

Análise da modelação de um solo de baixa plasticidade

Paulo José da Venda Oliveira
F.C.T.U.C. - Dep. de Eng. Civil

Sumário - Neste trabalho apresentam-se os resultados experimentais obtidos com a argila de Santa Clara, num estado reconstituído, visando verificar a sua possível modelação.

Após breve discussão dos modelos Cam-Clay, Cam-Clay modificado, $[p,q,\theta]$ (estabelecidos para condições isotrópicas) e Melanie (estabelecido para condições K_0), são analisados os resultados de duas séries de ensaios drenados, confrontando-se a zona de início de cedência de cada provete com a superfície preconizada pelos respectivos modelos. Simultaneamente procede-se à verificação se a lei de fluxo estabelecida para cada modelo é representativa do comportamento do solo analisado.

Finalmente, com base nos resultados da argila de Santa Clara e de Lower Cromer Till, apresenta-se uma proposta para a Superfície de Estado Limite (S.E.L.) global, após se tecerem algumas considerações acerca da aplicabilidade da teoria clássica do estado crítico a este solo.

Summary - In this work it was compared the behaviour of the clay of Santa Clara, with some theoretic models. Reconstituted samples were used.

Two types of tests were used, in order to investigate the behaviour of this soil, and compared with hardening elastic-plastic models, using isotropic consolidation (Cam-Clay, Modified Cam-Clay and $[p,q,\theta]$) and using K_0 consolidation (Melanie model).

Finally, with the results of Santa Clara clay and Lower Cromer Till it presents a design to a general Surface of State Limit (S.E.L.).

1 - INTRODUÇÃO

Com o advento da tecnologia, a utilização de computadores passou a fazer parte do quotidiano do cidadão comum. No domínio da geotecnia, também se vem observando uma crescente utilização deste meio poderosíssimo, permitindo a análise de problemas de elevada complexidade, num curto intervalo de tempo, ajudando o geotécnico a decidir.

A utilização progressiva de sofisticados programas de cálculo automático, principalmente recorrendo ao método dos elementos finitos (ou afins), com a incorporação de modelos de elevada complexidade, permite que a realidade geotécnica seja reproduzida com maior fiabilidade. No entanto, todos os modelos têm limitações no seu campo de aplicação, simulando somente o comportamento de um número restrito de casos, dado que, geralmente o estabelecimento de um modelo é realizado para um tipo específico de solo.

Esta pequena pesquisa, teve como objectivo verificar se o comportamento da argila de Santa Clara pode ser simulado pelos modelos derivados da "escola" de Cambridge. Recorreu-se à utilização de amostras reconstituídas, obtidas por consolidação num edómetro de grandes dimensões, para que a variabilidade entre elas fosse reduzida ao mínimo possível, limitando deste modo as variáveis em jogo.

2 - ALGUMAS CARACTERÍSTICAS DO SOLO

Nos quadros I e II, apresentam-se as características básicas (mineralogia, granulometria, plasticidade, consolidação e resistência residual) da argila de Santa Clara (analisada neste trabalho e por Maranha das Neves[21]) e de Lower Cromer Till (investigado por Campos[5], Gens[7], Hight[9] e Maswoswe[17]).

Estes solos foram amplamente investigados na bibliografia, constituindo bons exemplos de comparação de resultados, principalmente em termos qualitativos, sendo este aspecto muito relevante, no caso de se pretender efectuar uma "globalização" de resultados.

3 - PRINCIPAIS CARACTERÍSTICAS DO COMPORTAMENTO ELASTOPLÁSTICO COM ENDURECIMENTO

Um corpo tem comportamento elastoplástico quando, até um determinado limite de tensão, designada por tensão de cedência, sofre deformações recuperáveis e proporcionais às tensões aplicadas (extensões elásticas), após a qual passa a sofrer deformações irreversíveis (plásticas), não sendo portanto, recuperáveis após a descarga [19].

Analise-se a relação tensão - deformação ideal representada na fig. I (a). Se o material for solicitado de 0 até X, ponto de cedência, exhibe comportamento linear tendo deformações elásticas, $\delta\epsilon^e$. Carregando de X a Y e descarregando até Z, observa-se que uma parte das deformações não são recuperáveis (plásticas) correspondendo à distância O a Z. A comparação das deformações elásticas entre O-X e Y-Z permite concluir que no troço X- Y ocorrem deformações elásticas e plásticas. Durante a recarga o material exhibe comportamento elástico até atingir o novo ponto de cedência Y. O fenómeno descrito, em que a tensão de cedência é uma função crescente da extensão plástica, é designada por endurecimento [19].

Generalizando para um estado de solicitação multiaxial, aos pontos de cedência correspondem superficies (fig. I (b)). A solicitação no interior da superfície $X_A - X_C$, só provoca deformações elásticas (i.e. recuperáveis), sendo esta fronteira designada por superfície de cedência. No caso de materiais endurecíveis, se o carregamento prosseguir para além de $X_A - X_C$ haverá deformações permanentes, e a fronteira de cedência inicial será "arrastada" para nova posição $Y_A - Y_C$, sendo esta nova superfície de cedência designada por alguns autores por superfície de carga.

A partir do ponto de início das deformações irreversíveis, o estudo do comportamento terá que ser efectuado com base na teoria da plasticidade com endurecimento, baseado em três características essenciais:

3.1 - Superfície de cedência inicial

Como anteriormente exposto, esta superfície delimita estados de tensão que somente geram deformações elásticas (localizadas sobre ou no interior da fronteira), sendo

governadas pela teoria da elasticidade (lei de Hooke), de estados de tensão (que tentam atravessar esta superfície) originando deformações plásticas, sendo governadas por uma lei de endurecimento e de fluxo [19].

A especificação da superfície de cedência inicial, constitui pois um requisito primário e fundamental da teoria da plasticidade.

Como provado por Neves [20] e [21], as superfícies de cedência devem ser convexas, (podendo apresentar áreas locais planas).

3.2 - Lei de endurecimento

Como já referido, a lei de endurecimento define o “deslocamento” das superfícies de carga durante um carregamento plástico [20].

Os três modelos mais simples de endurecimento são o isotrópico, o cinemático e o misto (fig. II).

3.2.1 - Endurecimento isotrópico

Traduz uma expansão (ou retracção no caso de amolecimento) uniforme e sem distorção da superfície de cedência, à medida que se processa o escoamento plástico (fig. II (a)) [10].

3.2.2 - Endurecimento cinemático

A superfície de cedência sofre uma translação como um corpo rígido na direcção normal à superfície, com referência no ponto de cedência [10], à medida que o ponto de tensão A se desloca para B. Se se descarregar a partir de B, em trajectória inversa, verifica-se que em C o material entra novamente em cedência (fig. II (b)).

3.2.3 - Endurecimento misto

Trata-se de uma combinação dos modelos isotrópico e cinemático, isto é, a superfície de carga sofre translação e expansão uniforme em todos os sentidos, mantendo a forma inicial (fig. II (c)) [10].

3.3 - Lei de fluxo (ou escoamento)

Esta lei, fixa a direcção do vector dos incrementos de deformações plásticas em relação à superfície de escoamento. Para isso, deve-se representar no mesmo gráfico os incrementos de tensão e de deformação plástica, sendo necessário a correcta correspondência entre parâmetros de tensão e de deformação [1].

Perpendicularmente à resultante vector incremento de deformação plástica, define-se uma superfície que é designada por superfície de potencial plástico (fig. III). Se esta superfície coincidir com a superfície de cedência, o escoamento passa a ser denominado por *lei de fluxo associada*, isto é, o material verifica a lei da normalidade sendo o vector de incremento de deformações plásticas perpendiculares à superfície de escoamento.

4 - PARÂMETROS CARACTERÍSTICOS DOS ESTADOS CRÍTICOS

O conceito de estado crítico baseia-se na existência de um material ideal, que se comporta como um fluido friccional a volume específico (v) constante, quando p' e q satisfazem as seguintes equações [20]:

$$q = Mp' \quad (I)$$

$$v = T - \lambda \ln(p') \quad (II)$$

De acordo com Atkinson e Bransby [1], o estado crítico coincide com a rotura em provetes normalmente consolidados, enquanto que em amostras sobreconsolidadas verifica-se uma evolução pós-rotura em direcção ao estado crítico; contudo, este estado nem sempre é atingido, dado que a célula de trajectória de tensões não permite a aplicação de deformações elevadas e para esta gama de extensões o comportamento deixa de ser real(*).

A linha do estado crítico, é determinada com base em resultados de ensaios não drenados com amostras consolidadas isotropicamente e anisotropicamente. Na fig. IV representa-se a linha do estado crítico projectada em $q - p'$, onde também estão representados ensaios drenados em provetes ligeiramente sobreconsolidados ($ocr=2$). Tal como obtido originalmente por Parry (1960, citado por [1]), verifica-se que a recta representada (L.E.C.) se ajusta adequadamente aos resultados, sendo aproximadamente definida por $q/p' = M = 1,35$.

Na fig. V representa-se o diagrama $v - \ln(p')$, sendo a L.E.C. determinada com base nos ensaios de amostras normalmente consolidadas. Também se apresentam as trajectórias de provetes sobreconsolidados, observando-se uma clara tendência de evolução para o estado crítico, tal como referido na bibliografia. A L.E.C. é paralela à L.C.V, portanto com $\lambda = 0,0453$, obtendo-se $T = 1,77$ (sendo definido como o valor do volume específico correspondente a $p' = 1$ kPa).

Ensaio realizado por Neves [21] também com a argila de Santa Clara, conduziram aos seguintes parâmetros característicos do estado crítico:

$$M = 1,10 \quad ; \quad \lambda = 0,103 \quad ; \quad T = 1,935$$

sendo estes valores distintos dos obtidos neste trabalho. No entanto, tendo em conta a diferença de plasticidade entre os dois solos (quadro I), os resultados parecem lógicos.

Esta formulação dos estados críticos, constitui parte importante de modelos elaborados, estruturados a partir de suposições que têm em conta a dissipação de energia durante a cedência plástica, tais como o modelo Cam-Clay, Cam-Clay modificado, $[p, q, \theta]$ e o modelo Melanie. Estes modelos, introduzem uma distinção entre cedência e rotura utilizando o conceito da linha de estado crítico em conjunção com uma superfície de cedência dependente da deformação [19]. Nestes modelos, um solo sofrendo deformação por corte pode atravessar a superfície de cedência sem colapsar, continuando a deformar-se até que a dita linha (L.E.C.) seja atingida, onde existem condições de plasticidade ideal, isto é, progredindo a deformação sem variação adicional quer de índice de vazios quer de tensão, como anteriormente referido.

5 - COMPARAÇÃO DO COMPORTAMENTO COM MODELOS ELASTOPLÁSTICOS

Neste item, pretende-se comparar o comportamento elastoplástico da argila de Santa Clara, com o definido por diversos modelos teóricos, baseados nos modelos de

(*) Verifica-se que após rotura, a deformação começa a concentrar-se em zonas delgadas, sendo irreal o cálculo baseado nas extensões verificadas nas fronteiras, supondo que as condições no interior do provete são uniformes.

“Cambridge”. A comparação realiza-se ao nível da superfície de cedência inicial e verificação das leis de fluxo adoptadas. Não se realizou qualquer estudo tendente a verificar a lei de endurecimento. Analisa-se o comportamento em estado de consolidação isotrópica e consolidação Ko.

Somente se procede à análise do ramo “húmido” (isto é, à direita da linha dos estados críticos), dado que os resultados no lado “seco” sugerem a existência de uma superfície limite de Hvorslev. Além de Gens [7] com Lower Cromer Till, também Parry (1960, citado por Atkinson [1]) com argila de Weald e Hvorslev ((1960, referido por Neves [21])), obtiveram um comportamento do lado “seco” bem simulado por esta superfície.

5.1 - Provetes consolidados isotropicamente

5.1.1 - Descrição sumária de alguns modelos

De seguida apresentam-se as características fundamentais dos modelos utilizados nesta análise Cam-Clay, Cam-Clay modificado e $[p, q, \theta]$.

Cam-clay

Este modelo foi proposto por Roscoe e outro (1963) e Schofield e Wroth (1968, citados por Gens [7], tendo sido o primeiro modelo a utilizar o conceito de estado crítico. É basicamente definido pelas seguintes características:

- i) As deformações distorcionais (ε_p) são irreversíveis (isto é a componente elástica é nula):

$$\Delta \varepsilon_q^e = 0 ; \quad \Delta \varepsilon_p^e = \Delta \varepsilon_q \quad (\text{III})$$

- ii) as extensões volumétricas elásticas ocorrem devido à variação de posição na mesma linha “k”, enquanto que as plásticas são devidas ao deslocamento de uma linha “k” para outra (ver fig. VI).

$$\Delta \varepsilon_v = \Delta \varepsilon_v^e + \Delta \varepsilon_p^e ; \quad \Delta \varepsilon_v^e = k / (v \cdot p') \Delta p' \quad (\text{IV})$$

- iii) A função de cedência é a seguinte:

$$F = \frac{q}{M \cdot p'} + \frac{\lambda}{\lambda - k} \cdot \ln \left(\frac{p'}{p'_0} \right) = 0 \quad (\text{V})$$

Sendo a superfície de cedência inicial governada pela máxima tensão de préconsolidação (p'_0). Na fig. VII mostra-se o aspecto das diversas superfícies de cedência.

- iv) A lei de fluxo é associada, aplicando-se a lei da normalidade à superfície de cedência.

Cam-clay modificado

Este modelo foi proposto por Roscoe e Burland (1968, citado por Neves [20]), tendo como principal diferença em relação ao Cam-clay, a função de cedência, que é a seguinte:

$$F = \frac{p'}{p'_0} - \left(\frac{M^2}{M^2 + \eta^2} \right)^{1 - \frac{k}{\lambda}} \quad \text{com } \eta = \frac{q}{p'} \quad (\text{VI})$$

Na fig. VIII apresenta-se a geometria das diversas superfícies de cedência, sendo o tamanho da elipse inicial governado pela tensão de pré-consolidação máxima (p'_o). Neste modelo verifica-se que a tensão correspondente à intercepção da superfície de cedência com a linha dos estados críticos é metade de p'_o .

$[p, q, \theta]$

O modelo $[p, q, \theta]$ foi apresentado por U.A. Norris em 1980, sendo formulado basicamente a partir do Cam-clay modificado, apresentando no entanto duas diferenças fundamentais:

- i) representa uma tentativa de generalização, incluindo a influência da tensão principal intermédia.
- ii) representa maior flexibilidade na definição da superfície de cedência, permitindo o ajustamento da elipse à linha dos estados críticos de acordo com as características intrínsecas do solo obtidas experimentalmente, e não um valor pré-definido como no Cam-clay “modificado”.

A superfície de cedência é a elipse mostrada na fig. IX, tendo como equação [16]:

$$F = [p' - x]^2 + (q/h)^2 - a^2 = 0 \quad (\text{VII})$$

x - coordenada do centro da superfície

h - relação dos diâmetros nas direcções q e p

a - semi-diâmetro da elipse na direcção p

Como nos modelos anteriores, a superfície inicial é governada pela máxima tensão de pré-consolidação ($p'_o = x + a$), possuindo também uma lei de escoamento associada e o endurecimento dependente da deformação volumétrica.

5.1.2 - Análise dos resultados

Com a finalidade de verificar a modelação do comportamento da argila de Santa Clara, pelos modelos apresentados nos itens anteriores, foram realizados os seguintes ensaios:

Ensaio	RIDR 1	RIDR 2	RIDR 3	RIDR 4
Trajectória	$q/p' = 5$	$q/p' = 3$	$q/p' = 2,5$	$q/p' = 1$

Nas fig. X apresentam-se os resultados dos quatro ensaios, delimitando-se a zona de início de cedência simultaneamente com base na variação da extensão volumétrica e axial. Considera-se que o solo cede (plastifica) quando as curvas anteriores apresentam aumento da curvatura, afastando-se da linearidade inicial (elasticidade).

A definição de superfície de cedência exige uma determinação clara de um ponto de cedência, designado nos gráficos por ponto provável; de acordo com Mouratidis [18] e Graham [8] este ponto é definido somente pela variação de inclinação na curva $e_v - p'$. A metodologia é semelhante à proposta de Casagrande para a determinação da tensão de pré-consolidação [11], sendo apresentada na fig. XI.

Dado que, nos resultados dos ensaios a definição de um ponto de cedência é ambígua, julga-se ter mais sentido fazer a análise em termos de uma zona, e não de um ponto de provável início de cedência.

Na fig. XII comparam-se as envolventes de cedência especificadas pelos modelos (apresentados no item anterior) e a trajectória de tensões não drenada, com a zona de início de cedência obtido nos quatro ensaios drenados. Observa-se que dos três modelos utilizados, o que mais se aproxima dos resultados é o Cam-clay, verificando-se em relação aos outros duas diferenças acentuadas. Os resultados são contrastantes com os citados por Neves [20] para argilas remoldadas, cujo comportamento é bem simulado pelo modelo Cam-clay modificado. A investigação experimental realizada por Banerjee e Stipho[2], em amostras de Caulinite ($w_p = 26\%$, $w_l = 52\%$) reconstituídas isotropicamente conduziu a conclusões similares, isto é, o modelo Cam-clay aproxima-se mais dos resultados experimentais que o Cam-clay modificado.

Tal como verificado por Gens[7], em ensaios realizados com Lower Crower Till, a superfície que melhor delimita a zona quase-elástica (designada por elástica) da plástica, é a trajectória correspondente ao ensaio não drenado de uma amostra normalmente consolidada. Na fig. XII observa-se que em todas as trajectórias (drenadas) seguidas, a zona de início de cedência é atravessada pelo caminho de tensões do ensaio não drenado, verificando-se coincidência ou grande aproximação ao ponto de cedência mais provável (definido pelo método expresso na fig. XI).

Nas figuras XIII, XIV e XV compara-se para cada trajectória drenada a resultante do vector de deformação plástica com as superfícies de cedência dos três modelos isotrópicos analisados. Os incrementos de extensão plástica ($\Delta \epsilon_p^q$, $\Delta \epsilon_p^p$) foram calculadas de acordo com a metodologia definida por Oliveira[22], para um pequeno incremento de carga aplicada a partir do ponto de cedência definido teoricamente (fig. XI). No quadro III apresenta-se o resumo destes cálculos observando-se que a componente elástica da tensão distorcional ($\Delta \epsilon_q^e$) é muito elevada (aumentando com a inclinação da trajectória) para poder ser desprezada, tal como preconizada nos modelos ditos de "Cambridge".

Perpendicularmente ao vector resultante é traçada uma linha, que pretende representar a direcção da superfície de potencial plástico (Q) nesse ponto, permitindo a comparação com a superfície de cedência (F), de modo a fazer a verificação se a lei de fluxo é associada ou não. Apesar de os resultados conduzirem a uma certa incongruência entre as inclinações de RIDR2 ($q/p = 3$) e RIDR3 ($q/p = 2,5$), nota-se claramente o não cumprimento da lei da normalidade em relação à curva de cedência por parte de Cam-clay, enquanto que no Cam-clay modificado e no $[p, q, \theta]$, verifica-se maior concordância entre a inclinação da superfície de cedência e a direcção da superfície de potencial plástico deduzida dos ensaios.

Comparando a resultante do vector de deformação plástica com o caminho de tensões do ensaio não drenado (fig. XVI), não se pode tirar uma conclusão válida, dado que para RIDR2 ($q/p = 3$) e RIDR4 ($q/p = 1$) observa-se perpendicularidade do vector resultante em relação à trajectória, enquanto que nos restantes ensaios os resultados são mais desfazados.

Conclui-se, que o comportamento em termos de cedência da argila de Santa Clara é semelhante ao especificado pelo modelo Cam-clay, enquanto que, o estabelecimento de uma lei de fluxo associada apresenta maior consistência no caso do modelo Cam-clay

modificado e $[p, q, \theta]$. Resultados deste tipo não parecem ser um caso único, dado que Banerjee e outro [2], referem a existência de um modelo com uma lei de fluxo não associada ($F \neq G$), cuja superfície de cedência é igual à do Cam-clay e as superfícies de potencial plástico são descritas por elipses com a mesma forma do modelo Cam-clay modificado.

5.2 - Provetes consolidados em condições “Ko”

5.2.1 - Descrição sumária do modelo Melanie

O modelo Melanie é apresentado por Mouratidis e Magnan [18], sendo baseado no Cam-clay modificado, mas incluindo o efeito da anisotropia. As principais diferenças em relação ao modelo citado são os seguintes:

- i) As superfícies de cedência são definidas no plano (s', t) , tendo como eixo principal a linha “ko”. A função de cedência é a seguinte:

$$F = A^2 \left[s' \cdot \cos \theta + \sin \theta - \frac{s_p}{AC} \right]^2 + B^2 \left[t \cdot \cos \theta - s' \cdot \sin \theta \right]^2 - \frac{s_p^2}{C^2} = 0 \quad (\text{VIII})$$

com:

$$A = 2 (\sin \theta + \cos \theta) \quad (\text{IX})$$

$$B^2 = - \frac{A^2 \cdot \cos \theta}{C \cdot \sin^2 \theta} \left[C \cdot \cos \theta - \frac{2}{A} \right] \quad (\text{X})$$

$$C = 0,6$$

$$\theta = \arctg \left(\frac{1 - k_0}{1 + k_0} \right) \quad (\text{XI})$$

ko - coeficiente de impulso em repouso

sp - parâmetro de endurecimento, calculado por $s_p \cong 0,6 s_c$ (fig. XVII)

A curva de cedência inicial é estabelecida pela tensão de pré-consolidação, através do valor do parâmetro s_p ; as diversas elipses são homotéticas sendo estabelecidas em função da deformação volumétrica.

- ii) A lei de fluxo é não associada, não verificando a lei da normalidade em relação à superfície de cedência. É adoptada uma lei de escoamento, na qual o vector de incremento da extensão plástica coincide com a bissectriz entre a normal à elipse e a linha de ligação entre o ponto (respeitante ao estado de tensão) e a origem (fig. XVII).

5.2.2 - Análise dos resultados

Com o objectivo de testar o modelo Melanie, foram realizados os seguintes ensaios:

Ensaio	RADR 1	RADR 2	RADR 3	RADR 4
Trajectória	$q/p' = 3$	$q/p' = 1$	$q/p' = -0,5$	$q/p' = -1,5$

Na fig. XVIII apresentam-se os resultados dos ensaios anteriormente mencionados, delimitando-se a zona de início de cedência. A determinação desta zona, bem como do

ponto de cedência teórico (designado nos gráficos por “Ponto mais provável”) é realizado com base nos procedimentos descritos em 5.1.2. Na fig. XIX compara-se a zona de início de cedência obtida nos diversos ensaios, com a trajectória de tensões não drenada e a envolvente de cedência do modelo Melanie. No ensaio RADR 1 a cedência (fig. XVIII) é caracterizada por um aumento brusco das extensões, no momento em que atravessa a trajectória correspondente ao ensaio não drenado (RAND4). Estes resultados são concordantes com os obtidos por Bensani e O’Neil (1985, citado por Jamiojkowski [11]) com o solo “Boston Blue Clay e por Gens [10] com Lower Cromer Till, isto é, a envolvente de cedência “coincide” com o comportamento não drenado, apesar de nestes solos e para trajectórias deste tipo a cedência ser caracterizada por uma variação de declive (fig. XI), e não por aumento brusco das deformações, correspondendo a cedência a uma situação instável, tal como verificado para RADR1.

Não obstante, a cedência de RADR2 estar bem definida (fig. XVIII), verifica-se que os resultados são desfazados do que era previsível (e apresentados na bibliografia), dado que, a cedência deveria estar próximo do ponto correspondente à tensão de pré-consolidação.

Globalmente, com excepção de RADR2, verifica-se que a curva de cedência especificada pelo modelo Melanie reproduz razoavelmente o comportamento deste solo, apesar de, o comportamento de RADR4 parecer induzir para a elipse uma maior relação eixo maior / eixo menor.

No quadro IV apresentam-se os cálculos dos incrementos de deformação plástica. Observa-se, tal como para a consolidação isotrópica, que as extensões distorcionais elásticas ($\Delta\epsilon_q^e$) ainda assumem algum significado, podendo a sua não consideração provocar extensões plásticas distintas do real.

Na fig. XX comparam-se os resultados do vector incremento de deformação plástica respectivamente de RADR1, RADR2, RADR3 e RADR4 com a lei de fluxo do modelo Melanie (5.2.1 (ii)). Observa-se, que os resultados são muito diferentes dos teóricos, concluindo-se, que a lei de escoamento do modelo Melanie não é adequada para simular o comportamento da argila de Santa Clara.

6 - ASPECTOS ÚTEIS PARA A MODELAÇÃO DO COMPORTAMENTO

6.1 - Comportamento clássico do estado crítico

A teoria do estado crítico clássico foi desenvolvida inicialmente por Roscoe, tendo sido terminada por Schofield e Wroth (1968) e Atkinson e Bransby (1978) [7], estando resumida na fig. XXI, sendo representada num espaço das tensões normalizado em relação a p'_e . Esta teoria é definida pela existência de uma única superfície de estado limite (S.E.L.), separando uma zona de estados possíveis (no interior), de outra zona de estados impossíveis (exterior). A forma desta superfície depende da localização da trajectória, isto é, se o solo está à direita (lado “húmido”, representando solos normalmente consolidados ou levemente sobreconsolidados) ou à esquerda (lado “seco”, representando solos muito sobreconsolidados) do ponto de estado crítico, E.C. Os solos reconstituídos, como não apresentam cimentações é improvável resistirem a tensões de tracção; por este motivo localiza-se uma superfície que parte da origem delimitando a rotura por tracção (fig. XXI).

Esta teoria também estabelece que o comportamento obedece ao princípio de Rendulic (citado por Atkinson [1]). Este princípio estabelece que para amostras

normalmente, consolidadas as variações de índice de vazios são unicamente determinadas pela magnitude das tensões efectivas, sendo independentes do caminho de tensões seguidas. Portanto, num espaço de tensões normalizado em relação a p'_e , as trajectórias após se atingir a superfície de estado crítico quer de ensaios drenados ou não drenados, serão coincidentes.

Resumindo, a superfície do estado limite é composta pelas superfícies de Roscoe e de Hvorslev, as quais se cruzam na linha do estado crítico, sendo única num espaço de tensões normalizado.

6.2. - Determinação de S.E.L. no lado “seco”

A determinação desta superfície limite é feita com base em ensaios não drenados consolidados isotropicamente e dois ensaios drenados, RIDR5 e RIDR4.

Dado que a cada valor de índice de vazios corresponde uma superfície [21], a figura XXII apresenta os resultados normalizados em relação a p'_e , observando-se um bom ajustamento da superfície de Hvorslev à globalidade das trajectórias de tensões. A equação desta superfície (idealizada como uma recta) é a seguinte:

$$q/p'_e = g + h (p'/p'_e) \quad (XII)$$

tendo-se obtido:

$$g = 0.1$$

$$h = 1.2$$

Concluiu-se assim, que a superfície do estado limite (S.E.L.) no lado “seco” da argila de Santa Clara é bem representada pela superfície de Hvorslev, tal como obtido por Hvorslev (citado por Neves [21]) com a argila de Viena, por Parry (1960, citado por Atkinson [1]) com a argila de Weald e por Gens [7] com Lower Cromer Till. Este solo verifica o requisito da teoria clássica do estado crítico, que estabelece esta linha como independente da história de consolidação e das condições de drenagem, tal como referido por Neves [21], Atkinson [1] e experimentalmente verificado (com base em várias séries de ensaios simulando todas as possibilidades) por Gens [7].

6.3. - Análise do comportamento no lado “húmido”

No item 5 observou-se que nenhum dos modelos teóricos analisados reproduzia com fidelidade a superfície de Roscoe, não obstante, as superfícies propostas pelo Cam-clay e Melanie serem em termos práticos razoáveis. Verifica-se, que quer em consolidação isotrópica quer anisotrópica, a cedência (definida pela fig. XI) coincide com a trajectória de tensões não drenada (figs. XII e XIX). Apesar de não ter sido realizado um ensaio não drenado em extensão (numa amostra normalmente consolidada anisotrópicamente), de modo a ser possível comparar a cedência com o comportamento não drenado para toda a gama de tensões; os resultados obtidos por diversos investigadores, (entre os quais Koutsoftos e Ladd (1984), Bensani (1984), O'Neil (1985), Lefebvre e outro (1983), referidos por Jamiolkowski [11] e Gens [7], com argilas reconstituídas de baixa plasticidade mostram que a cedência coincide com o comportamento não drenado.

Na fig. XXIII apresentam-se as trajectórias de tensões normalizadas em relação a p'_e , de ensaios drenados (OCR = 2) e não drenados (OCR = 1) com provetes consolidados isotropicamente. Em RIDR1, RIDR2 e RIDR3 observa-se uma variação da inclinação dos caminhos de tensões aquando da transposição da trajectória não drenada (confirmando as conclusões do item 5.1.2), em direcção à linha dos estados críticos. O

comportamento normalizado de RIDR4 é diferente do observado nos outros três provetes, sendo provavelmente provocado pela trajectória seguida ($q/p' = 1$), que induz o aparecimento de pequenas variações volumétricas (fig. X), conduzindo a pequenos aumentos de p'_e , tendo como consequência uma baixa curvatura na trajectória normalizada.

Na fig. XXIV apresentam-se as trajectórias de tensões normalizadas de ensaios drenados (levemente sobreconsolidados) e não drenados ($OCR = 1$), com provetes consolidados sob condições K_0 . Verifica-se que a amostra RADR2, ensaiada com a trajectória $q/p' = 1$, apresenta comportamento semelhante a RIDR4. Os provetes RADR3 e RADR4 apresentam num determinado ponto, um aumento brusco da curvatura (isto é, cedência), sendo de prever com base nos resultados de diversos investigadores, (anteriormente enunciados) que estes pontos "coincidiria" com a trajectória de tensões, resultante de um ensaio não drenado em extensão, realizado com um provete normalmente consolidado (em "ko").

Nas duas figuras anteriormente referidas, conclui-se que o comportamento não verifica o princípio de Rendulic (um dos principais requisitos do comportamento clássico do estado crítico), isto é, os caminhos de tensões normalizados após a cedência em ensaios não drenados e drenados não coincidem; mesmo nos ensaios drenados o comportamento normalizado pós cedência não se sobrepõe, evidenciando o não cumprimento deste princípio.

Estes resultados estão de acordo com os obtidos por Neves [21] e por Gens [7], sendo contrastantes com os estudos de Rendulic (1937), Henkel (1960) (citados por Lemos [15]), Henkel (1960) e Balasubramanion (1969) (referidos por Atkinson [1]) que conduziram à obtenção de uma única superfície do estado limite no ramo "húmido", isto é, verificaram o princípio de Rendulic.

Com base nas considerações anteriores, propõe-se a subdivisão da zona dos estados possíveis, em duas zonas, uma zona "elástica" (na realidade deveria ser designada por quase - elástica, dado que no seu interior ocorrem pequenas deformações plásticas) e uma zona plástica, separadas pela trajectória de tensões não drenadas. Na modelação clássica (apresentada em 6.1.) a zona plástica coincidia com a S.E.L..

No caso do comportamento isotrópico (fig. XXIII), a superfície de cedência está totalmente definida (pela trajectória de RIND6), apresentando-se também uma proposta um pouco "grosseira" de delimitação da superfície de estado limite, não obstante, os resultados RIDR4 apresentarem falta de coerência para o seu estabelecimento. No caso do comportamento anisotrópico (fig. XXIV), a superfície de cedência só é parcialmente definida, correspondendo à parte superior da trajectória do ensaio não drenado em compressão triaxial, dado que os resultados de RADR2 (analísados em 5.2.2) não parecem coerentes; na parte inferior do diagrama propõe-se uma delimitação entre a zona "elástica" e a zona plástica com base nos resultados de RADR3 e RADR4. Na figura XXIV também se sugere uma superfície do estado limite no ramo "húmido", a qual é estabelecida na parte superior pelos pontos de inversão das trajectórias RADR1 e RADR2, sendo a parte inferior estimada com base nos ensaios RADR3 e RADR4.

Este tipo de comportamento não é muito comum na bibliografia, no entanto, Gens[7] ao investigar exaustivamente Lower Cromer Till, obteve resultados qualitativamente semelhantes. A maior diferença é registada no comportamento anisotrópico, tendo Gens [7], observado quase uma sobreposição da trajectória não drenada em compressão triaxial com a S.E.L.

6.4. - Proposta para a S.E.L. global

Para a definição pormenorizada da superfície de estado limite (S.E.L.), seria necessária a realização de maior número de ensaios (drenados e não drenados), aplicando uma vasta gama de trajectórias de tensões, quer partindo da zona plástica, quer da zona elástica e para amostras consolidadas isotropicamente e anisotropicamente.

Dado que o número de ensaios realizados foi reduzido, reforça-se a ideia de que a S.E.L. apresentada nas figuras XXII, XXIII e XXIV não passa de uma mera estimativa grosseira, quando analisada em termos quantitativos, apesar de ser interessante do ponto de vista qualitativo.

Atendendo aos ensaios realizados e às investigações efectuadas com Lower Cromer Till (realizada por Gens [7]), conclui-se que a argila de Santa Clara possui comportamento similar (em termos qualitativos) ao apresentado nas figuras XXV e XXVI, respectivamente para consolidação isotrópica e anisotrópica ("ko").

7 - CONCLUSÕES

Com base no estudo realizado conclui-se o seguinte:

- o parâmetro M parece ser independente das condições de drenagem e da história de tensões;
- dos três modelos elasto-plásticos isotrópicos apresentados, verifica-se que somente o modelo Cam-clay simula razoavelmente as condições de cedência;
- comparando a provável superfície de potencial plástico com as superfícies de cedência dos três modelos, conclui-se que somente no caso do modelo Cam-clay modificado e $[p, q, \theta]$ existe alguma consistência em utilizar a lei de fluxo associada;
- a curva de cedência do modelo Melanie reproduz razoavelmente o comportamento deste solo, enquanto que a lei de fluxo não associada preconizada por este modelo não é satisfeita;
- em ambos os tipos de consolidação, observa-se que a cedência coincide praticamente com a trajectória de tensões não drenada em estados normalmente consolidados;
- no caso de consolidação em K_0 , verifica-se que o troço superior da trajectória de tensões não drenada corresponde a uma zona de instabilidade, originando pelo seu atravessamento um "salto" enorme das deformações;
- a superfície do estado limite (S.E.L.) no ramo "seco" é bem representada pela teoria clássica do estado crítico, isto é, superfície de Hvorslev;
- no ramo "húmido" não se verifica o princípio de Rendulic (um dos requisitos da teoria clássica), propondo-se a subdivisão da zona dos estados possíveis em duas: uma "elástica" e outra plástica, separadas pelas trajectórias de tensões não drenadas, quer em provetes consolidados isotropicamente, quer consolidados em condições K_0 .

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] - Atkinson, J.H. e Bransby, P.L. (1978).
The mechanics of soils. An introduction to critical state Soil Mechanics.
Mcgraw-Hill.
- [2] - Banerjee, P.K. e Stipho, A. S. (1978)
Associated and non-associated constitutive relations for undrained behaviour of isotropic soft clays. Int. Journal for numerical and analytical methods in geomechanics, vol.2, pp 35-50.
- [3] - Bishop, A.W. e Henkel, D.J. (1962).
The measurement of soil properties in the triaxial test.
- [4] - Bishop, A. W and Wesley, L. D. (1975).
A hydraulic triaxial apparatus for controlled stress path testing.
Geotechnique 25, nº4, 657-670.
- [5] - Campos, T. M. P. (1983).
Two low plasticity clays under cyclic and transient loading.
Ph D thesis, University of London.
- [6] - Carvalho, J.C.; Crispel, J.J.; Mieussens, C.; Nardone, A. (1987).
Reconstitution des éprouvettes en laboratoire - Theorie et pratique opératoire.
Raport de recherche LPC nº145. Laboratoire Central des ponts et chaussés.
- [7] - Gens, A. (1982).
Stress-strain and strength characteristics of a low plasticity clay.
Ph D thesis, University of London.
- [8] - Graham, J. e Lau, S.L.K.(1988).
Influence of stress-release disturbance, storage and reconsolidation procedures on the shear behaviour of reconstituted underwater clay.
Geotechnique 38, nº2, p.p. 279-300.
- [9] - Hight, David William (1983).
Laboratory investigations of sea-bed clays.
Ph D thesis, University of London.
- [10] - Hight, D.W.; Jardine, R.J.; Gens, A. (1987)
The behaviour of soft clays. Embankments on soft clays.
Capítulo 2, Pag. 33 - 157.
- [11] - Jamiojkowski, M. ; Ladd, C.C. ; Germaine, J.T.; Cancellotta, R.(1977).
New development in field and laboratory testing of soils.
Proc. with International Conference Smfe, Tokyo, 2 - Pag. 421 - 490.
- [12] - Ladd, C.C.; Foott, R.; Ishihara, K.; Schlossen, F.; Paulos, H.G.(1977)
Stress - Deformation and Strength characteristics.
Proc. with International Conference Smfe, Tokyo, 2 - Pag. 421 - 490.
- [13] - Lambe, T. V., Whitman, TV. (1978)
Soil Mechanics, SI version. John Willey & Sons, Inc.

- [14] - Lemos, L.J.L.(1987).
Introdução à Mecânica dos Solos e Fundações. F.C.T.U.C.
- [15] - Lemos, L. J. L. (1987)
Apontamentos das aulas de Geotecnia Aplicada.
- [16] - Lewis, R. W. e Schreler, B.A.
The finite element method in the deformation and consolidation of porous media.
Pag. 50 - 63.
- [17] - Maswoswe, J. (1985).
Stress paths for compacted soil during collapse due to wetting.
Ph D thesis, Unisersity of London.
- [18] - Mouratidis, A. e Magnan, I.P. (1983)
Modèle elastoplastique anisotrope avec écrouissage pour le calcul des ouvrages
sur sols compressibles rappor de recherche CPC nº 121.
Laboratoire Central des Ponts et Chaussées.
- [19] - Moreira, C.M.C. (1990)
Análise do Comportamento Elastoplástico de solos através de modelos do estado
crítico. Dissertação de Mestrado em Mecânica dos solos.
Universidade Nova de Lisboa.
- [20] - Neves, E.M. (1986)
Equações constitutivas de meios particulados.
Memória nº 863, LNEC.
- [21] - Neves, M. e Melo, G. (1975).
Mecânica dos Solos.Equilíbrio limite e estado crítico. Curso 110, volume 2.
L.N.E.C.
- [22] - Oliveira, P.J.V., (1992)
Algumas características do comportamento de um solo de baixa plasticidade.
Dissertação de mestrado em Meânica dos Solos.
Universidade Nova de Lisboa
- [23] - Pinto, M.I.M. (1987).
Alguns factores que influenciam a resistência residual de solos.
Dissertação de mestrado em Mecânica dos Solos.
Universidade Nova de Lisboa.
- [24] - Poulos, S.J. (1964)
Report on control of leakage in the triaxial test.Harvarg Soil Mechanics series nº
71, Harvard University. Cambridge, Mass.
- [25] - Ricceri, G.; Favaretti, M.; Mazzucat, A.; Simonini, P.; Soranzo, M. (1985).
Effects of sampling on artificially reconstructed cohesive soils. Proceedings of the
eleventh international conference on Soil Mechanics and Foundations engineering
San Francisco, 1985. Pag. 1035-1040.
- [26] - Toll, D. G. (1990)
Durham University control system. User Manual.

Quadro I - Resumo das principais características dos solos analisados

Solos	Comp. da fracção arg.	WL (%)	Wp (%)	IP (%)	Granulometria			Gs	Act.	Classif.
					(%)argila	(%)silte	(%)areia			
Argila de Santa Clara	Ilite(55%) Caulinite(45%)	42,5	20,0	22,5	32%	36%	24%	2,69	0,70	CL
Argila de Santa Clara(*)	----- -----	47,6	21,1	26,5	---	---	--	2,78	---	---
Lower Cromer Till	Calcite Ilite Caulinite Clorite	25,0	13,0	12,0	17%	21%	> 50%	2,69	0,71	CLS

(*) Investigado por Maranhã das Neves

Quadro II - Resumo das características de compressibilidade e de resistência residual dos solos analisados

Solos	Compressibilidade		Comportamento residual	
	Cc	Cs	$\phi'r$	Mecanismo de corte
Argila de Santa Clara	0,21	0,0148	30°	Transicional
Argila de Santa Clara(*)	0,237	0,0253	-----	-----
Lower Cromer Till	0,152	0,018	29,7° - 31°	Turbulento

(*) Investigado por Maranhã das Neves

Quadro III - Incrementos de extensão plástica em amostras consolidadas isotropicamente

Provet	Trajectória de tensões	Parâmetros elásticos		Incremento total		Deformação elásticas		Deformações plásticas	
		E' MN/m ²	ν	$\Delta \epsilon_1$ (%)	$\Delta \epsilon_v$ (%)	$\Delta \epsilon_\gamma^e$ (%)	$\Delta \epsilon_q^e$ (%)	$\Delta \epsilon_\gamma^p$ (%)	$\Delta \epsilon_q^p$ (%)
RIDR1	q/p'=5	11,03	0,43	0,378	0,067	0,016	0,183	0,034	0,068
RIDR2	q/p'=3	12,13	0,36	0,485	0,160	0,019	0,070	0,054	0,062
RIDR3	q/p'=2.5	14,87	0,39	0,201	0,082	0,020	0,067	0,062	0,107
RIDR4	q/p'=1	12,64	0,38	0,311	0,311	0,022	0,022	0,290	0,196

Quadro IV - Incrementos de extensão plástica em amostras consolidadas anisotropicamente (Ko)

Provet	Trajectória de tensões	Parâmetros elásticos		Incremento total		Deformação elásticas		Deformações plásticas	
		E' MN/m ²	ν	$\Delta \epsilon_1$ (%)	$\Delta \epsilon_v$ (%)	$\Delta \epsilon_\gamma^e$ (%)	$\Delta \epsilon_q^e$ (%)	$\Delta \epsilon_\gamma^p$ (%)	$\Delta \epsilon_q^p$ (%)
RADR1	q/p'=3	34,54	0,65	12,47	0,68	0,004	-0,039	18,42	6,59
RADR2	q/p'=1	34,34	0,41	0,224	0,155	0,038	0,073	0,150	0,125
RADR3	q/p'=-0,5	55,15	0,28	-0,004	0,100	0,038	-0,0116	-0,038	0,029
RADR4	q/p'=-1,5	44,89	0,26	-0,077	0,208	0,039	-0,035	-0,168	0,057

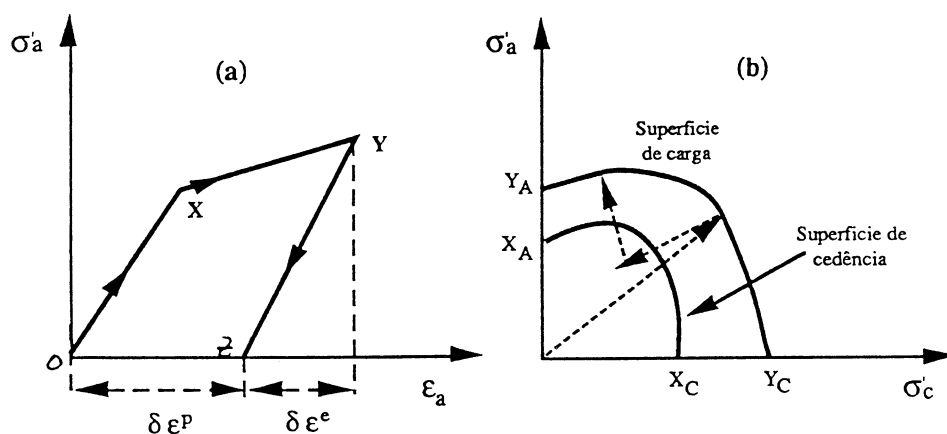


Fig. I - Comportamento elastoplástico. a) solicitação uniaxial (retirado de Atkinson[1]), b) solicitação multiaxial (retirado de Moreira[30]).

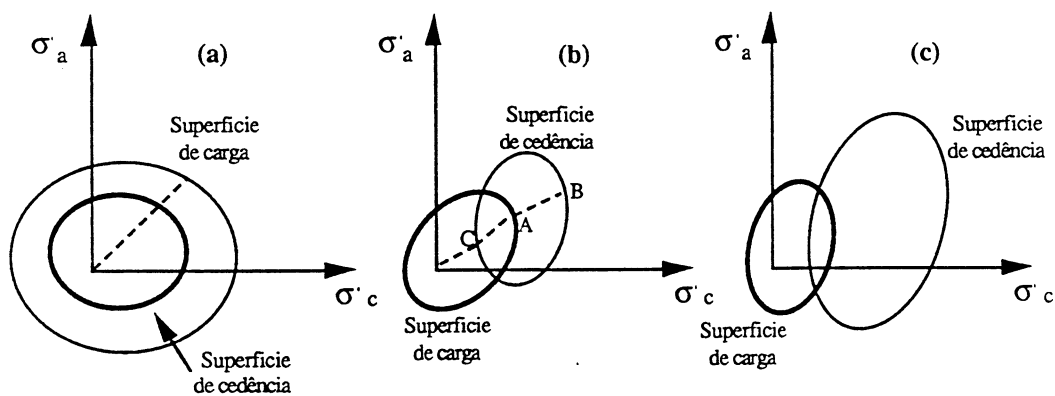


Fig. II - Leis de endurecimento. a) isotrópico, b) cinemático, c) misto. (Retirado de Neves[32])

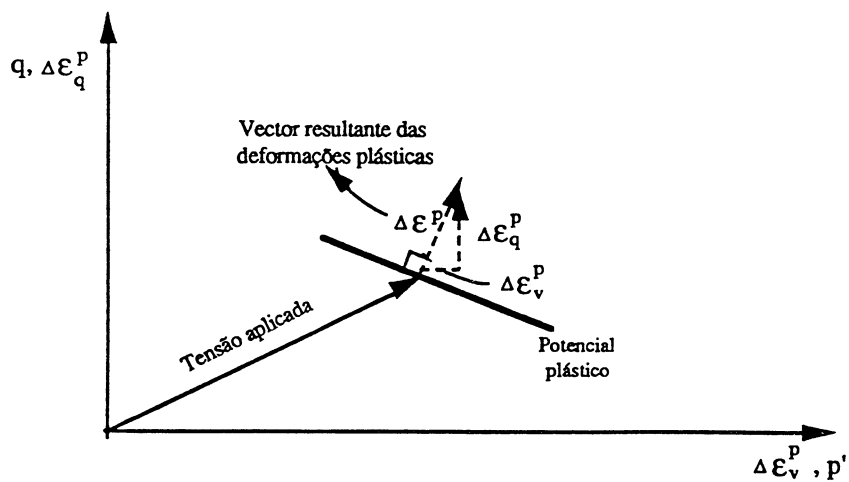


Fig. III - Representação da lei de fluxo em relação à superfície e potencial plástico.

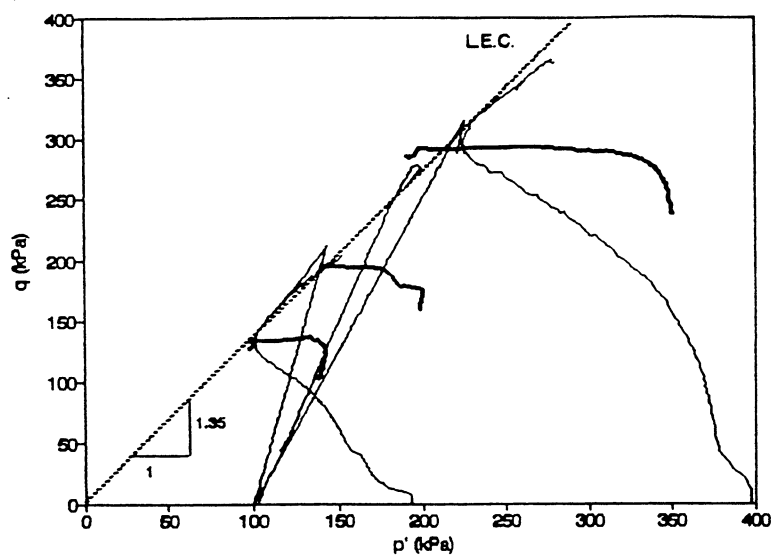


Fig. IV - Cálculo da linha dos estados críticos, num diagrama $q - p'$.

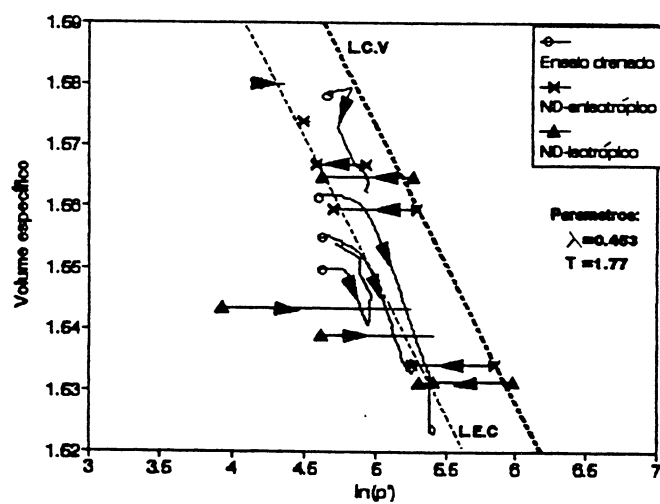


Fig. V - Cálculo da linha dos estados críticos, num diagrama $v - \ln p'$.

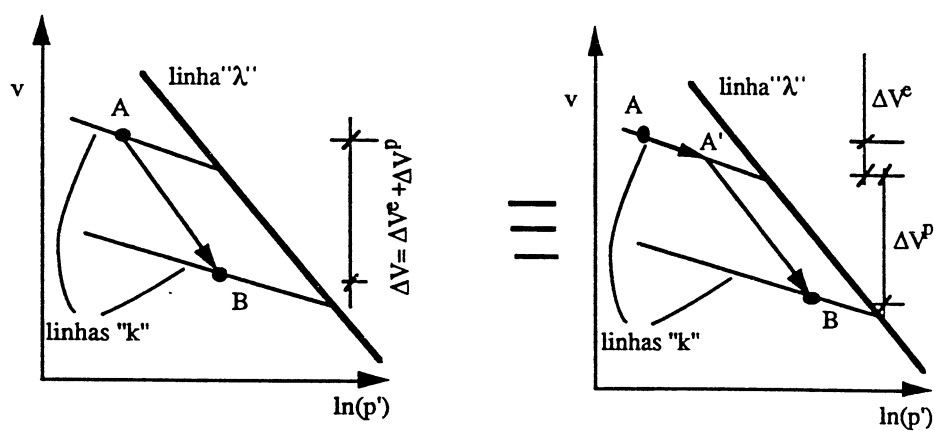


Fig. VI - Variação de volume durante um incremento de tensão. a) caso real. b) decomposição da trajetória teórica de modo a permitir o cálculo das deformações elásticas e plásticas.

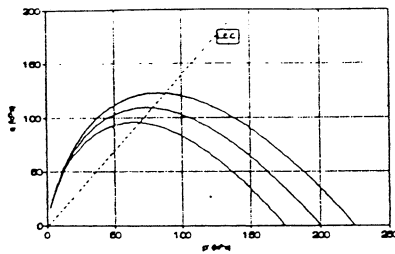


Fig. VII - Sup. de cedência do modelo Cam-Clay

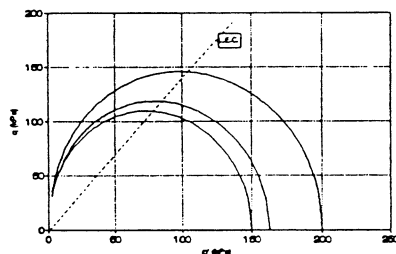


Fig. VIII - Sup. de cedência do modelo Cam-clay modificado

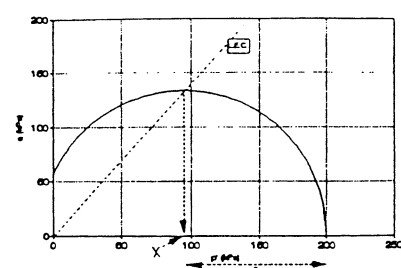


Fig. IX - Sup. de cedência do modelo $[p,q,\theta]$

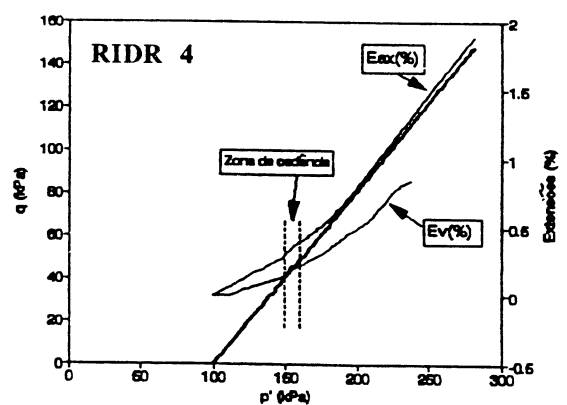
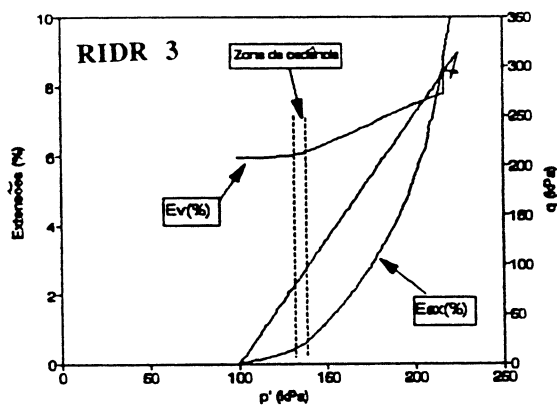
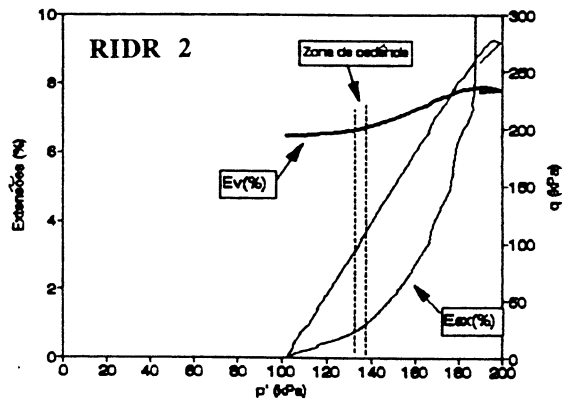
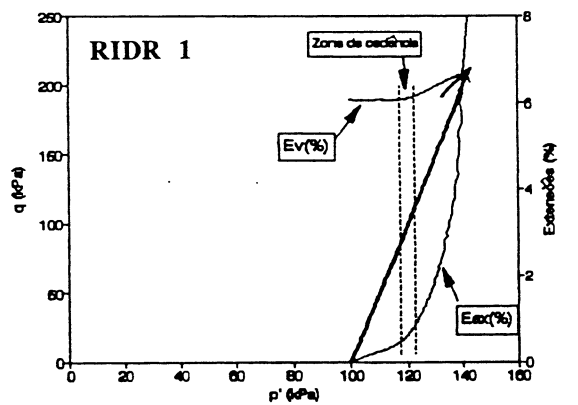


Fig. X - Resultados de RIDR1, RIDR2, RIDR3 e RIDR4, num estado inicial sobreconsolidado ($OCR=2$). Ensaaios triaxiais em compressão drenada.

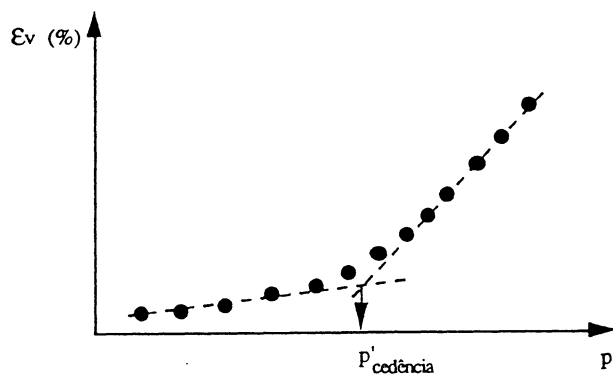


Fig. XI - Definição do ponto de cedência teórico.

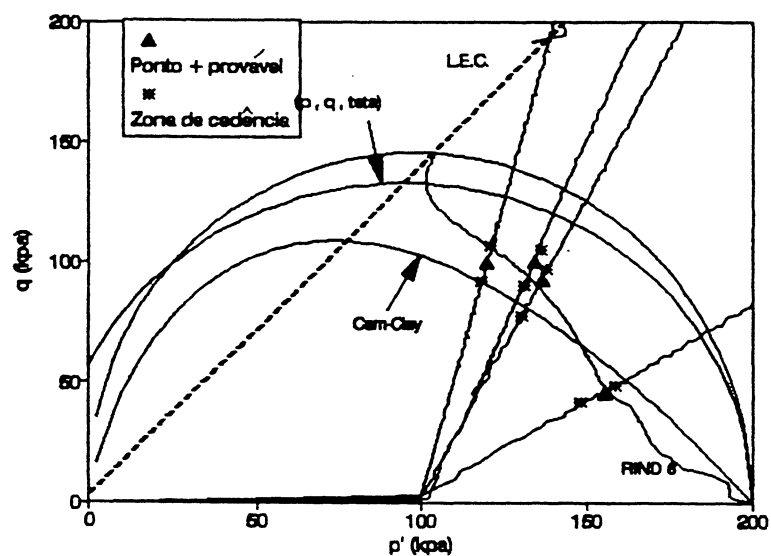


Fig. XII - Comparação entre a zona de cedência obtida ensaios drenados (consolidação isotrópica) e a trajetória não drenada com as superfícies de cedência dos modelos teóricos.

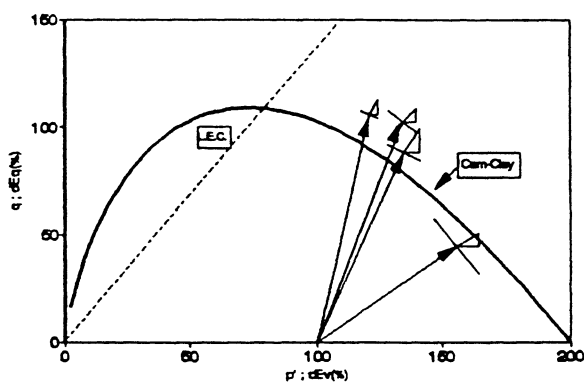


Fig. XIII - Comparação entre a sup. de cedência do modelo Cam-clay e a resultante do vector de deformação plástica.

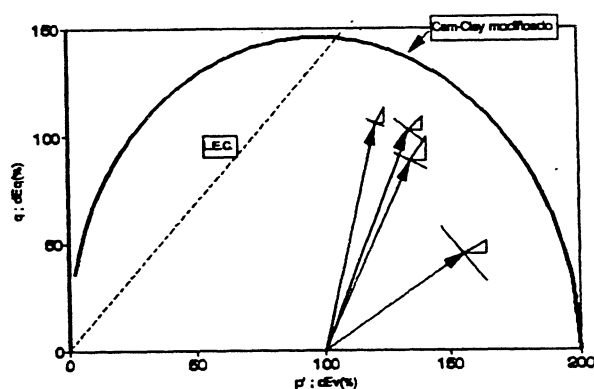


Fig. XIV - Comparação entre a sup. de cedência do modelo Cam-clay modificado e a resultante do vector de deformação plástica.

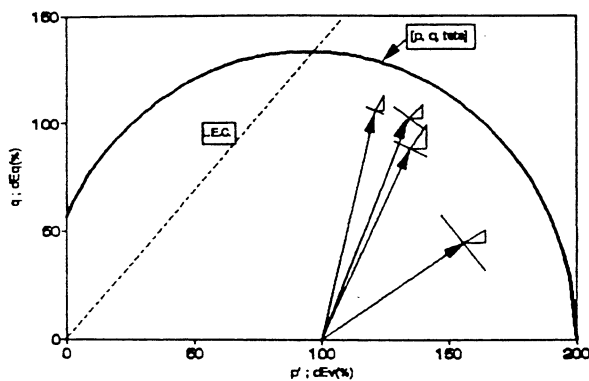


Fig. XV - Comparação entre a sup. de cedência do modelo $[p, q, \theta]$ e a resultante do vector de deformação plástica.

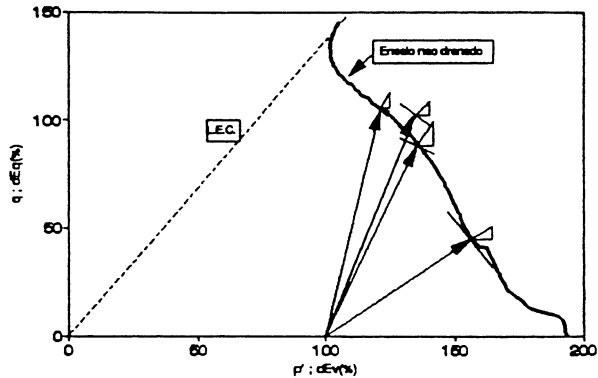


Fig. XVI - Comparação entre a trajectória não drenada e a resultante do vector de deformação plástica.

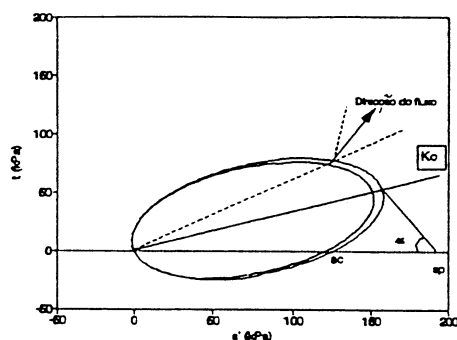


Fig. XVII - Superfícies de cedência e lei de fluxo do modelo Melanie

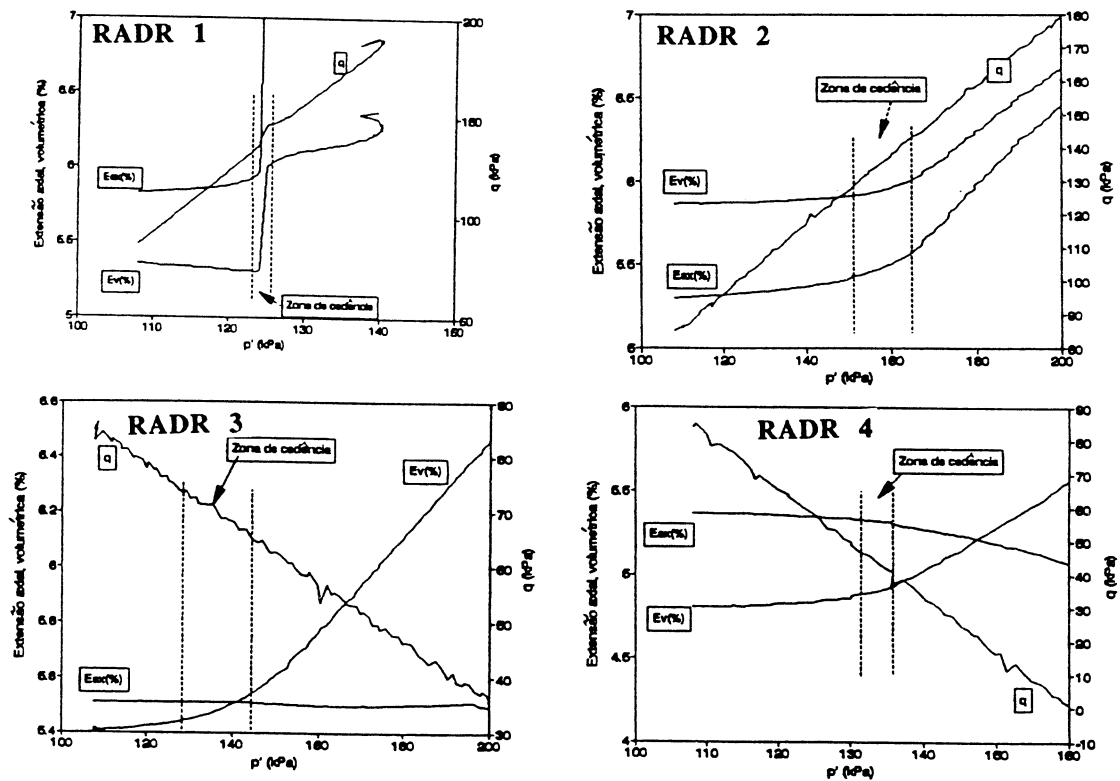


Fig. XVIII - Resultados de RADR1, RADR2, RADR3 e RADR4. Ensaio triaxiais em compressão drenada.

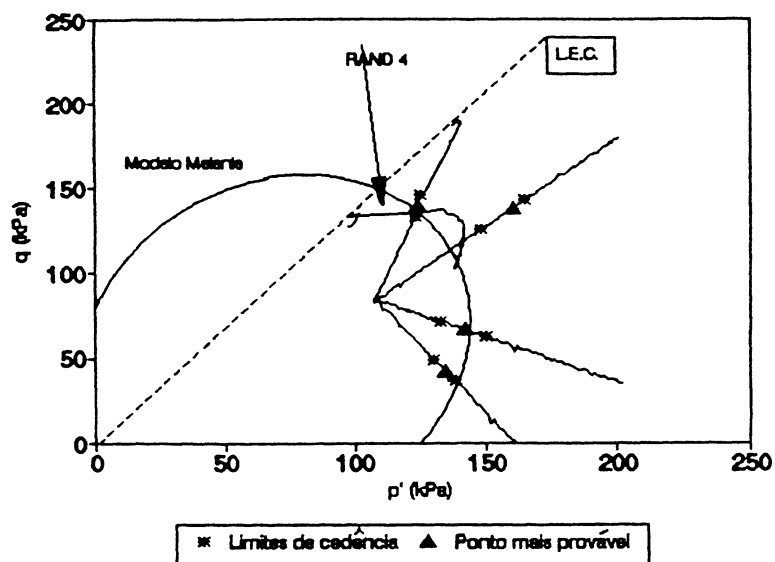


Fig. XIX - Comparação entre a zona de cedência obtida em ensaios drenados(consolidação em K_0), com a trajectória não drenada e a superfície de cedência do modelo Melan.

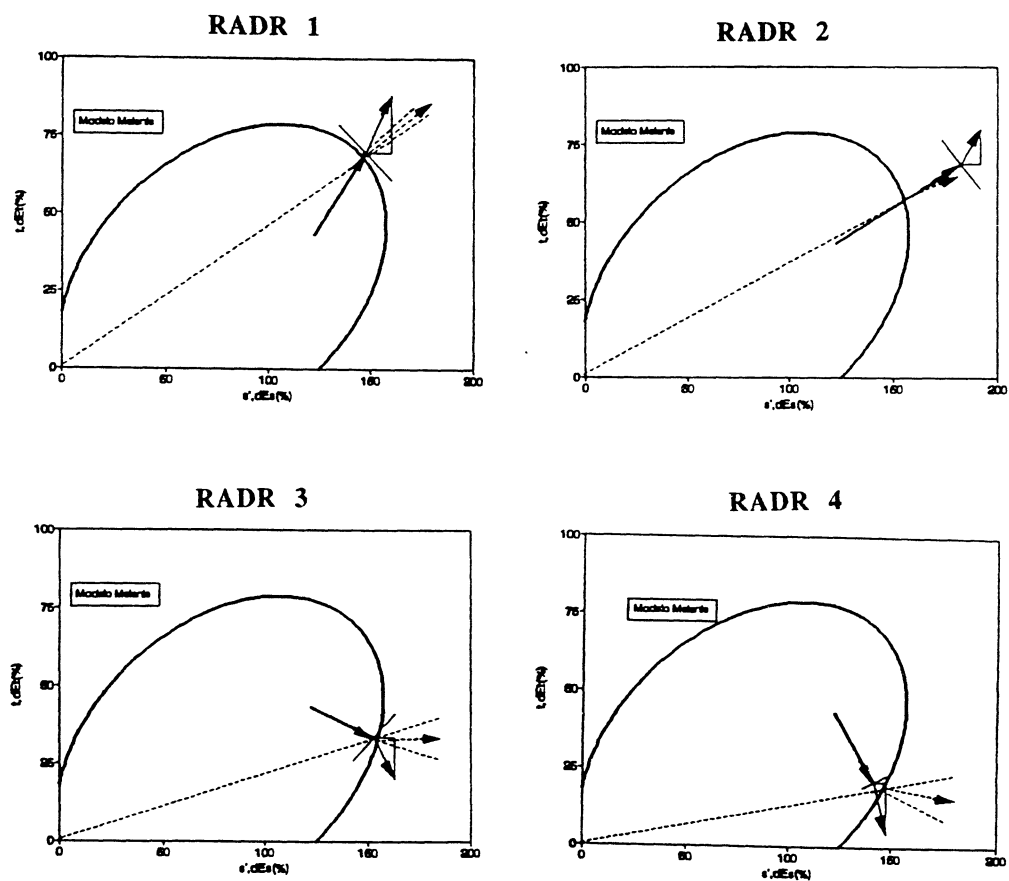


Fig. XX - Comparação entre a resultante da deformação plástica de RADR1, RADR2, RADR3 e RADR4 com a lei de fluxo do modelo Melan.

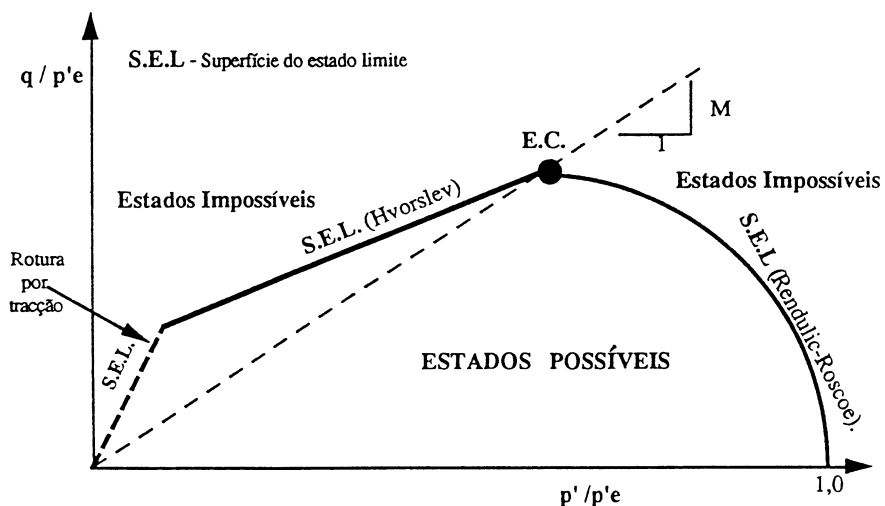


Fig. XXI - Superfície do estado limite, para o comportamento clássico do Estado Crítico. (Retirado de Atkinson e outro[1]).

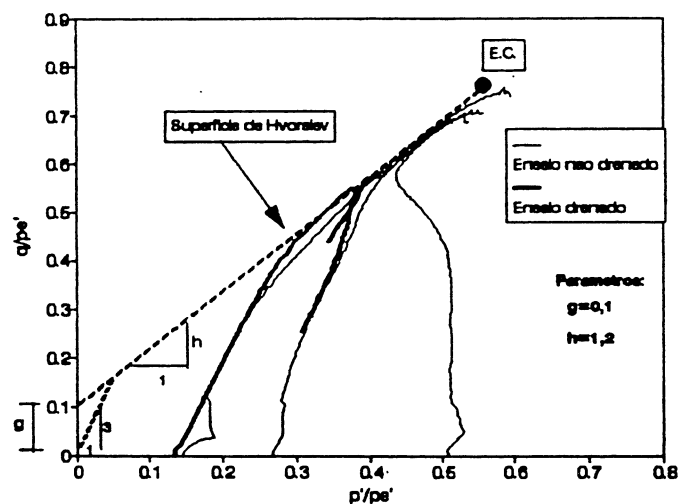


Fig. XXII - Determinação da superfície limite do lado "seco". Superfície de Hovrslev.

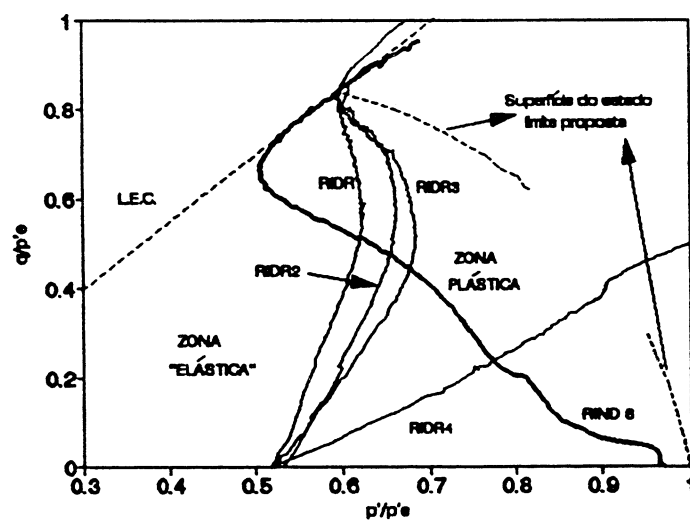


Fig. XXIII - Trajectórias de tensões normalizadas (em relação a p'_e) em ensaios drenados e não drenados. Provetes consolidados isotropicamente.

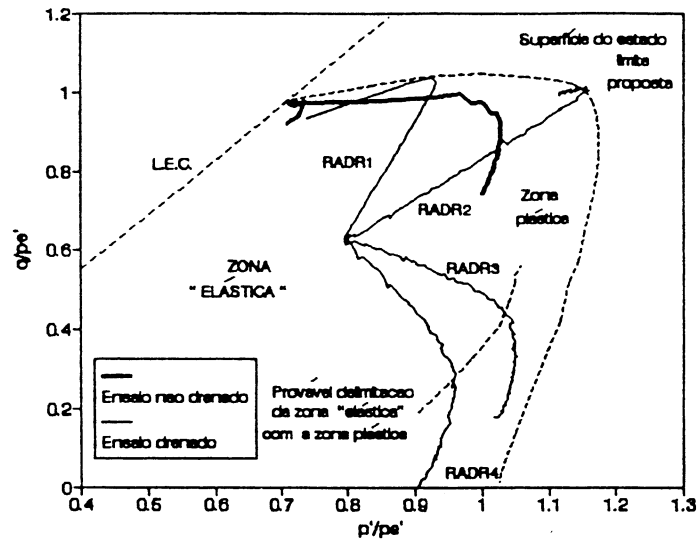


Fig. XXIV - Trajectórias de tensões normalizadas (em relação a p'_e) em ensaios drenados e não drenados. Provetes consolidados em K_0 .

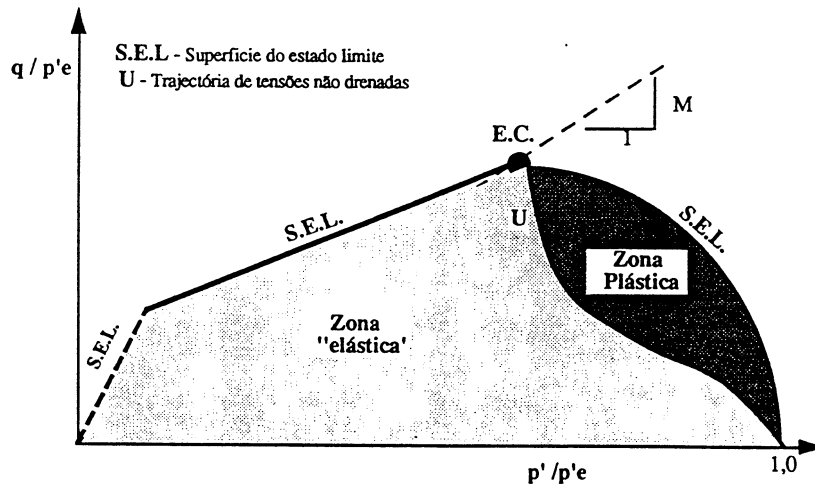


Fig. XXV - Proposta qualitativa para a S.E.L. global em amostras consolidadas isotropicamente. (Baseado em Gens[11]).

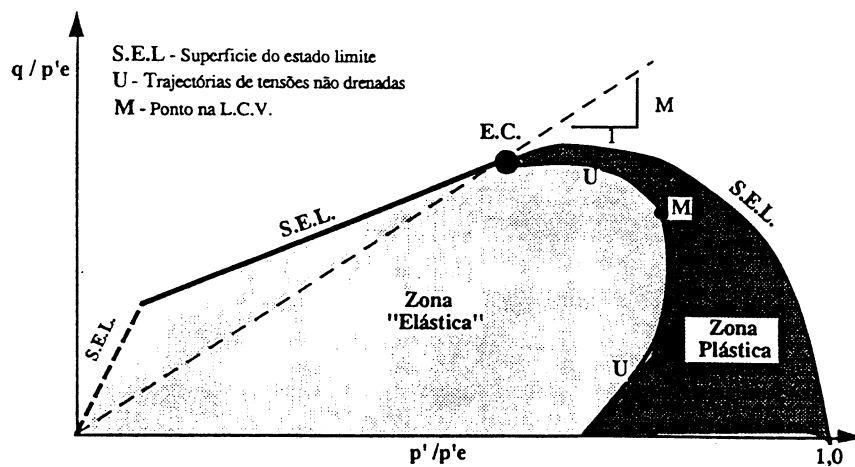


Fig. XXVI - Proposta qualitativa para a S.E.L. global em amostras consolidadas em condições " K_0 ". (Baseado em Gens[11]).