

# INSTRUMENTAÇÃO E OBSERVAÇÃO DE TALUDES REFORÇADOS COM GEOSSINTÉTICOS

## Instrumentation of slopes reinforced with geosynthetics

M. LURDES LOPES \*  
AGOSTINHO MENDONÇA \*\*

**RESUMO** - O presente trabalho aborda metodologias de instrumentação e observação de taludes reforçados com geossintéticos. Após a análise dos parâmetros mais importantes a controlar durante o funcionamento deste tipo de estruturas, procede-se à descrição da metodologia de instrumentação seguida em dois casos de obra publicados na bibliografia. Em seguida, é feita a descrição de uma estrutura real reforçada com geossintéticos em construção no nosso país, bem como, da metodologia de monitorização adoptada. Finalmente, sugere-se uma calendarização para a observação da referida estrutura.

**SYNOPSIS** - This work deals with monitoring methodologies of slopes reinforced with geosynthetics. The more important parameters to control during construction and service are discussed. The monitoring methodology used in two cases published in bibliography are described. A Portuguese case study of a geosynthetic reinforced structure is described, including the monitoring methodology adopted. Finally, an observation schedule for the same structure is suggested.

## 1 - INTRODUÇÃO

Dado o carácter extensível dos geossintéticos, as estruturas reforçadas com estes materiais carecem, mais do que qualquer outro tipo de sistema de reforço, do controlo das deformações em serviço.

O dimensionamento corrente de muros e taludes reforçados com geossintéticos baseia-se em metodologias de equilíbrio limite, as quais não permitem a quantificação das deformações.

A previsão do comportamento em serviço do tipo de estruturas em estudo só é possível através de análises baseadas no método dos elementos finitos, as quais só são fiáveis desde que aferidas através de resultados da observação de obras.

É, por isso, importante que estruturas reforçadas com geossintéticos sejam instrumentadas e observadas, durante a construção, e na fase de serviço, com vista ao controlo do comportamento da estrutura e à aferição de modelos numéricos que possibilitem a previsão desse mesmo comportamento.

Constitui objectivo fundamental deste trabalho a definição dos parâmetros de controlo de comportamento de taludes reforçados com geossintéticos a ter em consideração num esquema de instrumentação dos mesmos, bem como a descrição de um caso real instrumentado em construção em Portugal.

---

\* Doutora em Engenharia Civil, Professora Auxiliar da FEUP.

\*\* Mestre em Estruturas de Engenharia Civil, Soares da Costa, SA.

## 2 - PARÂMETROS DE CONTROLO DE COMPORTAMENTO

Os parâmetros de controlo de comportamento de estruturas reforçadas com geossintéticos a considerar num esquema de instrumentação dependem, não só, do tipo de estrutura de reforço, como também, do tipo de solo a utilizar como material de aterro, das características mecânicas da fundação, da localização da toalha freática, etc..

O presente trabalho versará a monitorização de taludes reforçados com geossintéticos, executados sobre fundação competente. Nestas circunstâncias, os parâmetros de comportamento considerados mais importantes a controlar na observação duma estrutura real são, em termos gerais, os seguintes:

- deformações nos reforços;
- forças nos reforços;
- pressões de terras;
- pressões neutras;
- movimentos da face;
- movimentos internos do maciço.

As deformações nos reforços são um dos parâmetros mais importantes a controlar. Em associação com as forças nos reforços dão indicações sobre o estado de tensão neles instalado, bem como acerca da rigidez dos mesmos.

É de referir que, embora seja importante o registo das forças instaladas nos reforços, a medição das deformações dos mesmos é já, por si só, um indicador acerca do estado de tensão instalado. Esta circunstância associada ao facto de o equipamento utilizado para medição das deformações ser, em regra, mais fiável do que o utilizado para medição das forças, leva a que na maioria dos casos de taludes reforçados com geossintéticos instrumentados apenas se registem as deformações dos reforços.

As pressões de terras são outro parâmetro importante a controlar, pois através do seu valor e dos valores das deformações e forças instaladas nos reforços é possível obter informação acerca da eficácia da transferência de tensões do solo para o reforço, ou seja, da eficácia da interacção solo-reforço.

A medição das pressões neutras assume particular importância quando se prevê uma condutividade hidráulica baixa do material de aterro. Esta circunstância pode ocorrer, por exemplo, entre outras situações, quando são utilizados solos com elevada quantidade de finos, ou quando são utilizados solos em que o esmagamento das partículas maiores pode induzir redução da sua condutividade hidráulica, como poderá acontecer no caso de alguns solos residuais.

A execução da zona adjacente à face do talude assume particularidades distintas das do restante aterro, nomeadamente: necessidade de utilização de cofragem, perdida ou não, para conter os movimentos da face durante a construção, espalhamento do solo à mão ou com equipamentos ligeiros e compactação com equipamentos leves. Por isso, é importante controlar o estado de deformação nessa zona. Uma ideia acerca desse estado de deformação pode ser obtida através do registo dos movimentos da face.

O registo dos movimentos internos do maciço, em especial na zona reforçada, é um indicador do estado de deformação instalado nessa zona.

### 3 - CASOS REFERIDOS NA BIBLIOGRAFIA

#### 3.1 - Introdução

O número de casos de muros e taludes reforçados com geossintéticos monitorizados referidos na bibliografia são em número significativo. Porém, de entre eles seleccionaram-se dois, um descrito por Fannin (1988) e outro descrito por Zornberg *et al.* (1995), por se considerar estarem bem documentados e por se referirem a taludes reforçados com geossintéticos de tipo diferente (geogrelhas, o primeiro, e geotêxteis, o segundo).

#### 3.2 - Estrutura com taludes reforçados com geogrelhas

A estrutura monitorizada descrita por Fannin (1988) situa-se na Noruega a cerca de 25Km de Oslo. É um aterro reforçado com geogrelhas, com 4,80m de altura e taludes com inclinação (V/H) 2:1, construído sobre um maciço de fundação competente em areia grossa. A obra é constituída por dois troços, com 10m de comprimento cada, incorporando diferentes arranjos dos reforços (Figura 1). O material de aterro utilizado foi uma areia média a fina uniforme com valores do peso específico seco e do teor em água óptimo fornecidos pelo ensaio de Proctor de 17,1kN/m<sup>3</sup> e 13%, respectivamente. O ângulo de atrito interno do solo era igual a 38°.

Os reforços principais são constituídos por geogrelhas uniaxiais em polietileno de alta densidade, com 55kN/m de resistência à tracção, e os reforços secundários (no troço em que existem - troço J da Figura 1) por geogrelhas biaxiais em polietileno de alta densidade com cerca de 20,5kN/m de resistência à tracção.

O comportamento da estrutura foi registado através de instrumentação colocada durante a construção nos dois troços da obra. Os parâmetros fundamentais controlados foram as forças e deformações nos reforços, as pressões de terras e os deslocamentos da face. Na Figura 2 indica-se esquematicamente a localização da instrumentação, exceptuando a referente aos deslocamentos da face.

Após um mês de finalizada a construção, e, tendo em vista a mobilização de maiores forças de tracção nos reforços, procedeu-se ao carregamento do topo do aterro, aplicando primeiro um ciclo de carga-descarga (5,4; 16,9; 28,4 e 5,4kPa) através do enchimento e esvaziamento de tanques de água, e, depois uma sobrecarga permanente de cerca de 50kPa conseguida à custa da construção de um aterro de cerca de 3m de altura.

Os resultados da observação da obra durante cinco meses e uma semana após a construção estão amplamente descrito e discutidos em Fannin (1988); por sua vez, os resultados durante os primeiros vinte meses de serviço são apresentados por Fannin e Hermann (1990).

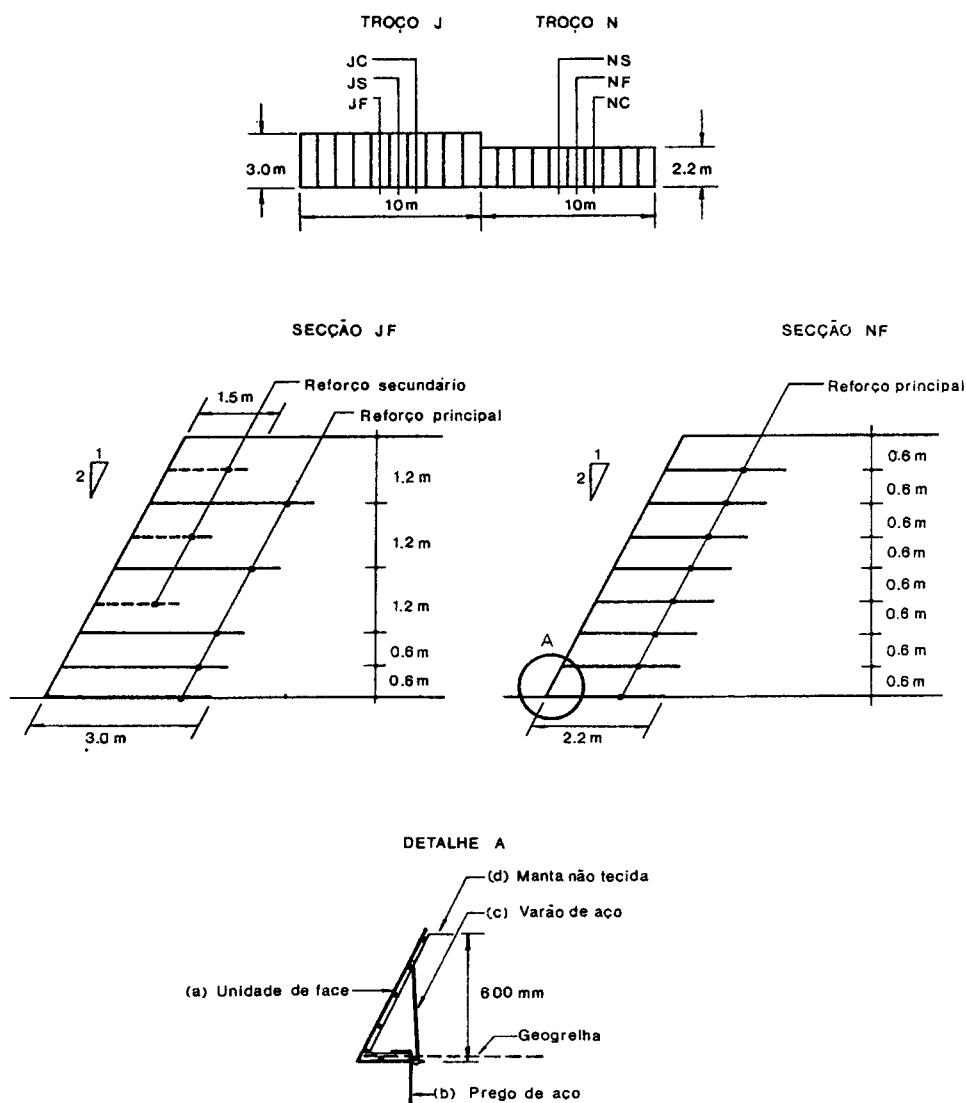


Figura 1 - Posicionamento dos reforços (adaptado de Fannin e Hermann, 1990).

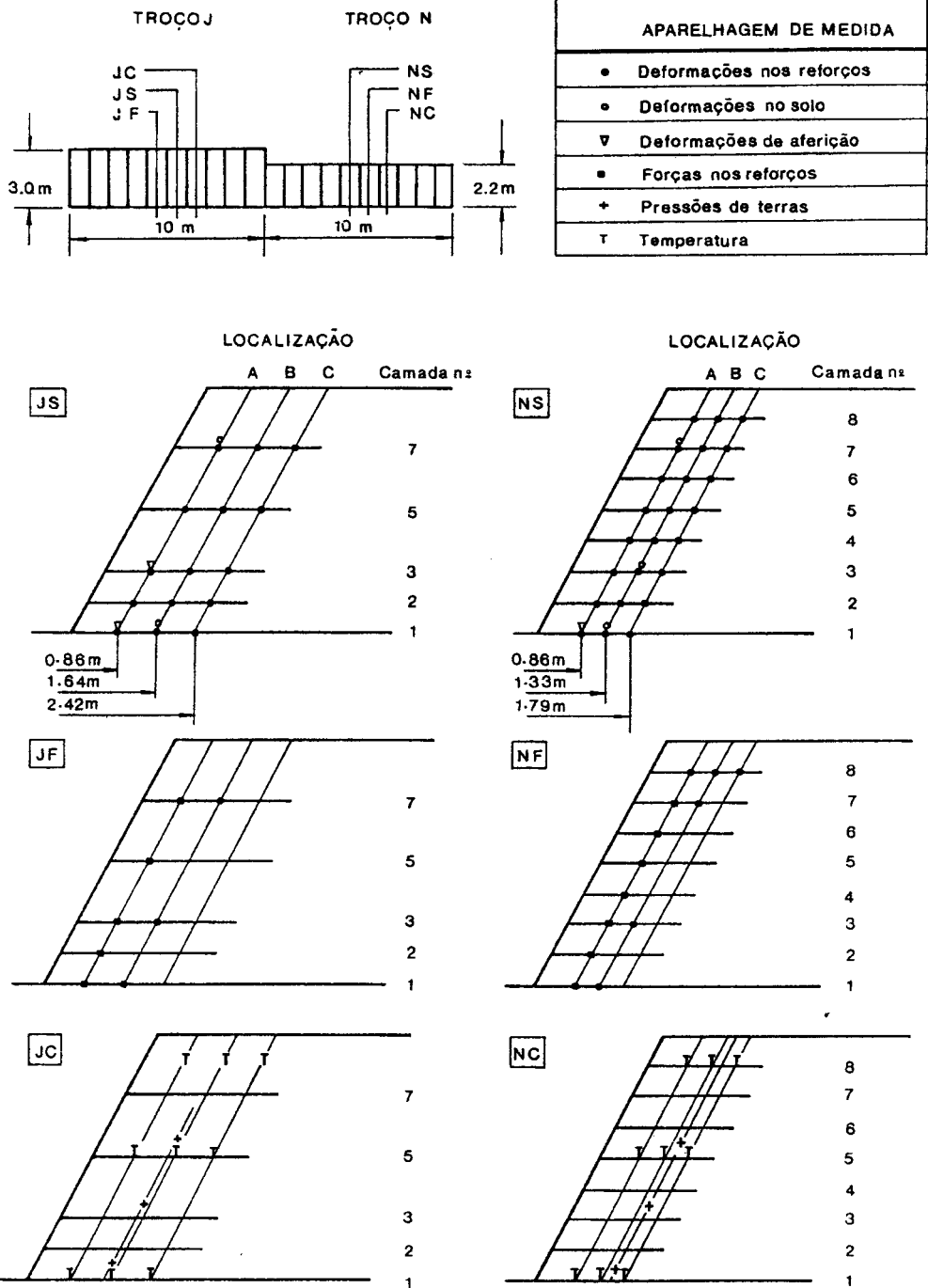


Figura 2 - Localização da instrumentação (adaptado de Fannin e Hermann, 1990).

Os resultados da observação permitem concluir que em ambos os troços instrumentados o nível menos solicitado, em termos de forças de tracção nos reforços, é o primeiro, sendo os mais esforçados os 2º, 3º e 4º níveis. No que respeita às deformações nos reforços, verificou-se serem máximas próximo da face diminuindo no sentido da extremidade posterior dos reforços. Embora as deformações nos reforços sejam baixas no final da construção (menores do que 0,7%), o seu valor tende a aumentar com a aplicação das sobrecargas, mantendo-se a tendência para um aumento mais significativo junto à face.

Durante o ciclo de carga-descarga as pressões de terras aumentam durante a carga e diminuem na descarga até valores próximos dos registados no início do ciclo. A aplicação da sobrecarga permanente produz um aumento das pressões de terras mais significativo na parte superior do aterro. Com o tempo as pressões de terras diminuem, em especial na parte inferior da obra.

A instrumentação utilizada para o registo dos movimentos da face do talude (régua alinhadas verticalmente ao longo do eixo central de cada troço do aterro, e distanciadas desse eixo central entre 2 e 5m) não permitiu a definição exacta dos movimentos da face, dando apenas uma ideia geral do tipo de movimentos, sendo os verticais descendentes reduzidos, e os horizontais, de valor mais significativo e dirigidos para o exterior, principalmente na metade superior do talude.

### 3.3 - Estrutura com taludes reforçados com geotêxteis

O caso descrito por Zornberg *et al.* (1995) refere-se a um aterro com taludes reforçados com geotêxtil construído na Idaho's Salmon National Forest (Estados Unidos). O aterro, com 172m de extensão, cerca de 15,3m de altura máxima e taludes com inclinação de 1:1, foi executado sobre fundação granítica, tendo-se utilizado como materiais de aterro solos residuais do granito com valores dos pesos específicos secos e dos teores em água óptimos, obtidos a partir de ensaios Proctor, variando entre 18 e 21kN/m<sup>3</sup> e os 9,5 e 13,5%, respectivamente.

Como material de reforço foram utilizados dois tipos de geotêxtil. Na metade superior do talude foi utilizado um geotêxtil não tecido de filamento contínuo em polipropileno com 20kN/m de resistência à tracção. Na metade inferior do talude foi utilizado um geotêxtil não tecido de filamento contínuo em polipropileno reforçado com uma rede biaxial de filamentos de elevada resistência com cerca de 100kN/m de resistência à tracção. A transmissividade hidráulica de ambos os materiais sob uma tensão normal de 200kPa era da ordem dos 0,006l/s/m. O espaçamento entre reforços era constante e da ordem dos 0,30m, tendo-se colocado 50 níveis de reforço.

A secção transversal mais alta do aterro foi instrumentada com o objectivo de avaliar, durante e após a construção, a distribuição das tensões e deformações na massa reforçada, a capacidade de drenagem dos geossintéticos, a deformação da estrutura, o seu comportamento a longo prazo e obter dados que possibilitem a melhoria de procedimentos de cálculo e/ou redução de custos.

Para atingir estes objectivos os parâmetros controlados foram:

- 1) as deformações nos reforços, dedicando-se especial atenção ao valor máximo atingido e à sua localização nos reforços;
- 2) os movimentos horizontais da massa reforçada;
- 3) os movimentos da face;
- 4) as pressões neutras no interior do aterro.

Note-se que no caso particular deste aterro as condições envolventes, em termos de percolação de águas e material de aterro utilizado, levaram à adopção de metodologias de controlo das pressões neutras.

A Figura 3 mostra a localização da instrumentação utilizada no aterro descrito por Zornberg *et al.* (1995).

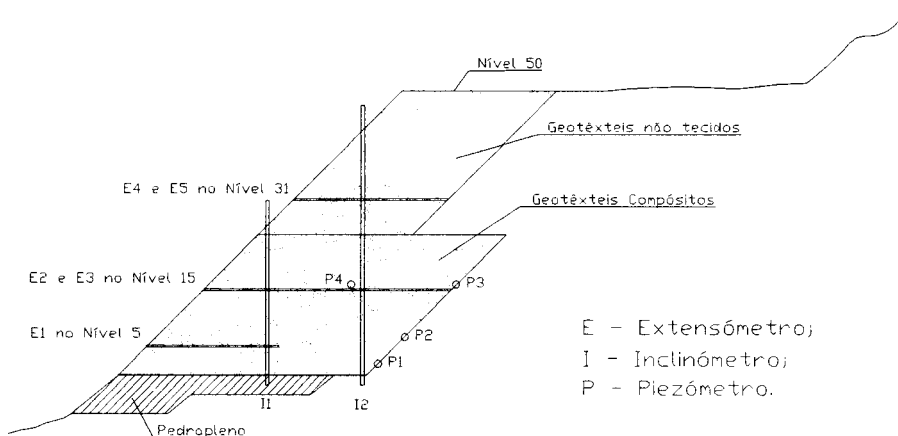


Figura 3 - Localização da instrumentação (adaptado de Zornberg *et al.*, 1995).

Para controlar os movimentos horizontais da massa reforçada foram colocados dois inclinómetros, com alturas de 7,3m (I1 - Figura 3) e 11,9m (I2 - Figura 3). Os movimentos da face foram registados em quatro alinhamentos verticais situados na vizinhança da secção instrumentada. As deformações nos reforços foram registadas através de 45 extensómetros posicionados no 5º, 15º e 31º níveis de reforço, respectivamente às cotas 1,22m, 4,27m e 9,14m, numa secção, e no 15º e 31º níveis de reforço, noutra secção paralela à anterior. No 5º nível de reforço foram colocados 5 extensómetros, tendo sido colocados nos 15º e 31º níveis de reforço 10 extensómetros em cada nível das duas secções instrumentadas. O controlo das pressões neutras foi efectuado através da colocação de piezómetros na extremidade posterior do 2º, 7º e 15º níveis de reforço, respectivamente, às cotas 0,3m, 1,8m e 4,27m. Um quarto piezómetro foi instalado entre o 15º e 16º níveis de reforço, aproximadamente à cota 4,4m.

O período de observação do aterro considerado no trabalho de Zornberg *et al.* (1995) refere-se à construção e aos dois meses seguintes.

Os deslocamentos internos do maciço reforçado aumentaram de modo aproximadamente linear durante a construção, mantendo-se praticamente inalterados nas oito semanas seguintes ao término da construção. Nesta altura o deslocamento horizontal máximo foi registado no inclinómetro localizado mais próximo da face e foi de cerca de 0,16% da altura do talude reforçado. No mesmo período os deslocamentos totais da face do talude foram reduzidos e consistentes com os registados pelos inclinómetros. As deformações máximas registadas nos reforços foram da ordem dos 0,20% no final da construção, não havendo evidência de acréscimos significativos destas nas oito semanas seguintes.

#### 4 - DESCRIÇÃO DA OBRA

No troço Régua/Reconcos do itinerário principal 3 (IP3), próximo de Lamego, foi construído um aterro instrumentado reforçado com geogrelhas. A Figura 4 dá uma perspectiva do referido aterro.

A fundação é constituída por solo residual do xisto compacto a muito compacto. Por condicionantes relacionadas com a morfologia do local e com os pressupostos do projecto, realizou-se um pedrapleno de modo que a altura máxima atingida pelo aterro não ultrapassasse os 20m. A inclinação dos taludes reforçados é de cerca de 60°. Em secções reforçadas com mais de 10m de altura executou-se uma banquetta paralela à rasante da via, de largura variável com um valor máximo de 3m (ver Figuras 4 e 6).

Tal como mostra a Figura 4, o aterro, com cerca de 200 m de extensão, desenvolve-se em curva formando o restabelecimento da ligação da estrada existente ao IP3.

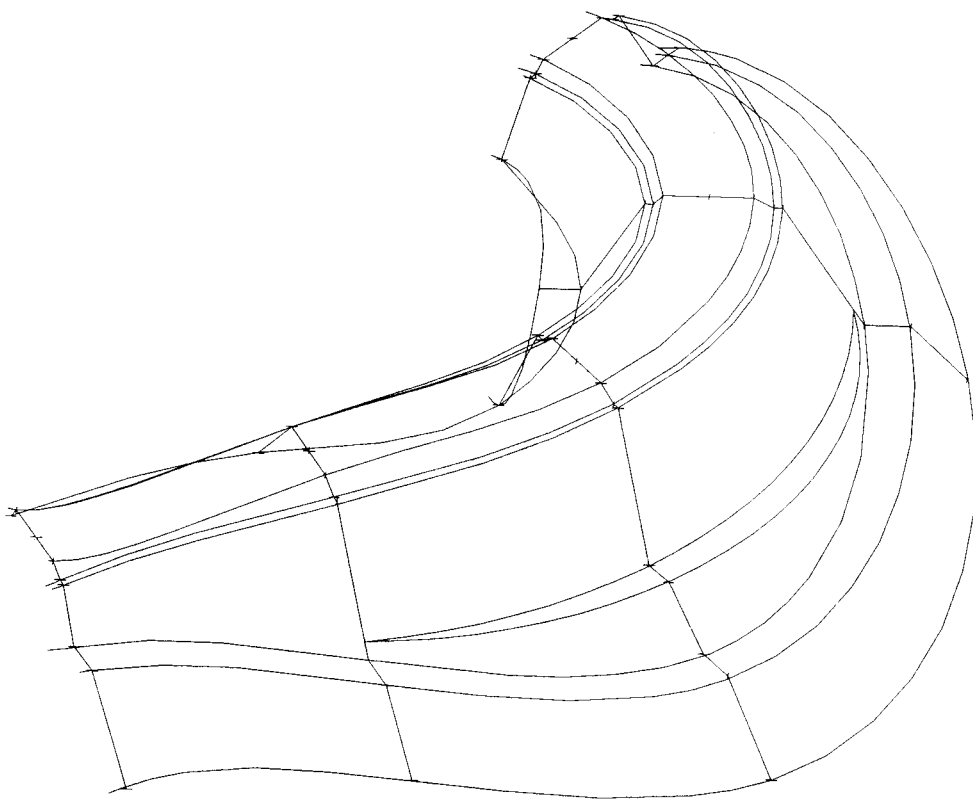


Figura 4 - Traçado da obra.



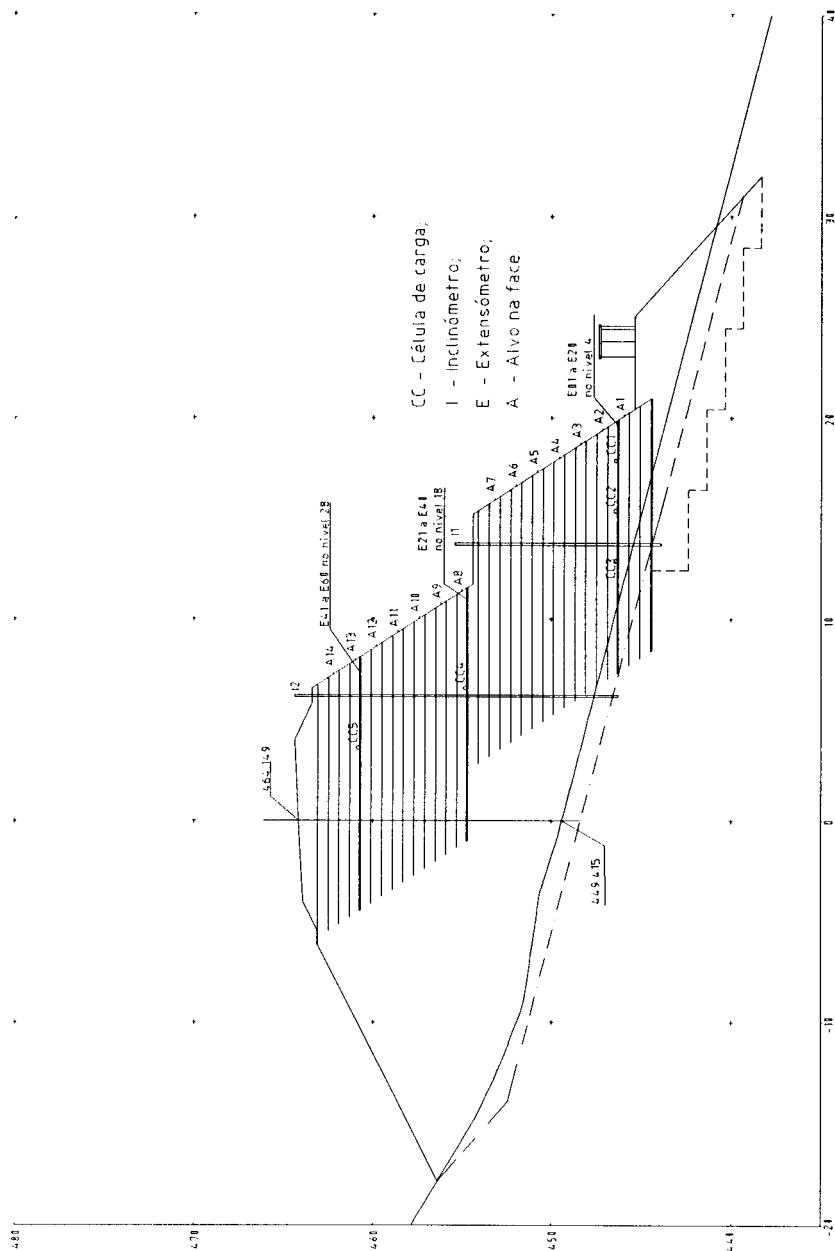


Figura 6 - Perfil instrumentado

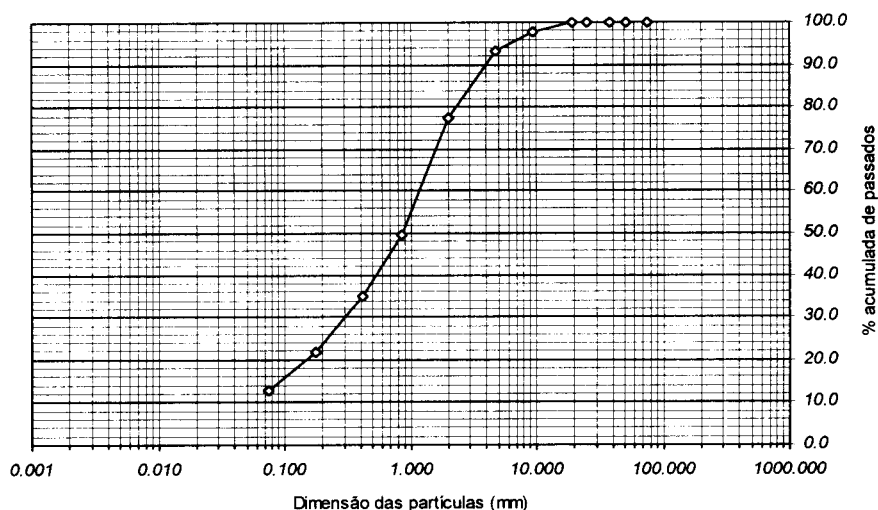


Figura 5 – Curva granulométrica do material de aterro.

A curva granulométrica do material utilizado como aterro está representada na Figura 5. Os valores do peso específico seco e do teor em água óptimo do solo, determinados com base em ensaios Proctor Modificado, foram de cerca de  $19,5 \text{ kN/m}^3$  e 10,2%, respectivamente. O ângulo de atrito interno do solo, definido através de ensaios triaxiais, era de cerca de  $35^\circ$ .

Os reforços, colocados horizontalmente e espaçados de 0,60m na vertical, eram constituídos por geogrelhas uniaxiais em polietileno de alta densidade com resistências à tracção de 160, 120, 90 e 60kN/m.

As camadas de aterro foram colocados com espessuras da ordem de 0,30m, após compactação, tendo-se utilizado elementos de face em rede metálica de abertura quadrangular com 0,15m de lado. No interior dos elementos de face foi colocado um tapete biodegradável para evitar a erosão superficial e facilitar o crescimento da vegetação.

## 5 - ESQUEMA DE MONITORIZAÇÃO

A monitorização do aterro da IP3 teve por objectivo estudar o comportamento da estrutura durante a construção e em serviço ao longo do tempo.

A zona instrumentada corresponde aproximadamente ao perfil do Km 0+150 e está representado esquematicamente na Figura 6. Este perfil apresenta uma altura máxima reforçada de cerca de 20m. Os reforços estão espaçados de 0,60m na vertical e têm cerca de 11m de comprimento.

Os parâmetros a controlar durante a deformação são: as deformações nos reforços, as pressões de terras, os deslocamentos internos da massa reforçada e os deslocamentos da face.

As deformações nos reforços estão a ser medidas em três níveis de reforço (4º, 18º e 28º) através de extensómetros lineares espaçados de cerca de 0,50 m (20 extensómetros em cada nível de reforço instrumentado), procurando-se, deste modo, conhecer a distribuição das deformações ao longo do comprimento do reforço, bem como, a localização do esforço máximo instalado. A Fotografia 1 mostra a geogrelha do 4º nível instrumentada com extensómetros.

As pressões verticais de terras estão a ser registadas através de células de pressão colocadas nos três níveis de reforço atrás mencionados, com vista a possibilitar a correlação entre as pressões de terras e as deformações nos reforços para daí procurar tirar informação acerca da eficácia da interacção solo-geogrelha. No nível de reforço instrumentado mais esforçado (4º nível) colocaram-se três células de pressão, a cerca de 2, 4 e 6 m da face, e nos restantes colocou-se apenas uma em cada nível, a cerca de 4,5 m da face. Os valores das deformações nos reforços e das pressões de terras estão a ser registados automaticamente numa caixa de aquisição colocada na base do talude. A Fotografia 2 mostra as células de pressão colocadas no 4º nível de reforço do aterro.

Os movimentos internos da massa reforçada são registados em dois tubos inclinométricos colocados a cerca de 6,5 e 11,5 m do pé do talude reforçado do aterro, tendo cerca de 10 e 20 m de altura, respectivamente. Esta localização dos tubos inclinométricos tem por objectivo o registo dos movimentos internos da massa reforçada até ao nível da banquetta (tubo inclinométrico localizado a cerca de 6,5 m do pé do talude) e o registo dos mesmos movimentos em toda a altura reforçada do talude (tubo inclinométrico localizado a cerca de 11,5 m do pé do talude).

O registo dos movimentos da face é feito ao longo do perfil do km 0+150. Os pontos medidos estão espaçados cerca de 1,2 m na vertical ao longo da face do talude. Os movimentos da face são medidos topograficamente a partir de uma estação fixa. A Figura 7 mostra um pormenor da metodologia utilizada para observação dos movimentos da face do talude reforçado.

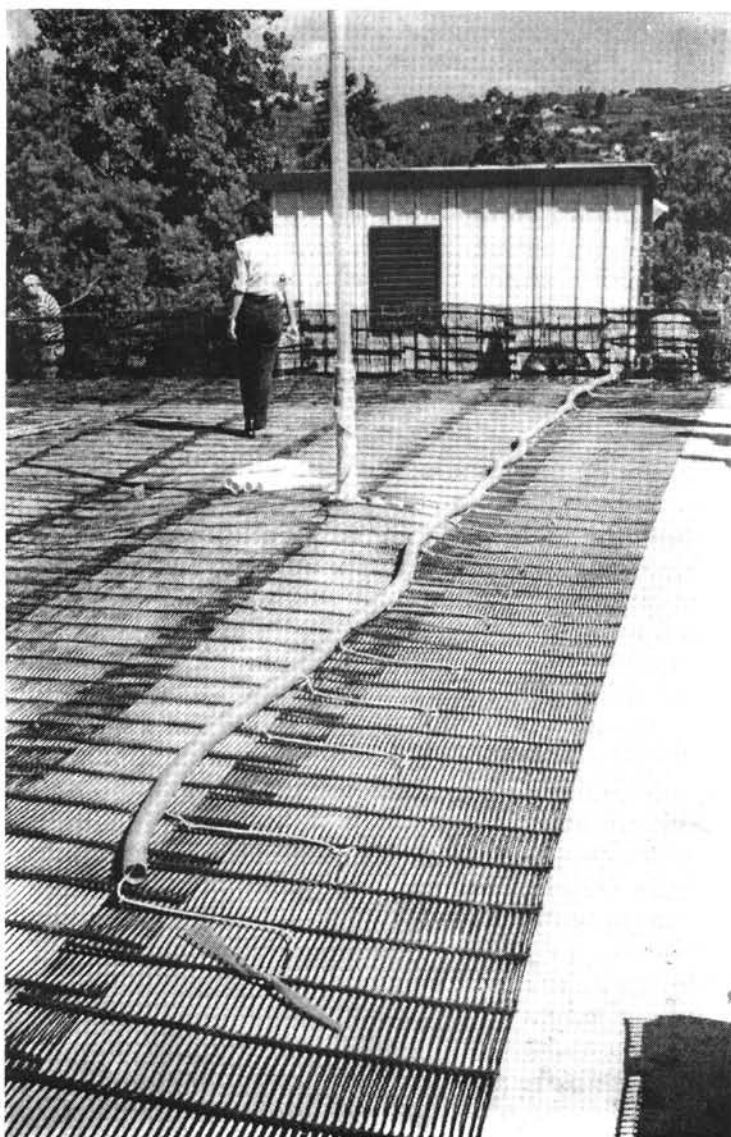
O comportamento do aterro reforçado com geogrelhas do IP3 está a ser observado durante cerca de 12 meses, correspondendo dois deles ao período de construção. Deste modo, procurar-se-á obter informação acerca do seu comportamento, quer durante a construção, quer ao longo dos primeiros 10 meses de serviço.

No Quadro I apresenta-se o plano de observação preconizado para o referido aterro.

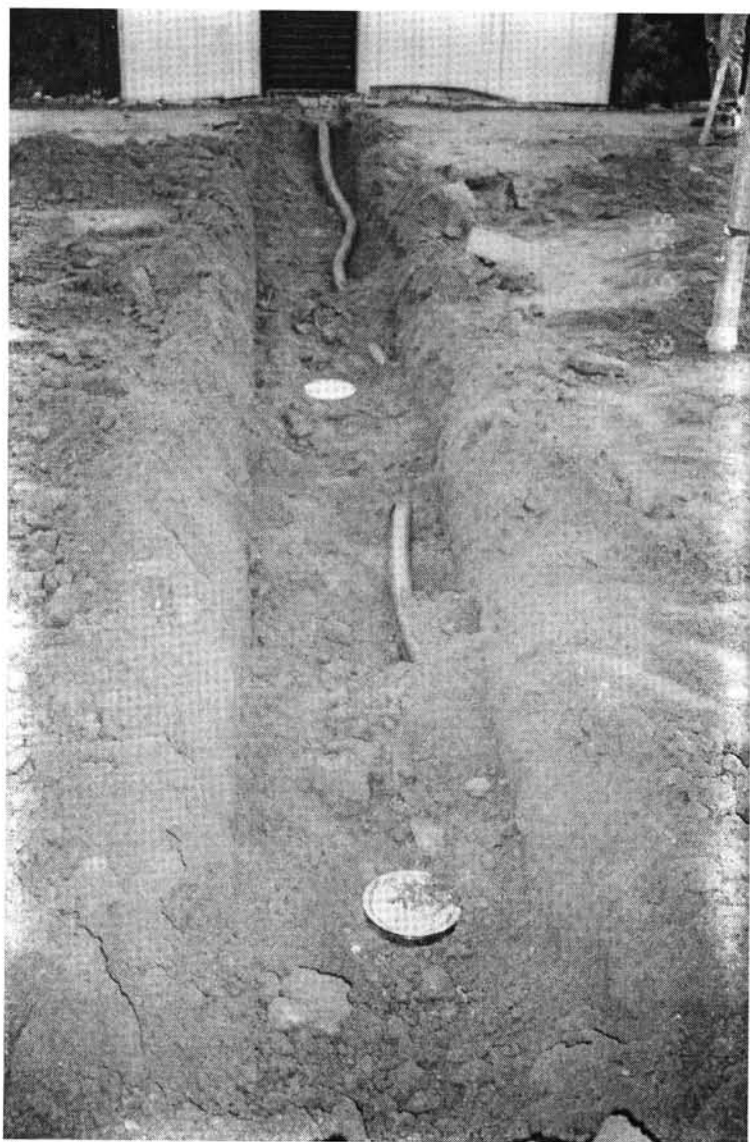
Como já foi dito atrás, os valores das pressões de terras e das deformações dos reforços são lidos automaticamente através de uma caixa de aquisição de resultados programável. Durante a construção as leituras foram efectuadas após a colocação de cada camada de solo. Finalizada a construção, o intervalo de registo dos valores dos parâmetros em causa foi gradualmente alargado até passar a mensal a partir do oitavo mês após o início da construção.

Os movimentos da face foram registados com uma periodicidade semanal durante a fase construtiva. Finalizada esta fase passaram a ser registados com intervalos crescentes até ao término do período de observação previsto.

A medição dos movimentos internos da massa reforçada foi iniciado quando o nível da banquetta foi atingido (cerca de 1 mês após o início da construção), mantendo-se uma periodicidade semanal de registos até ao final da construção. A partir desta altura, a periodicidade dos registos foi sendo alargada à medida que o tempo de serviço da estrutura aumentava.



Fotografia 1 - Geogrelha do 4º nível de reforço instrumentada com extensômetros lineares.



Fotografia 2 - Células de pressão no 4º nível de reforço.

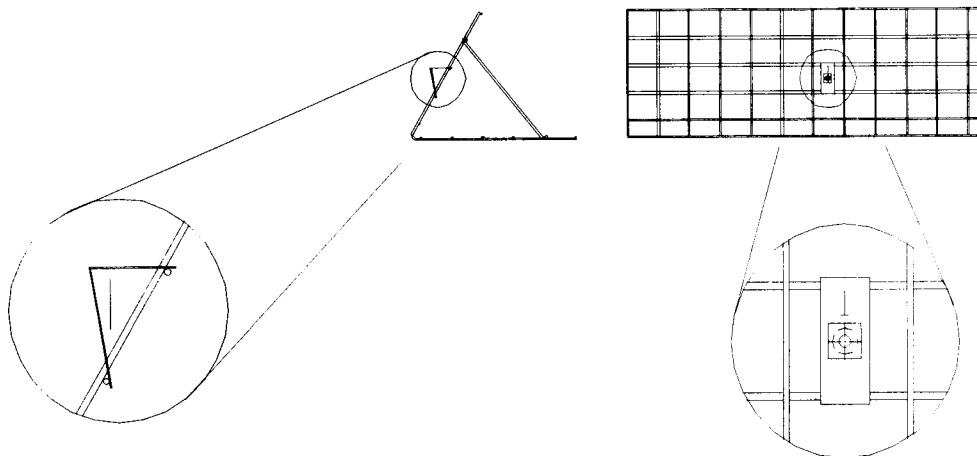


Figura 7 - Pormenor da metodologia utilizada na observação dos movimentos da face do talude reforçado.

Quadro 1 - Plano de observação

MÊS	TIPO DE INSTRUMENTAÇÃO			
	Pressões de Terra	Deformações nos Reforços	Movimentos da Face	Movimentos Internos
1	diária	Diária	semanal	-
2	diária	Diária	semanal	semanal
3	semanal	Semanal	quinzenal	mensal
4	semanal	Semanal	quinzenal	bi-mensal
5	quinzenal	Quinzenal	mensal	
6	quinzenal	Quinzenal	trimestral	trimestral
7	quinzenal	Quinzenal		
8	mensal	Mensal		
9	mensal	Mensal	quadrimestral	quadrimestral
10	mensal	Mensal		
11	mensal	Mensal		
12	mensal	Mensal		

No que se refere aos movimentos internos do maciço procurar-se-á definir com clareza a influência da construção da metade superior do aterro nos movimentos internos da zona mais solicitada do talude, ou seja, a controlada pelo inclinómetro localizado mais próximo do pé do talude reforçado.

## 6 - CONSIDERAÇÕES FINAIS

A instrumentação utilizada no aterro reforçado do IP3 resultou de um compromisso entre a economia e a eficácia mínima desejável.

Naturalmente que a instrumentação de mais níveis de reforço e de mais perfis seria conveniente. Porém, tal opção levaria a gastos incomportáveis com o orçamento disponível, tendo-se, por isso, procurado colher num só perfil informação em três níveis críticos de reforço (próximo da base, imediatamente acima da banquetta e próximo do topo) com instrumentação colocada com espaçamento reduzido (cerca de 0,50m, no caso dos extensómetros) de modo a obter informação válida, mesmo no caso de falha de algum dos equipamentos. Procurou-se, igualmente, adequar a instrumentação utilizada ao método construtivo comum neste tipo de obras, evitando, assim, interferências significativas nos trabalhos de terraplanagem.

Espera-se que o trabalho em desenvolvimento possa vir a contribuir de modo importante para a credibilidade e implantação no nosso país de uma técnica de reforço eficaz à qual estão geralmente associadas vantagens, quer de índole económica, quer de impacte ambiental.

## AGRADECIMENTOS

Os autores querem expressar os seus agradecimentos pelo patrocínio e apoio financeiro à Junta Autónoma de Estradas, no âmbito do protocolo JAE/FEUP, e ao FEDER e Programa PRAXIS XXI, no âmbito do projecto de investigação 3/3.1/CEG/2598/95.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- FANNIN, R. J. - *Soil reinforcement for Norwegian conditions - na instrumented field study of the analysis and design of geogrid reinforced slopes*. Norwegian Geotechnical Institute, Report nº 52757-10, 1988.
- FANNIN, R. J. e HERMANN, S. - *Performance data for a sloped reinforced soil wall*. Canadian Geot. Journal, Vol. 27, nº 5, pp. 676-686, 1990.
- ZORNBERG, J. G.; BARROWS, R. J.; CHRISTOPHER, B. R. e WAYNE M. H. - *Construction and instrumentation of a Highway slope reinforced with high-strength geotextiles*. Proc. Geosynthetics' 95, Vol.1, pp.13-27, 1995.