

# UMA TÉCNICA NUMÉRICA DE RESOLUÇÃO DA EQUAÇÃO DE PALMER\*

## A numerical technique to solve Palmer's equation

por

ANTÓNIO GABRIEL F. DE SOUSA COUTINHO\*\*

**RESUMO** — Apresenta-se uma técnica numérica de resolução da equação que permite obter a curva das tensões de corte não drenadas a partir de um ensaio com pressiómetro autoperfurador — a equação de Palmer. Salientam-se as vantagens em recorrer a um sistema gráfico interactivo na implementação de tal técnica em computador. Apresenta-se o programa ANABELA criado e desenvolvido no LNEC para processamento dos resultados de um ensaio pressiométrico que utiliza a técnica numérica descrita recorrendo ao sistema gráfico interactivo GKS. Dá-se uma panorâmica geral das imagens gráficas geradas pelo programa ANABELA as quais representam parâmetros de resistência e de deformabilidade obteníveis a partir do ensaio pressiométrico.

**SYNOPSIS** — A numerical technique to obtain the curve of undrained shear stresses according to Palmer's equation for selfboring pressuremeter tests is presented. When writing the correspondent computer program there are some advantages in using an interactive graphical system which are referred. Program ANABELA, created and developed in LNEC for processing pressuremeter tests results according to the above quoted technique which uses the Graphical Kernel System (GKS) is presented. A general overview of graphical images created by program ANABELA which represents strenght and deformability parameters obtained by pressuremeter tests is given.

### 1 — INTRODUÇÃO

Em trabalho recente (Sousa Coutinho, 1987a) abordou-se a teoria básica de interpretação de ensaios com pressiómetro autoperfurador, tendo-se situado este ensaio no contexto dos ensaios de campo e de laboratório associados às linhas de dimensionamento com base em teorias físico-matemáticas e com base em correlações empíricas ou semiempíricas. No cenário então enunciado verificou-se que uma das vantagens mais saliente da utilização do ensaio pressiométrico com pressiómetro autoperfurador era a possibilidade de interpretar um ensaio "in situ" com base numa teoria físico-matemá-

\* Trabalho recebido em Agosto de 1987. A discussão do trabalho está aberta por um período de três meses.

\*\* Engenheiro Civil (IST) do DG/NF do LNEC, Mestre em Mecânica dos Solos (UNL).

tica. Em particular foi claramente demonstrado que a interpretação de um ensaio não drenado em meio coesivo e saturado tinha subjacente uma teoria exacta, válida para qualquer magnitude de deformação. Esta teoria conduzia à obtenção da curva das tensões de corte não drenadas ao longo da gama de deformações do ensaio. A equação que exprime este conceito é a equação de Palmer (1972). A utilização desta solução tem sido alvo de críticas algumas das quais, aliás, citadas no trabalho anterior. Nesse mesmo trabalho referiu-se a existência de um método numérico criado e desenvolvido no Núcleo de Fundações do Departamento de Geotecnia do LNEC de resolução da equação de Palmer. Oportunamente tal método seria detalhadamente analisado.

É este último ponto que o presente trabalho se propõe abordar. A técnica de resolução da equação de Palmer foi implementada no programa de cálculo automático denominado ANABELA. Este programa, permite determinar diversas características de resistência e deformabilidade do solo ensaiado a partir de um ensaio com pressiómetro autoperfurador. Estas possibilidades serão referidas mais adiante.

## 2 — TÉCNICA NUMÉRICA DE RESOLUÇÃO DA EQUAÇÃO DE PALMER

### 2.1 — A equação de Palmer

Um ensaio pressiométrico consiste basicamente em provocar a expansão radial de uma cavidade cilíndrica. A imagem gráfica de tal ensaio é dada por uma curva representando as pressões aplicadas em cada instante na parede da cavidade,  $\Psi$ , versus as extensões circunferenciais induzidas,  $\varepsilon_0$ . Esta última grandeza pode ser relacionada com as deformações volumétricas da cavidade,  $\frac{\Delta V}{V}$ :

$$\frac{\Delta V}{V} = 1 - (1 + \varepsilon_0)^{-2}. \quad (1)$$

Para um ensaio não drenado, Palmer (1972) demonstrou que:

$$\tau_u = \frac{d\Psi}{d \ln \frac{\Delta V}{V}}, \quad (2)$$

onde  $\tau_u$  é a tensão de corte não drenada a cada nível de deformação. Em termos de deformação de Almansi,  $\alpha$ , a equação de Palmer assume a forma:

$$\tau_u = \frac{d\Psi}{d \ln \alpha_0}. \quad (3)$$

A expressão anterior põe em evidência que é possível conhecer a tensão de corte não drenada a qualquer nível de deformação a que o ensaio seja levado. Em particular, se o solo exibir sensibilidade será possível determinar uma resistência máxima de corte,  $\tau_u^{max}$ , bem como uma resistência residual,  $\tau_u^{res}$ .

A utilização da equação (3), ou de outras equações que exprimam o mesmo conceito físico mas em termos de outras variáveis (Ladanyi, 1972; Baguelin, Jézéquel, Lemée e Le Méhauté, 1972), tem sido criticada, uma vez que não sendo conhecida a expressão analítica da curva representativa do ensaio,  $\Psi = \Psi(\epsilon_0)$ , torna-se necessário resolver tal equação através de um processo numérico ou gráfico. Considerações acerca destes processos podem ser vistos no trabalho publicado em Março de 1987 (Sousa Coutinho, 1987a). Acrescente-se ao que então foi aduzido, que a curva das tensões de corte não drenadas,  $\tau_u = \tau_u(\epsilon)$  apresenta normalmente um aspecto irregular em virtude dos erros introduzidos quer nos pontos experimentais da curva ( $\Psi, \epsilon_0$ ) quer nos pontos estimados para o cálculo de  $\tau_u$ . É neste cenário que surge a proposta de Wroth (1984). Tal proposta consiste em traçar uma linha recta através dos pontos experimentais do gráfico ( $\Psi, \ln \alpha_0$ ) acima de um certo nível de deformação e identificar o gradiente de tal linha com a resistência ao corte não drenada,  $S_u$ . Neste caso, se o solo exibir uma certa sensibilidade não se conhece exactamente qual a relação entre  $S_u$  e  $\tau_u^{max}$  ou  $\tau_u^{res}$ . A sensibilidade é ignorada e a proposta de Wroth torna-se idêntica à equação de Gibson e Anderson (1961) que assumia um comportamento plástico perfeito do solo após a rotura ter sido induzida.

## 2.2 — Considerações gerais acerca do método

As objecções à utilização de um processo numérico de cálculo de  $\tau_u(\epsilon)$  começam a diluir-se se for possível utilizar uma grande densidade de pontos. Se, para além disso, for possível eliminar as "irregularidades" exibidas quer pela curva dita experimental quer pela curva derivada, estar-se-á na presença de uma solução o mais próxima possível da situação real. Tais irregularidades podem ser encaradas como sendo as altas frequências de uma curva de baixa frequência. É um método que utiliza estes princípios que será descrito seguidamente. O objectivo é converter a curva representativa do ensaio numa sucessão de pares ordenados tal que seja possível determinar os gradientes locais (em cada  $\alpha_0$ ) da curva  $\Psi = \Psi(\ln \alpha_0)$ . Deste modo evita-se utilizar uma formulação que imponha à curva do ensaio uma determinada função, o que obrigaria a sua derivada a ter um declive pré-definido (Prévost e Hoeg, 1975; Denby, 1978; Arnold, 1981). De notar que este método começou por ser imaginado e em seguida implementado para suprir a falta de pontos experimentais já que não se dispõe de uma unidade de controlo e registo automático ligada à célula pressiométrica.

### 2.3 — Bases teóricas do método

Após conversão para unidades mecânicas das leituras de campo realizadas em unidades eléctricas, está-se em condições de traçar a curva representativa do ensaio,  $\Psi = \Psi(\epsilon_0)$ . Esta curva é obtida traçando uma linha através dos pontos experimentais uma vez representados num sistema de dois eixos ortogonais a escalas convenientes preferencialmente em papel milimétrico. A curva assim obtida pode ser convertida num conjunto de pares ordenados à custa de uma mesa digitalizadora. O número de pontos digitalizados é função da resolução e da repetibilidade da mesa bem como da velocidade com que se percorre a linha a digitalizar com o seu cursor. No caso da mesa utilizada neste trabalho e pertença do Centro de Informática do LNEC, a resolução e a repetibilidade é de 1 ponto por milésimo de polegada (1 pont/.025 mm). Digitalizando a curva em modo contínuo pode dizer-se, por experiência já adquirida, que normalmente uma curva com cerca de 20 cm de comprimento é digitalizada com cerca de 800 pontos. Deste modo, tem-se uma densidade de pontos mais que suficiente, se não mesmo exagerada, na perspectiva do objectivo a atingir. No entanto, ao percorrer a linha com o cursor da mesa é difícil mantê-lo exactamente sobre a trajectória ideal. Por consequência e como se pode inferir pelos dados expressos acima, a alta resolução da mesa faz com que a representação numérica da curva, que é sem dúvida uma curva de muito baixa frequência, fique afectada de umas certas parcelas de altíssimas frequências. É aqui que deve intervir o bom senso. Tal densidade de pontos deverá ser reduzida até uma densidade conveniente, por exemplo, 1 ponto por cada 0,1% de deformação. Este objectivo será atingido regularizando a curva o que pode ser feito de diversas formas, desde a rejeição pura e simples dos pontos contidos no intervalo (aproveitando os extremos de forma a calcular a ordenada de uma certa abcissa exacta) ou usá-los para calcular o ponto que importa considerar. Apresenta-se seguidamente a formulação geral do método que é utilizado no programa ANABELA.

Sejam  $(x_1, y_1), (x_2, y_2), \dots, (x_n, y_n)$  os elementos do conjunto dos pares ordenados digitalizados. Pretende-se regularizar a curva num certo número de intervalos iguais de valor  $\Delta X$ . No intervalo  $i$  existem  $m$  pares ordenados. O ponto  $X_i$  é determinado de acordo com a amplitude do intervalo escolhido. Por exemplo:

$$X_i = i \cdot \Delta X + X_0, \quad (4)$$

se se tomar o ponto  $i$  como sendo o extremo superior do intervalo e  $X_0$  o ponto origem da curva. Se o ponto  $i$  for o ponto intermédio do intervalo, ter-se-á:

$$X_i = \frac{\Delta X}{2} + (i-1) \cdot \Delta X + X_0. \quad (5)$$

No caso geral do ensaio pressiométrico,  $X_0=0$ . A ordenada correspondente a  $X_i$ ,

$$Y_i = F_i (X_i), \quad (6)$$

será determinada pela função  $F$  cujos coeficientes são estimados a partir dos  $m$  pares ordenados  $(x_1, y_1), \dots, (x_m, y_m)$ , ou seja:

$$F_i = F \left[ \overset{\wedge}{(x_1, y_1), \dots, (x_m, y_m)} \right]. \quad (7)$$

Substituindo (7) em (6) tem-se

$$Y_i = \left[ F \left[ \overset{\wedge}{(x_1, y_1), \dots, (x_m, y_m)} \right] \right]_{X=X_i}. \quad (8)$$

O ponto  $X=X_i$  será o ponto representativo do intervalo  $i$  e será calculado de acordo com o critério que se adopte, por exemplo, pela equação (4) ou pela equação (5). De igual modo, a função  $F$  será de um certo tipo.

No caso do programa ANABELA o ponto  $i$  é na extremidade superior do intervalo e a função  $F$  é um polinómio do terceiro grau. Assinale-se que a opção por um polinómio de grau ímpar não é inocente. De facto a utilização deste tipo de polinómio para estimar os coeficientes de uma curva respeita a concavidade que ela apresente. É claro que se a curva tiver quatro possíveis pontos de inflexão, por exemplo, um polinómio do 3.º grau é incapaz de o simular. No entanto, dado que o intervalo em que se baseia o seu cálculo é de pequena amplitude considera-se suficiente tal tipo de regressão. Note-se que a operação descrita elimina logo à partida algumas das altas frequências que a curva apresente.

Conhecidos os  $K$  pares ordenados  $(X, Y)$  passa-se à sua filtragem. O problema da escolha do filtro apropriado tem que ser considerado. Por um lado, a utilização de certos filtros muito eficientes e muito sofisticados leva a altos gastos de tempo de CPU que provavelmente se não justificam; por outro lado, há normalmente um atraso de fase associado à filtragem. Tal atraso tem como consequência "puxar" a curva para trás ou seja, distorcer a relação  $\Psi = \Psi(\varepsilon_0)$ . Tendo em atenção que a curva em causa é de muito baixa frequência e que existe uma densidade de pontos razoável optou-se por um filtro que passa muito baixo mas que se revelou extremamente eficiente. O filtro adoptado no

programa ANABELA consiste em calcular a média corrente de um determinado ponto sobre uma janela com uma certa extensão. Seja tal extensão  $LAV$ . O ponto  $Y_k$  será dado por:

$$Y_k = \frac{Y_{k-\frac{LAV-1}{2}} + Y_{k-\frac{LAV-1}{2}+1} + \dots + Y_k + \dots + Y_{k-\frac{LAV-1}{2}+LAV-1}}{LAV}$$

$$= \frac{\sum_{i=k-\frac{LAV-1}{2}}^{k+\frac{LAV-1}{2}} Y_i}{LAV} \quad (9)$$

Note-se que nas extremidades da curva a janela é de tamanho variável consoante o número de pontos. Por exemplo, na extremidade inferior, o primeiro ponto não varia, o segundo é a média corrente dos três primeiros, o terceiro a média corrente dos cinco primeiros, etc., até que seja atingido o tamanho da janela escolhido. O mesmo princípio é aplicado à extremidade superior da curva. O número de vezes que se faz passar o filtro é também uma variável do problema.

Findo o processo anterior tem-se uma curva discretizada a intervalos de deformação regulares, devidamente filtrada e com uma densidade de pontos suficiente para resolver a equação (3).

Uma das grandes vantagens deste método é que não impõe uma forma pré-definida à curva do ensaio. A curva é obtida a partir dos pontos experimentais e em seguida digitalizada segundo o seu traçado qualquer que ele seja. Os processos numéricos subsequentes são meios de eliminar efeitos indesejáveis que a digitalização impõe. Estas considerações podem ser ilustradas observando as figuras 1 e 2. Na figura 1 a digitalização respeita o verdadeiro andamento da curva representativa do ensaio (Fig. 1a). O resultado é a curva das tensões de corte não drenadas apresentar na sua parte final duas "bossas" (Fig. 1b) cujo significado físico é, evidentemente, irrealista. Na figura 2 a digitalização foi feita utilizando o "senso comum" (Fig. 2a). A curva das tensões de corte não drenadas apresenta uma resistência de pico e uma resistência residual (Fig. 2b). Aplicando o método de Wroth, ter-se-ia  $S_u = 386$  kPa. Este valor aproxima-se bastante da resistência de pico determinada pela equação de Palmer pelo método "ANABELA", mas ignora a sensibilidade da argila.

A resolução da equação (3) é, pois, realizada com base na curva digitalizada, filtrada e regularizada. É fácil ver que a curva  $\tau_u(\epsilon)$  assim obtida está muito mais próxima da realidade física do ensaio expressa a partir das hipóteses de base do que outras propostas que têm sido apresentadas. A curva  $\tau_u(\epsilon)$  pode também sofrer uma filtragem que elimine as altas frequências que eventualmente exiba.

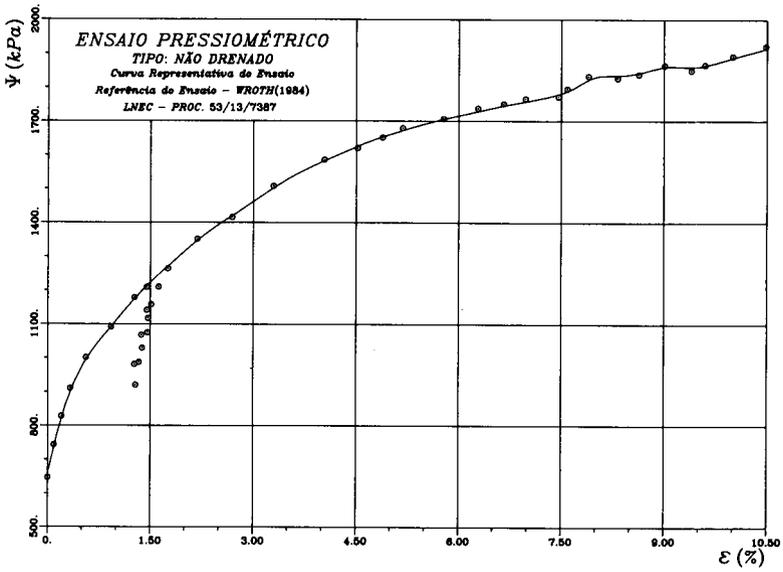


Fig. 1a) — Curva digitalizada para resolução da equação de Palmer com o andamento definido por todos os pontos experimentais

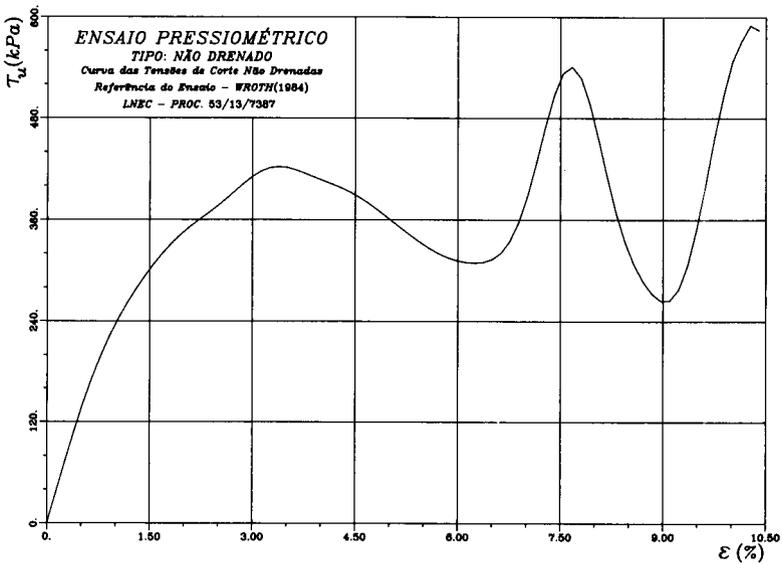


Fig. 1b) — Curva das tensões de corte não drenadas obtida a partir da curva representada na Fig. 1a)

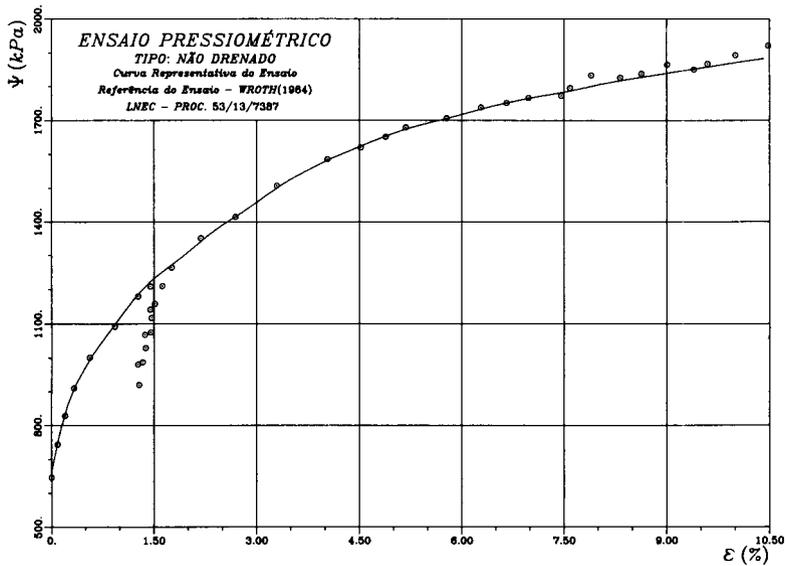


Fig. 2a) — Curva referente ao ensaio representado na Fig. 1a), mas digitalizada racionalmente

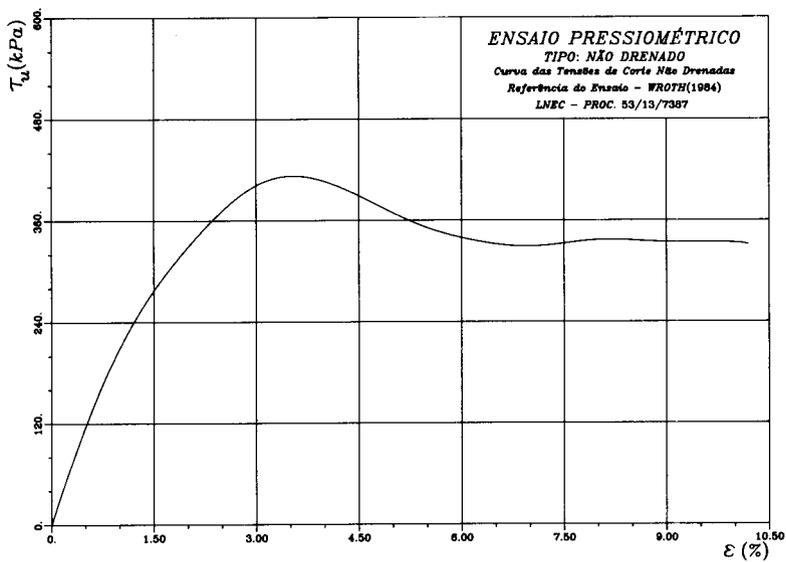


Fig. 2b) — Curva das tensões de corte não drenadas obtida a partir da curva representada na Fig. 2a)

## 2.4 — Implementação computacional do método

O problema que se depara em seguida é o da implementação do método descrito. De facto, as curvas são diferentes de ensaio para ensaio e portanto os parâmetros do filtro — extensão da janela e número de passagens do filtro — terão que ser diferentes. A execução repetida de um programa com diferentes parâmetros de filtragem tornar-se-ia morosa e dispendiosa. Por outro lado se o programa previsse um certo número de hipóteses e as experimentasse todas, além de não haver garantias quanto ao resultado, poder-se-ia cair no problema anterior. É neste contexto que um sistema gráfico interactivo se pode revelar muito eficiente. Um desses sistemas é o Graphical Kernel System — GKS — o qual está implementado no computador central do LNEC e que futuramente se pensa estender aos microcomputadores.

É esse sistema, o GKS, que o programa ANABELA utiliza. O GKS dispõe de uma norma própria — da ISO — e para ser utilizável é necessário definir uma interface com cada linguagem de programação e com cada sistema de operação (Cunha, 1983). Permite gerar imagens ao longo de uma sessão de trabalho podendo estas ser manipuladas pelo utilizador. No final da sessão de trabalho as imagens geradas e manipuladas podem ser armazenadas para posterior utilização. Tem, portanto, inúmeras vantagens em relação às rotinas do tipo Calcomp utilizadas habitualmente em programas escritos em Fortran e em Pascal que geram imagens durante a execução do programa nada mais restando para além disso.

Concretamente, no caso do programa ANABELA as curvas digitalizadas\* e as suas derivadas surgem no visor gráfico podendo então o utilizador verificar a existência das altas frequências. O programa pergunta ao utilizador quais são os parâmetros com que pretende usar o filtro. Após a resposta do utilizador, a correspondente imagem gráfica é gerada (sobrepondo as duas curvas, como é evidente). Se o utilizador estiver satisfeito com a filtragem, o desenho é enviado para o traçador de gráficos; caso contrário indica novos parâmetros e o processo recomeça. Note-se que com este sistema não é necessário refazer todos os cálculos iniciais de normalização, transformação de coordenadas e regularização; apenas o algoritmo do filtro e as primitivas gráficas geradoras da imagem da curva filtrada são utilizados. Do mesmo modo, para as curvas derivadas, o cálculo do gradiente é executado uma única vez e a sua imagem enviada para o visor. É sobre aquele cálculo que actuará o filtro (protegendo, como é natural, os resultados da derivação).

O cálculo do gradiente pode ser feito de diversos modos. No caso do programa ANABELA, o cálculo é executado à custa de uma rotina da biblioteca IMSL\*\*

---

\* Se a curva do ensaio tiver, como é usual, um troço de descarga e recarga, a curva terá que ser digitalizada duas vezes: uma vez incluindo tal troço e outra ignorando-o.

\*\* International Mathematical and Statistical Libraries.

(RLAV) a qual executa o cálculo dos coeficientes de uma regressão linear minimizando a soma dos valores absolutos dos desvios dos valores calculados em relação aos valores dados. O cálculo do declive num ponto é executado à custa dos 2 pontos imediatamente adjacentes:

$$\left(\frac{dY}{dX}\right)_i = H [(X_{i-1}, Y_{i-1}), (X_i, Y_i), (X_{i+1}, Y_{i+1})] \quad (10)$$

onde a função  $H$  designa o declive de uma recta estimada à custa dos 3 pontos indicados através da rotina RLAV.

Este algoritmo é preferível ao modelo de regressão linear de Gauss o qual só é realmente eficiente para amostras com mais de 30 pontos.

### 3 — O PROGRAMA ANABELA

O programa ANABELA está escrito em FORTRAN-77 (Versão Vax/Digital) e utiliza o sistema gráfico interactivo GKS. Permite processar os resultados de ensaios pressio-métricos drenados e não drenados gerando imagens gráficas representativas, quer de parâmetros de resistência quer de parâmetros de deformabilidade. Para qualquer dos dois tipos de ensaio, obtém-se a sua curva representativa bem como a curva dos módulos de distorção tangentes a cada nível de deformação (Sousa Coutinho, 1985, 1987a). A técnica de cálculo deste tipo de curva é exactamente a mesma que é utilizada para a equação de Palmer.

Os pontos experimentais do ensaio, excluindo os pontos iniciais e os pontos de eventuais ciclos de descarga e recarga são utilizados para calcular parâmetros de resistência. No caso de um ensaio não drenado, o parâmetro que é calculado é a resistência ao corte,  $S_u$ , tal como proposto por Wroth (1984). No caso de um ensaio drenado é executado um cálculo do ângulo de atrito e do ângulo de dilatância segundo a proposta de Hughes, Wroth e Windle (1977). Estes parâmetros são estimados utilizando a rotina RLAV uma vez que o seu cálculo implica o ajuste da recta que melhor "encaixe" nos pontos. Também à custa da rotina RLAV e desde que o ensaio tenha incluído pelo menos um ciclo de descarga e sequente recarga, é calculado o módulo de distorção de descarga/recarga,  $G_{dr}$ . Este módulo corresponde ao módulo de distorção da parcela elástica do solo ensaiado.

Finalmente, para os ensaios não drenados, obtém-se a curva representativa das tensões de corte não drenadas,  $\tau_u(\epsilon)$ , tal como foi descrito e discutido no pçnto 2 do presente trabalho.

Na figura 3 apresenta-se uma série completa dos gráficos obtidos a partir de um ensaio não drenado:

- a) Curva Representativa do Ensaio;
- b) Curva do Módulos de Distorção Tangentes;
- c) Parâmetro de Resistência ao Corte e Módulo de Distorção de Descarga/Recarga;
- d) Curva das Tensões de Corte Não Drenadas.

Este ensaio foi executado no âmbito do projecto da ponte sobre o rio Arade perto de Portimão (LNEC, 1987).

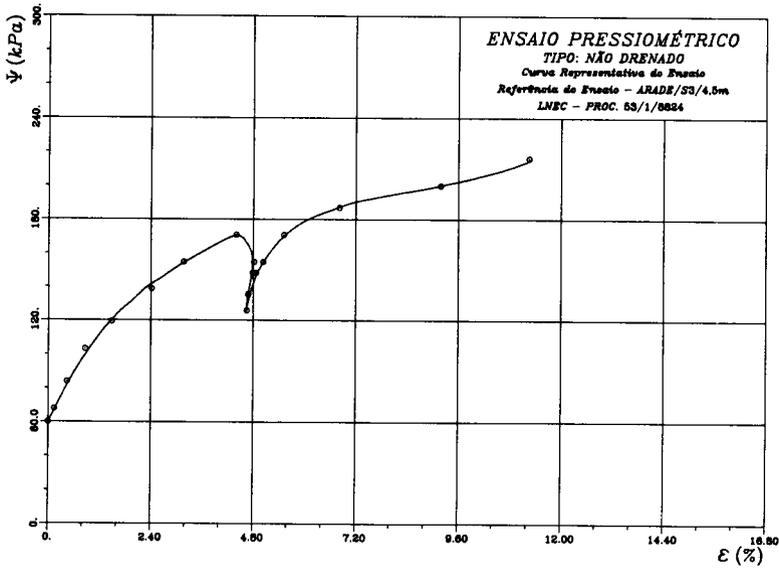


Fig. 3a) — Curva representativa de um ensaio não drenado

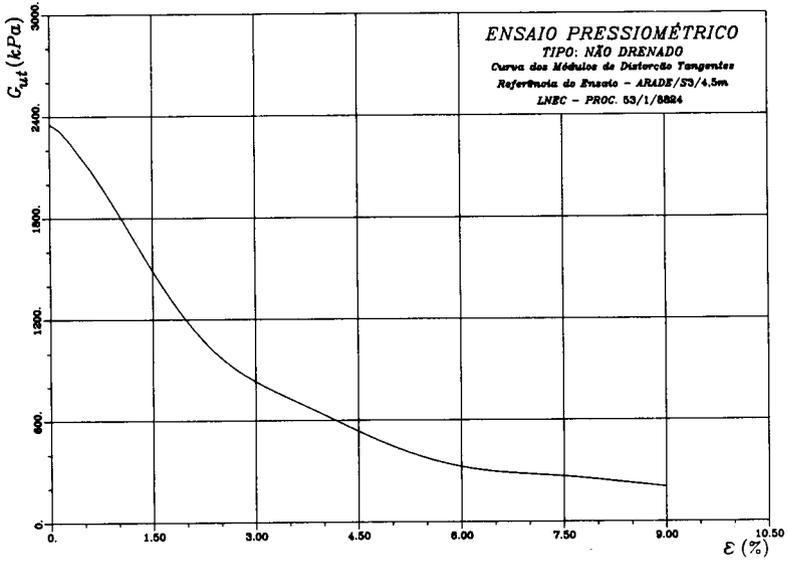


Fig. 3b) — Curva dos módulos de distorção tangentes do ensaio representado na Fig. 3a)

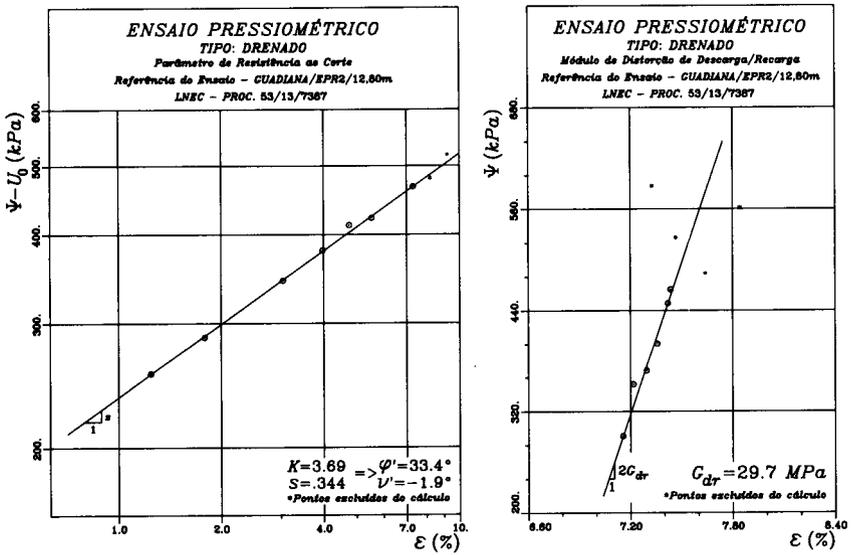


Fig. 3c) — Parâmetro de resistência ao corte e módulo de distorção de descarga/recarga do ensaio representado na Fig. 3a)

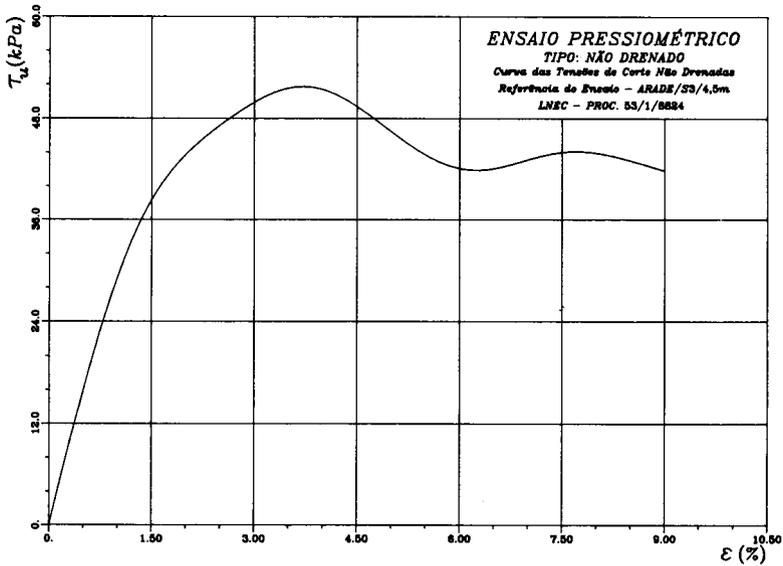


Fig. 3d) — Curva das tensões de corte não drenadas do ensaio representado na Fig. 3a)

Na figura 4 apresentam-se dois dos três gráficos que se obtêm para um ensaio drenado (o desenho que não se apresenta é o dos módulos de distorção tangentes):

- a) Curva Representativa do Ensaio;
- b) Parâmetro de Resistência ao Corte e Módulo de Distorção de Descarga/Recarga.

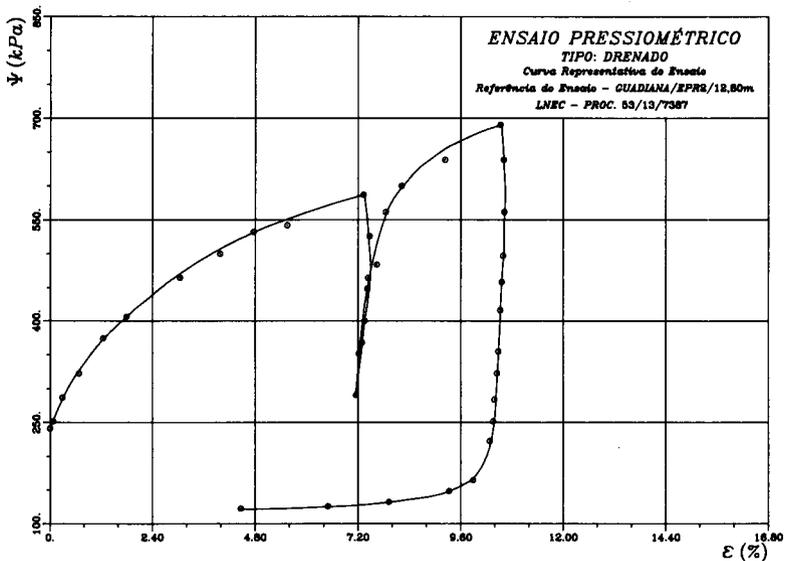


Fig. 4a) — Curva representativa de um ensaio drenado

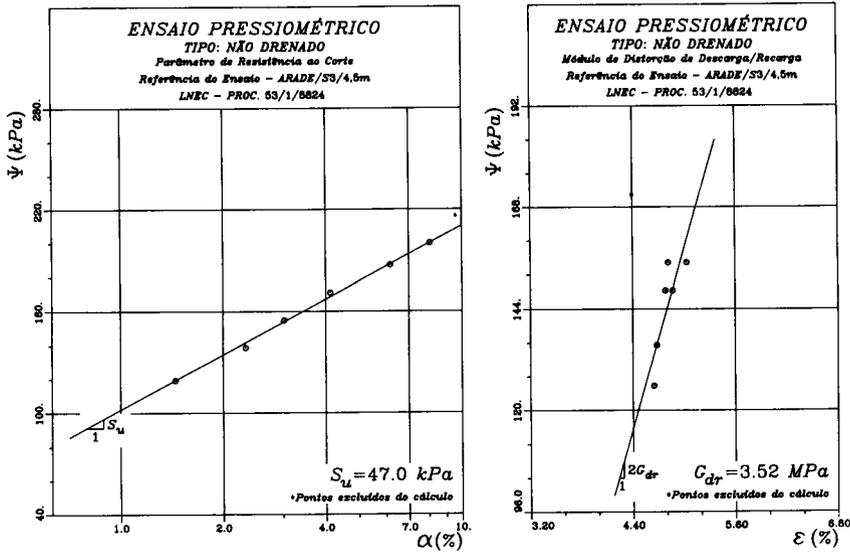


Fig. 4b) — Parâmetro de resistência ao corte e módulo de distorção de descarga/recarga do ensaio representado na Fig. 4a)

Este ensaio foi executado no âmbito do projecto da ponte internacional sobre o rio Guadiana perto de V.<sup>a</sup> Real de St.<sup>o</sup> António (Sousa Coutinho, 1985; LNEC, 1985).

Como nota de fecho deste ponto, assinala-se a existência do programa ANABELA II que já permite obter o ângulo de atrito de uma areia ao longo da gama de deformação do ensaio bem como a curva das respectivas deformações volumétricas. Estas possibilidades baseiam-se numa proposta de comportamento reológico apresentado pelo autor (Sousa Coutinho, 1987b) na 1.<sup>a</sup> Conferência de Jovens Engenheiros Geotécnicos realizada em Copenhaga em Junho de 1987. A título de curiosidade, apresentam-se na figura 5 as duas curvas referidas, relativas ao ensaio drenado representado na figura 4.

#### 4 — CONCLUSÕES

O processo numérico descrito e utilizado para a resolução da equação de Palmer revelou ser apropriado, uma vez que a curva resultante — a curva das tensões de corte não drenadas,  $\tau_u(\epsilon)$  — tem um andamento suave e não tem um gradiente pré-definido

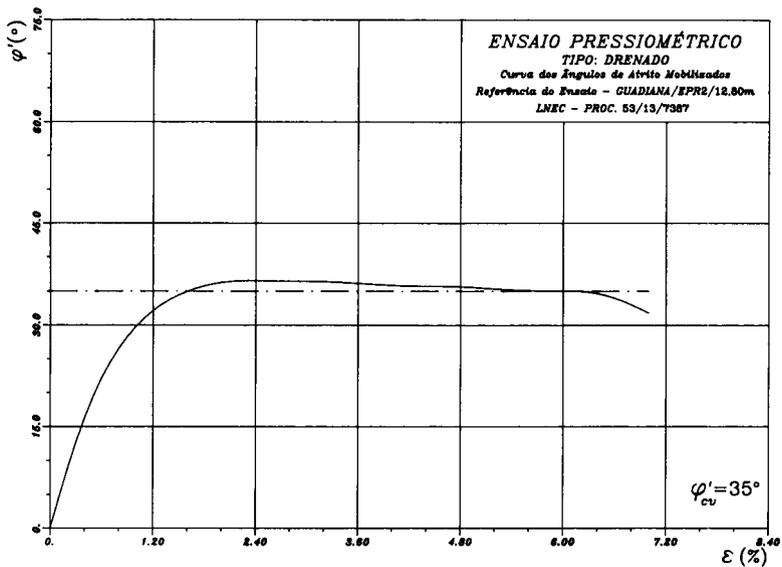


Fig. 5a) — Curva representativa dos ângulos de atrito mobilizados referente ao ensaio representado na Fig. 4a)

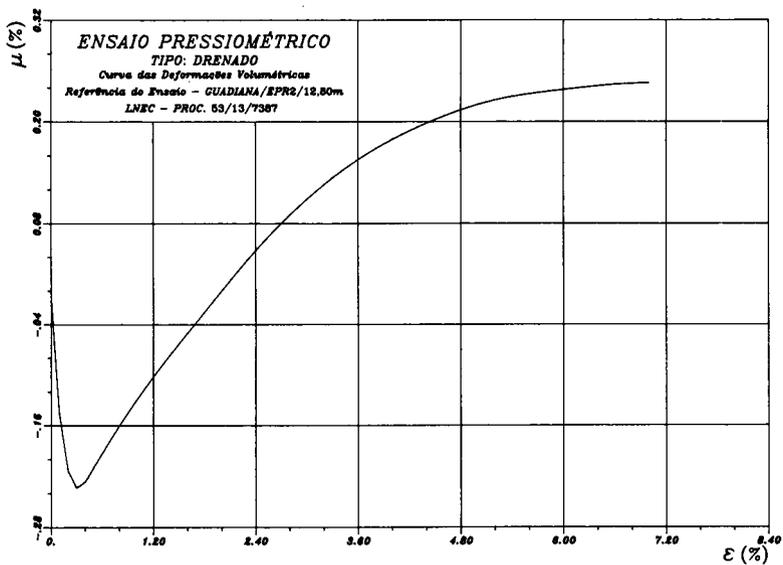


Fig. 5b) — Curva das deformações volumétricas referentes ao ensaio representado na Fig. 4a)

como aconteceria se fosse imposta uma expressão analítica à curva do ensaio,  $\Psi = \Psi(\epsilon_0)$ . Em particular, verificou-se a possibilidade de obter uma resistência de pico e uma resistência residual (se existir) ao invés de obter uma só resistência ( $S_u$ ). Neste último caso, não é conhecido o seu posicionamento em termos de uma relação tensões/deformações. De facto, não se sabe se, para um certo nível de deformação, tal resistência está a ser estimada por defeito ou por excesso. No primeiro caso estar-se-á perante uma situação a favor da segurança mas contra a economia; no segundo caso, se forem previstas e admitidas deformações de uma magnitude significativa, estar-se-á contra a segurança.

Em relação aos meios utilizados, note-se que o ANABELA poderia ser facilmente implementado num microcomputador. A mesa digitalizadora a utilizar poderia ser do tipo "tablet" e poderia estar ou não ligada ao microcomputador onde o ANABELA estivesse implementado. O importante era que o microcomputador onde o programa fosse executado conseguisse compreender o ficheiro das digitalizações. O "software" gráfico não seria problema pois que existem já versões do GKS para instalar em microcomputadores. O único problema estaria na utilização de rotinas da biblioteca IMSL mas seria sempre possível utilizar rotinas semelhantes de bibliotecas instaláveis em microcomputadores. Em alternativa poder-se-iam desenvolver os algoritmos correspondentes.

No último ponto referiram-se as possibilidades do programa ANABELA em relação aos gráficos que se obtêm em resultado de um ensaio com pressiómetro autoperfurador.

Como nota complementar assinala-se que a estrutura básica do método aqui apresentado de resolução da equação de Palmer pode ser aplicada a problemas em que seja necessário resolver uma equação a partir da imagem gráfica de uma função. Tal é o caso do ensaio pressiométrico em areias, para o qual o autor apresentou recentemente uma solução na 1.<sup>a</sup> Conferência de Jovens Engenheiros Geotécnicos realizada em Junho de 1987 em Copenhaga que será brevemente publicada.

## 5 — AGRADECIMENTOS

Ao Centro de Informática do LNEC e em particular aos seus Investigadores, Eng.<sup>o</sup> João Cunha, Investigador Principal, e Dr. António Pereira da Silva, Investigador Auxiliar, por todo o apoio dispensado nas fases de estudo e utilização do GKS.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ARNOLD, M. (1981) — *An empirical evaluation of pressuremeter test data*. Canadian Geotechnical Journal, 18, No 3, pp. 455-459.
- BAGUELIN, F., J. F. JÉZÉQUEL, E. LEMÉE e A. LE MÉHAUTÉ (1972) — *Expansion of cylindrical probes in cohesive soils*. Journal of the Soil Mech. and Found. Div. ASCE. Vol. 98, n.º SM 11. Nov. pp. 1129-1142.
- CUNHA, J. D. (1983) — *Instrumentos de Computação Gráfica*. Informação Científica e Técnica, LNEC.
- DENBY, G. M. (1978) — *Self-Boring pressuremeter study of the San Francisco Bay mud*. PhD thesis, Stanford University.
- GIBSON, R. E., W. F. ANDERSON (1961) — *In situ measurements of soil properties with the Pressuremeter*. Civil Engineering Pub. Wks Review, Vol. 56, n.º 658, May, pp. 615-618.
- HUGHES, J. M. O., C. P. WROTH, D. WINDLE (1977) — *Pressuremeter tests on sands*. Geotechnique, Vol. 30, n.º 4, pp. 507-531.
- LADANYI, B. (1972) — *In situ determination of undrained stress-strain behavior of sensitive clays with the Pressuremeter*. Canadian Geotechnical Journal, Vol. 9, n.º 3 August, pp. 313-319.
- LNEC (1985) — *Ponte Internacional sobre o Rio Guadiana. Ensaios Pressiométricos*. Relatório.
- LNEC (1987) — *Ponte sobre o Rio Arade (Portimão). Ensaios Pressiométricos*. Relatório.
- PALMER, A. C. (1972) — *Undrained plane-strain expansion of a cylindrical cavity in clay: a simple interpretation of the Pressuremeter test*. Geotechnique, Vol. 22, n.º 3, September, pp. 451-457.
- PRÉVOST, V. H. e K. HOEG (1975) — *Analysis of pressuremeter in strain softening soil*. Journal Geot. Eng. Div., Am. Soc. Civ. Eng. 101, GT8, pp. 717-732.
- SOUSA COUTINHO, A. G. (1985) — *Teoria e Prática do Pressiómetro Autoperfurador*. Tese de Mestrado em Mecânica dos Solos, Universidade Nova de Lisboa.
- SOUSA COUTINHO, A. G. (1987a) — *Teoria de Interpretação de Esaios com Pressiómetro Autoperfurador*. Geotecnia 49, pp. 49-77.
- SOUSA COUTINHO, A. G. (1987b) — *An Interpretation Method of Selfboring Pressuremeter Tests*. 1.ª Conferência de Jovens Engenheiros Geotécnicos, Copenhaga, 1987.
- WROTH, C. P. (1984) — *The interpretation of in situ soil tests*. Geotechnique, Vol. 34, n.º 4, December, pp. 449-489.

## ERRATA (Geotecnia n.º 52)

Artigo "Uma Técnica de Resolução da Equação de Palmer"

<b>Página</b>	<b>Linha</b>	<b>Onde se lê</b>	<b>Deve ler-se</b>
28	6	preerencialmente	preferencialmente
28	15	percorrerça	percorrer a
34	31	pçnto	ponto

A figura 3c) está trocada com a figura 4b).