

# NOVOS DESENVOLVIMENTOS NA INTERPRETAÇÃO DE REGISTOS INCLINOMÉTRICOS\*

New developments on the interpretation of inclinometer field data

F.M.SALGADO\*\*  
M.R. de CARVALHO\*\*\*

RESUMO - O inclinómetro é um dos instrumentos que é geralmente utilizado para controlar a estabilidade de problemas geotécnicos dado que permite a medição de deslocamentos sub-horizontais com os quais é possível identificar a localização de superfícies potenciais de rotura assim como estimar a evolução dos deslocamentos horizontais registados nessas superfícies. Casos recentes de rotura analisados por investigadores do LNEC fizeram realçar a necessidade para melhorar a metodologia corrente de interpretação de registos inclinométricos. De facto a metodologia corrente não permite quantificar qual é o factor de segurança num ponto da superfície de rotura. Uma nova metodologia é apresentada para estimar, com base em registos inclinométricos, a distribuição em profundidade da distorção horizontal,  $\gamma_h$ . Uma vez conhecido o valor de  $\gamma_h$  é possível estimar o valor correspondente de distorção máxima,  $\gamma$ , usando a geometria da superfície de rotura. Esta nova metodologia foi usada para estudar a instabilidade dos taludes de uma das auto-estradas principais de acesso à cidade de Lisboa. Os valores de  $\gamma$  estimados com a nova metodologia indicam que existia uma situação de eminente rotura no local e que a resistência ao corte a considerar no projecto de reforço é a resistência residual correspondente.

SYNOPSIS - One of the instruments that is commonly used to control geotechnical stability problems is the inclinometer since it provides sub-surface horizontal deformation data which allows to estimate the location of a potential failure surface and the evolution of the displacements in that particular location. Recent instability cases studied by LNEC researchers outstand the need to improve the current procedures of inclinometer data interpretation. In fact these procedures can not quantify how close to failure are the soils located in the potential failure surface. A new procedure is presented to estimate the distribution in depth of the horizontal shear strain,  $\gamma_h$ , from inclinometer data. Once  $\gamma_h$  is known is possible to estimate the correspondent maximum shear strain,  $\gamma$ , using the geometry of the failure surface. This new procedure has been used to study the instability of the slopes of a major access highway to Lisbon. The values of  $\gamma$  estimated from the new procedure indicate that there was a situation of eminent rupture at the site and that the shear resistance to use in the design should be the residual shear resistance.

---

\* Comunicação apresentada no 8º Congresso Internacional da Associação de Geologia de Engenharia, Vancouver, Canadá, 1998.

\*\* Investigador Principal do Departamento de Geotecnia do Laboratório Nacional de Engenharia Civil

\*\*\* Assistente de Investigação do Departamento de Geotecnia do Laboratório Nacional de Engenharia Civil

## 1 - INTRODUÇÃO

Os investigadores do Departamento de Geotecnia do LNEC são solicitados frequentemente por empresas estatais e privadas para darem pareceres a vários níveis de consultoria, nomeadamente: i) apreciação de projecto; ii) supervisão e controlo da segurança durante e após o final da obra; iii) diagnóstico da instabilidade de problemas geotécnicos e recomendações relativas às respectivas soluções de reforço.

Um dos instrumentos que é geralmente utilizado no campo para acompanhar a segurança local é o inclinómetro. Vários tipos de inclinómetro foram desenvolvidos no passado (Koch *et al.* 1952, Wilson e Hancock, 1960). A empresa Slope Indicator Company tem vindo a aperfeiçoar este instrumento assim como os procedimentos para a interpretação dos registos inclinométricos (SINCO, 1987).

Um dos casos de instabilidade estudados pelos investigadores do LNEC mostrou a necessidade para melhorar os procedimentos correntes de interpretação dos registos inclinométricos. Este caso é o caso da rotura da fundação que ocorreu em 1994 durante a construção de um aterro de acesso à passagem superior da Azambuja construído sobre os solos moles argilosos locais. Usando os procedimentos convencionais de interpretação de registos inclinométricos não é possível antever que uma rotura na fundação local se desenvolveria uma hora após a última leitura efectuada. Esta leitura foi efectuada por coincidência num inclinómetro localizado no pé do talude do aterro do lado Sul localizado adjacente à zona de rotura.

Para superar esta lacuna, existente nos procedimentos correntes de interpretação de registos inclinométricos, Salgado (1995) propôs uma nova metodologia com a qual é possível estimar valores de distorção horizontal,  $\gamma_h$ , a partir de registos inclinométricos. Posteriormente Carvalho (1997) e Carvalho e Salgado (1998a) propõem procedimentos para estimar o valor do factor de segurança local (FS) conhecidos os valores de  $\gamma_h$ , e da resistência não drenada ao corte,  $C_u$ , e do módulo de distorção,  $G$ , os quais podem ser obtidos a partir dos resultados dos ensaios de campo de Molinete (Carvalho e Salgado, 1998b). Usando esta nova metodologia é então possível inferir dos registos inclinométricos que existia uma condição de rotura no subsolo lodoso da Azambuja.

Esta nova metodologia foi usada para analisar a instabilidade dos taludes de uma das auto-estradas principais de acesso à cidade de Lisboa. Os valores de  $\gamma_h$  obtidos a partir dos registos inclinométricos seguindo a nova metodologia mostram que: i) a superfície de rotura tem cerca de 0,5 m de espessura; ii) a resistência ao corte a considerar no projecto de reforço é a correspondente à resistência residual. Um resumo deste estudo é apresentado neste artigo, contudo primeiro faz-se uma revisão dos procedimentos correntes seguido de um sumário dos novos procedimentos

## 2 - PROCEDIMENTOS CORRENTES PARA A INTERPRETAÇÃO DE REGISTOS INCLINOMÉTRICOS

O princípio do funcionamento do inclinómetro está esquematizado na Figura 1. Após a instalação do tubo calha num furo, o torpedo inclinométrico é levado ao fundo do furo onde é feita uma leitura de inclinação. Sequentemente, à medida que se sobe o torpedo até à superfície fazem-se novas leituras, obtendo-se assim o alinhamento geométrico inicial do furo. Numa data à posteriori faz-se um novo conjunto de leituras obtendo-se um novo alinhamento geométrico. A diferença entre o alinhamento inicial (ou de referência) e outros alinhamentos geométricos que se obtenham à posteriori permitem averiguar se foi mobilizada qualquer variação no alinhamento geométrico do furo. Desde que um dos extremos do furo não sofra translação (ou se essa translação for medida por outros meios), então a diferença entre os alinhamentos permite calcular

o valor absoluto da deformação horizontal mobilizada em qualquer ponto ao longo do tubo calha inclinométrico.

Os procedimentos correntes usados para a interpretação de registos inclinométricos consistem no desenvolvimento de três tipos de gráficos, nomeadamente: i) variação em profundidade dos deslocamentos horizontais acumulados dado por  $\Sigma L \sin(\theta)$  vs P; ii) variação em profundidade dos deslocamentos horizontais parciais dado por  $L \sin(\theta)$  vs P; iii) evolução do deslocamento horizontal acumulado a uma profundidade pré-definida dado por  $\Sigma L \sin(\theta)$  vs t, onde: L=comprimento entre duas leituras consecutivas,  $\theta$ =inclinação, P=profundidade e t=tempo relativo à data da leitura de referência. Como exemplo os registos obtidos no caso da rotura da Azambuja estão apresentados na Figura 2. Com base nos resultados apresentados nesta figura pode inferir-se o seguinte Figura 2 (a): o deslocamento máximo horizontal acumulado é de 18 cm e foi registado aos 6,0 m de profundidade no depósito das argilas moles; Figura 2 (b): o deslocamento máximo horizontal parcial é de 2,0 cm e foi registado aos 13,0 m de profundidade também no depósito das argilas moles; Figura 2 (c): uma hora antes da ocorrência da rotura a taxa do deslocamento máximo horizontal aumentou de 0,3 para 1,1 cm/dia. Pode ver-se que com base nesta informação não é possível quantificar-se que existia uma condição de rotura no local deste inclinómetro. Pormenores são discutidos em detalhe por Carvalho (1997) e Carvalho e Salgado, 1998a).

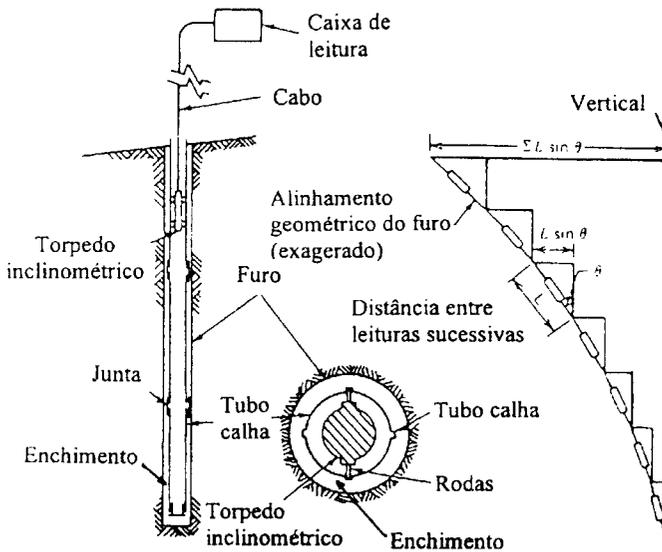


Figura 1 - Princípio de funcionamento do Inclinómetro (Dunncliff, 1988):

### 3 - NOVOS PROCEDIMENTOS PARA A INTERPRETAÇÃO DE REGISTOS INCLINOMÉTRICOS

Os dados obtidos a partir dos procedimentos correntes permitem estimar o local de uma superfície potencial de rotura e a evolução dos deslocamentos horizontais num ponto localizado nessa superfície, mas estes procedimentos não permitem quantificar qual é o factor de segurança local do solo nesse ponto. Uma nova metodologia foi desenvolvida por Salgado (1995) para estimar o valor da distorção horizontal,  $\gamma_h$ , a partir dos registos inclinométricos.

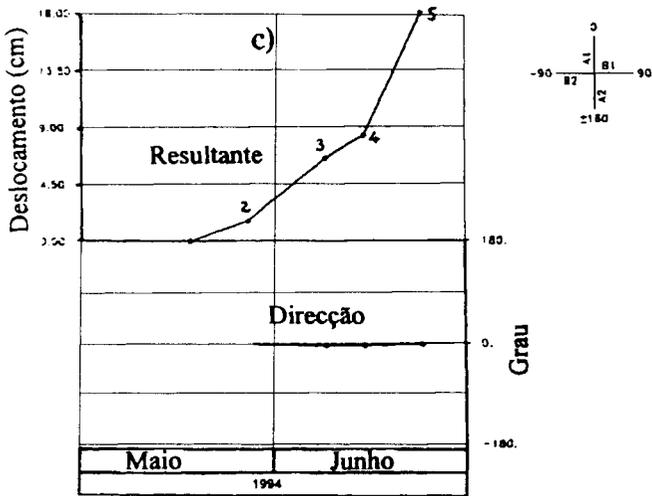
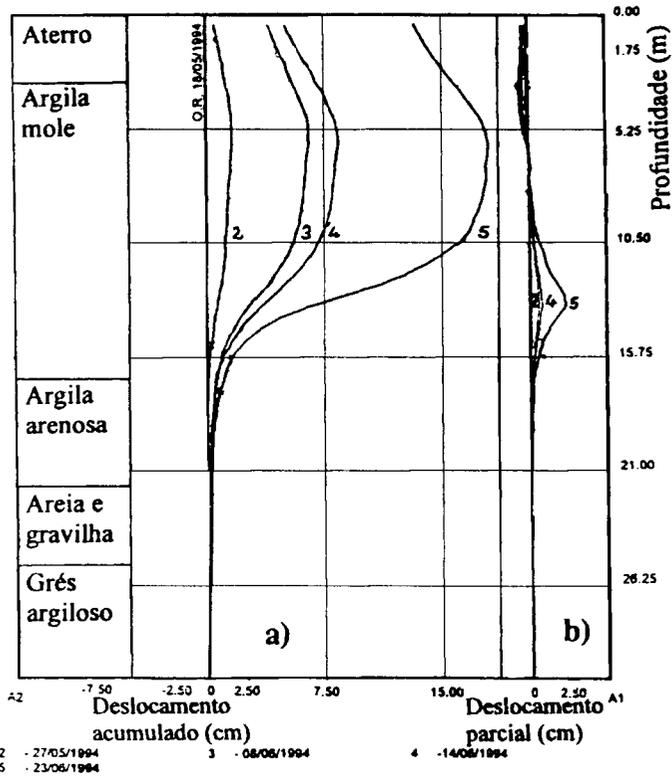


Figura 2 - Procedimentos correntes na interpretação de registos inclinométricos:  
 (a) Deslocamento horizontal acumulado  
 (b) Deslocamento horizontal parcial  
 (c) Evolução do deslocamento horizontal

Um resumo desta metodologia é apresentada de seguida.

A partir dos resultados de um ensaio de corte simples os valores de  $\gamma_h$  são facilmente calculados através da equação  $\gamma_h=d/h$ , onde  $d$  é o deslocamento mobilizado no topo da amostra correspondente à tensão de corte  $\tau_h$ , e  $h$  é a altura da amostra ensaiada (Figura 3a). Por analogia é possível calcular o valor de  $\gamma_h$  a partir de duas leituras consecutivas de inclinómetro, considerando as geometrias do torpedo e do tubo calha inclinométricos (Figura 3b), usando a equação seguinte:

$$\gamma_h(\%)=100 ((d_i-d_{i+1})/L \cos(\theta)) \quad (1)$$

onde:  $d_i$  e  $d_{i+1}$  são os deslocamentos horizontais acumulados medidos em duas leituras consecutivas,  $L$  é a distância entre os pontos correspondentes a essas leituras e  $\theta$  é o ângulo da inclinação do tubo calha correspondente.

Usando este procedimento a todos os pares de leituras consecutivas é possível estimar-se a distribuição em profundidade de  $\gamma_h$  mobilizada no solo ao longo do tubo inclinométrico. Este procedimento foi aplicado aos dados apresentados na Figura 2 e os valores correspondentes de  $\gamma_h$  estão apresentados na Figura 4 (a). Pode ver-se que um valor de  $\gamma_h=4,5\%$  é calculado a uma profundidade de 13,0 m no depósito das argilas moles. É importante notar que este procedimento só é válido quando os deslocamentos entre duas leituras consecutivas considerados na equação (1) têm a mesma direcção. Isto acontece quando grandes deformações são mobilizadas no solo conforme mostra o gráfico da Figura 4 (b) onde está apresentada a variação em profundidade do ângulo entre a direcção da resultante dos deslocamentos horizontais com a direcção A1 (montante-jusante).

Considera-se que o conhecimento de  $\gamma_h$  a partir de registos inclinométricos é um passo em frente na interpretação destes registos pois permite quantificar o grau da distorção horizontal mobilizado no solo o qual por si só é um parâmetro muito importante pois permite por sua vez a quantificação do valor do factor de segurança local, FS.

#### 4 - ESTIMATIVAS DO VALOR DO FACTOR DE SEGURANÇA

Uma vez conhecido o grau da distorção horizontal mobilizado no solo é possível calcular o valor correspondente do factor de segurança local, FS, usando os procedimentos desenvolvidos por Carvalho (1997) e Carvalho e Salgado (1998a). Os procedimentos desenvolvidos por estes investigadores são sumariados de seguida conjuntamente com uma optimização recente desta metodologia que é proposta nesta comunicação.

Com base na formulação hiperbólica (Kondner e Zelasko, (1963), Duncan e Chang (1970)), o valor de FS pode ser calculado através da equação seguinte:

$$FS=(\tau_{rot}+G_i \gamma Rf)/(\gamma G_i) \quad (2)$$

Assim, para estimar FS é necessário conhecerem-se os valores de  $\gamma$ ,  $G_i$ ,  $Rf$  e  $\tau_{rot}$ , onde:  $\gamma$ =distorção máxima,  $G_i$ =módulo de distorção inicial,  $Rf$ =coeficiente de rotura= $\tau_{rot}/\tau_{ult}$ , sendo:  $\tau_{rot}$ =resistência máxima de corte e  $\tau_{ult}$ =valor assíntótico de  $\tau_{rot}$ .

Valores representativos de  $G_i$ ,  $Rf$  e  $\tau_{rot}$  podem ser obtidos a partir dos resultados de ensaios de laboratório seguindo os procedimentos desenvolvidos por Duncan *et al.* (1980). Estes investigadores também apresentam nesta comunicação uma vasta lista de parâmetros característicos com base nos resultados de ensaios de laboratório efectuados em vários tipos de solo. Estes valores característicos conjuntamente com os publicados por Byrne *et al.* (1987) podem ser usados com a equação (2) para estimativas preliminares de FS.

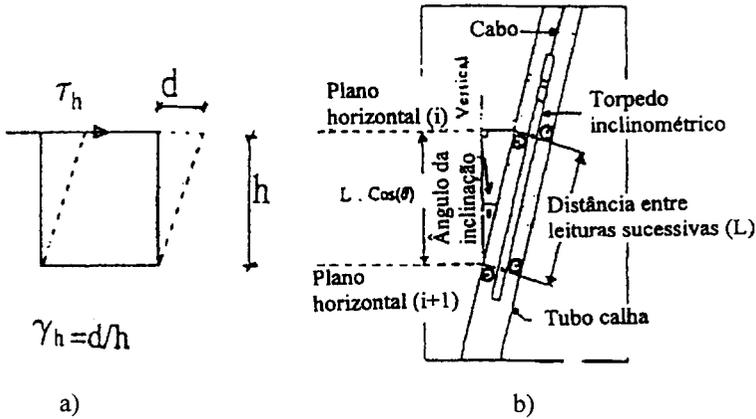


Figura 3 - Analogia entre as geometrias do ensaio de corte simples (a) e do inclinómetro (b)

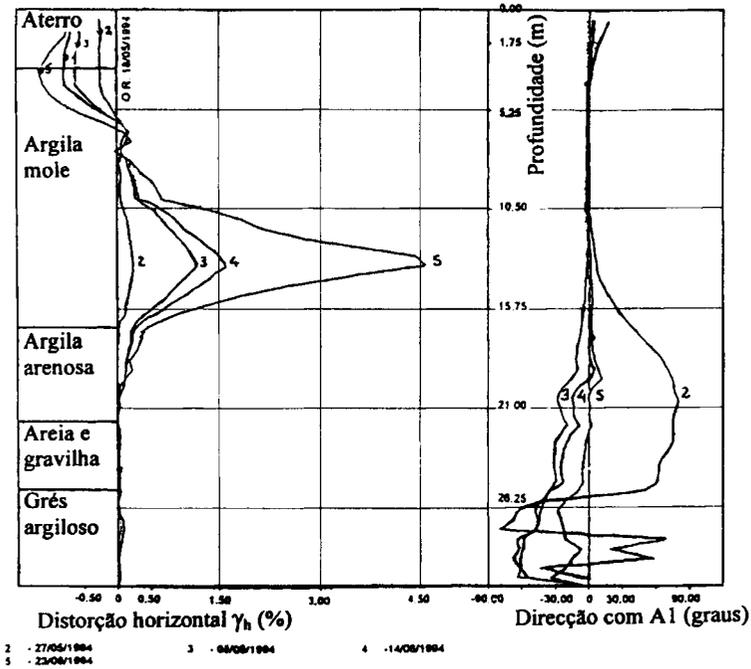


Figura 4 - Novos procedimentos na interpretação de registos inclinométricos:  
 (a) Distorção horizontal,  $\gamma_h$   
 (b) Direcção da resultante

No caso da Azambuja, Carvalho (1997) (conforme sumariado por Carvalho e Salgado 1998a) considerou-se  $\gamma = \gamma_h$  porque o inclinómetro atrás referido estava localizado numa zona onde prevalecem condições de corte simples. Em adição considerou-se  $\tau_{rot} = c_u$ . Os valores de resistência não drenada ao corte,  $c_u$  foram obtidos a partir dos resultados de campo de Molinete seguindo os procedimentos correntes e os valores de  $G_s$  e  $R_f$  foram obtidos também a partir dos resultados dos ensaios de campo de Molinete, mas seguindo os novos procedimentos propostos por Carvalho e Salgado (1998b). Estes investigadores mostram que para o local do inclinómetro

correspondente aos dados apresentados na Figura 2 é possível inferir que existia uma condição de rotura á profundidade de 13,0 m uma hora antes desta se ter desenvolvido.

## 5 - PROCEDIMENTOS PARA ESTIMATIVAS DA DISTORÇÃO MÁXIMA, $\gamma$

Nos casos em que as condições de corte simples prevalecem, i.e. quando a distorção horizontal é igual à distorção máxima ( $\gamma_h = \gamma$ ), o valor de  $\gamma_h$  pode ser usado na equação (2) para calcular o valor do factor de segurança, FS.

Para os casos em que  $\gamma_h \neq \gamma$ , propõe-se aqui o seguinte procedimento (Figura 5) para estimar  $\gamma$  a partir de  $\gamma_h$ :

i) definir a localização de um ponto (ponto A, B ou C dependente da localização do inclinómetro) na superfície potencial de rotura a partir da distribuição em profundidade de  $\gamma_h$  obtida dos registos inclinométricos;

ii) efectuar análises de equilíbrio limite de maneira que a superfície potencial de rotura passe pelo ponto pré-defenido em i);

iii) a partir da geometria da superfície potencial de rotura, estimada em ii), calcular para o local da intercepção desta superfície com o alinhamento geométrico do inclinómetro (ponto A, B ou C), o ângulo  $\alpha$  definido pela tangente à superfície de rotura com a horizontal. Para os casos de rotura planar o valor de  $\alpha$  é constante;

iv) calcular  $\gamma = \cos^{-1}(\alpha) \gamma_h$ .

## 6 - APLICAÇÃO DOS NOVOS PROCEDIMENTOS AO ESTUDO DA INSTABILIDADE DOS TALUDES DE UMA DAS AUTO-ESTRADAS PRINCIPAIS DE ACESSO A LISBOA

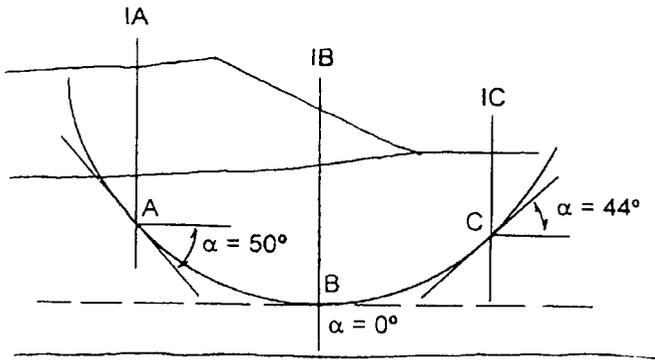
Os novos procedimentos tem vindo a ser aplicados com sucesso em vários casos de instabilidade estudados pelos investigadores do LNEC. O caso da Azambuja que já foi referido atrás e é discutido em detalhe por Carvalho (1997) e Carvalho e Salgado (1998a) é considerado ser um caso importante do ponto de vista didáctico pois realçou a necessidade para o desenvolvimento das novas metodologias, contudo o caso da Azambuja é considerado ser um caso pouco importante do ponto de vista de impacto económico.

O caso apresentado a seguir é considerado ser muito importante porque a auto-estrada nº 2 é a única auto-estrada de acesso a Lisboa do lado Sul através da Ponte 25 de Abril e qualquer interrupção no tráfego local devido à rotura de um dos taludes locais teria um impacto negativo bastante significativo nos 140.000 veículos que diariamente entram na cidade de Lisboa.

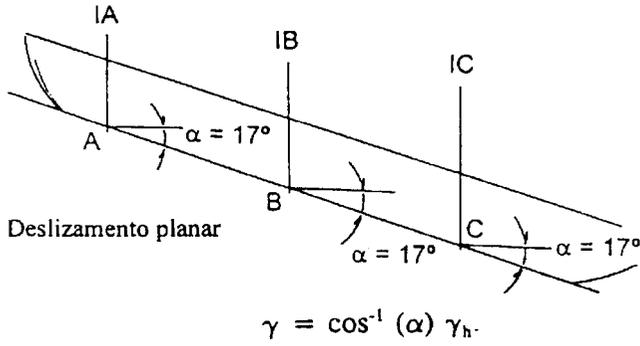
### 6.1 - Descrição da instabilidade

A auto-estrada de acesso a Lisboa do lado Sul foi construída entre 1964 e 1965 pela metodologia de escavação-aterro nos taludes do lado Poente do Vale de Alcântara (Figura 6).

A geologia local consiste em depósitos superficiais seguidos por argilas margosas, margas e calcários margosos (formações Cretáceas do Cenomaniano médio C<sup>2</sup><sub>c</sub>). Estas formações apresentam sensivelmente a mesma atitude. Os estratos têm uma direcção aproximada de N60°E e inclinações entre os 7 e os 15° para SE. Esta atitude é considerada desfavorável no ponto de vista da estabilidade local. Em adição, intercalado nos depósitos margosos existem camadas de argila caracterizadas pela sua baixa resistência ao corte.



Deslizamento rotacional



Deslizamento planar

Figura 5 - Procedimentos para estimar  $\gamma$  a partir de  $\gamma_h$

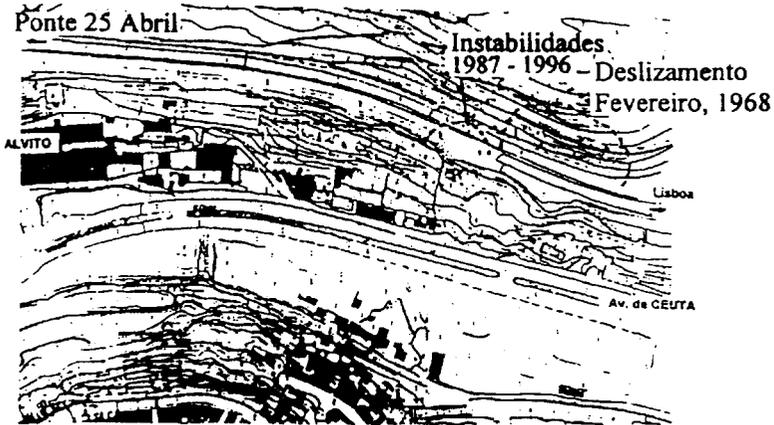
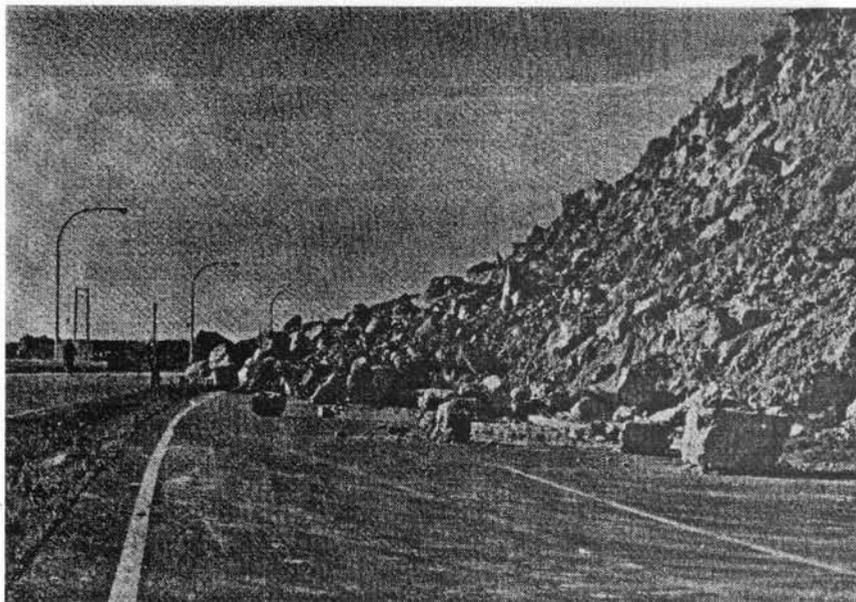


Figura 6 - Vale de Alcântara: Planta de localização

Em 1987 a zona no lado do aterro localizada no outro lado da auto-estrada (Figura 6) começou a mostrar sinais de instabilidade. Estes sinais consistiram na abertura de fendas longitudinais na berma da auto-estrada localizadas na crista do talude. As medida de reforço

consistiram na construção de um muro com 70 m de comprimento reforçado com ancoragens e fundado em estacas conforme está apresentado na Figura 7. As estacas tem um comprimento de 6,0 m e estão fundadas nos depósitos margosos que existem em profundidade. O LNEC foi então solicitado por uma empresa estatal para efectuar o controlo da estabilidade local a longo prazo após a conclusão das obras de reforço. O sistema de observação consistiu em 3 inclinómetros, 3 piezómetros e células de medição de forças de tracção em 2 ancoragens (Figuras 7 e 8). Os resultados obtidos entre 1987 e 1995 indicam a existência de uma zona de distorção localizada a uma cota mais baixa do que a cota da base das estacas conforme é discutido a seguir na secção 6.2.

Em 1996 o Governo decidiu expandir a Ponte 25 de Abril de forma a suportar uma faixa de rodagem adicional e um eixo ferroviário de duas vias. No lado Norte da Ponte o alinhamento geométrico do eixo ferroviário passa tangente á zona da instabilidade ocorrida em 1987 onde foi construído o muro de reforço atrás referido. Por razões de gabari foi necessário cortar o pé do talude nesse local. Os registos inclinométrico obtidos durante 1996 mostram que houve um aumento das taxas dos deslocamentos em dois dos inclinómetros (IN1 e IN3). Estes dados serão discutidos em pormenor a seguir na secção 6.2. Em Outubro de 1996 observou-se o desenvolvimento de fissuras longitudinais na berma da auto-estrada (Fotografia 3). No final de Dezembro de 1996 estas fissuras apresentavam aberturas significativas. No dia 1 de Janeiro de 1997, com base em registos inclinométricos prontamente obtidos por técnicos do LNEC que mostraram uma aceleração das taxas dos deslocamentos, os investigadores do LNEC alertaram as autoridades competentes sobre a instabilidade e recomendaram que era necessário implementarem-se de imediato medidas complementares de reforço nesta zona, caso contrário um deslizamento de grandes proporções ocorreria (Figura 9) o qual cortaria as três faixas de rodagem do sentido Sul e uma faixa de rodagem do sentido Norte da auto-estrada. Esta ocorrência teria um impacto negativo bastante significativo na cidade de Lisboa.



Fotografia 1 - Frente de escorregamento vista do Norte



Fotografia 2 – Levantamento da faixa interior

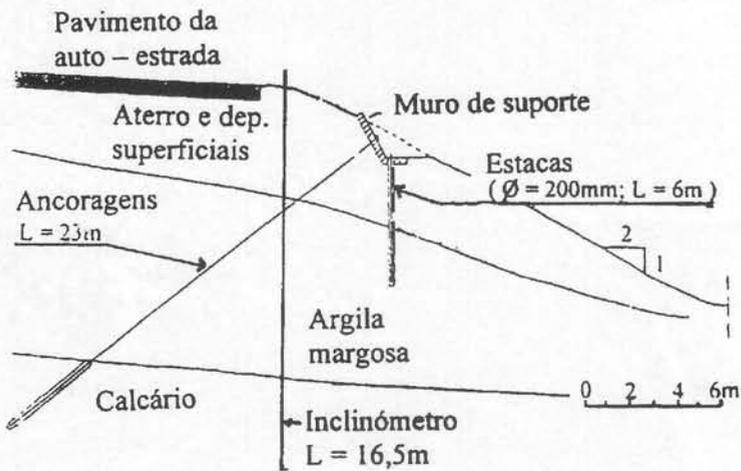


Figura 7 – Muro de suporte (1987)

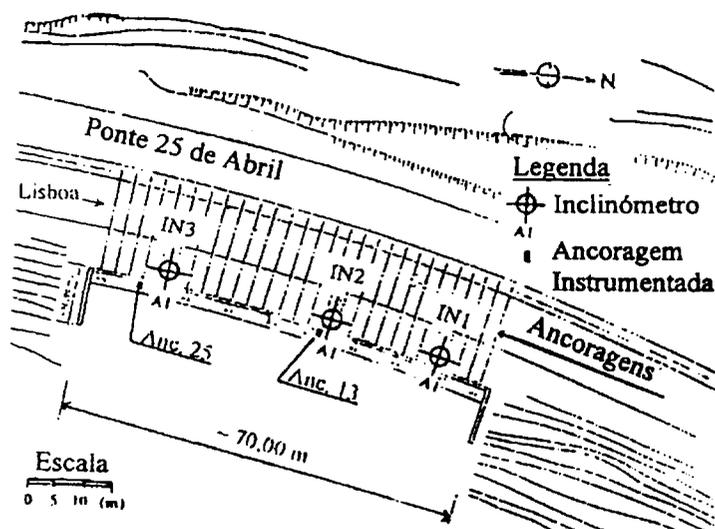


Figura 8 – Localização dos inclinómetros

## 6.2 - Análise interpretativa dos registos inclinométricos obtidos entre 1987 e 1998

Foram usados os procedimentos correntes e os novos procedimentos na análise interpretativa dos registos inclinométricos obtidos no local dos tubos IN1, IN2 e IN3 (Figuras 7 e 8). Os resultados obtidos no tubo IN2 não foram significativos pelo que só os registados nos tubos IN1 e IN3 são discutidos a seguir. Os resultados obtidos estão apresentados na Figura 10 (IN1) e na figura 11 (IN3). Em cada figura é apresentado: (a) deslocamentos horizontais acumulados; (b) distorção horizontal,  $\gamma_h$ ; (c) ângulo entre a direcção da resultante dos deslocamentos horizontais e a direcção A1 (montante-jusante). Para complementar estes dados apresenta-se na Figura 12 a evolução dos deslocamentos máximos, das taxas (velocidades) destes deslocamentos e dos valores máximos da distorção horizontal. Para facilitar a análise interpretativa apresenta-se na Figura 13 um corte transversal com os dados inclinométricos relativos ao tubo IN3 assim como a geologia local e as geometrias do talude e da estrutura do novo eixo ferroviário. Em adição para interpretar correctamente estes dados apresenta-se de seguida uma lista com a cronologia dos acontecimentos mais importantes que ocorreram no local.

Lista de acontecimentos associados com a construção do novo eixo ferroviário:

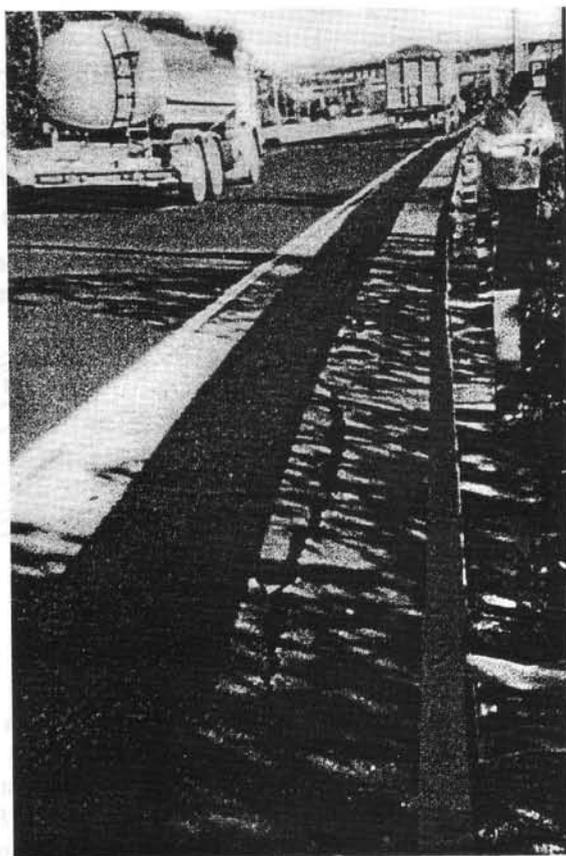
A - Janeiro a Abril de 1996: escavações superficiais no pé do talude.

B - Junho de 1996: execução das estacas de largo diâmetro ( $d=1,5$  m) para o suporte do estrutura do novo eixo ferroviário.

C - Agosto de 1996: execução de uma estrada no pé do talude e escavação para a construção de travessas.

D - Novembro e Dezembro de 1996: corte do pé do talude, implementação de drenagem e execução de pregagens.

E - Janeiro (meados) até Junho de 1997: Implementação das medidas de reforço.



Fotografia 3 – Fissuras no pavimento (1996)

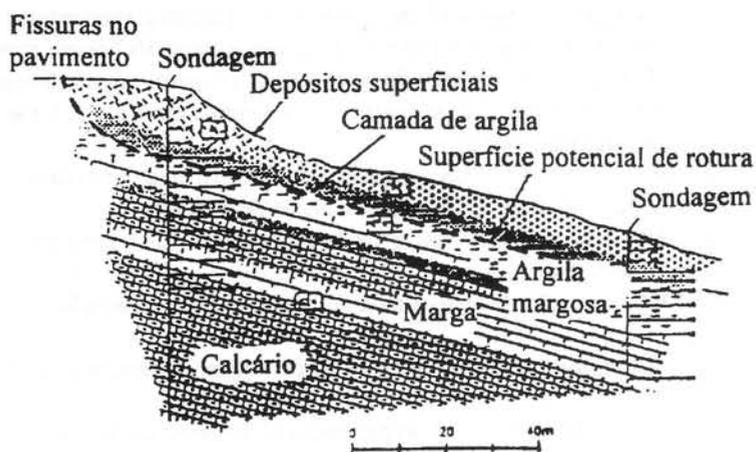


Figura 9 – Condições geológicas no talude e localização da superfície potencial de rotura

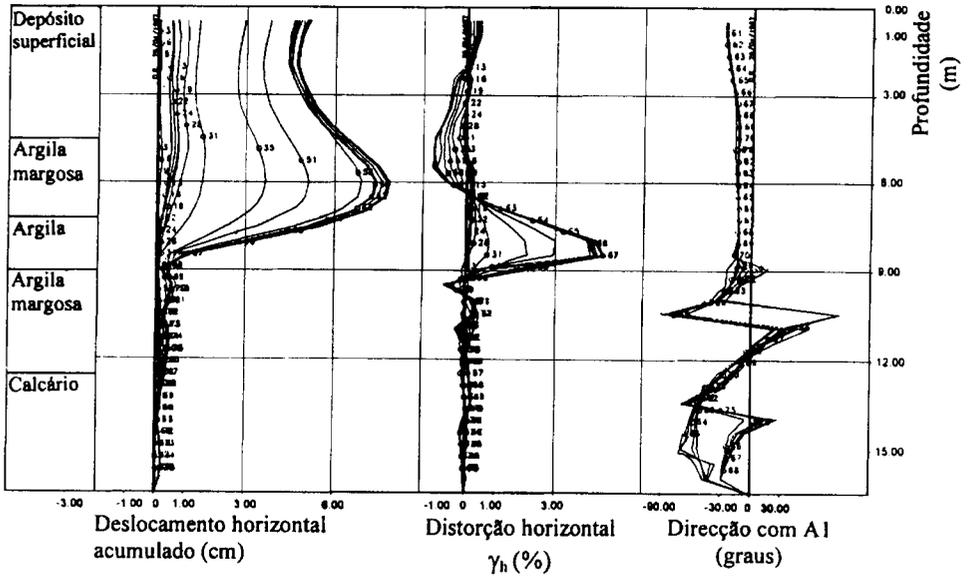


Figura 10 - Dados inclinométricos: Tubo IN1

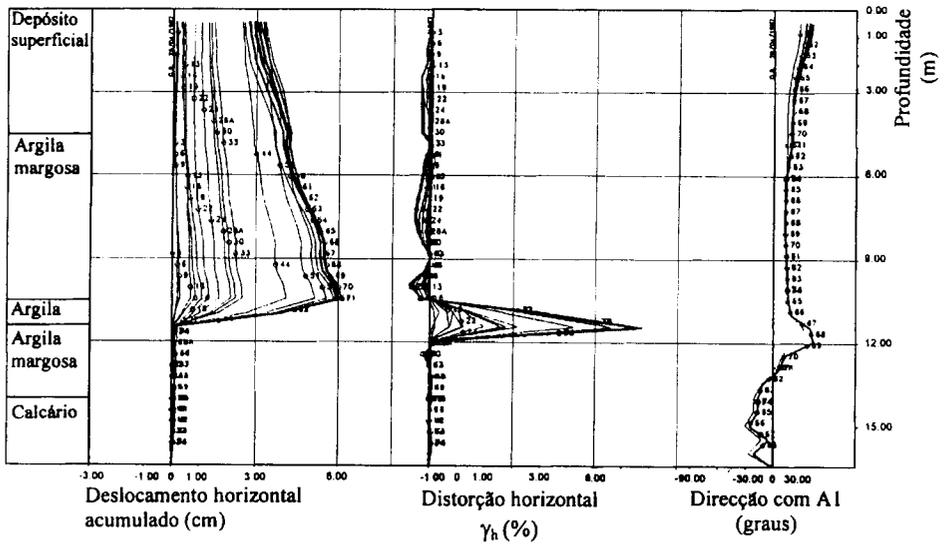


Figura 11 - Dados inclinométricos: Tubo IN3

Os dados apresentados nas Figuras 10 a 13 foram analisados em pormenor por Salgado e Carvalho (1997). As conclusões principais são apresentadas de seguida:

a) as medidas de reforço efectuadas em 1987 não consideraram a presença da fina camada de argila existente em profundidade porque esta camada não foi identificada durante a investigação

geotécnica efectuada em 1987. Assim a causa da instabilidade manteve-se tendo a acção instabilizadora sido retardada essencialmente pelo efeito do sistema de ancoragens instalado em 1987. Pode ver-se pela configuração dos gráficos apresentados nas Figuras 10, 11 e 13 que os deslocamentos registados às profundidades correspondentes à intercepção do alinhamento dos inclinómetros com o alinhamento dos cabos das ancoragens são mais pequenos do que os deslocamentos máximos registados. Este facto reflecte o impedimento imposto pelas ancoragens.

b) a causa do aceleramento da instabilidade foi o corte efectuado no pé do talude para a implementação do novo eixo ferroviário.

c) da configuração da distribuição de  $\gamma_h$  em profundidade (Figuras 10b) e 11 b)) pode concluir-se que a espessura da camada de argila é de cerca de 0,5 m no local do tubo IN3 e de 2,0 m no local do tubo IN1.

d) um valor máximo de distorção horizontal de  $\gamma_h=8,0\%$  foi registado no tubo IN3 a uma profundidade de 11,5 m. O valor correspondente de distorção máxima,  $\gamma$  foi obtido seguindo os procedimentos propostos na secção 5, usando  $\gamma=\gamma_h \cos^{-1}(\alpha)$  e considerando  $\alpha=10^\circ$  obtido a partir da Figura 13. Assim o valor de  $\gamma$  desenvolvido entre 1987 e 1997 é de  $\gamma=8,1\%$ , contudo porque a instabilidade local já existia antes de 1987, então o valor total acumulado é superior a 8,1%.

e) com base nos resultados de ensaios triaxiais não drenados efectuados em amostras não remexidas colhidas da camada de argila obtém-se um valor característico de  $\gamma=12\%$  correspondente à distorção máxima de rotura da argila (Salgado e Carvalho, 1997). Com base nestes valores foi decidido considerar no projecto de reforço um valor de resistência máxima não drenada igual à resistência residual da argila.

f) com base na geometria da superfície de rotura apresentada na Figura 13, as medidas de reforço consistiram na construção no pé do talude de um novo muro ancorado e fundado em estacas de largo diâmetro ( $d=800\text{mm}$ ). Em adição o muro construído em 1987 foi também reforçado com novas ancoragens.

g) a partir dos resultados obtidos após a implementação das obras de reforço (Figura 12) pode concluir-se que a instabilidade foi controlada a tempo de evitar-se um escorregamento de largas proporções.

## 7 - CONCLUSÕES

Os novos procedimentos aqui apresentados são um passo em frente na interpretação de registos inclinométricos. De facto seguindo estes novos procedimentos é agora possível inferirem-se valores de distorção horizontal,  $\gamma_h$ , a partir dos registos inclinométricos. Uma vez conhecidos estes valores de  $\gamma_h$ , é então possível estimar os valores correspondentes da distorção máxima,  $\gamma$ , usando para esse fim as geometrias da superfície de rotura conforme proposto na secção 5 desta comunicação. Em adição uma vez conhecido o valor de  $\gamma$  e o da curva característica de tensão-deformação correspondente do solo é possível efectuarem-se estimativas do grau de tensão de corte mobilizado no solo ou por outras palavras do valor do factor de segurança local, conforme foi sumariado na secção 4 e é descrito em detalhe por Carvalho (1997) e Carvalho e Salgado (1998a).

## 8 - AGRADECIMENTOS

Os autores estão gratos à Rede Ferroviária Nacional-REFER, E.P. pela utilização dos dados apresentados nesta comunicação.

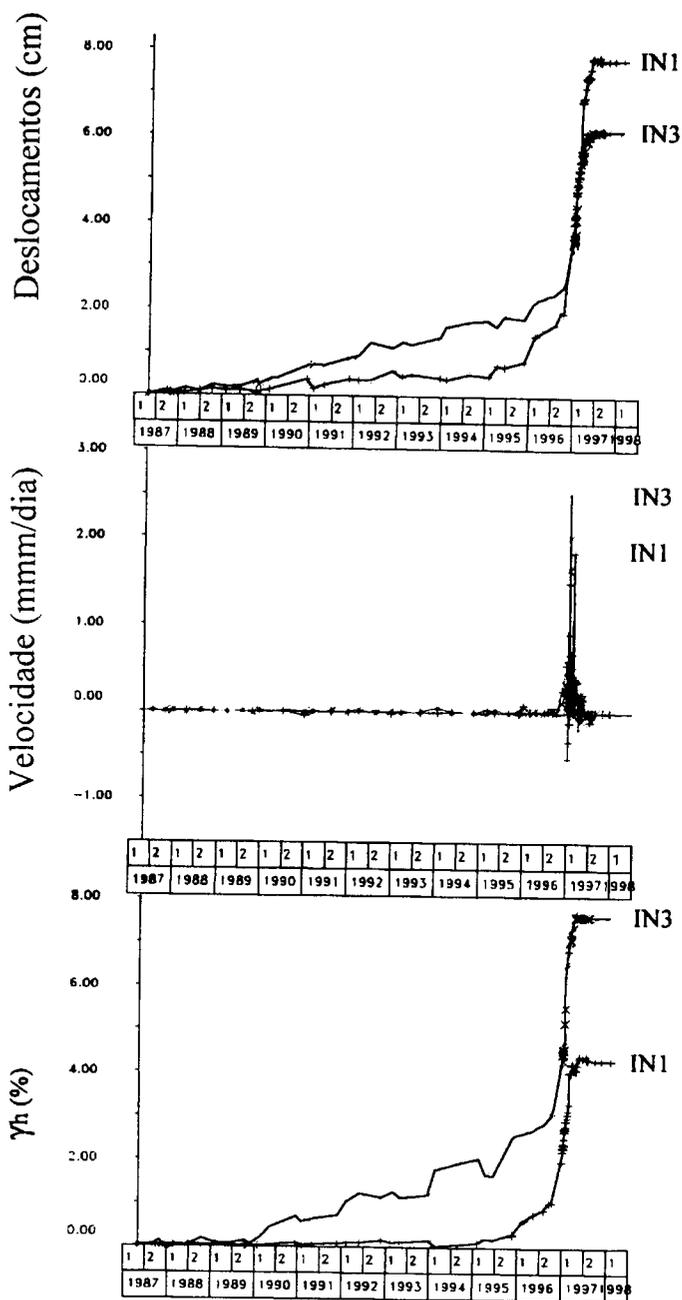


Figura 12 – Evolução de dados inclinométricos

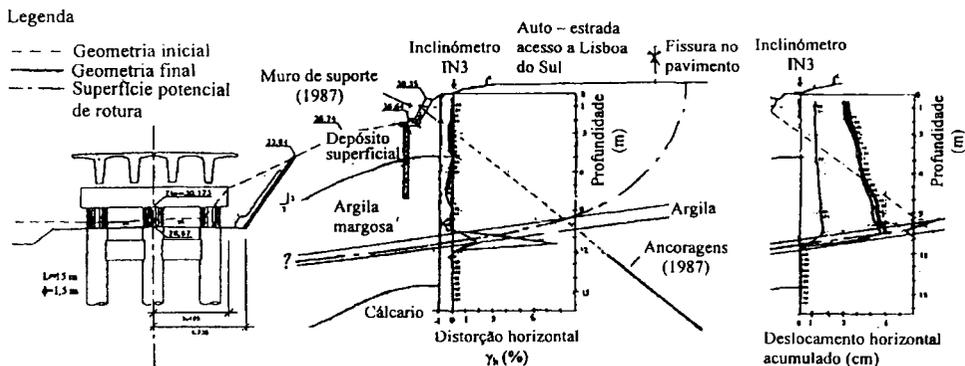


Figura 13 – Secção transversal correspondente ao tubo IN3

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- BYRNE, M.P., CHEUNG, H, e YAN, L. - *Soil parameters for deformation analysis of sand masses*. Canadian Geotechnical Journal, V.24, nº 3, pp. 366-376, 1987.
- CARVALHO, M.R. - *Análise distorcional de solos aluvionares lodosos*. Dissertação apresentada na Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade Nova de Lisboa para a obtenção do grau de Mestre em Mecânica dos Solos, 1997.
- CARVALHO, M.R. e SALGADO, F.M. - *distorcional analysis of soft soils*. International Conference on Ground Improvement Techniques, Macau, pp. 101-110, 1997.
- CARVALHO, M.R. e SALGADO, F.M. - *Evaluation of the local factor of safety from in situ inclinometer and vane test data*. 8th Congress IAEG. Vancouver, Canada, pp. 3387-3394, 1998a.
- CARVALHO, M.R. e SALGADO, F.M. - *New developments on the interpretation of in situ Vane Test data*. 8th Congress IAEG, Vancouver, Canada pp. 409-416.
- DUNCAN, J.M., BYRNE, M.P., WONG, K.S. e MABRY, P. - *Strength, stress-strain and Bulk modulus parameters for finite element analysis of stresses and movements in soil masses*. Report no. UCB/GT/80-81, Dep. of Civil Engineering. Univ. of California, Berkeley, 1980.
- DUNNICLIFF, J. - *Geotechnical instrumentation for monitoring field performance*. A Wiley-Interscience Publication, John Wiley e sons, Inc, 1988.
- DUNCAN, J.M. e CHANG, C.-Y. - *Non-linear analysis of stress and strain in soils*. Journal of the Soil Mechanics and Foundation Division, ASCE, Vol. 96, no. SM5, 1970.
- KOCH, J.J., BOITEN R.G., BIERMASZ, A.L., ROSZBACK, G.P., e SANTEN, G.W. - *Strain gauges: theory and application*. Philips Industries, Eindhoven, 1952.
- KONDNER, R.L. e ZELASKO, J.S. - *A Hyperbolic stress-strain formulation of sands*. Proc. of the 2nd Pan American Conf. on Soil Mech. and Found. Eng., Vol. 1, Brasil, pp. 289, 1963.
- SALGADO, F.M. - *Instrumentação e observação de aterros sobre solos moles para o desenvolvimento de uma passagem superior em Alverca*. LNEC, Departamento de Geotecnia, Rel. 226/95-NEGE, 1995.
- SALGADO, F.M. e CARVALHO, M.R. - *Caracterização da estabilidade de um talude na encosta Poente do Vale de Alcântara*. LNEC, Depart. de Geotecnia, Rel. 14/97-NEGE, 1997.
- SLOPE INDICATOR COMPANY - *Manual for Digüilt 50309E Inclinometer*, Seattle, WA, 1987.
- WILSON, S.D. e HANCOCK, JR. C.W. - *Horizontal displacements of clay foundations*. Proc. 1st. Panamerican Conf. Soil Mech., México, 1960.