MODELAÇÃO DE UMA ARGILA – VALIDAÇÃO EXPERIMENTAL

Modelling of a clay - Experimental validation

Paulo José da Venda Oliveira*
Luís Joaquim Leal Lemos**

RESUMO – Neste trabalho apresentam-se os resultados experimentais obtidos com a argila de Santa Clara num estado reconstituído com o objectivo de se verificar a sua possível modelação. Após breve discussão dos modelos Cam Clay, Cam Clay Modificado (estabelecidos para condições isotrópicas) e Melanie (baseado em condições Ko), são analisados os resultados de duas séries de ensaios drenados, confrontando-se a zona de início de cedência de cada provete com a superfície de plastificação preconizada pelos respectivos modelos. Complementarmente, testa-se a adequabilidade das leis de fluxo preconizadas pelos modelos ao comportamento do solo. Finalmente, com base nos resultados experimentais da argila de Santa Clara apresenta-se uma proposta para a Superfície de Estado Limite global.

SYNOPSIS – In this work it is presented the experimental results on remoulded samples of Santa Clara clay and studied the possibility of using existing numerical models, namely: hardening elastic-plastic models, using isotropic consolidation (Cam-Clay, Modified Cam-Clay); and using Ko consolidation (Melanie model). The yield surface and the flow rule of the models are evaluated. Finally, with the experimental results of Santa Clara clay, a Limit State Surface is put forward.

PALAVRAS CHAVE – Modelação de argilas, lei de fluxo, cedência.

1 – INTRODUÇÃO

O desenvolvimento tecnológico registado nas últimas décadas, nomeadamente em termos de meios computacionais, transformou por completo diversos sectores da sociedade contemporânea. Inevitavelmente, a Geotecnia também tem sido influenciada por esta dinâmica, que tem induzido a alteração de atitude por parte da comunidade geotécnica, nomeadamente nos procedimentos de abordagem a novos problemas. Assim, actualmente a utilização de meios de cálculo automático é essencial na análise da generalidade dos problemas geotécnicos, permitindo a simulação de proble - mas de elevada complexidade num curto intervalo de tempo e com reduzido custo, promovendo a despistagem de erros e facilitando a tomada de decisão em geotecnia.

Para se tirar partido desta sofisticação tecnológica, têm surgido diversos programas de cálculo automático, em geral baseados no método dos elementos finitos, ou afins, que incorporam leis constitutivas que pretendem simular o comportamento dos solos. Estas leis são geralmente de dois tipos: (i) leis simples, com poucos parâmetros, de fácil determinação experimental e interpretação física, mas que reproduzem deficientemente o comportamento dos solos naturais em todos as suas vertentes; (ii) leis complexas, compostas por um número excessivo de parâmetros, alguns sem

* Professor Auxiliar, Departamento de Engenharia Civil, Universidade de Coimbra, E-mail: pjvo@dec.uc.pt.
** Professor Catedrático, Departamento de Engenharia Civil, Universidade de Coimbra, E-mail: llemos@dec.uc.pt.

significado físico, e cuja determinação experimental é morosa e que em geral envolvem a realização de ensaios complexos, os quais exigem equipamento sofisticado. No entanto, todos os modelos, independentemente da sua complexidade, apresentam limitações no campo de aplicação, sendo desenvolvidos para simular o comportamento de um numero restrito de casos e de um tipo particular de solo.

O presente trabalho visa verificar se o comportamento da argila de Santa Clara é reproduzido por dois modelos baseados em condições isotrópicas, modelos Cam Clay e Cam Clay Modificado, e pelo modelo Melanie, baseado em condições anisotrópicas. O estudo compreende a verificação da superfície de cedência e da lei de fluxo. As amostras utilizadas são reconstituídas* para minimizar a variabilidade, tendo sido efectuados duas séries de ensaios drenados com provetes ligeiramente sobreconsolidados sujeitos a diferentes trajectórias de tensões, visando a reconstituição da superfície de cedência.

2 – CARACTERÍSTICAS DOS MODELOS TEÓRICOS

Seguidamente descrevem-se os principais aspectos dos três modelos elastoplásticos em análise: (i) modelo Cam Clay (CC), (ii) modelo Cam Clay Modificado (CCM), (iii) modelo Melanie (MEL). A descrição incide fundamentalmente na definição da superfície de cedência e da lei de fluxo, aspectos estes em análise no presente trabalho. Em termos gerais, estes modelos pressupõem no interior da superfície de cedência um comportamento elástico, originando o seu atravessamento deformações plásticas.

2.1 – Modelos de "Cambridge"

Os modelos CC e CCM, designados por modelos de "Cambridge", são baseados em condições isotrópicas, sendo as suas superfícies de cedência definidas em função da tensão de préconsolidação média, p'_c, de acordo com:

Modelo CC
$$F = F(\sigma'_{ij}, p'_c) = \ln\frac{p'_c}{p'} - \frac{\eta}{M} = 0 \quad (\text{com } \eta = q/p') \tag{1}$$

Modelo CCM
$$F = F(\sigma_{ij}, p'_c) = \frac{q^2}{M^2} + p'(p' - p'_c) = 0 \tag{2}$$

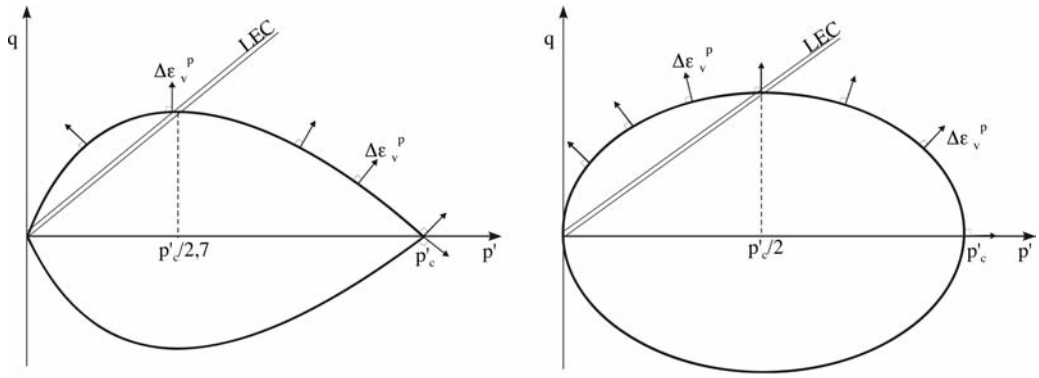
representando p' a tensão média efectiva, q a tensão distorcional e M o declive da Linha do Estado Crítico (LEC) no referencial p'-q,

Na Figura 1 ilustram-se as superfícies de cedência dos modelos citados, que apresentam formas diferenciadas, exibindo o modelo CC um desenvolvimento em forma de amêndoa, distinta da forma elíptica apresentada pelo modelo CCM. Este facto condiciona o ponto de intersecção da LEC com a superfície de cedência, correspondendo no caso do modelo CC a $p'_c/2{,}7$, inferior ao obtido com o modelo CCM, $p'_c/2{,}0$ (Venda Oliveira, 2000).

---

* A reconstituição do solo consistiu na preparação de amostras remexidas com um índice de liquidez de cerca de 1,2, sendo posteriormente consolidadas de modo a se reproduzir o processo de sedimentação.

Estes modelos utilizam uma lei de fluxo associada, pelo que a superfície de potencial plástico coincide com a superfície de cedência, sendo por conseguinte o vector das deformações plásticas perpendicular à superfície de cedência (Figura 1).



a) Modelo "Cam Clay". b) Modelo "Cam Clay Modificado".

Fig. 1 – Representação da lei de fluxo dos modelos de "Cambridge".

2.2 – Modelo Melanie

Desenvolvido nos anos oitenta no *"Laboratoire Central des Ponts et Chaussées"* (LCPC) para simular o comportamento de argilas naturais, o modelo Melanie (MEL) baseia-se em condições anisotrópicas, sendo a superfície de cedência representada por uma elipse cujo eixo principal coincide com a linha "Ko" (Figura 2), descrita matematicamente no plano p'-q por (Magnan, 1986):

$$F(p', q, K) = A^2\left(p'.\cos\theta + q.\sin\theta - \frac{K}{AC}\right)^2 + B^2(q.\cos\theta - p'.\sin\theta)^2 - \frac{K^2}{C^2} = 0 \qquad (3)$$

com:

$$\theta = \text{arctg}\left[\frac{3(1 - K_{o(nc)})}{1 + 2K_{o(nc)}}\right] \qquad (4)$$

$$A = 2(\sin\theta + \cos\theta) \qquad (5)$$

$$B^2 = \frac{A^2\cos\theta}{C\sin^2\theta}\left(\frac{2}{A} - C\sin\theta\right) \qquad (6)$$

representando $K_{o(nc)}$ o coeficiente de impulso em repouso referente ao estado normalmente consolidado, C uma constante de valor 0,6 e K o parâmetro de endurecimento, o qual é descrito por:

$$K = \frac{p'_c}{2} A.C.(\cos\theta + tg\theta.\sin\theta) \qquad (7)$$

O modelo MEL utiliza uma lei de fluxo não associada, traduzida pela orientação do vector das deformações plásticas com a direcção da bissectriz entre a normal à elipse e a linha que une a origem e o ponto de plastificação (Figura 2).

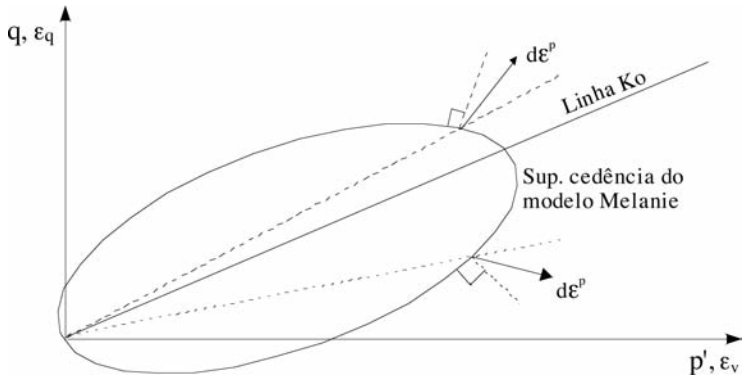


Fig. 2 – Representação da superfície de cedência e da lei de fluxo do modelo Melanie.

3 – DEFINIÇÃO DO PONTO DE CEDÊNCIA E DO VECTOR DAS DEFORMAÇÕES PLÁSTICAS

Nos itens seguintes tecem-se algumas considerações sobre a metodologia utilizada na identificação do ponto/zona em cedência e sobre o procedimento usado para estimar a direcção do vector das deformações plásticas.

3.1 – Ponto/zona em cedência

A definição da superfície de cedência exige a identificação do ponto de cedência (provável), que corresponde à variação de declive da curva da extensão volumétrica ou da extensão axial com a tensão média efectiva (ε_{vol}-p' ou ε_{ax}-p'), de acordo com a metodologia preconizada na Figura 3 (Mouratidis e Magnan, 1983; Graham e Lau, 1988). Esta metodologia é semelhante à proposta de Casagrande para a determinação da tensão de pré-consolidação (Jamiolkowski *et al.,* 1977). Como a definição de um ponto de cedência envolve alguma ambiguidade, complementa-se este com a estimativa de uma zona de provável início de cedência, que inclui o ponto de cedência mais provável.

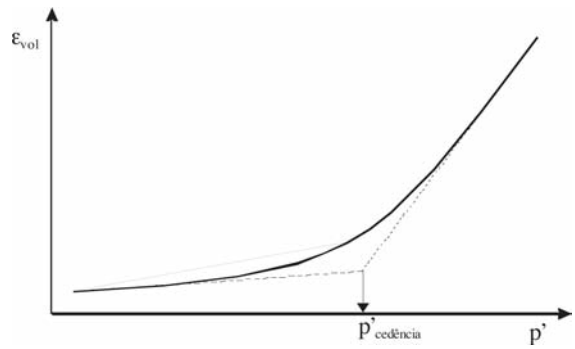


Fig. 3 – Definição do ponto de cedência teórico (Venda Oliveira, 1992).

3.2 – Vector das deformações plásticas

A avaliação do vector das deformações plásticas baseia-se no conceito de que o comportamento elástico está associado à evolução ao longo de uma linha "κ" (linha de descarga/recarga no referencial *lnp'-e*), estando as deformações plásticas relacionadas com a mudança de linha "κ". Assim, as deformações volumétricas e distorcionais elásticas são calculadas respectivamente por (Atkinson e Bransby, 1978):

$$\Delta\varepsilon_v^e = \frac{\kappa}{(1+e).p'}.\Delta p' \tag{8}$$

$$\Delta\varepsilon_q^e = \frac{2.\kappa.(2+\nu)}{9.(1+e).p'.(1-2\nu)}.\Delta q \tag{9}$$

representando *e* o índice de vazios, ν o coeficiente de Poisson e κ o declive da linha de descarga/recarga no referencial *ln p'-e*. As componentes da deformação plástica são determinadas deduzindo a componente elástica à deformação global, de acordo com:

$$\Delta\varepsilon_v^p = \Delta\varepsilon_v - \Delta\varepsilon_v^e \tag{10}$$

$$\Delta\varepsilon_q^p = \Delta\varepsilon_q - \Delta\varepsilon_q^e \tag{11}$$

As componentes volumétrica e distorcional globais, $\Delta\varepsilon_v$ e $\Delta\varepsilon_q$, são determinadas num estado triaxial para um dado incremento de carga, de acordo com as seguintes relações:

$$\Delta\varepsilon_q = \frac{2}{3}.(\Delta\varepsilon_v - \Delta\varepsilon_r) \tag{12}$$

$$\Delta\varepsilon_v = (\Delta\varepsilon_{ax} + 2\Delta\varepsilon_r) \tag{13}$$

representando $\Delta\varepsilon_{ax}$ e $\Delta\varepsilon_r$ os incrementos de deformação axial e radial, respectivamente.

4 – ANÁLISE DOS RESULTADOS

4.1 – Principais parâmetros da argila

Seguidamente analisam-se os resultados experimentais da argila de Santa Clara, cujas principais propriedades físicas se apresentam no Quadro 1 (Venda Oliveira, 1992). A compressibilidade é caracterizada por κ = 0,006 e λ = 0,045, representando λ o índice de compressibilidade no referencial *ln p'-e*. A linha de estados críticos é definida por M = 1,35 e Γ = 1,77, sendo Γ o volume específico (1 + e) correspondente a p'=1.

4.2 – Comparação com os modelos de "Cambridge"

A análise da possível modelação do comportamento da argila de Santa Clara pelos modelos CC e CCM, é efectuada com base em quatro ensaios drenados efectuados com trajectórias: (i) q/p'=5, (ii) q/p'=3, (iii) q/p'=2,5, (iv) q/p'=1. Estes provetes encontram-se inicialmente num estado ligeiramente sobreconsolidado (OCR=2), visando desta forma a identificação do ponto de cedência.

Quadro 1 – Principais propriedades físicas da argila de Santa Clara (Venda Oliveira, 1992).

Comp. da fracção	W_L (%)	W_P (%)	IP (%)	Granulometria			Gs	Act.	Classif.
				Argila (%)	Silte (%)	Areia (%)			
Ilite (55%) Caulinite (45%)	42,5	20,0	22,5	32	36	24	2,69	0,70	CL

W_L – limite de liquidez; W_P – limite de plasticidade; IP – índice de plasticidade;
Gs – densidade das partículas do solo; Act. – actividade da argila.

Na Figura 4 apresentam-se os resultados experimentais, bem como a aplicação da metodologia citada para a identificação do ponto de cedência mais provável e da zona que delimita o início de cedência. Na Figura 5 confrontam-se os pontos/zonas em cedência de cada ensaio com a trajectória não drenada de um provete normalmente consolidado e com as superfícies de cedência preconiza - das pelos modelos CC e CCM. Constata-se uma melhor aproximação ao modelo CC, o que vem corroborar os resultados de Banerjee e Stipho (1978) com amostras de Caulinite.

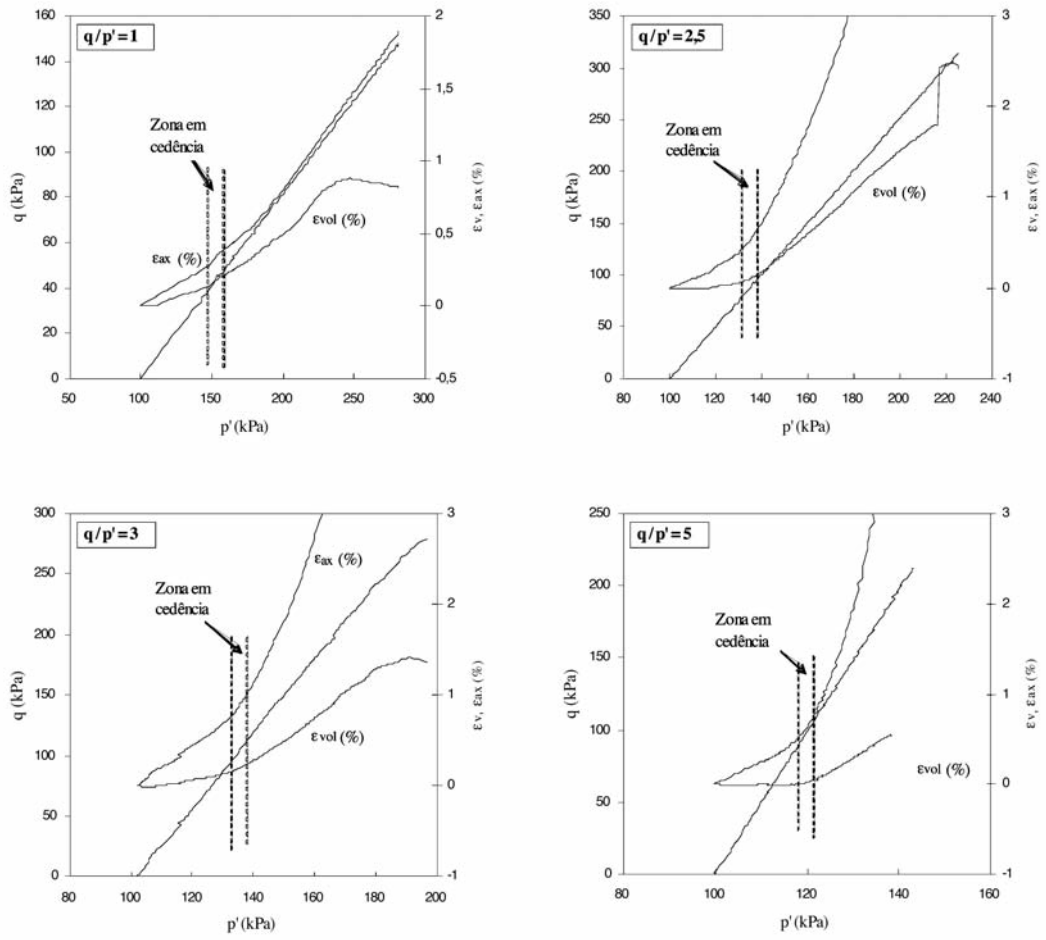


Fig. 4 – Identificação dos pontos / zonas em cedência em ensaios isotrópicos.

Na Figura 5 observa-se que a trajectória de tensões do ensaio não drenado se localiza no interior da estimativa para a zona em cedência, constatando-se mesmo uma boa aproximação ao ponto de cedência mais provável. Estes resultados são consistentes com os obtidos por Gens (1982), os quais permitem constatar que a superfície que melhor delimita a zona "quase-elástica" da zona "plástica" corresponde à trajectória não drenada de uma amostra normalmente consolidada.

Na Figura 6 compara-se para cada trajectória drenada a resultante do vector de deformação plástica com as superfícies de cedência preconizadas pelos dois modelos isotrópicos analisados. Perpendicularmente ao vector de deformação plástica resultante é traçada uma linha, que pretende representar a direcção da superfície de potencial plástico nesse ponto, permitindo a comparação com a superfície de cedência, e assim verificar se a lei de fluxo é associada ou não.

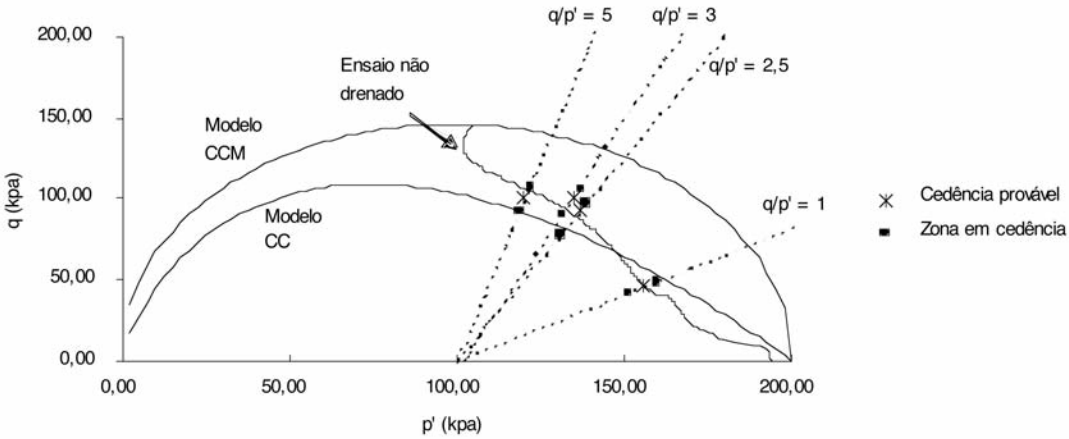


Fig. 5 – Comparação da cedência obtida em ensaios drenados com a trajectória não drenada e as superfícies de cedência dos modelos Cam-Clay e Cam-Clay Modificado.

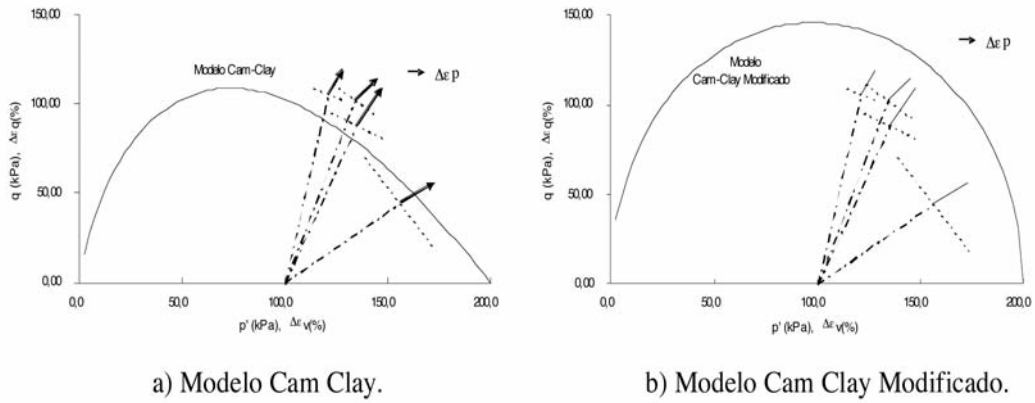


Fig. 6 – Verificação da lei de fluxo.

Embora os resultados sejam inconsistentes nas trajectórias q/p'= 3 e q/p'= 2,5, caracterizados por uma significativa variação da inclinação, nota-se claramente o não cumprimento da lei da normalidade em relação à curva de cedência do modelo CC, verificando-se, pelo contrário, com o modelo CCM uma melhor aproximação.

Comparando a resultante do vector de deformação plástica com o caminho de tensões do ensaio não drenado (Figura 7), observa-se, com excepção da trajectória q/p'=2,5, a "quase" perpen - dicularidade do vector de deformação plástica em relação à trajectória não drenada.

Os resultados permitem constatar que o comportamento em termos de cedência da argila de Santa Clara é semelhante ao especificado pelo modelo CC, enquanto que o estabelecimento de uma lei de fluxo associada é mais consistente com o modelo CCM.

Resultados deste tipo não parecem ser caso único, tendo Banerjee e Stipho (1978) sugerido um modelo caracterizado por uma superfície de cedência coincidente com a do modelo Cam Clay e por uma lei de fluxo não associada caracterizada por superfícies de potencial plástico coincidentes com as elipses de cedência do modelo Cam Clay Modificado.

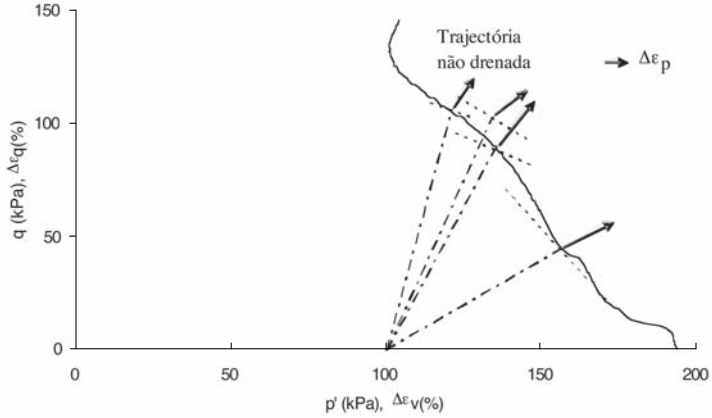


Fig. 7 – Resultante do vector de deformação plástica em relação à trajectória de tensões do ensaio não drenado com OCR=1.

4.3 – Comparação com o modelo Melanie

A validação do modelo de Melanie é testada com quatro ensaios drenados, efectuados com provetes ligeiramente sobreconsolidados (OCR=2), tendo-se aplicando as trajectórias de tensões: (i) q/p'= -1,5, (ii) q/p'= -0,5, (iii) q/p'=1, (iv) q/p'=3.

Na Figura 8 apresentam-se os resultados dos ensaios anteriormente mencionados, que permitem a delimitação da zona de início de cedência e do ponto de cedência provável. No ensaio efectuado com a trajectória q/p'=3 constata-se que a cedência corresponde a um aumento brusco das extensões, estando este ponto associado ao atravessamento da trajectória correspondente ao ensaio não drenado.

Na Figura 9 comparam-se as zonas de início de cedência obtidas nos diversos ensaios, com a trajectória de tensões não drenada e a superfície de cedência preconizada pelo modelo Melanie. Nalguns pontos, observa-se a "quase" sobreposição do ponto de cedência com a trajectória não dre - nada, sendo este comportamento similar ao constatado noutros solos (Gens, 1982). Este comporta - mento é idêntico ao observado no estado isotrópico.

Não obstante a cedência do ensaio com q/p'=1 estar bem definida, verifica-se que os resulta- dos são inconsistentes, dado o ponto de cedência se encontrar muito afastado do valor previsível, que corresponderia à tensão de pré-consolidação.

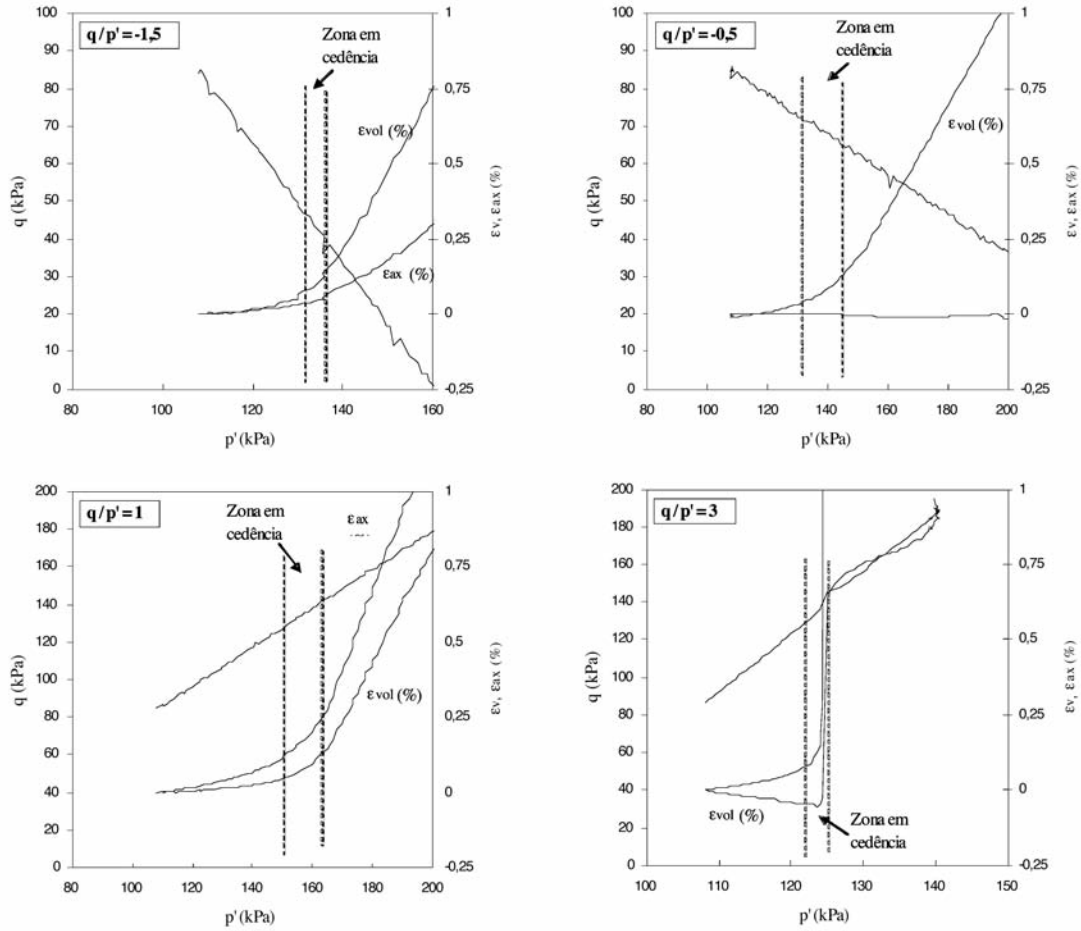


Fig. 8 – Identificação dos pontos / zonas em cedência em provetes consolidados em condições Ko.

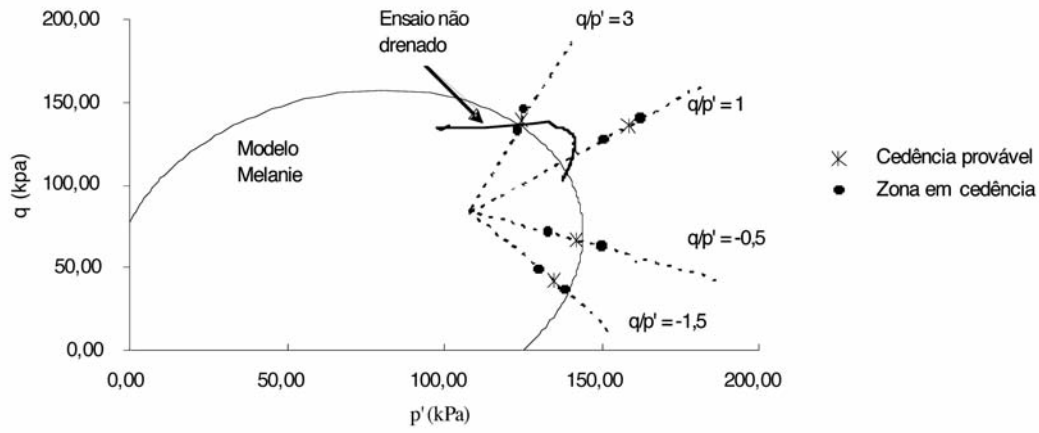


Fig. 9 – Comparação da zona de cedência estimada de ensaios de consolidação anisotrópica com a trajectória não drenada e a superfície de cedência do modelo Melanie.

Globalmente, constata-se que a curva de cedência especificada pelo modelo Melanie reproduz razoavelmente o comportamento deste solo, muito embora o comportamento para a trajectória q/p'=1 pareça induzir uma elipse de cedência com uma maior relação eixo maior/eixo menor.

Na Figura 10 confrontam-se as direcções do vector incremento de deformação plástica obtido nos diversos ensaios, com a lei de fluxo do modelo Melanie. Constata-se que a lei de fluxo do modelo Melanie é adequada para simular o comportamento correspondente a trajectórias de compressão (q/p'=1 e q/p'=3), observando-se diferenças apreciáveis nas trajectórias de extensão, caracterizadas por maiores inclinações do vector das deformações plásticas que as especificadas pela lei de fluxo do modelo.

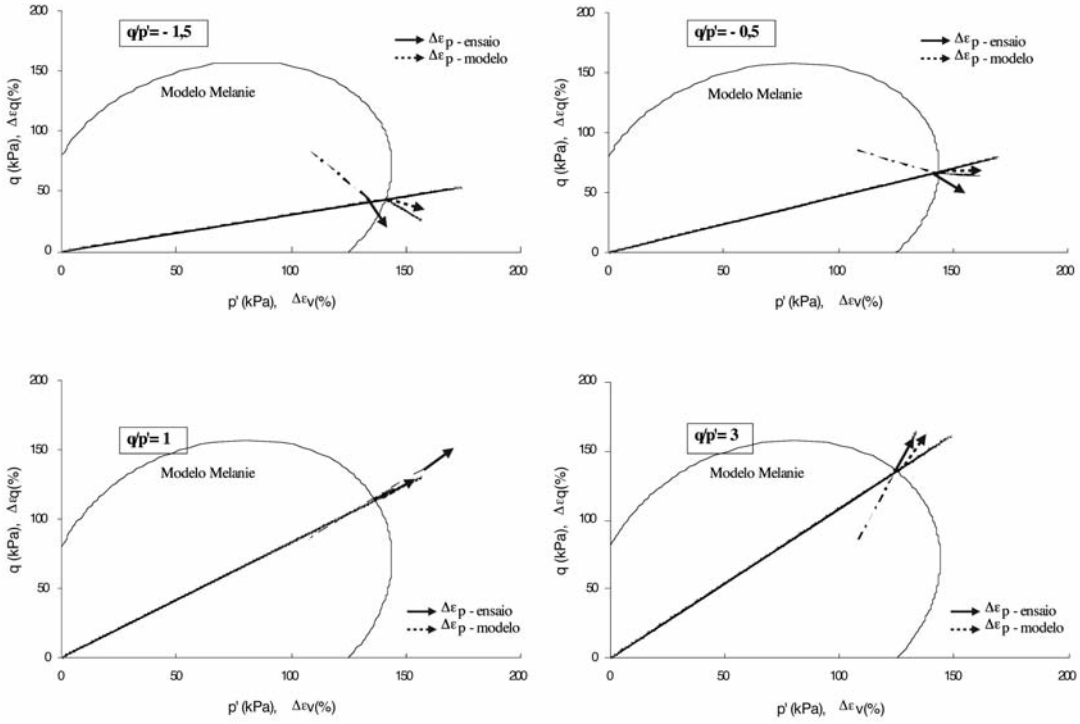


Fig. 10 – Verificação da lei de fluxo do modelo Melanie.

4.4 – Análise do comportamento normalizado

Na Figura 11 apresentam-se as trajectórias de tensões normalizadas em relação à tensão de préconsolidação média equivalente, p'e†, referente aos ensaios drenados (OCR=2) e não drenados (OCR=1) com provetes consolidados isotropicamente. Na generalidade dos ensaios, observa-se a variação de inclinação das trajectórias de tensões na transposição da trajectória não drenada, em direcção ao Estado Crítico (E.C.) o que vem comprovar o importante papel desta trajectória. O comportamento normalizado do ensaio drenado efectuado com q/p'=1 é distinto dos restantes, condicionado pelas reduzidas variações volumétricas (Figura 4) que não induzem alterações de p'e, pelo que não se observa a variação de curvatura na trajectória normalizada.

†Valor de p' na linha de consolidação virgem para o mesmo índice de vazios.

Na Figura 12 ilustram-se as trajectórias de tensões normalizadas de ensaios drenados (OCR = 2) e não drenados (OCR = 1), com provetes consolidados em condições Ko. Para a trajectória q/p'=1, constata-se um comportamento similar ao observado em condições isotrópicas para a mesma trajectória.

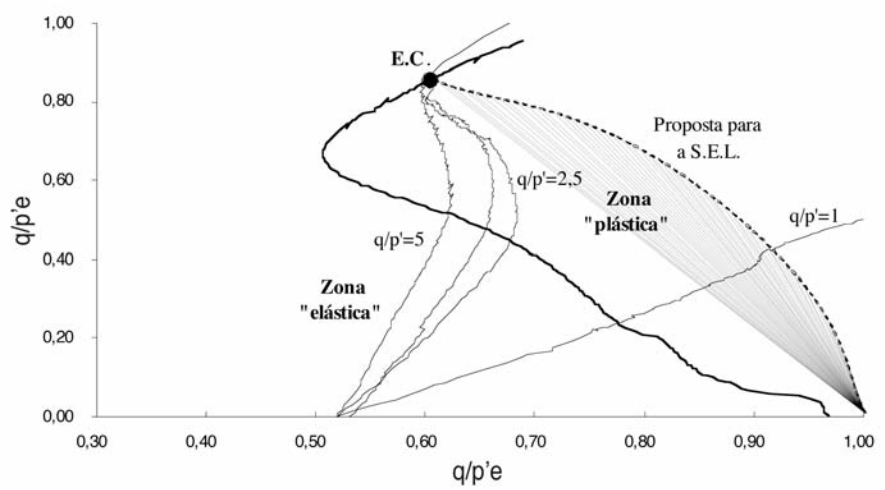


Fig. 11 – Trajectórias de tensões normalizadas em ensaios com consolidação isotrópica.

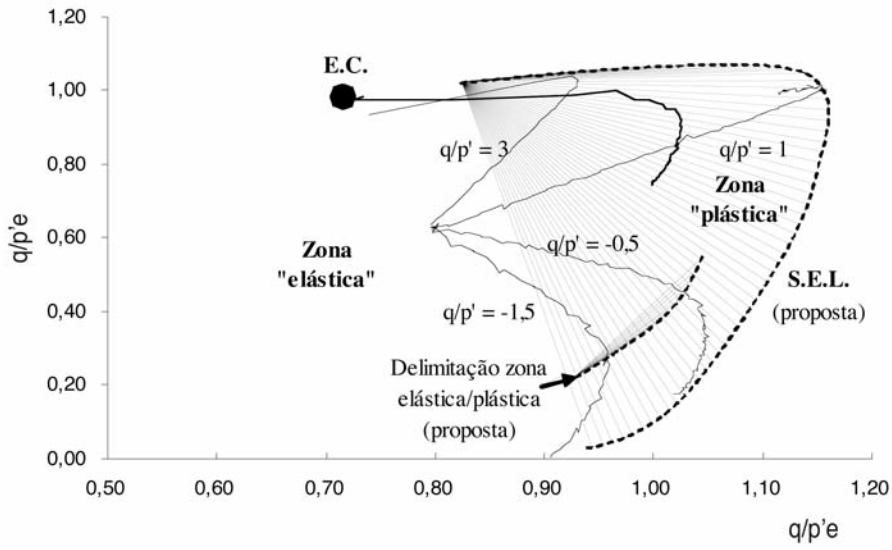


Fig. 12 – Trajectórias de tensões normalizadas em ensaios com consolidação anisotrópicos.

Nas duas figuras anteriormente referidas, observa-se que as trajectórias de tensões normalizadas após a cedência em ensaios não drenados e drenados não coincidem, pelo que não é totalmente válido o princípio de Rendulic‡. Mesmo nos ensaios drenados, o comportamento normalizado pós cedência não se sobrepõe, o que evidencia o não cumprimento deste princípio. Resultados semelhantes foram obtidos por Maranha das Neves (1986) e Gens (1982).

Com base nas considerações anteriores, propõe-se a subdivisão da zona dos estados possíveis em duas zonas, uma designada de "elástica" (na realidade "quase–elástica", dado no seu interior ocorrerem pequenas deformações plásticas) e outra de "plástica", separadas pela trajectória de tensões não drenada (Figuras 11 e 12).

5 – CONSIDERAÇÕES FINAIS

Os resultados apresentados neste trabalho permitem constatar os seguintes aspectos:

(i) o modelo Cam Clay simula razoavelmente bem as condições de cedência em condições isotrópicas, em contraponto com o observado com o modelo Cam Clay Modificado;

(ii) a superfície de potencial plástico do solo em condições isotrópicas é adequadamente reproduzida pela superfície de cedência do modelo Cam Clay Modificado, pelo que as condições de escoamento plástico podem ser traduzidas pela lei de fluxo deste modelo;

(iii) a curva de cedência do modelo Melanie reproduz razoavelmente o comportamento anisotrópico deste solo, enquanto que a lei de fluxo não associada preconizada por este modelo não simula adequadamente o comportamento, em particular nas trajectórias de extensão;

(iv) em ambos os tipos de consolidação, constata-se que a cedência coincide geralmente com a trajectória de tensões não drenada referente ao estado normalmente consolidado;

(v) nos ensaios apresentados não se verifica totalmente o princípio de Rendulic, pelo que se propõe a subdivisão da zona dos estados possíveis numa zona ''elástica'' e noutra "plástica", correspondendo a fronteira à trajectória de tensões não drenada referente a um estado normalmente consolidado.

6 – AGRADECIMENTOS

Agradece-se o apoio financeiro concedido pelo Projecto PRAXIS/C/ECM/1425C/1998, pelo CIEC/unidade 148 e PRODEP.

7 – REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Atkinson, J.H. e Bransby, P.L. (1978). *The mechanics of soils. An introduction to critical state Soil Mechanics*. Mcgraw-Hill.

‡ Traduzido por uma relação biunívoca entre o índice de vazios e a tensão efectiva nas argilas saturadas normalmente consolidadas.

Banerjee, P.K. e Stipho, A. S. (1978). *Associated and non-associated constituive relations for undrained behaviour of isotropic soft clays*. Int. Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics, vol.2, pp 35-50.

Gens, A. (1982). *Stress-strain and strength characteristics of a low plasticity clay*. Ph D thesis, University of London.

Graham, J. e Lau, S.L.K. (1988). *Influence of stress-release disturbance, storage and reconsolidation procedures on de shear behaviour of reconstituted underwater clay*. Geotechnique 38, nº2, pp 279-300.

Jamiolkowski, M.; Ladd, C.C. ; Germaine, J.T. e Cancellotta, R. (1977). *New development in field and laboratory testing of soils*. Proc. with International Conference Smfe, Tokyo, 2, pp 421 - 490.

Magnan, J.P. (1986). *Modélisation numérique du comportement des argiles molles naturelles*. Rapport de Recherche LPC, No. 141, 256 páginas.

Maranha das Neves, E. (1986). *Equações constitutivas de meios particulados*. Memória nº 863, LNEC.

Mouratidis, A. e Magnan, J.P. (1983). *Modèle élastoplastique anisotrope avec écrouissage pour le calcul des ouvrages sur sols compressibles*. Rapport de Recherche LPC, No. 121.

Venda Oliveira, P.J. (1992). *Algumas características do comportamento de um solo de baixa plasticidade*. Tese de dissertação de Mestrado em Mecânica dos Solos, UNL.

Venda Oliveira, P.J. (2000). *Aterros sobre solos moles – Modelação numérica*. Tese de Doutoramento, Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade de Coimbra.