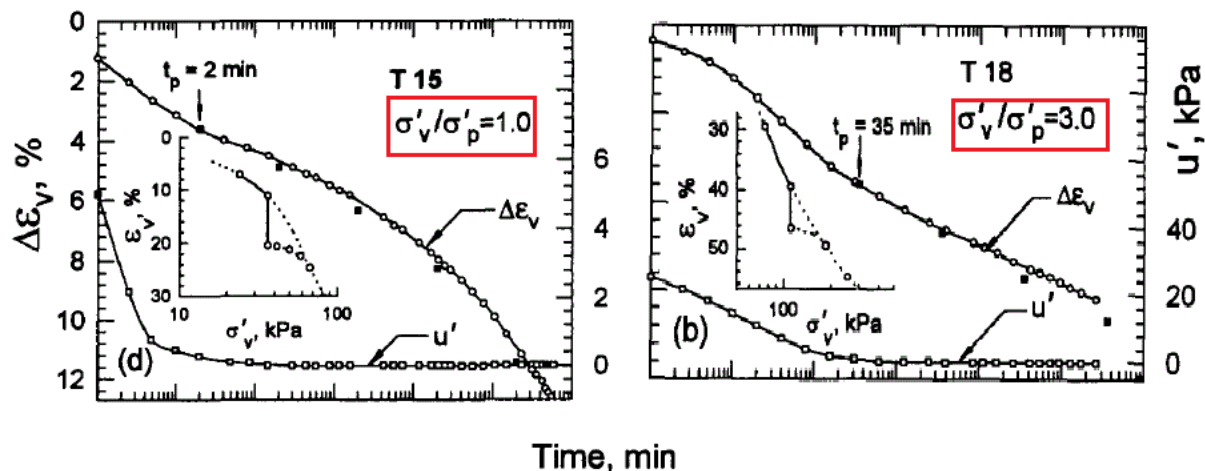


Figura 2.12- Influência da σ'_v para a determinação de C_{ae} (Mesri et al., 1997).

Pela análise da Figura 2.12 constata-se que o valor de C_{ae} tende a aumentar quando $\sigma'_p = \sigma'_v$, sendo que o valor de C_{ae} se mantém constante com o tempo para $\sigma'_v = 3\sigma'_p$. Além disso, são notórias as fases correspondentes à consolidação primária e secundária. De facto, o gráfico $\Delta\varepsilon_v$ - $\log \sigma'_v$ (Figura 2.12) permite verificar o fim da consolidação primária com relativa precisão, dado que a medição da pressão de água nos poros começa a ser constante quando se inicia a fase de fluência, confirmando assim que esta fase evolui devido à natureza viscosa do esqueleto sólido.

Em suma, C_{ae} mantém-se constante, diminui ou aumenta com o tempo caso C_c se mantenha, diminua ou aumente com σ'_v . (Mesri e Vardhanabhuti, 2005).

3 CARACTERIZAÇÃO GEOTÉCNICA DO SOLO

Para uma eficaz e correta compreensão dos resultados obtidos torna-se imprescindível que se faça uma caracterização do solo em questão. Apesar de os parâmetros utilizados na caracterização geotécnica serem comuns aos diferentes tipos de solos, estes como se sabe apresentam algumas particularidades e variabilidade em profundidade.

3.1 Solo mole do Baixo Mondego

O solo em estudo é proveniente do depósito de solos moles do Baixo Mondego, mais precisamente da Quinta da Foja (Maiorca, Figueira da Foz). Situado numa planície aluvial, com uma área de 15 000 ha e um comprimento de 40km, onde a largura não ultrapassa os 4km e onde se pressupõe que exista um volume de aluviões na ordem dos 3 a 4 Mm³ com uma profundidade de 40m (Correia, 2011).

Relativamente ao seu passado geológico, sabe que se trata de um depósito recente, pelo que, de um modo geral, encontra-se num estado normalmente consolidado ou pouco sobreconsolidado, exceto eventualmente na zona superficial sujeita a processos de dessecação (Coelho, 2000).

Em relação à mineralogia constata-se que apesar de o processo de formação se ter mantido relativamente constante ao longo da história, refletindo assim uma uniformidade em profundidade, existem algumas variações granulométricas relevantes devido a variação das condições hidrológicas e, conseqüentemente, da deposição ao longo do tempo (Coelho, 2000).

No que diz respeito à granulometria estes solos são maioritariamente constituídos por silte e argila. Apresentam igualmente matéria orgânica na sua composição, resultante da atividade biológica no período da sua formação, bem como vestígios de organismos vegetais e animais incorporados no solo durante a sua deposição, como fragmentos de raízes com diferentes graus de decomposição, e de conchas de organismos marinhos (Coelho, 2000).

É de salientar que já foram vários os estudos realizados neste solo com particular destaque para os de Coelho (2000) e Correia (2011) de onde se pode retirar:

-Tratando-se de um solo orgânico, as características físicas como o teor em água, peso volúmico e densidade das partículas sólidas, são fortemente influenciáveis observando-se em geral que quanto mais orgânico for o solo, maior será o seu teor em água e menor o seu peso volúmico.

-Constatou-se que o depósito se encontra praticamente saturado, possuindo um grau de saturação de cerca de 100%, revelando um mau comportamento resistente e elevada deformabilidade.

-Em termos granulométricos a silte é a fração dominante, existindo as frações de areia e argila em menor quantidade. Porém, e apesar da reduzida percentagem de argila (cerca de 10 %), o solo apresenta elevada deformabilidade, isto devido à presença da matéria orgânica.

-Destacam-se valores elevados de C_c , C_r e C_s e uma significativa variabilidade em profundidade, que se pode explicar pela composição granulométrica, amplificada pela composição orgânica.

-O valor de C_{ae} cresce com a tensão efetiva até atingir o valor da tensão de pré-consolidação, mantendo-se aproximadamente constante para tensões superiores a esta.

-A evolução de C_{ae} é qualitativamente semelhante à de C_c (declive tangente à curva no ponto correspondente ao da determinação de C_{ae}), sugerindo que a relação proposta por Mesri e Castro (1987) é verificada neste solo. O valor de C_{ae}/C_c obtido por Coelho (2000) define-se num estreito intervalo de 0,0441 a 0,0564, estando de acordo com o valor obtido por Mesri et al., (1997) para a maioria das argilas orgânicas de alta plasticidade ($0,05 \pm 0,01$).

Assim, pode-se constatar que a matéria orgânica surge como um dos componentes com maior influência sobre o comportamento e características do depósito.

3.2 Análise e caracterização do solo em estudo

Como referido o solo em estudo é oriundo da Quinta da Foja, situada no depósito de solos moles do Baixo Mondego a uma profundidade de 2,5 metros. A recolha deu-se com auxílio de uma retroescavadora, seguido do transporte para o laboratório de Geotecnia do DEC-UC.

Posto isto procedeu-se à homogeneização do solo como descrito no capítulo 4, para que não houvesse grande variabilidade nos parâmetros a determinar e se pudesse reconstituir mais fidedignamente as amostras.

Em seguida procede-se à caracterização geotécnica, identificando os índices físicos e as características de identificação do solo.

3.2.1 Índices físicos

Para descrever o estado físico de um solo basta apenas determinar três grandezas que relacionam pesos e volumes dos respectivos componentes do solo (partículas sólidas, ar, água) denominadas de teor em água, peso volúmico ou baridade e a densidade das partículas sólidas.

O teor em água do solo natural é cerca de 80 % tendo sido obtido pela norma NP 84-1965. O valor é relativamente próximo dos valores encontrados em campo por Correia (2011) (80,87%) e Coelho (2000) (81%).

O peso volúmico saturado provém dos resultados do Coelho (2000), e vale $14,8 \text{ KN/m}^3$.

Para a determinação da densidade das partículas sólidas, seguiu-se a norma a NP-83 (1965), em que se relaciona a massa de uma amostra seca e o volume ocupado pelas partículas sólidas, que permitiu determinar o valor de 2,63, valor esse que está de acordo com Correia (2011) e Coelho (2000) que determinaram valores de 2,55 a 2,58, respetivamente.

3.2.2 Características de identificação

Após o estado físico do solo natural estar quantificado, procedeu-se à determinação das características de identificação. Dados como a curva granulométrica, limites de consistência e determinação do teor de matéria orgânica são imprescindíveis para a previsão do comportamento do solo e posterior avaliação de resultados.

3.2.2.1 Curva granulométrica

A composição granulométrica é definida como a distribuição em percentagem ponderal das partículas do solo de acordo com as suas dimensões. A determinação experimental da curva é definida através de dois processos distintos consoante as dimensões das partículas, denominados de peneiração e sedimentação, de acordo com a especificação E 196 (1966). O primeiro consiste em fazer passar o solo por uma série normalizada de peneiros de malha quadrada e de dimensões progressivamente menores, retendo em cada um deles as partículas de dimensões superiores à abertura do peneiro e deixando passar as partículas de dimensões inferiores. Este procedimento acaba no peneiro nº 200 (0,074mm), próximo da separação entre a areia e a silte. De seguida, inicia-se a sedimentação, processo de análise das partículas finas do solo ao longo do tempo, após terem sido sujeitas à ação de um antifloculante e de uma agitação vigorosa de modo a promover a sua individualização. Por fim, é realizada uma medição da densidade e da temperatura da mistura ao longo do tempo, que permite a obtenção da curva granulométrica da Figura 3.1.

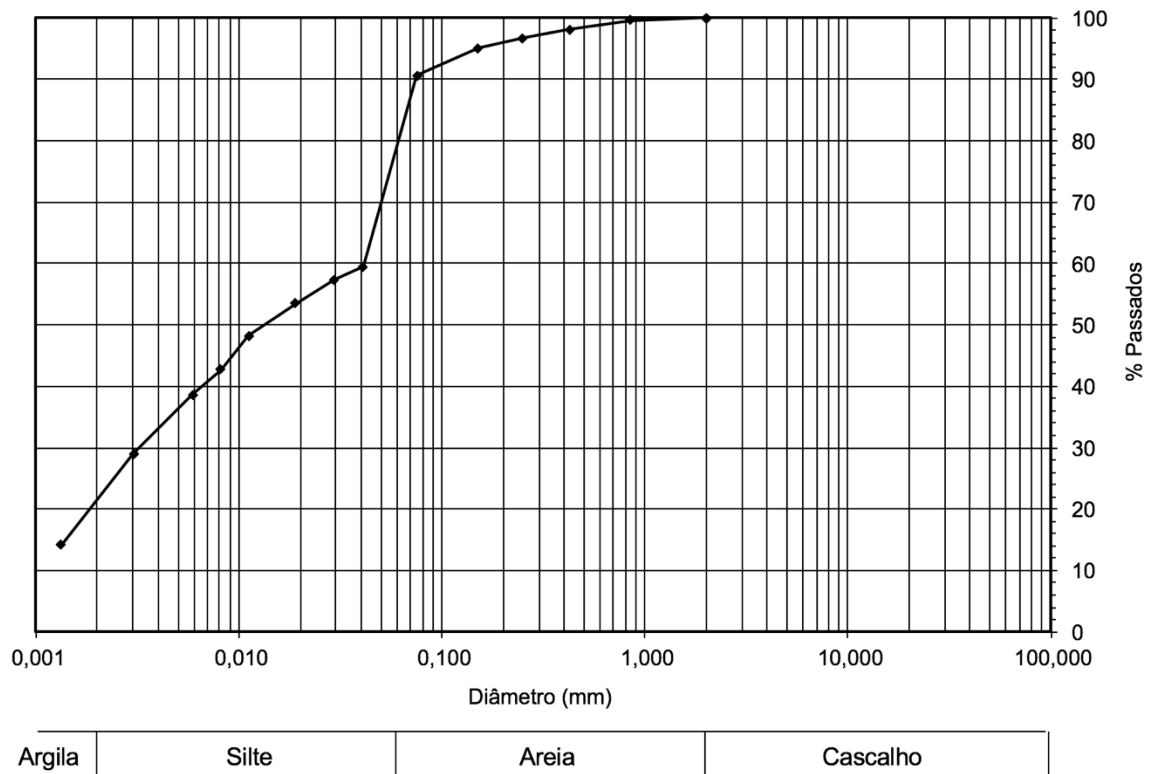


Figura 3.1- Curva granulométrica do solo em estudo.

Constata-se que o solo é constituído maioritariamente por silte (54%), contendo ainda areia (25%) e argila (21%). Os valores obtidos são próximos dos valores estimados por Coelho (2000) que indica a predominância da componente siltosa, com a fração argilosa a variar de 15 a 30% e a arenosa inferior a 35% ao longo da profundidade do depósito.

3.2.2.2 Limites de consistência

A caracterização dos limites de consistência de um solo de fração fina permite avaliar a dependência entre o comportamento do solo e o seu teor em água. Isto é, existem teores em água que estabelecem a fronteira entre os diferentes tipos de comportamento do solo, definidos pelos limites de liquidez (w_l), plasticidade (w_p) e retração (w_s) ordenados por ordem decrescente do teor em água.

O limite de liquidez define o teor em água acima do qual o solo se comporta como um fluído. O limite de plasticidade define a fronteira entre as zonas com comportamento moldável e friável, enquanto que o limite de retração estabelece o teor em água abaixo do qual o solo seca a volume constante.

Por forma a determinar o limite de liquidez e o de plasticidade procedeu-se aos ensaios especificados na norma NP143 (1969). Na determinação do limite de liquidez utilizou-se a Concha de Casagrande, como se mostra na Figura 3.2, tendo-se obtido um valor de 76,2%. No caso do limite de plasticidade obteve-se um valor de 38,4 %, através da rolagem do solo em placa de vidro (Figura 3.3). A diferença entre estes define o índice de plasticidade que assume o valor de 37,8%.

Os resultados obtidos aproximam-se dos valores encontrados por Coelho (2000) e Correia (2011) que obtiveram para o limite de plasticidade 40 e 42,80%, e para o limite de liquidez 77 e 71,03 %, respetivamente.



Figura 3.2- Determinação do w_l .



Figura 3.3- Determinação do w_p .

3.2.2.3 Teor em matéria orgânica

A quantificação deste parâmetro é bastante importante, uma vez que, como já se constatou a matéria orgânica exerce enorme influência sobre as características físicas e de plasticidade do solo, determinando o comportamento mecânico deste.

Para a sua determinação foi usado o método das perdas de ignição, no qual se submeteu uma amostra de solo, previamente pesada, a uma secagem de 24 horas à temperatura de referência de 50°C. Após pesagem, voltou-se a secar a amostra agora a uma temperatura de 400°C (dado que Franklin et al., (1973) concluíram que abaixo dos 400°C parte da matéria orgânica não é eliminada, enquanto que para temperaturas superiores se pode ultrapassar a temperatura crítica de desidratação de alguns minerais) durante o mesmo intervalo de tempo, procedendo-se no final à sua pesagem.

$$OM = \frac{P_s^{50^\circ C} - P_s^{400^\circ C}}{P_s^{50^\circ C} - P_{cápsula}} \quad (3.1)$$

Com base na Equação 3.1, fundamentada na norma BS 1377: 3 (1990), em que $P_s^{50^\circ\text{C}}$ e $P_s^{400^\circ\text{C}}$ significam a massa do solo mais a cápsula após a secagem a 50°C e 400°C , respectivamente, e $P_{\text{cápsula}}$ trata-se da massa da cápsula usada no ensaio, obteve-se um valor de teor em matéria orgânica de 8,3% para o solo natural. O valor obtido está de acordo com os valores encontrados por Coelho (2000) (OM= 8,50%) e por Correia (2011) (OM=7,96%), sendo que este, tal como outros parâmetros do solo, sofre uma variação espacial que se reduz em profundidade.

3.2.3 Classificação do solo

Para aplicações práticas em engenharia é efetuada a classificação de solos pelo Sistema de Classificação Unificada, com base na carta de Casagrande como se pode ver na Figura 3.4. Esta metodologia distingue os solos de acordo com os limites de liquidez e plasticidade bem como com a sua composição granulométrica.

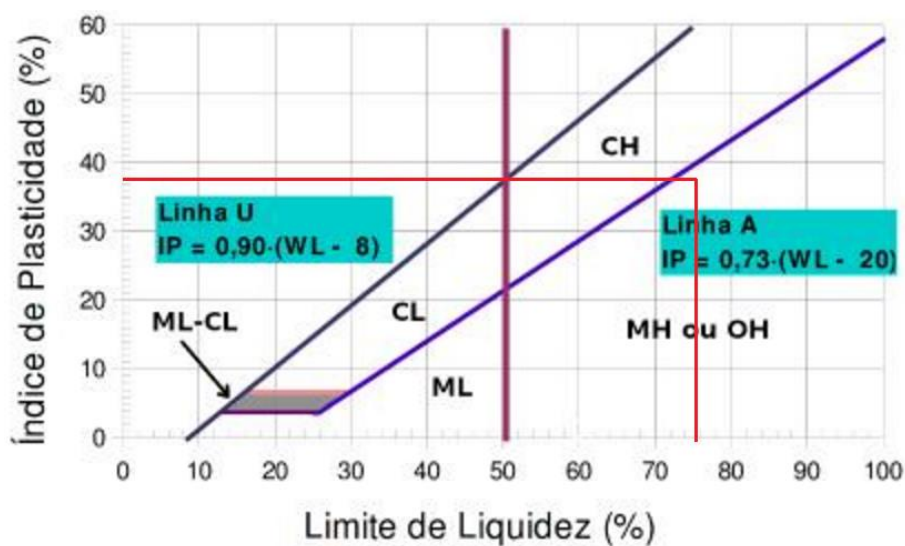


Figura 3.4- Carta de Plasticidade de Casagrande.

Constata-se que o solo se define como OH, ou seja, um silte orgânico, caracterizado por exibir um mau comportamento mecânico.

De acordo com o sistema de classificação dado por Leroueil et al., (1990) (Quadro 3.1) o solo classifica-se como um solo levemente orgânico, OM = 8,3%.

Quadro 3.1- Classificação do solo (LPC).

OM %	Classificação do solo (Sistema do LPC)
< 3	Inorgânico
3 - 10	Levemente orgânico
10 - 30	Moderadamente orgânico
> 30	Muito orgânico

Recorre-se ainda ao triângulo de Feret, de modo a classificar o solo segundo a sua granulometria, sendo classificado como um silte argiloso como se observa na Figura 3.5.

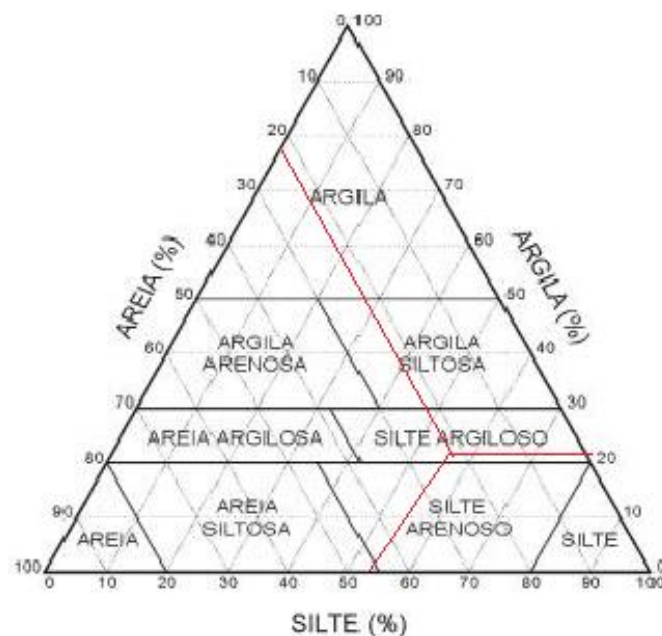


Figura 3.5- Classificação granulométrica do solo segundo o triângulo de Feret.

De seguida, expõem-se alguns valores obtidos de estudos anteriormente feitos bem como os do presente estudo (Quadro 3.2).

Quadro 3.2- Principais propriedades do depósito de solos moles do Baixo Mondego.

Características do Solo		Coelho (2000)	Correia (2011)	Teles (2013)	Presente estudo
Composição Granulométrica	Argila (%)	13 - 30	8 - 12	25	21
	Silte (%)	54 - 73	71	61	54
	Areia (%)	14 - 16	17 - 21	14	25
Peso Volúmico Saturado	γ_{sat} (kN/m ³)	14.80	14.56	-	-
Densidade das Partículas	G	2.58	2.555	2.559	2.63
Teor em Água Natural	w (%)	81	80.87	-	80.15
Índice de Vazios	e	2.1	2.11	-	1.87
Grau de Saturação	S (%)	100	98.10	-	-
Teor em Matéria Orgânica	OM (%)	8.50	7.96	13.05	8.3
Limites de Consistência	w _p (%)	40	42.80	41.9	38.4
	w _L (%)	77	71.03	68	76.2
Grau de Sobreconsolidação	OCR	3.3	3.3	-	-
Índices de Compressibilidade e Recompressibilidade	C _r	0.08	0.065	-	0.18
	C _c	0.63	0.57	-	0.42
Coefficiente de Consolidação	C _{α}	0.006	0.02	-	-

4 PROCEDIMENTO LABORATORIAL

As amostras a ensaiar podem ser classificadas como intactas ou reconstituídas. As primeiras são recolhidas com o auxílio de amostradores, *in situ*, tentando-se preservar ao máximo a estrutura dos solos no estado natural, o que logicamente aproxima os resultados laboratoriais às situações reais. Contudo Coelho (2000) referiu que nos solos da Quinta da Foja, devido à sua enorme deformabilidade, a estrutura do solo é muito difícil de manter, mesmo usando amostradores de alta qualidade. Além disso, dado que o solo em questão exhibe expressiva variabilidade, é necessário ter um cuidado acrescido na extrapolação dos resultados.

No presente trabalho utilizaram-se amostras reconstituídas, mantendo a composição mineralógica, orgânica e granulométrica do solo original, mas isento das heterogeneidades presentes no solo *in-situ*, o que permite uma melhor interpretação dos resultados.

Assim sendo, torna-se imperativo que se descreva o processo da reconstituição das amostras a utilizar nos ensaios edométricos realizados.

4.1 Preparação das amostras

O solo natural manteve-se armazenado numa caixa plástica e protegido da perda de água com filme de plástico isolante no interior da câmara termo-higrométrica do laboratório à temperatura de $20 \pm 2^\circ\text{C}$ e humidade relativa de $95 \pm 5\%$, já isento de qualquer fragmento de conchas de organismos marinhos, pois parte dele já tinha sido utilizado em trabalhos anteriores.

Usaram-se cerca de 50 kg desse solo, garantido a correta homogeneização tanto por processos manuais como mecânicos, até que o solo apresentasse um aspeto fino e homogéneo, de modo a que a classificação feita no capítulo 3 fosse o mais fidedigna possível (Figura 4.1). É de referir que sempre que se usava o solo era executado uma mistura manual, por forma a eliminar a eventual heterogeneidade introduzida pela acumulação da água à superfície do solo. Além disso, o valor do teor em água foi diversas vezes controlado por forma a se garantir o valor medido inicialmente (cerca de 80%).

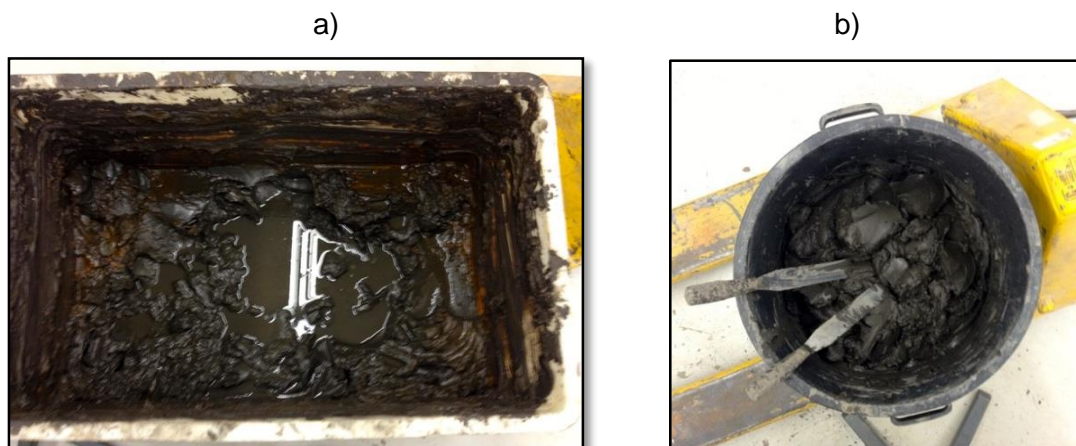


Figura 4.1- Aspeto do solo antes a) e depois b) da homogeneização.

Com o solo nas condições pretendidas, procedeu-se à preparação dos tubos para posteriormente ser feita a consolidação, de modo a simular um estado de tensão inicial correspondente a 5 metros de profundidade, o que de acordo com o peso volúmico saturado obtido por Coelho (2000) de valor $14,8 \text{ kN/m}^3$, perfaz uma tensão efetiva vertical de aproximadamente 24 kPa.

Uma vez que o presente estudo pretende determinar a influência da matéria orgânica no método da pré-carga, é de real interesse explicar o processo usado para determinar as percentagens de matéria orgânica de 1,2, 4,1, 6,4 e 8,3%, sendo esta última referente ao solo natural.

Para tal foi necessário reduzir a pó, através do pilão e almofariz, cerca de 12 kg de solo natural previamente seco à temperatura de 400°C -solo “queimado”- (Figura 4.2), possuindo um teor de matéria orgânica de cerca de 1,2%.

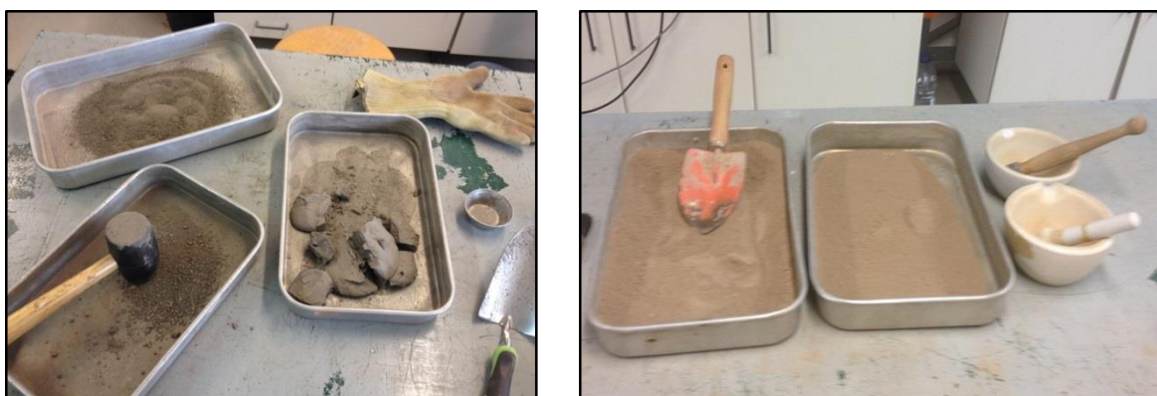


Figura 4.2- Redução a “pó” do solo queimado a 400°C .

Assim, tendo por base o solo natural e o “solo queimado” foi possível obter mediante a mistura destes dois solos, materiais com teores em matéria orgânica de 4,1 e 6,4 %, usando as seguintes proporções em massa: 50/50 e 73/27 (Figura 4.3).

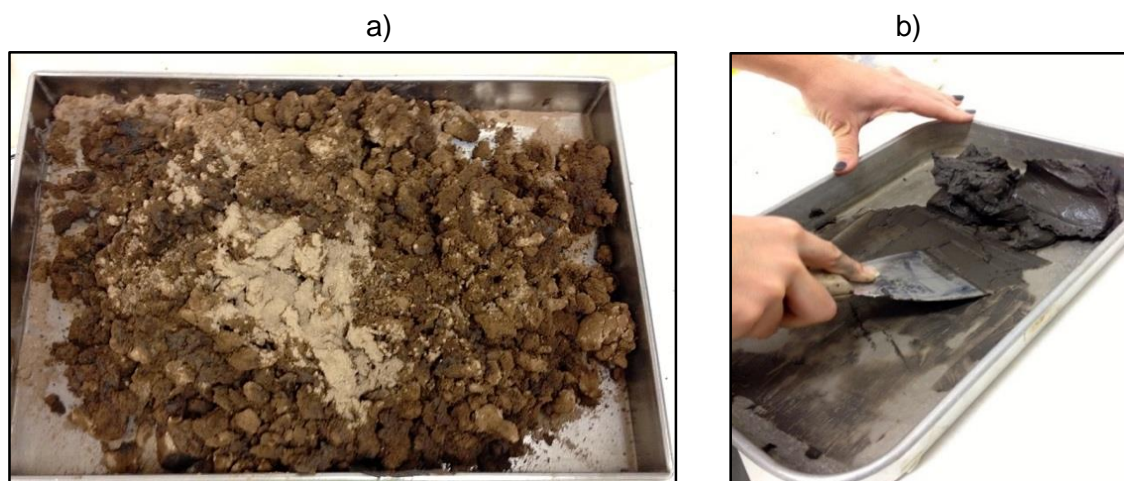


Figura 4.3- Mistura com OM=4,1% antes a) e depois b) da homogeneização.

Com as diferentes percentagens do teor em matéria orgânica preparadas, foram calculados os limites de liquidez (w_l) e de plasticidade (w_p) para estes solos, de forma a poder dosear a quantidade de água a adicionar a cada mistura mantendo o índice de liquidez (IL) igual a 1,09 para todas as amostras, através da equação 3.1, em que IP refere-se ao índice de plasticidade.

$$w = IP \times IL + w_p \quad (4.1)$$

Os valores referentes a cada amostra podem ser observados no Quadro 4.1.

Quadro 4.1- Características dos 4 solos com diferentes %OM.

	Matéria orgânica presente no solo (%)			
	8,3	6,4	4,1	1,2
Limite de Liquidez	76,2	62,6	57,5	41
Limite de Plasticidade	38,4	45,2	40,3	34,0
Índice de Plasticidade	37,8	17,4	17,2	7,0
Teor em água (%)	79,6	64,1	59,0	41,6
Índice de Liquidez	1,09	-	-	-
Índice de Liquidez pretendido	-	1,09	1,09	1,09

É de referir que se prepararam 3 tubos para cada diferente percentagem de matéria orgânica, perfazendo um total de 12 tubos, com 200 mm de altura e 106mm de diâmetro.

Posto isto procedeu-se a preparação dos tubos de PVC seguindo a sequência:

- Colocação de vaselina no interior do tubo, para reduzir o atrito lateral entre as paredes do tubo e o solo, facilitando assim a sua extração.
- A base do tubo foi tapada com fita adesiva, onde com o auxílio de uma tesoura se fizeram pequenos furos. De seguida aplicaram-se os sistemas de drenagem com a colocação do geotêxtil e papel de filtro, respetivamente, embebidos em água antes da sua aplicação (Figura 4.4).
- Enchimento do tubo com o tipo de solo pretendido, tendo especial atenção em remover as bolhas de ar que possam ficar no seu interior com a ajuda de uma vareta. Este enchimento foi feito de forma gradual por camadas, em que no final de cada uma se deram algumas pancadas por forma a eliminar o ar presente nos vazios do solo.
- Submersão dos tubos amostradores num tanque com água de forma a promover a saturação da amostra (Figura 4.4).
- Colocação de uma massa, por forma a aplicar uma tensão vertical efetiva de 24 kPa. Durante este processo de consolidação foram registadas duas leituras por dia, por forma a verificar quando é que se mantinham estáveis, ou seja, quando acabava a consolidação primária.
- Após o término da consolidação primária procedeu-se à remoção da massa e à extração dos tubos de PVC do local onde se encontravam a consolidar, completamente saturados. Devidamente etiquetados colocaram-se na câmara termo-higrométrica até serem utilizados para os ensaios edométricos a realizar.



Figura 4.4- Algumas das etapas respeitantes à reconstituição das amostras.

4.2 Ensaios efetuados

4.2.1 Procedimento do ensaio

Ao longo do trabalho laboratorial foram realizados 6 ensaios edométricos para cada percentagem de matéria orgânica, perfazendo um total de 24 ensaios, todos realizados de forma idêntica regendo-se pela norma BS 1377:5 (1990). Os ensaios foram realizados sobre amostras de 70 e 50 mm, em edométricos clássicos e de fluência (Figura 4.5), com sistema de carregamento por massas colocadas num braço de carga multiplicativo de 11,04 no caso dos edométricos clássicos e com relação de 1 para 1 nos edométricos de fluência.

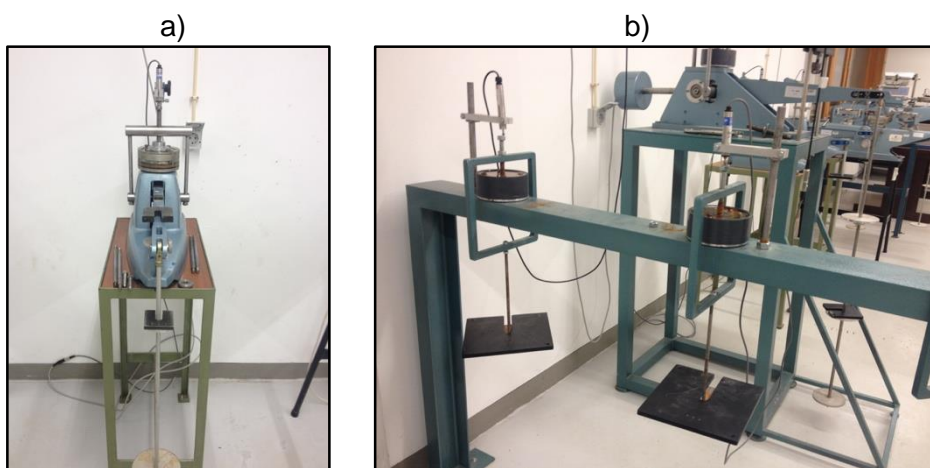


Figura 4.5- Edométrico clássico a) e de fluência b).

No que diz respeito à preparação da amostra, após extração do tubo em PVC, cravou-se o anel edométrico na amostra reconstituída (Figura 4.6) preparada conforme a descrição na secção 4.1. De seguida, retirou-se o excesso de solo e retificaram-se as faces da amostra, criando uma superfície completamente lisa e sem bolhas de ar, como se observa na Figura 4.7.

Note-se que a diferença de cor das amostras, indica a presença de matéria orgânica, sendo a Figura 4.6 referente a uma amostra de solo natural (OM=8,3%) e a Figura 4.7 a uma amostra de solo queimado (OM=1,2%).



Figura 4.6 - Cravação do anel edométrico na amostra.



Figura 4.7- Amostra devidamente preparada para o ensaio edométrico.

Posto isto, a amostra foi colocada na célula de consolidação, entre duas pedras porosas, assegurando a drenagem do solo tanto pelo topo como pela base. Além disso, houve o cuidado de colocar papel de filtro entre a amostra e as pedras porosas, de modo a assegurar que não havia contaminação da pedra porosa.

Após a colocação do conjunto, anel edométrico mais amostra, na célula do edométrico e alguns ajustes do mesmo, procede-se a inundação da amostra para que esta se encontre completamente saturada (Figura 4.8).



Figura 4.8 - Célula de consolidação preenchida por água (saturação da amostra).



Figura 4.9- Aspeto da água presente na célula de consolidação no final do ensaio.

O aspeto da água presente na célula de consolidação no final do ensaio pode ser observado na Figura 4.9. Presenciou-se que quanto maior era o teor de matéria orgânica no solo, mais a água apresentava um tom acastanhado e “sujo”.

O carregamento da amostra começou com tensões verticais muito baixas, da ordem dos 8 kPa, sendo levado até ao máximo de 600 kPa nos edómetros de fluência e até aos 900 kPa nos edómetros clássicos. A sequência do carregamento foi efetuada de forma que o valor da tensão no escalão de carga seguinte fosse praticamente o dobro do anterior. A fase de descarga final foi efetuada em 2 níveis.

No que diz respeito ao tempo de atuação dos escalões de carga e descarga, embora a norma refira as 24 horas, este trata-se de um período de tempo bastante alargado face ao término da consolidação primária, pelo que cada escalão de carga foi realizado em intervalos de hora em hora. Note-se que a utilização deste tempo foi verificada num ensaio-teste (E0), por forma a avaliar se este tempo era suficiente para que ocorresse a consolidação primária.

Ao longo do ensaio foram medidas as deformações verticais por um sistema automático de aquisição de leituras, que posteriormente se converteram em deslocamentos mediante a aplicação de uma calibração prévia. As leituras eram feitas de 2 em 2 segundos, nos primeiros 5 minutos, sendo posteriormente alargado o intervalo para 30 segundos nos próximos 8 minutos e depois de 5 em 5 minutos até perfazer a uma hora. No caso da fluência as leituras eram retiradas de 30 em 30 minutos durante 14 dias.

4.2.2 Descrição dos ensaios

Os ensaios executados dividem-se em dois tipos. Numa primeira fase realizaram-se 4 ensaios edométricos clássicos, cada um deles para as diferentes percentagens de matéria orgânica em análise. Estes ensaios tiveram como principal objetivo avaliar a compressibilidade dos solos e determinar o tempo necessário para ocorrer a consolidação primária do nível de tensão em estudo (100 kPa), ou seja, a tensão efetiva vertical atuante a 5m de profundidade e induzida pela construção de um aterro fictício com 3,8 metros de altura.

Após conhecer esse tempo, foram realizados ensaios de fluência para os solos com diferentes percentagens de matéria orgânica (1,2;4,1;6,4;8,3%). Dado que o caso em estudo incide na influência da pré-carga, analisaram-se 2 níveis diferentes de pré-carga (25 kPa e 50kPa) e outro sem pré-carga. Estes casos de estudo, referem-se à construção do aterro com auxílio da pré-carga com altura de 1,25 e 2,25 metros, e à construção do aterro sem recurso à metodologia referida, respetivamente. É de referir que os ensaios efetuados com pré-carga foram realizados em duplicado, por forma a garantir a fiabilidade dos resultados obtidos. O Quadro 4.2 sintetiza a informação dita anteriormente.

Quadro 4.2- Síntese dos ensaios efetuados.

Nº ensaio	Tipo	OM (%)	Duração dos Escalões de carga	Informações sobre o ensaio	Tempo de aplicação da pré-carga(min)	Nº provetes ensaiados
E0	Clássico	8,3	24h	Avaliação da Consolidação e Compressibilidade do solo	-	5
E1		1,2				
E2		4,1				
E3		6,4				
E4		8,3				
E5	Fluência sem pré-carga	1,2	-	Avaliação da fase de fluência do solo quando não é aplicada pré-carga.	-	4
E6		4,1				
E7		6,4				
E8		8,3				
E9,10	Fluência com pré-carga 25 KPa	1,2	Todos os escalões carregados de hora em hora exceto o de 100 KPa, que permanece durante 14 dias	Simula-se a construção de aterro com uma camada de 1.25 m de pré-carga, sendo que esta só atua durante o tempo necessário para que ocorra a consolidação primária referente à pré-carga	4.5	8
E11,12		4,1			17	
E13,14		6,4			22	
E15,16		8,3			60	
E17,18	Fluência com pré-carga 50 KPa	1,2	-	Simula-se a construção de aterro com uma camada de 2.5m m de pré-carga, sendo que esta só atua durante o tempo necessário para que ocorra a consolidação primária referente à pré-carga	4.5	8
E19,20		4,1			17	
E21,22		6,4			22	
E23,24		8,3			60	

5 ANÁLISE DE RESULTADOS

5.1 Introdução

No presente capítulo são expostos e analisados os resultados obtidos em ensaios edométricos realizados em solos com diferentes percentagens de matéria orgânica. Numa primeira fase serão averiguados os resultados do ensaio clássico, por forma a determinar os parâmetros de compressibilidade dos solos em estudo.

Posteriormente, analisa-se o comportamento dos solos na fase de fluência, para uma tensão vertical efetiva de 100 kPa, onde se pretende estudar o efeito da aplicação da pré-carga no comportamento dos solos, mais concretamente, a eficiência que esta metodologia tem sobre o coeficiente de consolidação secundária (C_{sc}) para diferentes percentagens de teor em matéria orgânica e níveis de tensão.

5.2 Ensaio clássico

Este ensaio fornece-nos um parâmetro essencial que se encontra relacionado com as deformações que o solo apresenta quando lhe é aplicada uma carga, denominado de índice de vazios (e). Fazendo uso da hipótese de confinamento lateral da amostra (deformações unicamente verticais), estabelece-se a relação entre a variação de altura (Δh) e o índice de vazios (Δe) da amostra:

$$\Delta e = \frac{\Delta h \times (1 + e_0)}{h_0} \quad (5.1)$$

Posto isto, é possível representar a compressibilidade dos solos em estudo através da variação do seu índice de vazios com o logaritmo da tensão efetiva aplicada, como se observa na Figura 5.1. Verifica-se que o solo com maior índice de vazios inicial (e_0) é o solo natural (OM=8.3%), com cerca de 1.8, e que à medida que a presença da matéria orgânica diminui existe uma redução de índice de vazios. Além disso é possível constatar que o solo natural é aquele que sofre maior variação do índice de vazios para a mesma variação de tensão, pelo que é inquestionável a influência que a matéria orgânica tem sobre as características de deformabilidade dos solos.

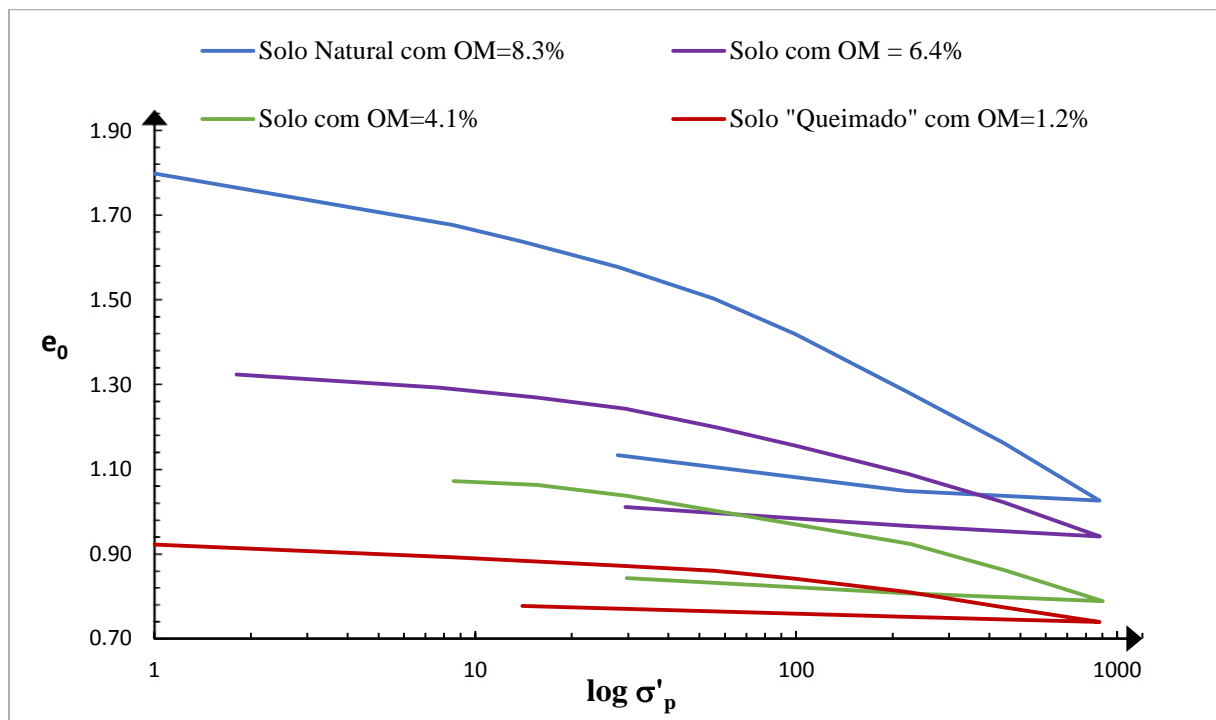


Figura 5.1- Comparação de curvas e - \log - σ'_v para os solos em estudo.

Como Coelho (2000) evidenciou, uma das propriedades físicas mais influenciadas pela presença da matéria orgânica é o teor em água, que é a principal responsável pela redução do índice de vazios, pois à medida que o solo é solicitado a água presente nos vazios começa a ser “expulsa”, processo esse que dá origem aos assentamentos por consolidação primária, ou seja, uma maior quantidade de matéria orgânica presente no solo está associada a um maior teor em água, e conseqüentemente, a uma maior variação do índice de vazios.

Torna-se perceptível que existem três troços de diferentes declives para cada ensaio (Figura 5.1), visíveis quando a tensão efetiva é representada em escala logarítmica, pois nestas condições os ramos de carga/descarga mostram um comportamento aproximadamente linear. Estes definem-se como o ramo de recompressão, ramo virgem e ramo de descarga final, sendo que este último não tem qualquer interesse para o caso em estudo. O ramo de recompressão trata-se de ramo que reproduz o comportamento no troço em que as tensões efetivas aplicadas são inferiores a σ'_p , enquanto que o ramo de compressão virgem relaciona o índice de vazios com tensões efetivas verticais que, até então, ainda não tinham sido “experimentadas” pelo solo. Assim sendo, o ramo de recompressão estende-se aproximadamente até à tensão de pré-consolidação do solo (24 kPa), sendo que para valores de tensão efetiva vertical superiores trata-se do ramo de compressão virgem.

Com base nestes dois declives, é possível determinar o valor do índice de compressibilidade do solo (ramo virgem), C_c , e o índice de recompressibilidade (ramo de recompressão), C_r . A Figura 5.2 apresenta a variação destes dois índices com o teor em matéria orgânica. Em geral, verifica-se uma tendência crescente dos valores de C_c e C_r com a presença da matéria orgânica, sendo que no caso das percentagens inferiores a 8,3 este acréscimo é mais reduzido. A razão C_r/C_c varia entre 0,33 a 0,44, tendo como valor médio 0,39. Este valor é maior do que o usual 0,1 a 0,2 justificado pelo fato dos solos não terem história, ou seja, estes solos não apresentam estrutura induzida pelo envelhecimento.

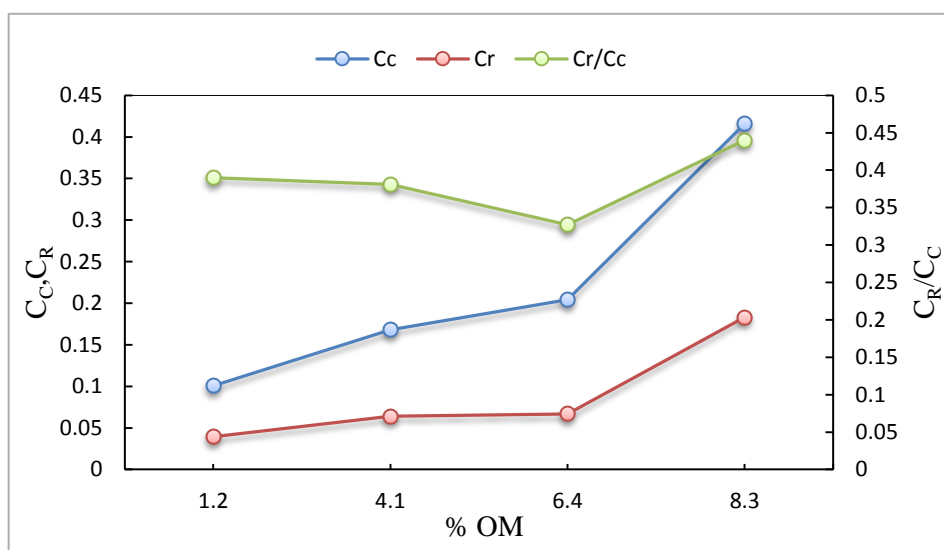


Figura 5.2- Variação de C_c , C_r e C_r/C_c em função da %OM.

O valor de C_c , para o solo natural (OM = 8,3%) é igual a 0,42, sendo distinto do valor obtido por Coelho (2000) que usou amostras intatas ($C_c=0,65$). O valor obtido por Correia (2011) para amostras reconstituídas é dado por 0,55. No caso de C_r , Coelho (2000) obteve o valor por intermédio de uma descarga, pois optou por não calcular o C_r na primeira carga, devido a significativos efeitos da perturbação das amostras nessa zona, pelo que os valores são ligeiramente diferentes. No presente estudo o valor de C_r é de 0,18 enquanto que o valor obtido por Coelho (2000) foi 0,08.

Uma vez que se pretende estudar o fenómeno da fluência para a tensão de 100 kPa, optou-se por calcular o valor do coeficiente de consolidação vertical (c_v), e relacioná-lo com o índice de vazios iniciais para esse escalão de carga.

Para a determinação do valor de c_v utilizou-se o método de Casagrande, para o qual é necessário obter o valor do tempo correspondente a 50% de consolidação (t_{50}), processo ilustrado na Figura 5.3. Assim, através da expressão 5.2, para $T_v = 0,196$ (correspondente a 50% da consolidação)

e considerando d o caminho máximo de drenagem da amostra (igual a metade da espessura da amostra, pois a drenagem é feita pelo topo e base) obteve-se o valor de $1,01 \text{ m}^2/\text{ano}$ para o caso do solo natural com $\text{OM}=8,3\%$.

$$c_v = \frac{T_v \times d^2}{t_{50}} \quad (5.2)$$

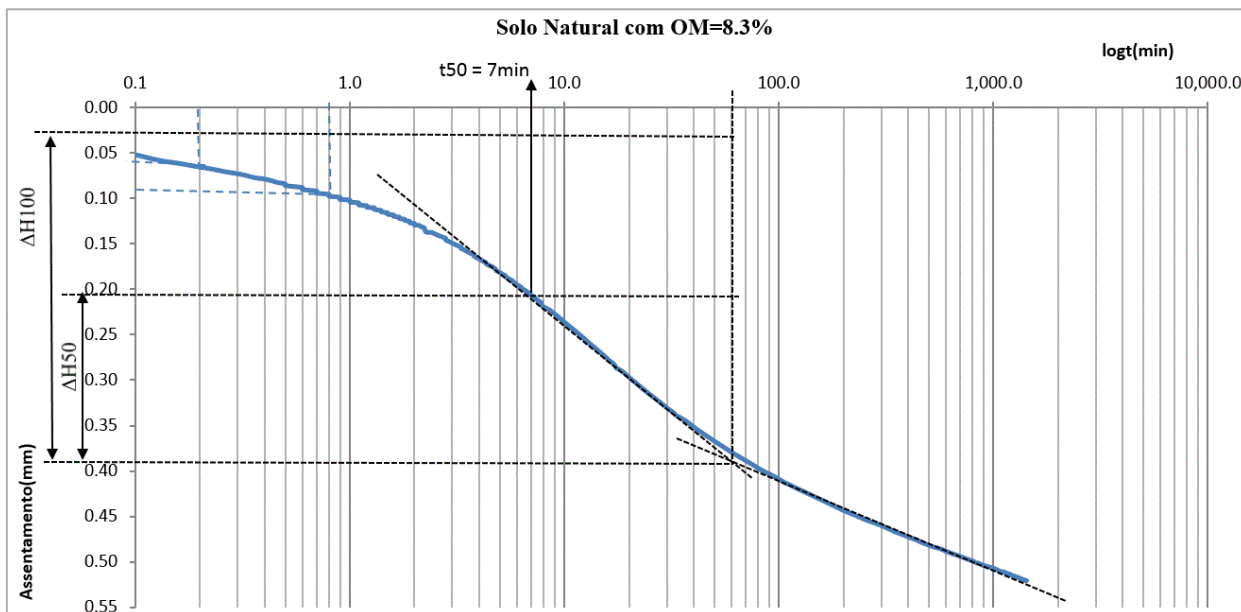


Figura 5.3- Aplicação do método de Casagrande.

A evolução de c_v e do índice de vazios inicial do escalão de carga referente à tensão efetiva vertical de 100 kPa em função do teor em matéria orgânica é apresentada na Figura 5.4.

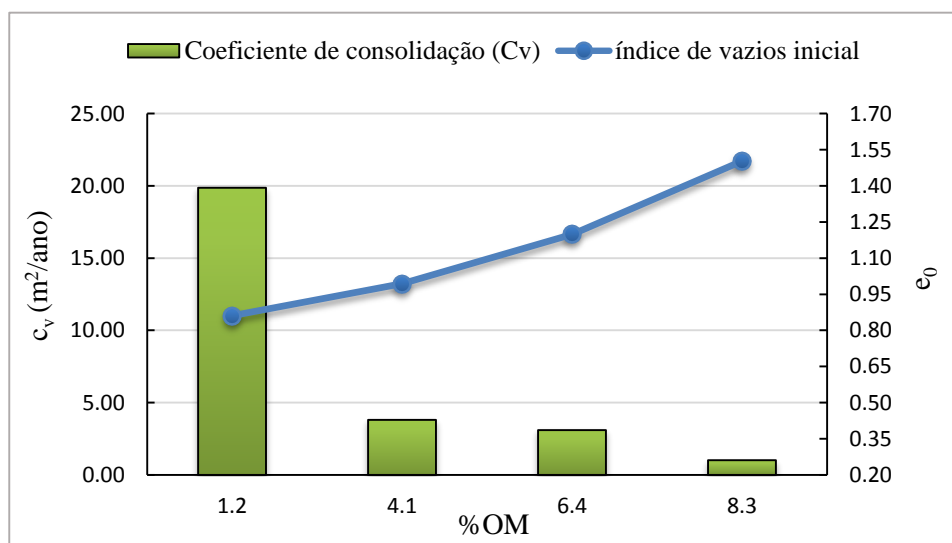


Figura 5.4- Variação do e_0 e do c_v com a %OM.

Como se esperava existe uma relação inversamente proporcional entre a percentagem de matéria orgânica e o valor de c_v uma vez que este toma o valor máximo para o solo com menor quantidade de matéria orgânica, facto que se traduz no aumento da velocidade de consolidação. Pelo contrário, quanto maior for a quantidade de OM presente no solo menor é o coeficiente de consolidação do solo, e consequentemente, mais lento é o processo de expulsão da água dos poros e rearranjo das partículas por consolidação.

5.3 Ensaio de fluência

Analisada a compressibilidade dos solos em estudo, segue-se a análise do comportamento do solo em fluência quando submetido à atuação de uma pré-carga para dois níveis diferentes de tensão, confrontando-se, em paralelo, os resultados obtidos com a situação em que não se aplica pré-carga.

5.3.1 Sem pré-carga

Os ensaios de fluência sem pré-carga consistem em submeter a amostra a uma tensão de 100 kPa, a qual se deixa em fluência durante 14 dias, de modo a observar o desenrolar dos assentamentos por consolidação secundária. Estes ensaios visam reproduzir o comportamento do solo à profundidade de 5 metros, devido à atuação de um aterro com 3,8m de altura ($\gamma = 20 \text{ kN/m}^3$).

Os resultados obtidos corroboram os de Mesri e Vardhanabhuti (2005), pois verifica-se que C_{ae} se mantém constante ao longo do tempo, logo os assentamentos por consolidação secundária dão-se indefinidamente ao longo do tempo, os quais a partir de certo tempo tendem a estabilizar como se observa nas Figuras 5.5 e 5.6.

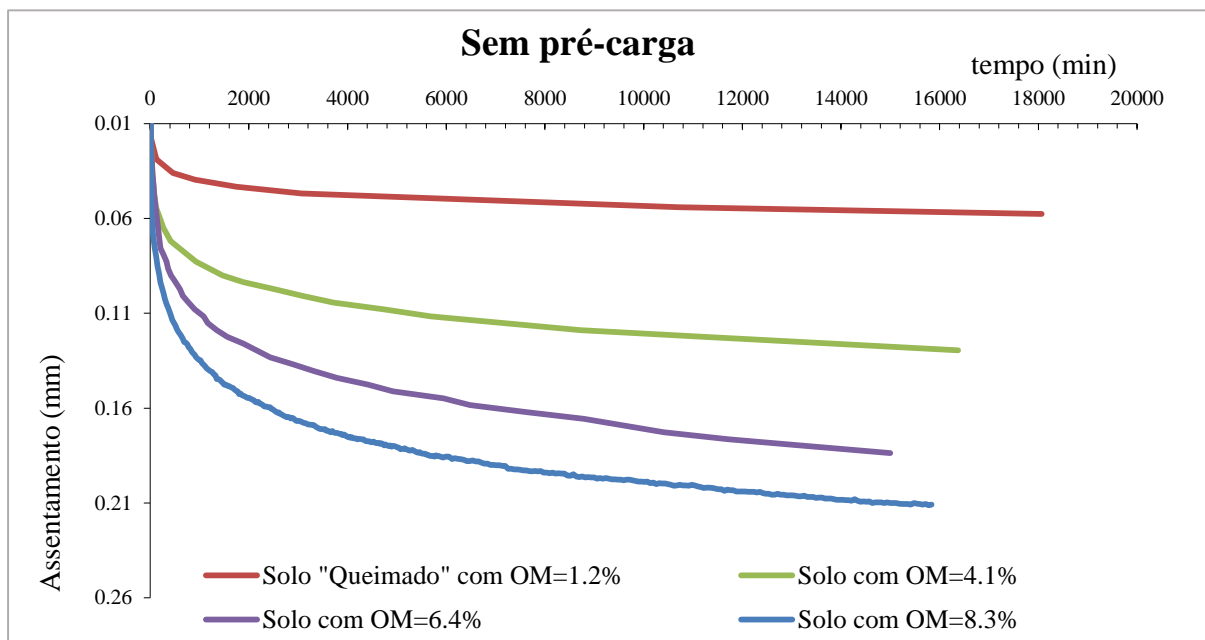


Figura 5.5- Variação dos assentamentos por fluência ao longo do tempo sem pré-carga.

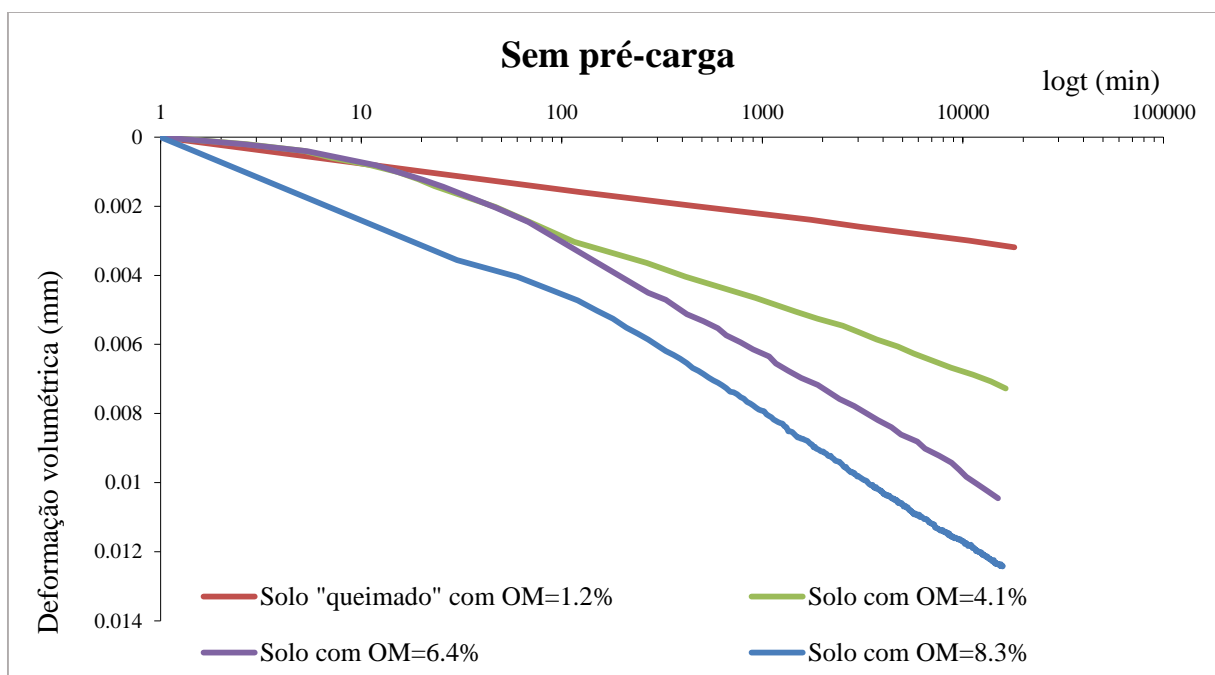


Figura 5.6- Variação da deformação volumétrica com o logaritmo do tempo.

Como expectável, a presença da matéria orgânica influencia a grandeza dos assentamentos por fluência ocorridos, verificando-se que quanto maior a quantidade desta no solo, maior o valor de C_{ae} , e conseqüentemente, maior magnitude dos assentamentos por fluência. Os valores obtidos para C_{ae} encontram-se resumidos no Quadro 5.1.

Quadro 5.1- Valores de C_{ae} obtidos sem pré-carga.

OM (%)	1.2	4.1	6.4	8.3
C_{ae}	0.00138	0.00403	0.00818	0.00926

Os assentamentos secundários resultam da fluência do esqueleto sólido, motivada pela natureza viscosa das partículas constituintes do solo, ou seja, existe um rearranjo das partículas para posições de equilíbrio mais estáveis do que aquelas que resultaram da consolidação primária, sendo estes rearranjos mais notórios em solos com maior teor de matéria orgânica, daí os valores mais elevados para estes solos. Os resultados levam a supor que a matéria orgânica lubrifica as partículas de solo, facilitando o escorregamento de umas em relação às outras, o que se traduz no aumento das deformações por fluência.

5.3.2 Influência da pré-carga

Neste item analisam-se os resultados dos ensaios de fluência com pré-carga, para níveis de tensão de 25 kPa e 50 kPa, que correspondem à construção de uma camada de aterro suplementar ($\gamma = 20 \text{ kN/m}^3$) com 1,25m e 2,5m de altura sobre o aterro final (com 3.8 m de altura).

O ensaio rege-se da mesma forma que o tradicional, ou seja, através de incrementos de carga sobre a amostra. No escalão de carga correspondente a simulação da pré-carga em conjunto com o aterro final ($\sigma'_v=125 \text{ kPa}$ ou $\sigma'_v=150 \text{ kPa}$), a pré-carga atua apenas durante o tempo em que decorre a consolidação primária do solo, determinado através do método de Casagrande (Quadro 4.1). Terminada esta fase, retira-se a pré-carga e deixa-se a amostra sujeita à tensão efetiva vertical de 100 kPa (que corresponde ao aterro final), durante 14 dias (tempo de fluência).

Estes ensaios foram efetuados em duplicado, por forma a garantir a reprodutibilidade dos resultados.

5.3.2.1 Pré-carga de 25 kPa

Pela análise da Figura 5.7, verifica-se que a forma da curva que descreve os assentamentos ao longo do tempo com a aplicação da pré-carga de 25 kPa, adquire uma forma diferente da Figura 5.6, podendo ser subdividida em três declives distintos. Imediatamente após a remoção da pré-carga, a evolução no tempo das deformações por fluência começa por ser muito ligeira, sem expressão significativa. Com o desenrolar do tempo, verifica-se que C_{ae} tem uma evolução crescente

Dado que C_{ae} não se mantém constante ao longo do tempo, optou-se por considerar 2 intervalos de tempo compreendidos, aproximadamente, entre 100-1000min e entre 5000 até ao final do ensaio, correspondendo ao cálculo de C_{ae1} e C_{ae2} , respetivamente. Na Figura 5.7 encontram-se representados C_{ae1} e C_{ae2} para o caso do Solo Natural com OM=8,3%.

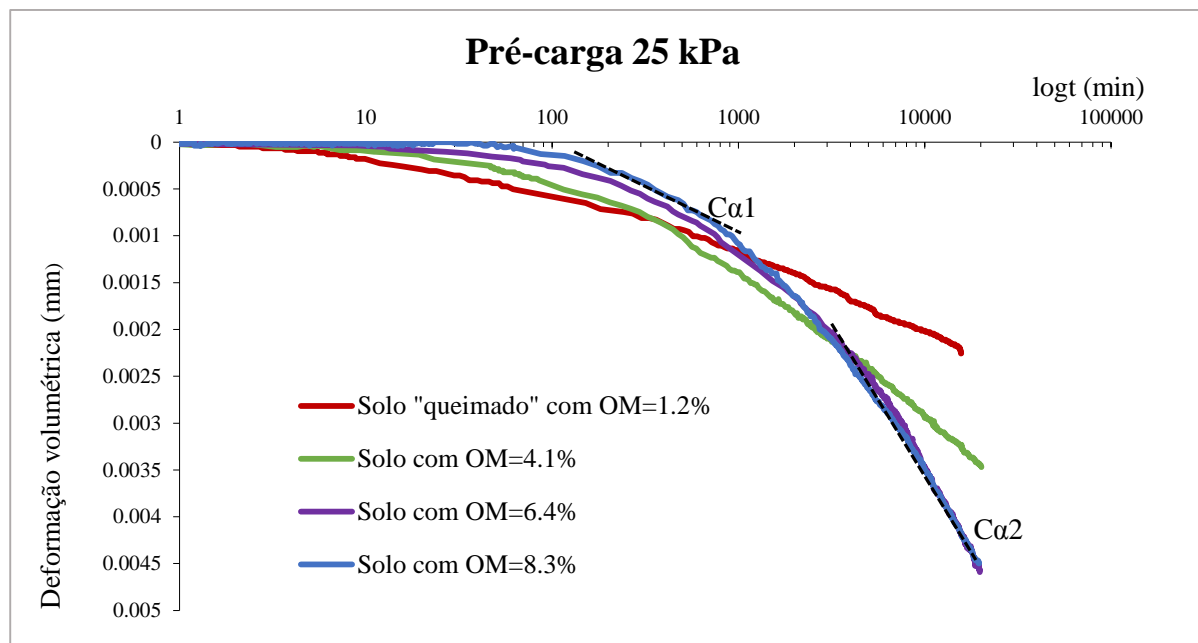


Figura 5.7- Variação dos assentamentos por fluência ao longo do tempo com recurso à pré-carga de 25 kPa.

Na Figura 5.8 é possível avaliar a evolução de C_{ae1} e C_{ae2} com a presença de matéria orgânica para os solos em estudo. Constata-se que o valor de C_{ae1} (100 -1000min) é sempre inferior ao valor de C_{ae2} (5000 - até ao final do ensaio) o que indica que, tal como Mesri et al., (1997) referiram, o efeito da pré-carga é benéfico até certo instante, observando-se posteriormente o aumento de C_{ae} até valores bastante próximos do caso em que não se utilizou pré-carga. Além disso a evolução de C_{ae1} com OM é bastante mais suave do que em C_{ae2} , o que leva a crer que uma presença mais significativa da matéria orgânica influencia sobremaneira este coeficiente. Note-se que na Figura 5.8, além dos valores médios de C_{ae} obtidos, encontra-se o valor máximo

e mínimo para cada ensaio (exceto no solo queimado, no qual apenas um dos ensaios é válido), registrando-se, em geral, uma reduzida dispersão dos resultados, isto é, validando-se as conclusões acima enunciadas.

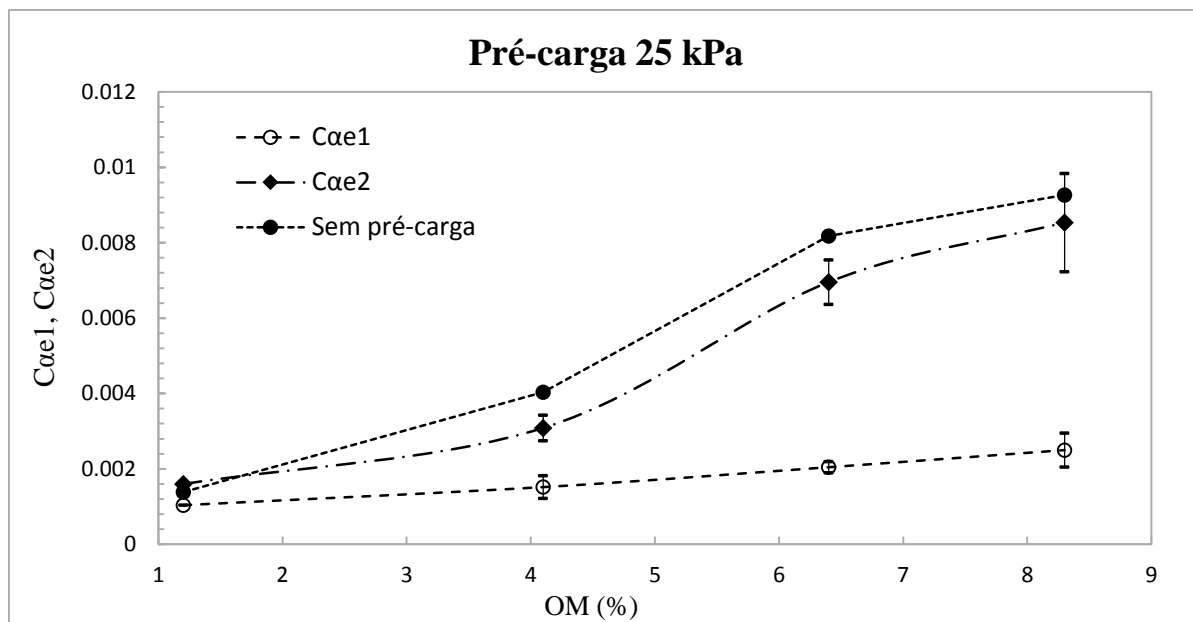


Figura 5.8- Variação do C_{ae} com OM, com e sem recurso a pré-carga 25 kPa.

5.3.2.2 Pré-carga de 50 kPa

De igual forma à pré-carga de valor 25 kPa, o valor de C_{ae} não é constante, pelo que se considerou de novo C_{ae1} e C_{ae2} (definidos nos mesmos intervalos de tempo que no caso da pré-carga igual a 25 kPa) para estimar a sua evolução.

Pela análise das Figuras 5.9 e 5.10 constata-se que, apesar do andamento das curvas serem semelhantes ao do caso anterior, obtiveram-se menores valores de C_{ae} , quando é usada uma pré-carga de maior magnitude, o que está de acordo com a revisão bibliográfica.

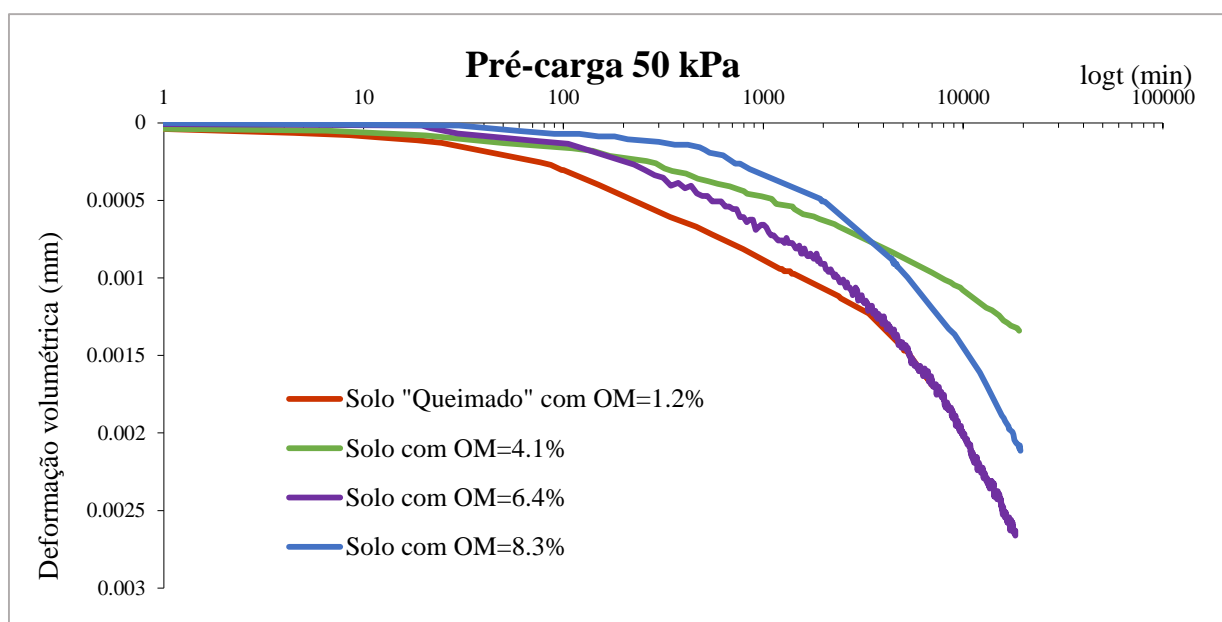


Figura 5.9- Variação dos assentamentos por fluência ao longo do tempo com recurso à pré-carga de 50 kPa.

Tal como no caso anterior o aumento de C_{ae1} com OM é bem mais suave que em C_{ae2} , fazendo-se notar o aumento acentuado de C_{ae2} quando o teor de matéria orgânica passa de 4,1% para 6,4% (Figura 5.10).

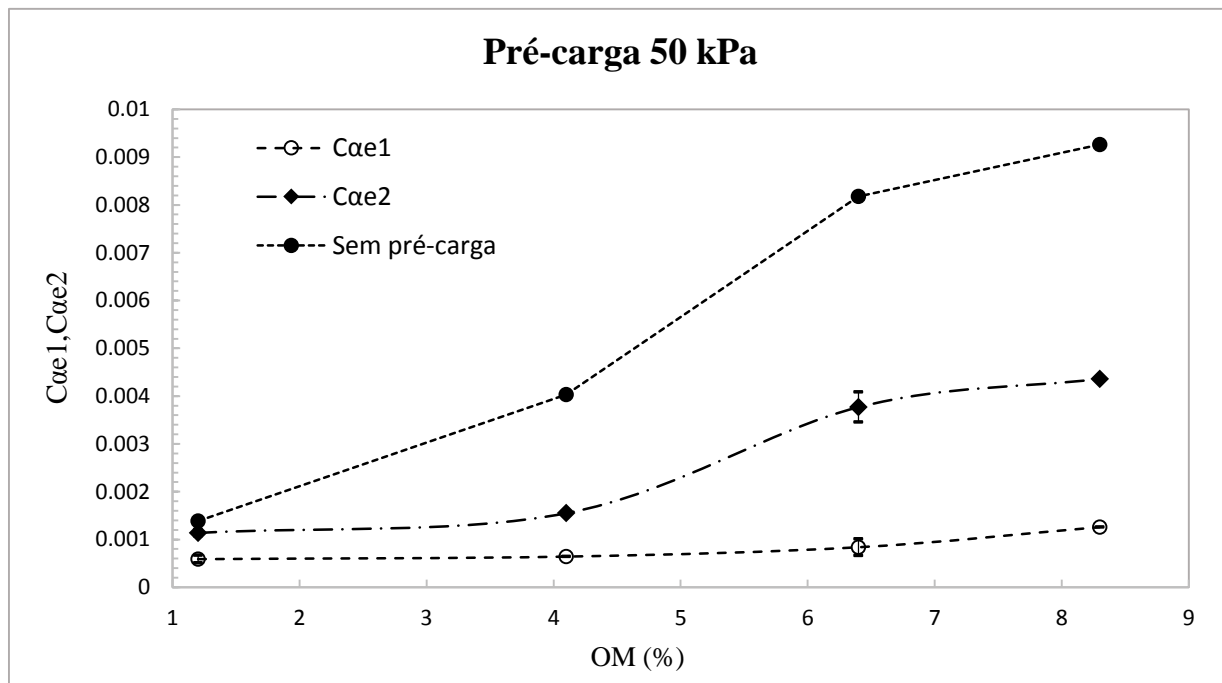


Figura 5.10- Variação do C_{ae} com OM, com e sem recurso a pré-carga 50 kPa.

5.3.3 Análise conjunta da fluência

Nas Figuras 5.11 e 5.12 confrontam-se as curvas deformação-tempo dos provetes sem pré-carga com os provetes sujeitos aos dois níveis de pré-carga para os quatro teores em matéria orgânica, pois desta forma é mais perceptível a influência do teor em matéria orgânica na redução dos assentamentos por fluência quando é ou não usada a pré-carga.

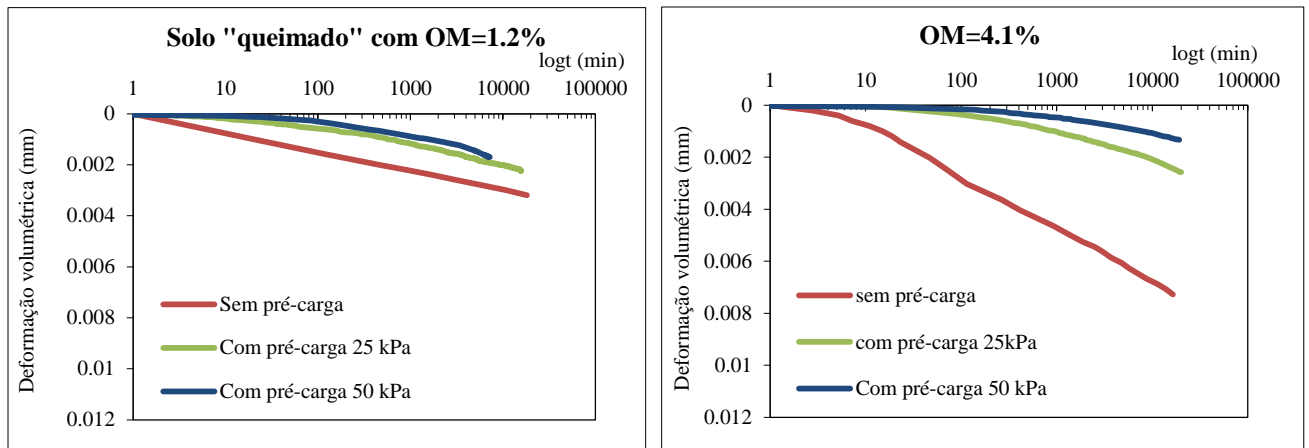


Figura 5.11 - Variação dos assentamentos por fluência para OM=1.2% e OM=4.1%, com e sem pré-carga.

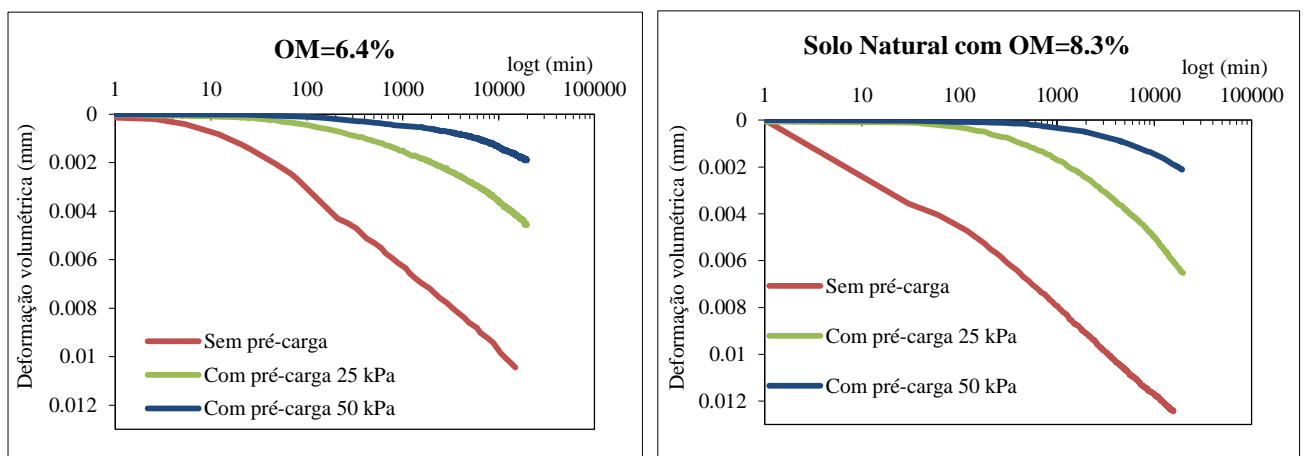


Figura 5.12 - Variação dos assentamentos por fluência para OM=6.4% e OM=8.3%, com e sem pré-carga.

Em suma, nas Figuras 5.11 e 5.12 observa-se que quanto maior for a percentagem de matéria orgânica maiores são os assentamentos por fluência, independentemente ou não da utilização de pré-carga. Quando se utiliza a pré-carga verifica-se que existe uma redução dos assentamentos por consolidação secundária, sendo esta redução proporcional ao nível de pré-carga utilizado, ou seja, a pré-carga de 50 kPa promove uma maior redução do coeficiente de consolidação secundária (C_{ae}), logo dos assentamentos por fluência.

Na Figura 5.13 pode-se observar, em termos quantitativos, a evolução do $C_{\alpha e}$ com e sem recurso a pré-carga. Consta-se, como já mencionado, a redução tanto de $C_{\alpha e1}$ (100-1000 min) como de $C_{\alpha e2}$ (5000min até ao final do ensaio) com a aplicação da pré-carga, sendo que os menores valores são obtidos para a pré-carga de maior magnitude.

Mesri et al., (1997) referiu que o uso da pré-carga apenas é benéfica num intervalo de tempo, pois com o aumento do tempo $C_{\alpha e}$ tende a aumentar podendo mesmo atingir o valor de $C_{\alpha e}$ quando não se utiliza a pré-carga. Com exceção do solo “queimado” (OM=1,2%), os resultados obtidos nos restantes casos não corroboram completamente a teoria de Mesri et al., (1997) obtendo-se com a utilização de pré-carga valores de $C_{\alpha e1}$ e $C_{\alpha e2}$ sempre inferiores aos obtidos sem pré-carga, evidenciando o efeito benéfico da utilização desta metodologia. Contudo, o efeito da pré-carga é potenciado a curto prazo, ou seja, em termos de redução de $C_{\alpha e1}$.

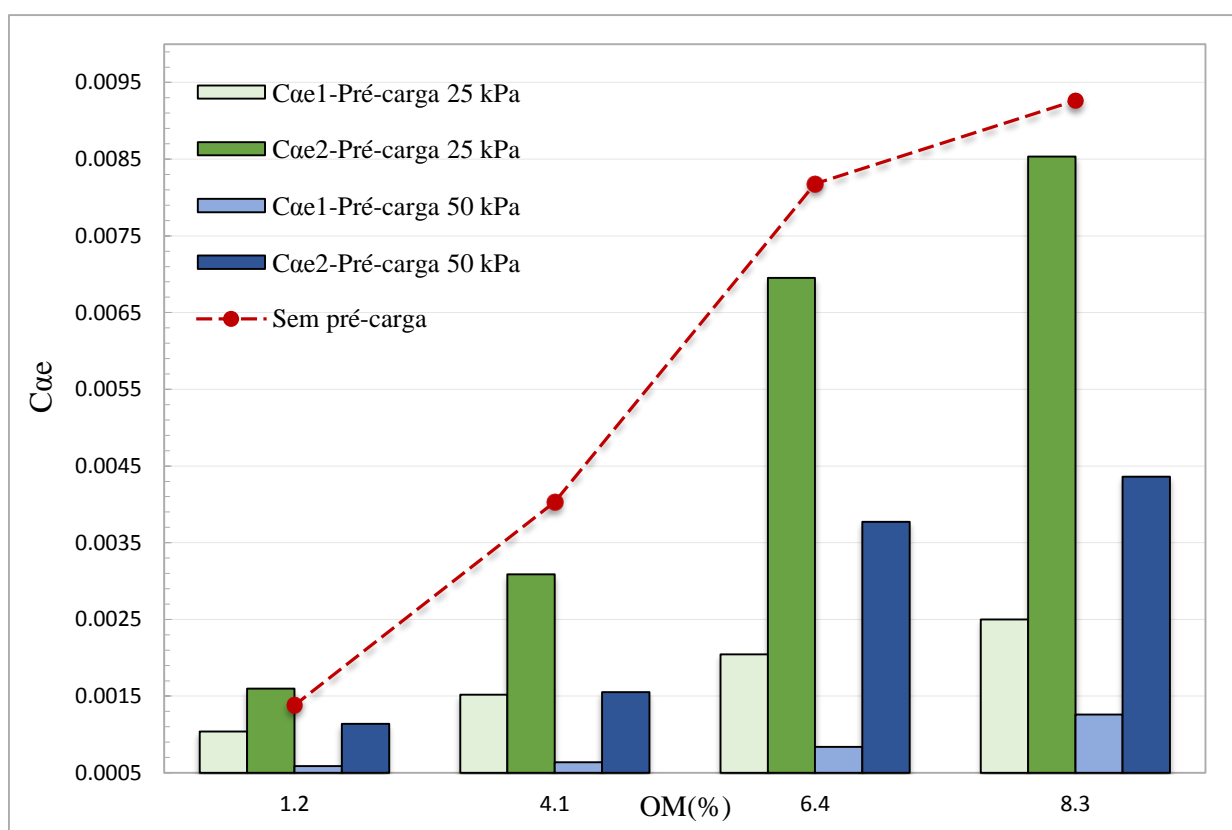


Figura 5.13 - Variação de $C_{\alpha e}$ para cada % OM, com e sem pré-carga.

Posto isto, determinou-se qual a eficiência da pré-carga na redução dos assentamentos por consolidação secundária consoante a percentagem de matéria orgânica presente no solo. Considerou-se um tempo de referência igual a 1000 min, e quantificou-se a redução dos assentamentos por fluência resultante da aplicação da pré-carga (Figura 5.14), através da expressão:

$$\text{Eficiência da pré - carga} = 1 - \frac{\Delta h_{1000}^{p.c}}{\Delta h_{1000}^{sem p.c}} \times 100$$

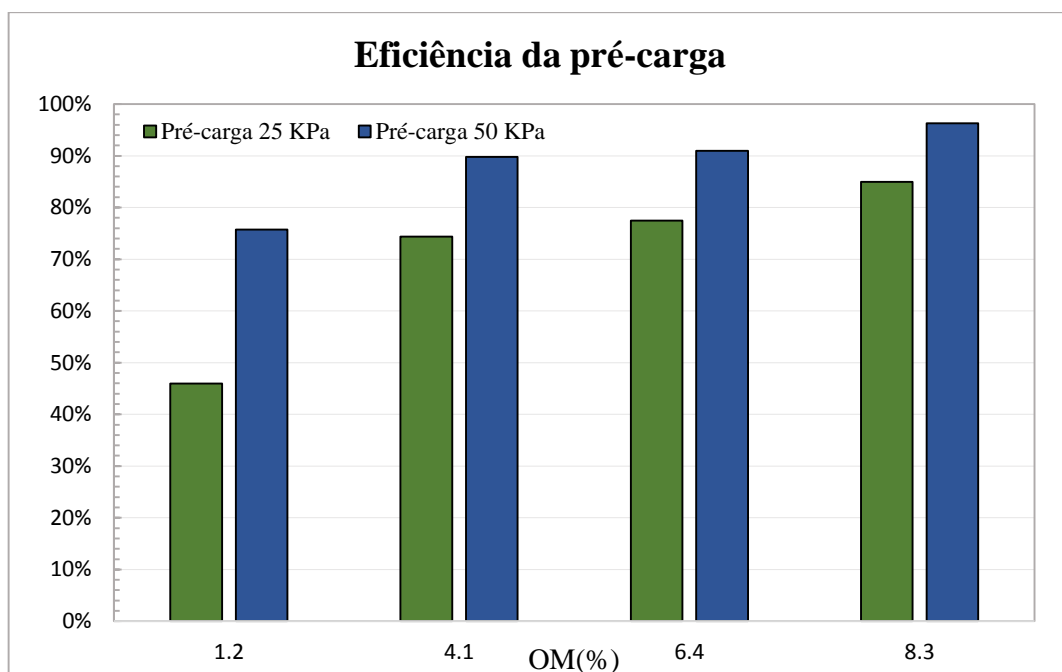


Figura 5.14 - Eficiência da pré-carga para cada % OM.

Como se tinha visto anteriormente, uma pré-carga de maior magnitude tem mais eficiência na redução dos assentamentos por fluência. Além disso verifica-se que a metodologia em estudo é mais eficaz com o aumento do teor de matéria orgânica presente no solo.

No geral, conclui-se que a utilização da pré-carga reduz de facto os valores de C_{ae} , porém com maior preponderância a curto prazo, dado que à medida que se avança no tempo após a remoção da sobrecarga temporária, este coeficiente sofre um aumento progressivo aproximando-se do valor que se verificaria sem a aplicação de pré-carga. A partir das curvas das Figuras 5.11 e 5.12 pode-se extrapolar que as curvas resultantes da aplicação de pré-carga revelam uma tendência para se aproximarem, e até intersectarem, a linha do ensaio no qual não se usou a pré-carga, revelando que a muito longo prazo, caso se use ou não a pré-carga, se atinjam os mesmos valores de assentamentos por fluência.

6 CONCLUSÕES E TRABALHOS FUTUROS

6.1 Conclusões

O estudo realizado acerca da avaliação da influência do teor em matéria orgânica na redução dos assentamentos por fluência permite concluir que, independentemente da utilização de pré-carga, os assentamentos por fluência são fortemente influenciados pela presença desta, aumentando com o teor em matéria orgânica.

Também se verifica que o aumento de matéria orgânica incrementa a compressibilidade e o tempo de consolidação do solo, uma vez que existe a diminuição do coeficiente de consolidação e um maior índice de vazios presente no solo, à medida que esta aumenta.

A análise dos resultados obtidos através dos ensaios edométricos realizados sem pré-carga, permitiram concluir que o valor do coeficiente de consolidação secundária toma um valor único para cada tipo de solo analisado, diferindo com a percentagem de matéria orgânica. Esse valor é tanto maior, quanto maior for o teor de matéria orgânica presente no solo, logo os assentamentos por fluência também o são.

Dos ensaios edométricos onde foi aplicada a pré-carga, verificou-se que de facto esta reduz de o valor do coeficiente de consolidação secundária, sendo esse efeito amplificado com a magnitude da sobrecarga temporária imposta ao solo. Porém, este efeito é mais preponderante a curto prazo, pois a longo prazo o coeficiente de consolidação secundária tende a aumentar, pelo que a muito longo prazo são expectáveis assentamentos de grandeza semelhante aos que se obtiam caso não se fizesse uso da pré-carga.

Finalmente, constatou-se que a metodologia em estudo, apresenta uma maior eficiência na redução dos assentamentos em solos com maior teor de matéria orgânica.

6.2 Trabalhos futuros

De modo a completar o estudo efetuado nesta dissertação, seria importante estudar os seguintes aspetos em trabalhos futuros:

- I. Analisar a influência do tempo de atuação da pré-carga.
- II. Analisar outros níveis de pré-carga.
- III. Analisar a influência do OCR do solo.
- IV. Aumentar o tempo de fluência e estudar a variação de C_{ae} para todos os escalões de carga/descarga.
- V. Avaliar qual a eficiência da pré-carga em solos com teores em matéria orgânica mais elevados.
- VI. Realização de ensaios triaxiais de fluência com trajetórias de compressão e extensão.
- VII. Realizar uma modelação numérica e confrontar os resultados obtidos com os de laboratório.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Alonso, E. E., Gens, A., e Lloret, A. (2000). “Precompression design for secondary settlement reduction”. *Géotechnique*, 50(6): p.645 – 656.
- Bjerrum, L. (1967).”Engineering geology of Norwegian normally – consolidated marine clays as related to settlements of buildings”. Seventh Rankine Lecture, *Géotechnique*, 17: p. 83 – 118.
- BS 1377:3 (1990) – Methods of test for soils for civil engineering purposes. Chemical and electro-chemical tests, British Standards Institution, London.
- BS 1377:5 (1990) – Methods of test for soils for civil engineering purposes. Compressibility, permeability and durability tests, British Standards Institution, London.
- Chai,J., Miura, N., e Bergardo, D. (Junho de 2008). Preloading clayey deposit by vacuum pressure with cap-drain: Analyses versus performance. *Geotextiles and Geomembranes*, 26(3): p. 220-230.
- Coelho, P. A. L. F. (2000). “Caracterização Geotécnica de Solos Moles: Estudo do Local Experimental da Quinta da Foja (Baixo Mondego)”. Dissertação de Mestrado, Dep. de Eng^a Civil da FCTUC, Universidade de Coimbra, Portugal.
- Correia, A. A. S. (2011). “Aplicabilidade da Técnica de Deep Mixing aos Solos Moles do Baixo Mondego”. Dissertação de Doutoramento, Dep. de Eng^a Civil da FCTUC, Universidade de Coimbra, Portugal.
- E196 (1966). “Solos – Análise granulométrica”. Especificação do LNEC, Lisboa, Portugal.
- Franklin, A. G., Orozco, L.F. e Semrau, R. (1973). Compaction and strenght of slightly organic soils. *Journal of the soil Mechanics and Foundations Division, ASCE*, 99 (SM7): p. 541-557.
- Hann, E.J.D.,(1994). Stress-independent parameters for a primary and secondary compression. *Proceedings XIII ICSMFE,New Delhi,India*. p. 65-70.
- Kuhn, M. R., e Mitchell, J. K. (1993). “New perspectives on soil creep”. *Journal of Geotechnical Engineering*, 119: p. 507-524.

-
- Lehane, B. M., e Jardine, R. J. (2003). "Effects of long-term pre-loading on the performance of a footing on clay". *Géotechnique*, 53(8): p. 689 – 695.
- Leroueil, S., Kabbaj, M., Tavenas, F., e Bouchard, R. (1985). Stress-strain-strain rate relation for the compressibility of sensitive natural clays. *Géotechnique*, 35: p. 159-180.
- Leroueil, S., Magnan, J. P. e Tavenas, F. (1990). *Embankments on soft clays*. Ellis Horwood Series in Civil Engineering, Geotechnics Section. England.
- Lowe, J. (1974). New concepts in consolidation and settlement analysis. *Journal of the Geotechnical Engineering Division, Proceedings ASCE*, 100: p. 574-612.
- Maranha das Neves, E. (1993). "Main Session 5: Fills and Embankments. General Report". International Symposium on Hard Soils-Soft Rocks, Athens.
- Matos Fernandes, M. (2006). "Mecânica dos Solos". Volume I. Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Portugal.
- Mesri, G. e Castro, A. (1987). " C_u/C_c concept and K_0 during secondary compression". *Journal of Geotechnical Engineering*, 111(3): p. 230-247.
- Mesri, G., Vardhanabhuti. B. (2005). "Secondary Compression". *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 131: p. 398-401.
- Mesri, G., Peck, e R., Terzaghi K. (1996). "Soil Mechanics in Engineering Practice". Third Edition. Wiley, New York.
- Mesri, G., Stark, T. D., Ajlouni, M. A., e Chen, C. S. (1997). "Secondary Compression of Peat With or without surcharging". *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 123: p. 411-421.
- Mira, E. S. P. (2008). "Atenuação dos assentamentos por consolidação secundária com recurso a pré-carga- Análise Laboratorial". Dissertação de Mestrado, Dep. de Eng^a Civil da FCTUC, Coimbra.
- NP 83 (1965). "Solos – Determinação da Densidade das Partículas Sólidas". Norma Portuguesa Definitiva.
- NP 84 (1965). "Solos – Determinação do Teor em Água". Norma Portuguesa Definitiva.
- NP 143 (1969). "Solos – Determinação dos Limites de Consistência". Norma Portuguesa Definitiva.

- Sridharan, A. e Rao, A. S. (1982). Mechanisms controlling the secondary compression of clays. *Géotechnique*, 32(3): p. 249-260.
- Stapelfedt, T., e Vepsäläinen, P. (2007). Preloading and vertical drains. Helsinki University of Technology.
- Silva, J.M.M.M. (1996). “Modelação do colapso e da fluência em aterros”. Dissertação de Doutoramento, elaborada no Laboratório Nacional de Engenharia Civil, Universidade do Porto.
- Taylor, D. W. (1942).”Research of consolidation of clays”. Massachusetts Institute of Technology, Department of Civil and sanitary Engineering, Serial 82.
- Taylor, D. W., e Merchant, W. (1940) “A theory of clay consolidation accounting for secondary compression. *Journal of Math. And Physics*, 19: p. 167-185.
- Teles, J. M. N. P. C. (2013). “Comportamento Mecânico do Solo Mole do Baixo Mondego Quimicamente Estabilizado com Adição de Fibras Metálicas”. Dissertação de Mestrado, Dep. de Eng^a Civil da FCTUC, Universidade de Coimbra.
- Terashi, e Miki. (1999). Importance of prediction in ground improvement. *Prediction and Performance of Ground Improvement, Practitioners Series No. 11*, Japanese Geotechnical Society, p. 1-10.
- Ter – Martirosyan, ZG. (1992). “Rheological parameters of soil and design of foundations”.Balkema.