

OS MODELOS CAM-CLAY ORIGINAL E MODIFICADO NA PREVISÃO DO COMPORTAMENTO DE ARGILAS NORMALMENTE CONSOLIDADAS

ORIGINAL AND MODIFIED CAM-CLAY MODELS APLIED FOR PREDICTION THE BEHAVIOUR OF NORMAL CONSOLIDATED CLAYS

Biarez J., *Professeur de l'Ecole Central Paris*

Gomes Correia A., *Doutor em Engenharia Civil, Professor Associado do IST*

Da Silva E., *Engenheira Civil, Investigadora do Centro de Geotecnia*

RESUMO

Ao efectuar a simulação de um problema geotécnico pelo método dos elementos finitos (MEF), é necessário definir leis de comportamento para o material solo que consigam traduzir adequadamente a resposta deste quando sujeito a várias solicitações, incluindo-se nestas os modelos Cam-Clay Original e Modificado. Com base num estudo conduzido sobre cerca de uma dezena de ensaios triaxiais correntes, de compressão, drenados e não drenados, efectuados em argilas normalmente consolidadas verificou-se que o modelo Cam-Clay Modificado representa de modo satisfatório o comportamento destas argilas. Em contrapartida o modelo Cam-Clay Original apresenta algumas deficiências, sobretudo no que respeita à previsão da evolução, por um lado do índice de vazios com o nível de deformação (ensaio drenado), e por outro da forma da curva tensão-deformação.

ABSTRACT

In order to simulate a geotechnical problem, using the finite element method it is necessary to define adequate models behaviour for the soil, being Original and Modified Cam-Clay models two of the possible options. Based on current triaxial tests of compression, for drained and undrained conditions, and for normally consolidated clay, it was observed that the Modified Cam-Clay model represents satisfactory, the clay behaviour. On the contrary, Original Cam-Clay model is not sufficiently accurate to predict the evolution of void ratio with the deformation level (drained test) and the trend of stress-strain curve.

1 - INTRODUÇÃO

Com o avanço da informática e dos meios computacionais disponíveis, os métodos de cálculo automático vêm sendo cada vez mais utilizados. A principal finalidade destes métodos de cálculo automático será antecipar o comportamento das obras e assim otimizar as técnicas de engenharia empregues, analisar os acidentes ou incidentes e reformular os métodos de dimensionamento, ultrapassar os limites dos métodos aproximados de cálculo e ainda ultrapassar os limites dos métodos exactos que não contemplam situações complexas. Por estes motivos, o método dos elementos finitos (MEF), vem sendo aplicado com bastante frequência na modelação de casos de obras geotécnicas, permitindo assim a consideração de geometrias mais complexas, de comportamentos elásticos não lineares ou elastoplásticos para traduzir o comportamento dos solos, e de fenómenos diversos tais como o tempo e a percolação.

Dentro das leis de comportamento dos solos, disponíveis em programas recorrendo ao MEF, encontram-se os modelos Cam-Clay Original e Modificado. Estes modelos têm a vantagem de utilizar um número reduzido de parâmetros geotécnicos com significado físico bem compreendido pelos Engenheiros. Tal facto merece o aprofundamento da adequabilidade destes dois modelos na previsão do comportamento de resultados observados experimentalmente. Os parâmetros utilizados nos modelos Cam-Clay Original e Modificado, são relacionados não só com parâmetros intrínsecos do solo como também com os parâmetros índices, sendo estas relações de grande utilidade na prática da engenharia.

Hoje em dia recorre-se aos ensaios triaxiais para a obtenção dos parâmetros que permitem descrever uma lei de comportamento para o solo, podendo definir-se o estado de tensão e deformação com base em apenas quatro variáveis: $p' = (\sigma'_1 + \sigma'_2 + \sigma'_3)/3 \rightarrow$ tensão média efectiva; $q = (\sigma'_1 - \sigma'_3) \rightarrow$ tensão deviatória; $\varepsilon_v = \varepsilon_1 + \varepsilon_2 + \varepsilon_3 \rightarrow$ deformação volumétrica e $\varepsilon_s = (2/3) \cdot (\varepsilon_1 - \varepsilon_3) \rightarrow$ deformação distorcional. Os ensaios triaxiais correntes ($\sigma'_2 = \sigma'_3$) realizados sobre argilas partem de um estado de tensão isotrópico ($\sigma'_1 = \sigma'_2 = \sigma'_3 = c'^e$) ou ($p' = c'^e$; $q = 0$), o qual é caracterizado, no plano (e ; $\log p'$), pela linha de consolidação virgem ou linha de consolidação isotrópica (ISO). Seguidamente ao estado isotrópico, submete-se o solo a um incremento de σ'_1 , a velocidade constante, verificando-se que as amostras atingem a rotura ou "plasticidade perfeita" (PP) uma vez excedida a sua capacidade resistente. A plasticidade perfeita pode ser representada no plano (p' ; q) por uma linha recta ($q = Mp'$), sendo o estado de tensão para a qual esta ocorre obtido pela intercepção desta mesma linha com a que define a trajectória do ensaio triaxial, quer drenado (figura 1-a), quer não drenado (figura 1-b), estando-lhe ainda associado um índice de vazios ("Biares & Hicher, 1994")

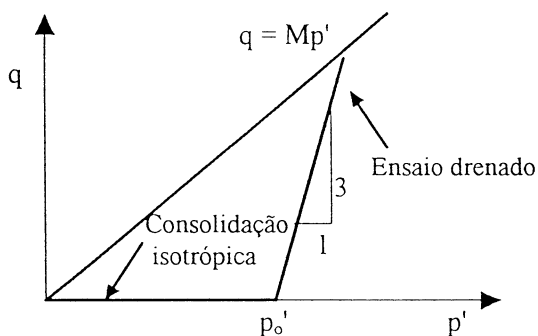


Figura 1-a) Ensaio triaxial Drenado

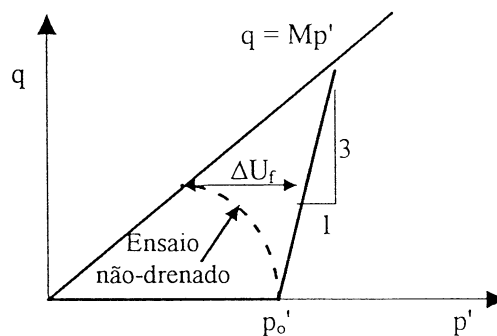


Figura 1-b) Ensaio triaxial não-drenado

Para descrever o estado e comportamento de uma amostra de solo durante um ensaio triaxial, será necessário observar o andamento das variáveis (p' ; q ; v), sendo " $v = 1 + e$ " o volume específico (notação de Cambridge), ou das variáveis (s' ; t ; e), sendo $s' = (\sigma'_1 + \sigma'_3)/2$; $t = (\sigma'_1 - \sigma'_3)/2$ e " e " o índice de vazios, (notação MIT) (figura 2-a e figura 2-b).

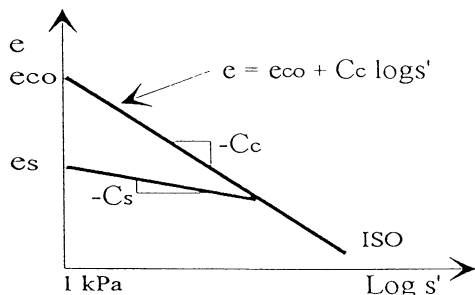
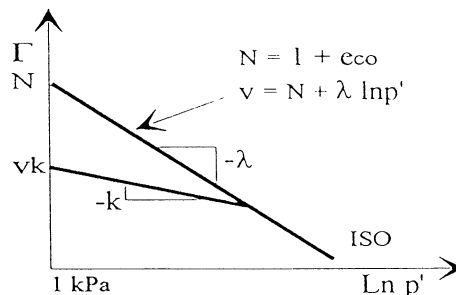
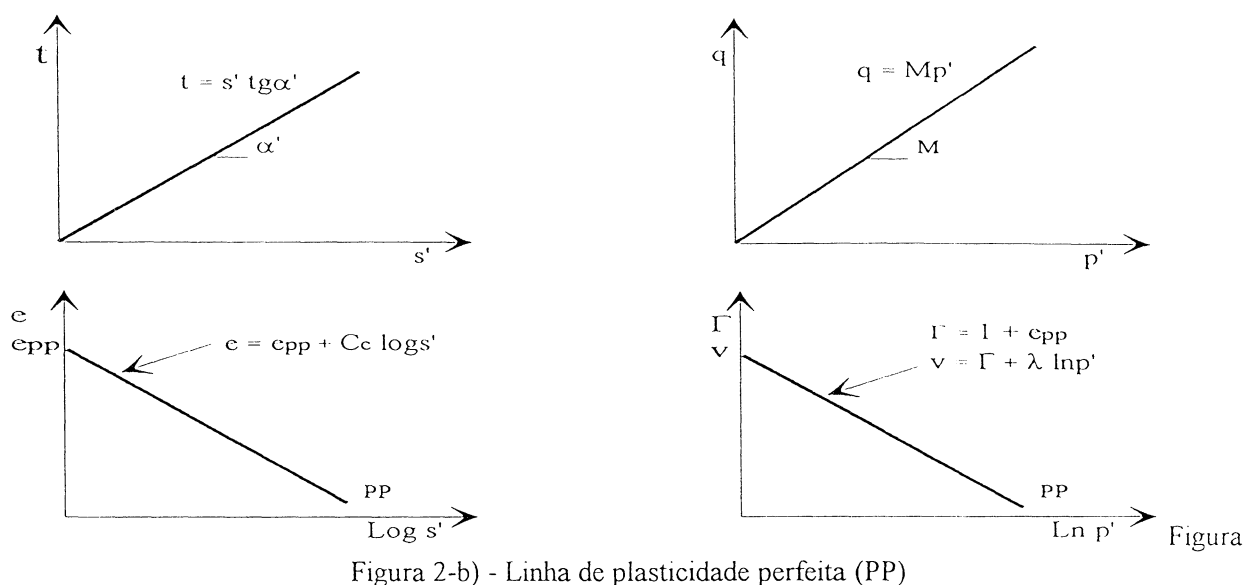


Figura 2-a) - Linha de consolidação isotrópica (ISO) e linha de descarga/recarga





2 - MODELO DE CAMBRIDGE / CAM-CLAY

O modelo Cam-Clay foi inicialmente desenvolvido por "Roscoe" (1963) - Cam-Clay Original, sendo mais tarde modificado por "Roscoe & Burland" (1968) - Cam-Clay Modificado. O modelo foi criado para descrever o comportamento de argilas saturadas normalmente consolidadas e ligeiramente sobreconsolidadas ("Zervoyannis", 1982). A diferença entre estes dois modelos reside na formulação assumida para a dissipação do trabalho, que implica alterações na lei de fluxo, obtendo-se assim expressões diferentes para os dois modelos (Quadro 1).

Quadro I - Equações utilizadas nos modelos Cam-Clay Original e Modificado

	Cam-Clay Original	Cam-Clay Modificado
Superfície de carga	$q = M \cdot p' \cdot \ln \left(\frac{p'_m}{p'} \right)$	$q = M \cdot p' \cdot \sqrt{\left(\frac{p'_m}{p'} \right) - 1}$
Variação da	$\delta \epsilon_{ve} = \frac{k \cdot \delta p'}{(1 + e_0) \cdot p'}$	$\delta \epsilon_{ve} = \frac{k \cdot \delta p'}{(1 + e_0) \cdot p'}$
deformação volumétrica	$\delta \epsilon_{vp} = \frac{\delta e_p}{(1 + e_0)} = \frac{\lambda - k}{(1 + e_0)} \cdot \left(\frac{\delta p'}{p'} + \frac{\delta \eta}{M} \right)$	$\delta \epsilon_{vp} = \frac{\delta e_p}{(1 + e_0)} = \frac{\lambda - k}{(1 + e_0)} \cdot \left(\frac{\delta p'}{p'} + \frac{2\eta \delta \eta}{M^2 + \eta^2} \right)$
Variação da	$\delta \epsilon_{se} = 0$	$\delta \epsilon_{se} = \frac{\delta q}{3G}$
deformação distorcional	$\delta \epsilon_{sp} = \frac{\delta \epsilon_{vp}}{M - \eta}$	$\delta \epsilon_{sp} = \frac{2\eta \cdot \delta \epsilon_{vp}}{M^2 - \eta^2}$
Variação da pressão intersticial	$\delta u = p_0 - p + \frac{q}{3}$	$\delta u = p_0 - p + \frac{q}{3}$
Deformação axial	Drenado $\epsilon_1 = \epsilon_{st} + \frac{\epsilon_{vt}}{3}$	Drenado $\epsilon_1 = \epsilon_{st} + \frac{\epsilon_{vt}}{3}$
	Não-Drenado $\epsilon_1 = \epsilon_{st}$	Não-Drenado $\epsilon_1 = \epsilon_{st}$

Nas situações em que a ruptura ocorre com $\eta < M$ geram-se deformações volumétricas plásticas de compressão (ensaio drenado) ou incrementos de pressões intersticiais positivos (ensaio não-drenado). No caso contrário, ou seja, para $\eta > M$ geram-se deformações volumétricas plásticas dilatantes (ensaio drenado) ou incrementos de pressões intersticiais negativos (ensaio não-drenado). Quando $\eta = M$, as deformações volumétricas plásticas serão nulas dado que o volume plástico mantém-se constante (figura 3).

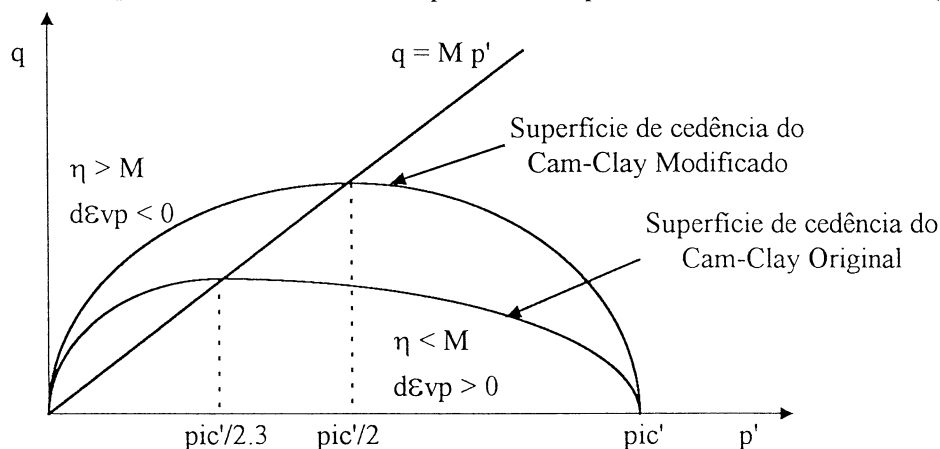


Figura 3 - Superfície de cedência para o modelo Cam-Clay Original e Modificado

Estes modelos além de serem simples quando comparados a outros, apresentam ainda a grande vantagem de apenas necessitarem de três parâmetros, M' ; C_c e C_s (base 10) ou M' ; λ e λ_d (base e), para a sua definição. No entanto, alguns destes parâmetros podem obter-se com base em correlações empíricas (Biarez ; Hicher, 1990). Assim, para as argilas remexidas NC é possível estimar o índice de compressibilidade C_c em função do limite de liquidez, W_L em (%), ou do índice de plasticidade, I_p em (%), (figura 4-a). Para as areias, e com base na relação d_{60}/d_{10} (coeficiente de uniformidade) e para uma geometria e relação entre o raio mínimo e máximo das partículas, dado por R , será possível determinarem-se os valores do índice de vazios uma vez atingida a plasticidade perfeita, e_{pp} , para uma dada tensão de confinamento σ'_3 (figura 4-b).

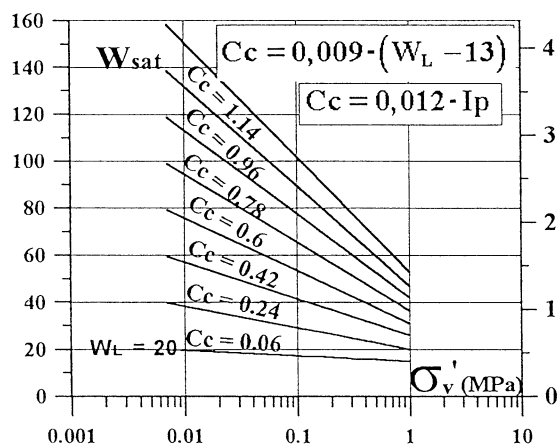


Figura 4-a) Determinação de C_c (argilas NC)

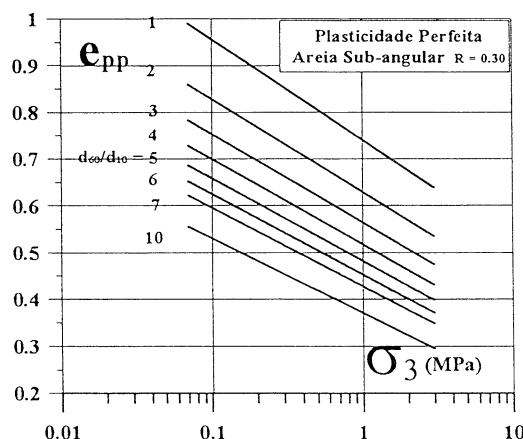


Figura 4-b) Determinação de e_{pp} (solos granulares)

Será ainda importante referir que estas propriedades para solos normalmente consolidados são independentes do arranjo das partículas, ou seja do seu índice de vazios inicial. No entanto para solos sobreconsolidados o índice de vazios inicial e o estado de tensão inicial são dados muito importantes, assim como o valor do grau de sobreconsolidação (O.C.R).

3 - SIMULAÇÃO E RESULTADOS

A simulação dos resultados dos ensaios triaxiais correntes em condições drenadas e não drenadas, em argilas normalmente consolidadas ("Kaolinite de Zervoyannis" e "Argila de Ladd"), foi realizada recorrendo a um programa, *CRIS* (Ortigão, 1993), que utiliza como lei de comportamento os modelos Cam-Clay Original e Modificado. Com os dados fornecidos no quadro 2, executou-se a simulação para estes dois solos, obtendo-se assim os resultados indicados no quadro 3 para as condições drenadas e no quadro 4 para as condições não drenadas. Nestes são apresentados não só os valores da tensão de consolidação isotrópica, ou seja a tensão inicial antes da fase de corte, como também os valores correspondentes à plasticidade perfeita.

Quadro 2 - Valores dos parâmetros para as argilas

	"Kaolinite de Zervoyannis, 1984"	"Argila de Ladd, 1964"
ϕ'	21°	23°
Cc	0.543	0.211
Cs	0.166	0.077
e_{pp} ($p'=1$ kPa)	2.4	1.08
G	34 MPa	34 MPa
M'	0.81	0.9
λ	0.236	0.092
k	7.22×10^{-2}	3.35×10^{-2}
W_L	70 %	46 %
I_p	30 %	24 %

Quadro 3 - Ensaios drenados: Valores obtidos na plasticidade perfeita

	p'_o [kPa]	p'_{pp} [kPa]	q_{pp} [kPa]	e_{pp}	v
Kaolinite NC	200.0	274.0	222.0	1.075	2.075
	400.0	548.0	444.0	0.912	1.912
	600.0	822.0	666.0	0.816	1.819
	800.0	1096.0	888.0	0.748	1.748
Argila de Ladd	400.0	571.4	514.3	0.497	1.497
NC	800.0	1142.9	1028.6	0.433	1.433

Quadro 4 - Ensaios Não drenados: Valores obtidos na plasticidade perfeita

	Modelo Cam-Clay	p'_o [kPa]	p'_{pp} [kPa]	q_{pp} [kPa]	Δu [kPa]	A	$e = C^{te}$
Kaolinite NC		200.0	123.6	100.1	110.0	1.10	1.263
	Modificado	400.0	247.2	200.3	219.5	1.10	1.100
		780.0	482.1	390.5	428.0	1.10	0.942
		200.0	99.9	80.9	127.1	1.57	1.313
	Original	400.0	199.8	161.9	254.1	1.57	1.150
		780.0	389.7	315.6	495.5	1.57	0.992
Argila de Ladd NC	Modificado	800.0	515.3	463.7	439.3	0.95	0.506
	Original	800.0	424.1	381.7	503.1	1.32	0.524

Sobrepondo os resultados das simulações com os dos ensaios triaxiais laboratoriais, obtiveram-se as figuras 5, 6, 7, 8, 9, 10, 11 e 12.

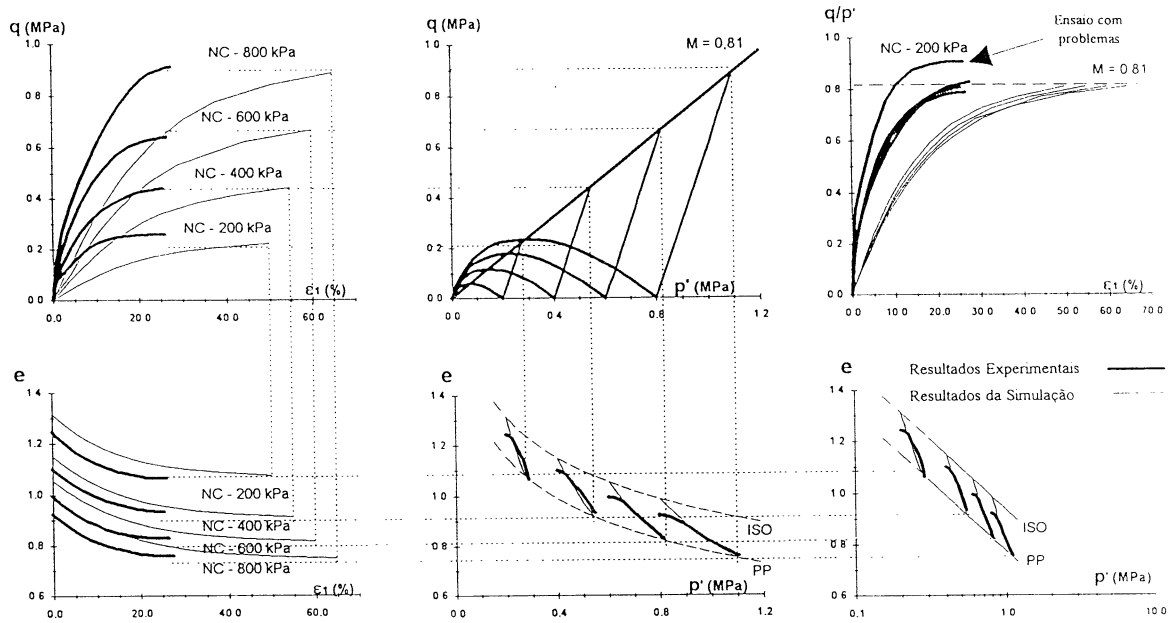


Figura 5 - Simulação com modelo Cam-Clay Original para ensaio triaxial drenado - Kaolinite

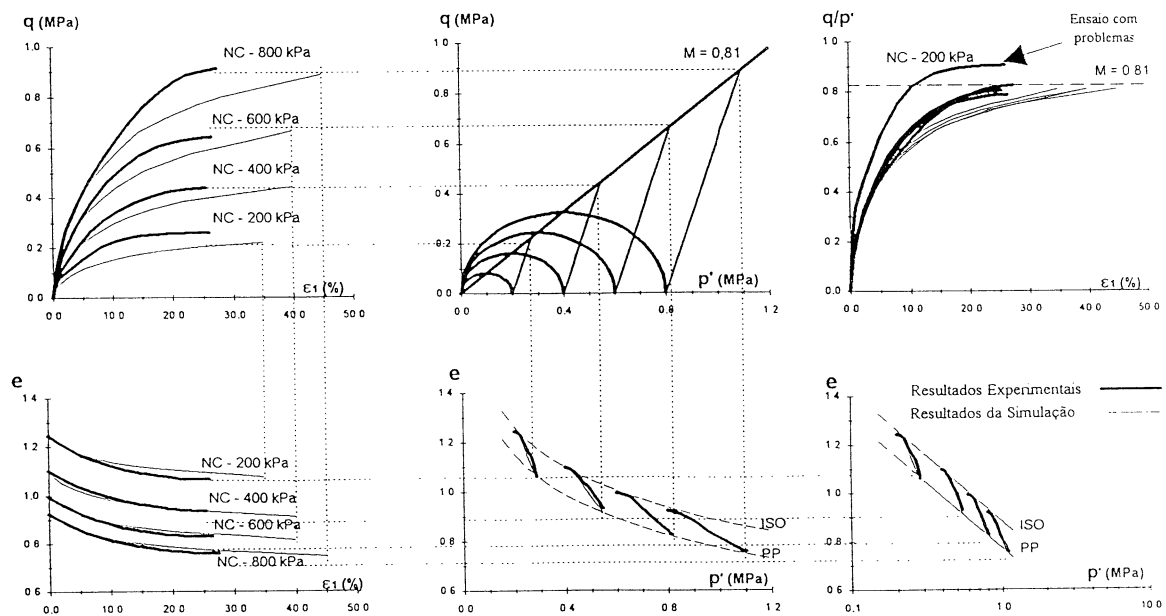


Figura 6 - Simulação com modelo Cam-Clay Modificado para ensaio triaxial drenado - Kaolinite

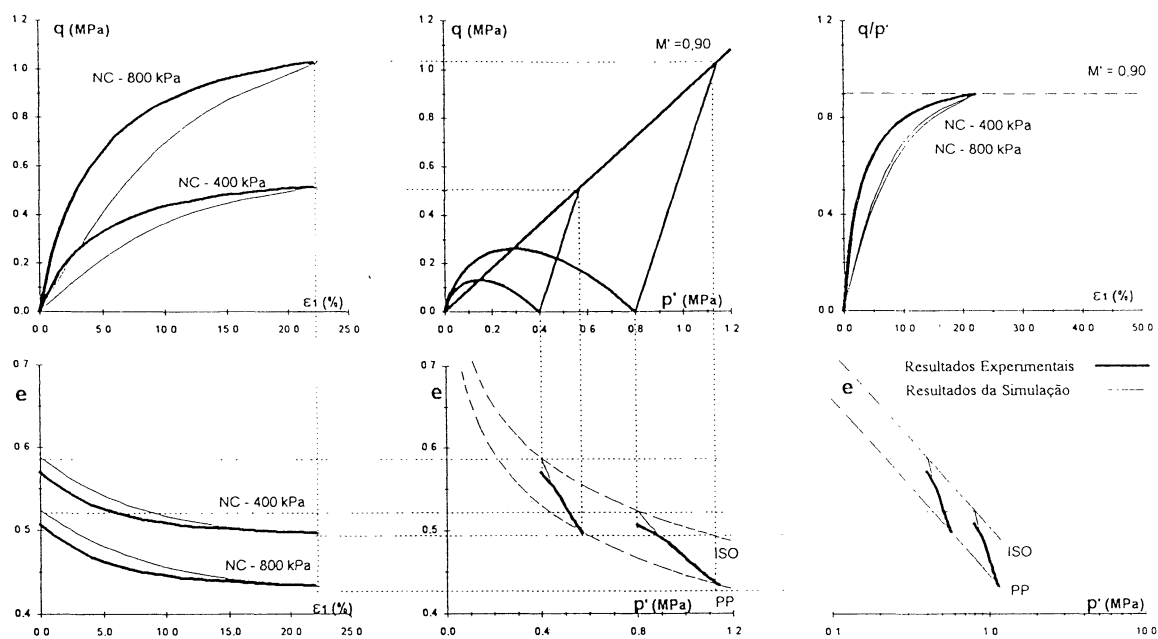


Figura 7 - Simulação com modelo Cam-Clay Original para ensaio triaxial drenado - Argila de Ladd

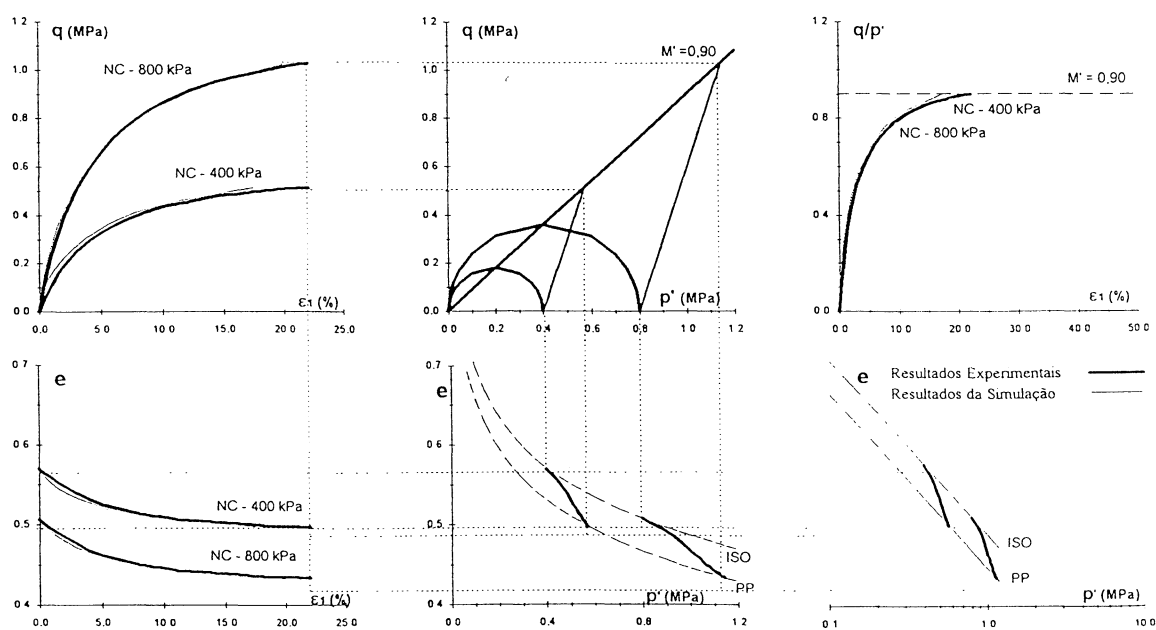


Figura 8 - Simulação com modelo Cam-Clay Modificado para ensaio triaxial drenado - Argila de Ladd

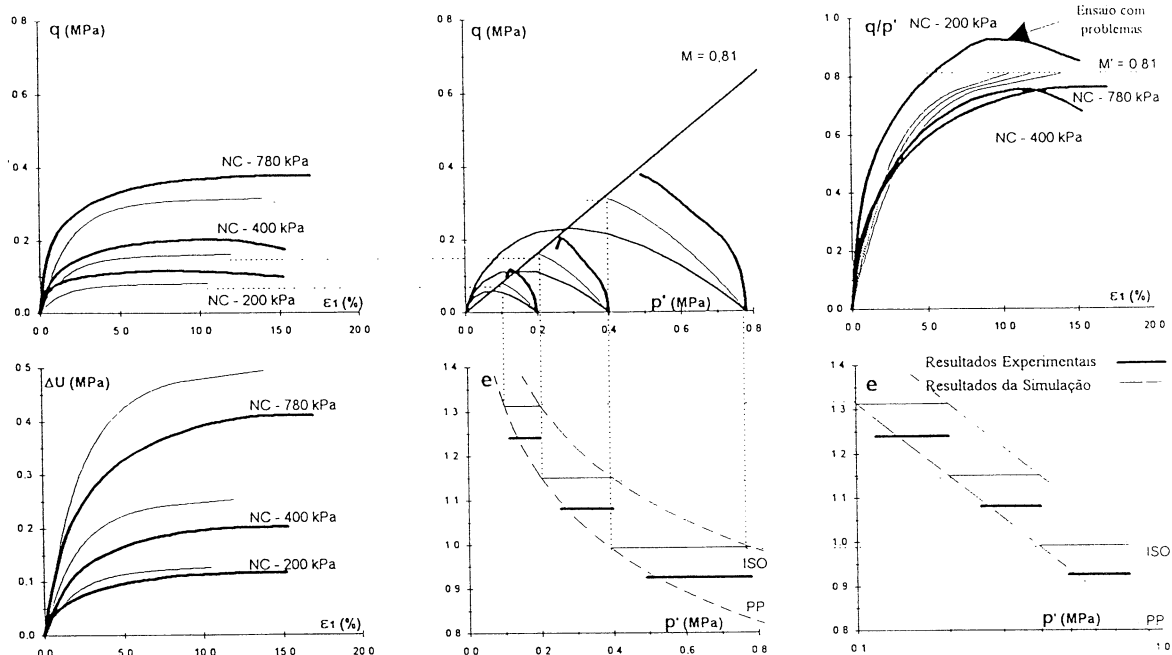


Figura 9 - Simulação com modelo Cam-Clay Original para ensaio triaxial não drenado - Kaolinite

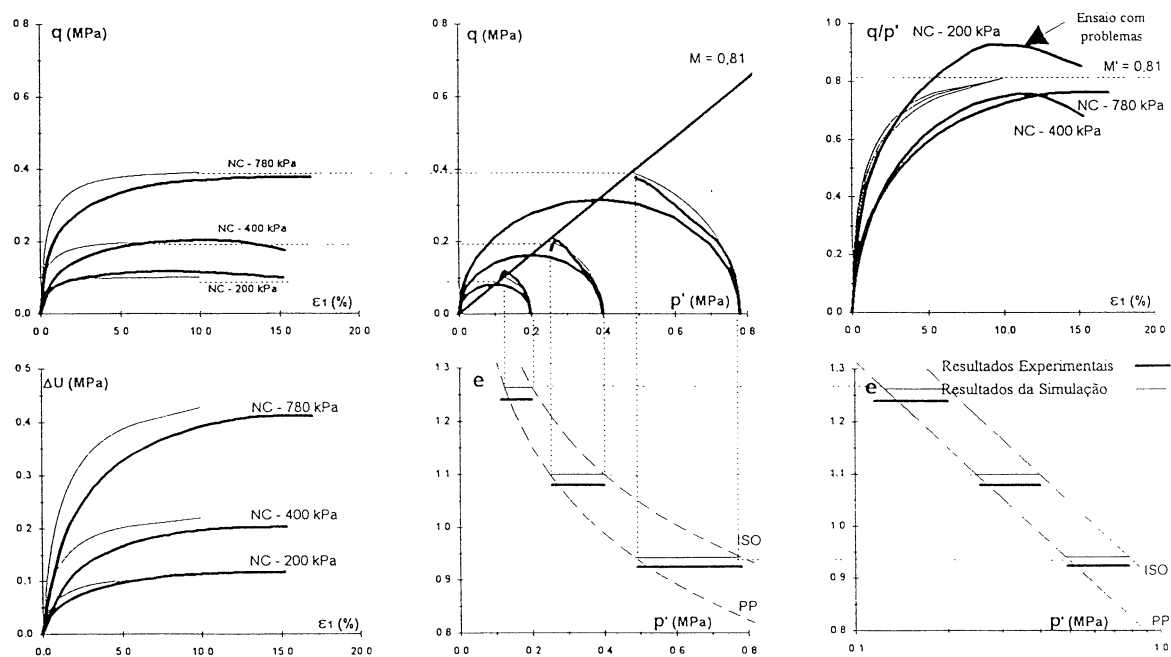


Figura 10 - Simulação com modelo Cam-Clay Modificado para ensaio triaxial não drenado - Kaolinite

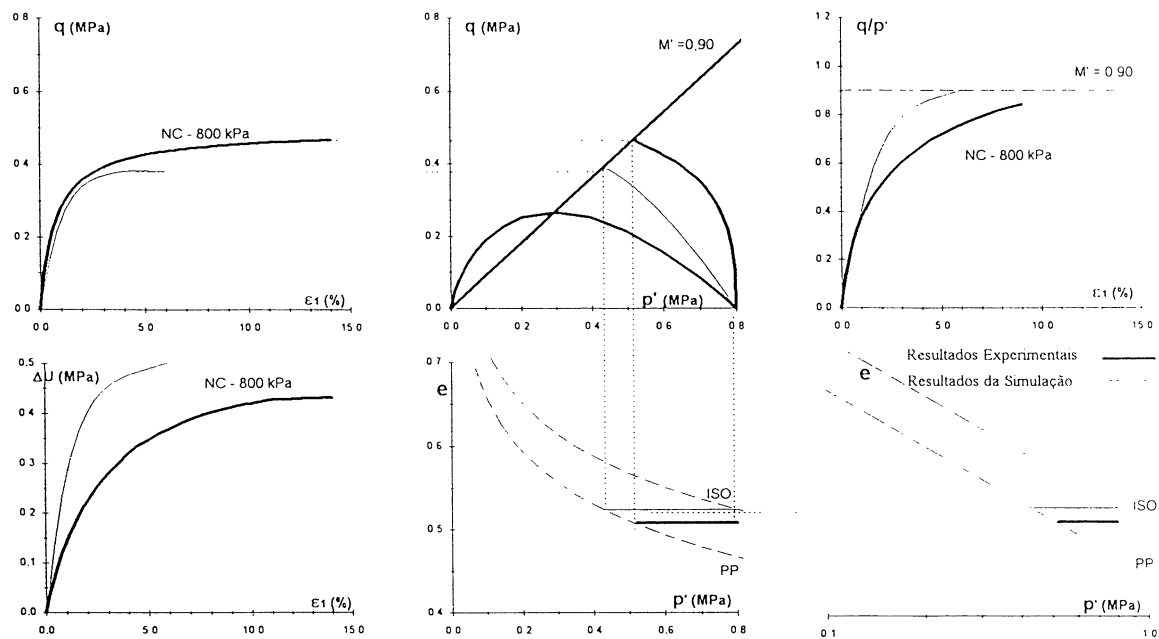


Figura 11 - Simulação com modelo Cam-Clay Original para ensaio triaxial não drenado - Argila de Ladd

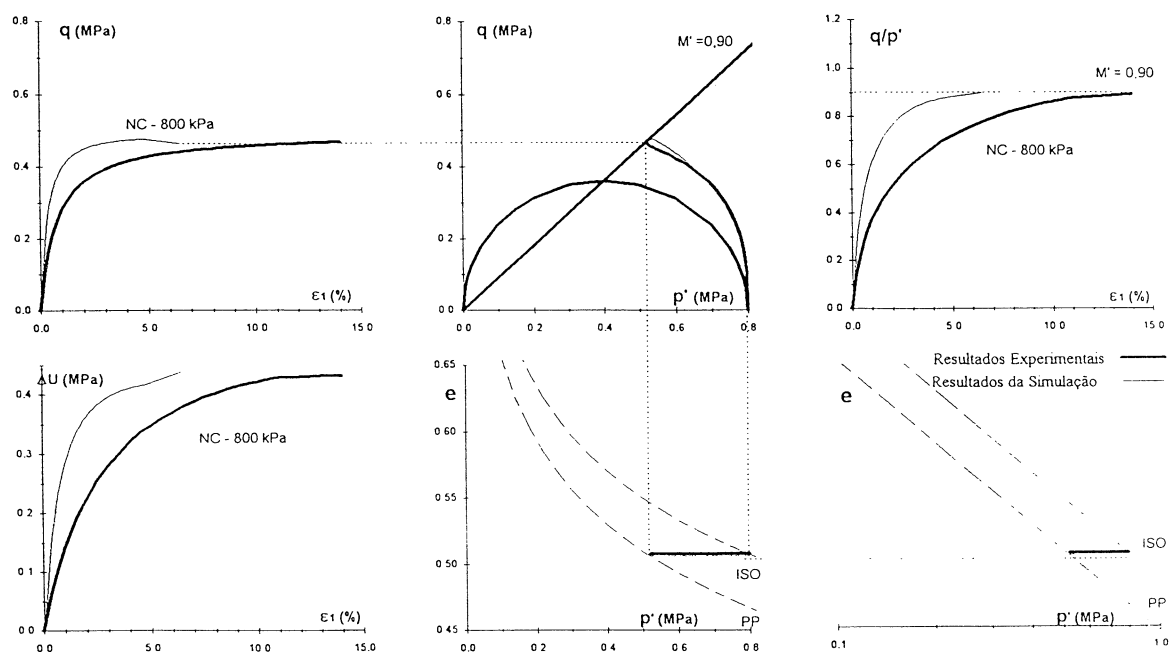


Figura 12 - Simulação com modelo Cam-Clay Modificado para ensaio triaxial não drenado- Argila de Ladd

4 - CONSIDERAÇÕES FINAIS

Para os ensaios conduzidos em condições drenadas verifica-se que os valores da tensão efectiva média, tensão deviatória e índice de vazios, correspondentes à plasticidade perfeita são iguais, quer para o modelo Cam-Clay Original, quer para o Modificado. No entanto, o andamento apresentado pelas curvas em alguns planos são diferentes. Assim, observa-se que o modelo Cam-Clay descreve relativamente bem os ensaios triaxiais drenados, muito particularmente o modelo Cam-Clay Modificado. Este traduz extremamente bem, não só a variação do índice de vazios, como também a relação tensão-deformação ao longo do ensaio. Salienta-se ainda para este modelo a excelente aproximação no plano (e ; p') dos resultados do ensaio com a simulação. Quanto ao modelo Cam-Clay Original verifica-se que este não traduz adequadamente o valor inicial do índice de vazios, além de também não representar bem a curva tensão-deformação.

Para as condições não drenadas, e contrariamente ao referido para os ensaios drenados, observa-se que no estado crítico se tem valores diferentes consoante o tipo de modelo utilizado. De qualquer modo continua a ser o modelo Cam-Clay Modificado que melhor traduz o comportamento do solo em quase todos os planos.

Finalmente conclui-se que o modelo Cam-Clay Modificado representa de modo satisfatório o comportamento das argilas normalmente consolidadas em compressão triaxial, com a grande vantagem de utilizar um número reduzido de parâmetros com significado físico bem definido e compreendido pelos engenheiros.

AGRADECIMENTOS

Os autores gostariam de agradecer ao Professor Ramalho Ortigão da Universidade do Rio de Janeiro pela cedência do programa CRIS para a simulação dos ensaios triaxiais, ao "Laboratoire de l' Ecole Central Paris" pelos dados experimentais facultados, e ainda aos Programas "Capital Humano e Mobilidade" e "Praxis XXI", os quais subsidiaram a realização deste trabalho.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Biarez J.; Hicher P-Y. (1990). Lois de comportement des sols remaniés et des matériaux granulaires. Notes de cours pour le DEA " mécanique des sols et structures " Tome1 : Approche expérimentale. ECP - 3^{ème} édition - Juillet.
- Biarez J.; Hicher P-Y. (1994). Elementary Mechanics of Soil Behaviour, Saturated, Remoulded soils. A.A. Balkema / Rotterdam / Brookfield.
- Ladd C.C. (1964). Stress-Strain behaviour of saturated Clay and basic strength principles. Rec. Rapp. R64-17, N° 1, Part 1, M.I.T.
- Ortigao J.A.R. (1993). Introdução à Mecânica dos Solos dos Estados Críticos. Livros Técnicos e Científicos Editora Ltda / Rio de Janeiro.
- Roscoe K.H.; Wroth C. P. (1968). Critical state soil mechanics. McGraw-Hill, London.
- Wood D.M.(1990). Soil Behaviour and Critical State Soil Mechanics. Cambridge University Press / U.S.A.
- Zervoyannis C. (1982). Etude synthétique des propriétés mécaniques des argiles et des sables sur chemins oedométrique et triaxial de révolution . Thèse de Docteur ingénieur, Ecole Centrale Paris.