

# **MONITORIZAÇÃO DAS DEFORMAÇÕES EM MUROS DE TERRA ARMADA COM CRACKMETERS**

## **MONITORING DEFORMATIONS ON REINFORCED SOIL RETAINING WALLS WITH CRACKMETERS**

Santos, Vitor; *Cêgê-Consultores para Estudos de Geologia e Engenharia Lda, Algés, Portugal, vitor.santos@cege.com.pt*

Oliveira, Pedro; *Cêgê-Consultores para Estudos de Geologia e Engenharia Lda, Algés, Portugal, pedro.oliveira@cege.pt*

### **RESUMO**

A monitorização de muros de terra armada é habitualmente realizada recorrendo a metodologias de medição das deformações, com equipamentos topográficos ou inclinómetros. Com o objectivo de se conhecer a tensão que fica realmente instalada nas cintas de reforço dos muros de terra armada, seleccionou-se um equipamento que permitisse medir directamente a deformação e com esta, calcular a força de resistência à tracção. Nos muros de terra armada da Auto-Estrada do Marão, foram adaptados crackmeters de corda vibrante às cintas de reforço dos muros. Os resultados obtidos permitiram comprovar a elevada precisão de medição pretendida, calcular a resistência à tracção instalada nas cintas de reforço dos muros e comparar os resultados obtidos com os valores observados pelos métodos de monitorização habitualmente utilizados.

### **ABSTRACT**

The monitoring of the reinforced soil structures is usually performed using methods of deformation measurement, namely topographical equipment or inclinometers. In order to investigate the tension on the reinforcement straps of the retaining wall effectively, an instrument was selected that would allow to directly measure this deformation. Thus measurement of the traction strength resistance was enabled. For the first time, a crackmeter was adapted and fixed to the reinforcement straps of the soil retaining walls of Marão highway. Results demonstrated the high measuring accuracy desired and obtained, allowed to calculate the load tensile on the straps and allowed comparisons between our figures and those values observed by commonly used traditional monitoring methods.

### **1 - INTRODUÇÃO**

A monitorização de estruturas, quer em fase de execução, quer em fase de exploração, reveste-se de particular importância, quer em termos de segurança, quer para aferição dos pressupostos de projecto e calibração dos modelos idealizados (Dunnicliff, 1988).

A Auto-estrada do Marão desenvolve-se entre Amarante e Vila Real e o seu traçado insere-se numa zona de orografia com grandes diferenças altimétricas. Para além de contar com um túnel de 5,6 km de extensão e várias obras de arte para vencer os desníveis altimétricos, outra das soluções adoptadas em zonas de aterros de grande altura, foi a construção de muros de terra armada.

Habitualmente a monitorização dos muros de terra armada é realizada por instrumentos de leitura topográfica, como os alvos topográficos e marcas de superfície, e por instrumentos geotécnicos como os inclinómetros. No entanto, estes equipamentos apresentam limitações. Em relação aos topográficos, apenas medem deformação da superfície dos muros. Quanto aos inclinómetros apenas ficam operacionais após a conclusão do muro e medem possíveis deslocamentos do aterro no tardo dos muros.

O dimensionamento deste tipo de estruturas e dos seus reforços, com o avanço da arte, é hoje muito auxiliada por programas informáticos de modelação numérica, no entanto, o controlo efectivo das deformações geradas ao longo da vida da obra, nem sempre são adicionadas para comprovação dos modelos.

Os geossintéticos são cada vez mais utilizados em obras geotécnicas e também na execução deste tipo de muros, nomeadamente no que diz respeito aos reforços dos muros de terra armada. As características físicas dos geossintéticos utilizados nos reforços dos muros têm sido ensaiadas e alvo de estudos de deformabilidade (Dinis da Gama, 2002) e resistência (Lopes, 2000a e Lopes, 2000b).

Nos muros de terra armada da Auto-Estrada do Marão (Figura 1) foram pela primeira vez aplicados equipamentos para monitorizar as cintas de reforço, permitindo assim medir directamente a deformação destas durante a fase de execução e após conclusão. Permite ainda a medição na fase de entrada em serviço da obra, sem quaisquer constrangimentos de tráfego e em segurança.

Com os valores de deformação é possível calcular a tensão a que as cintas ficam sujeitas ao longo do tempo e comparar estes valores com o limite máximo admissível.

No presente trabalho são apresentados os critérios que levaram à selecção do tipo de equipamento a utilizar, tendo em conta as limitações do local de instalação (interior do muro em qualquer posição do aterro), precisão pretendida face à deformação possíveis e desenvolvimento de equipamentos para adaptar os instrumentos aos reforços dos muros.

São apresentados os resultados obtidos e uma comparação com os resultados da instrumentação habitualmente realizada.



Figura 1 – Muro M4B da Auto-Estrada do Marão.

## **2 - SELECÇÃO DO EQUIPAMENTO**

### **2.1 - Limitações na selecção do equipamento de leitura**

A escolha do equipamento para monitorizar era muito limitada às condicionantes e especificidades do local, pelo que se tornou fundamental como trabalho prévio a identificação rigorosa e pormenorizada dessas condicionantes, tendo este trabalho sido desenvolvido conjuntamente com o projectista da obra.

O local de instalação do equipamento de monitorização é uma das condicionantes. A necessidade de aplicação dos equipamentos em qualquer ponto do interior do aterro do muro acarreta obrigatoriamente a necessidade de leituras à distância. Por outro lado, a aplicação no seio de aterros implica que o equipamento tenha de resistir, quer à fase de construção das camadas do aterro que lhe ficam sobrejacentes, com a passagem de equipamentos de execução pesados, quer posteriormente, com o próprio acréscimo de peso sobre o local instrumentado, resultante do aumento da altura do aterro ao longo da construção.

As cintas de reforço dos muros de terra armada não têm grande margem para a colocação de equipamentos solidários, sendo necessário um mecanismo que não coloque em causa a sua funcionalidade, ou seja, que permita simplesmente a observação e não exerça nenhuma limitação à plenitude da sua função, quer de movimentação, quer de resistência. Deste modo foi considerada inadequada a utilização de sistemas de fixação que necessitassem de perfuração das cintas.

Tendo em conta os deslocamentos máximos possíveis para estes reforços, a selecção do equipamento teve de dar resposta à precisão pretendida, com campo de leitura suficientemente largo para medir a deformação máxima, mas suficientemente preciso para detectar todos os deslocamentos.

## 2.2 - Especificações das cintas de reforço dos muros

Um dos factores determinantes para a escolha do equipamento para monitorização é a grandeza dos deslocamentos a medir. Habitualmente, os equipamentos de monitorização com sensores de corda vibrante apresentam maior precisão de leitura, sendo o erro associado ao campo de leitura, ou seja, menor erro de leitura com menor campo de leitura. Deste modo, é necessário em cada caso específico adequar o equipamento ao intervalo de deformação admissível, de forma a seleccionar o equipamento mais preciso.

No caso dos muros de terra armada da Auto-Estrada do Marão, foram utilizadas na grande maioria dos locais, cintas da Linear Composites, Ltd de grau 30 e 50.

De acordo com as especificações técnicas do fabricante (Linear Composites, 2009), as cintas de reforço dos muros de terra armada têm uma largura nominal de 83 mm a 90 mm e espessura nominal de 1,5 mm a 3,5 mm, com resistência máxima de rotura à tracção de 30 kN e 56 kN, conforme se trate das de grau 30 ou 50.

Em termos de aplicação na execução do muro de terra armada, estes reforços são dispostos de forma contínua ao longo do muro, com ligação aos painéis exteriores por olhais com varão de ligação, como se encontra representado esquematicamente na Figura 2.



Figura 2 - Esquema com ligação das cintas às placas de betão do muro (Adaptado de Linear Composites, 2009).

Estes reforços são dispostos entre as camadas de aterro de forma contínua em "zig-zag" conforme se ilustra na Figura 3.

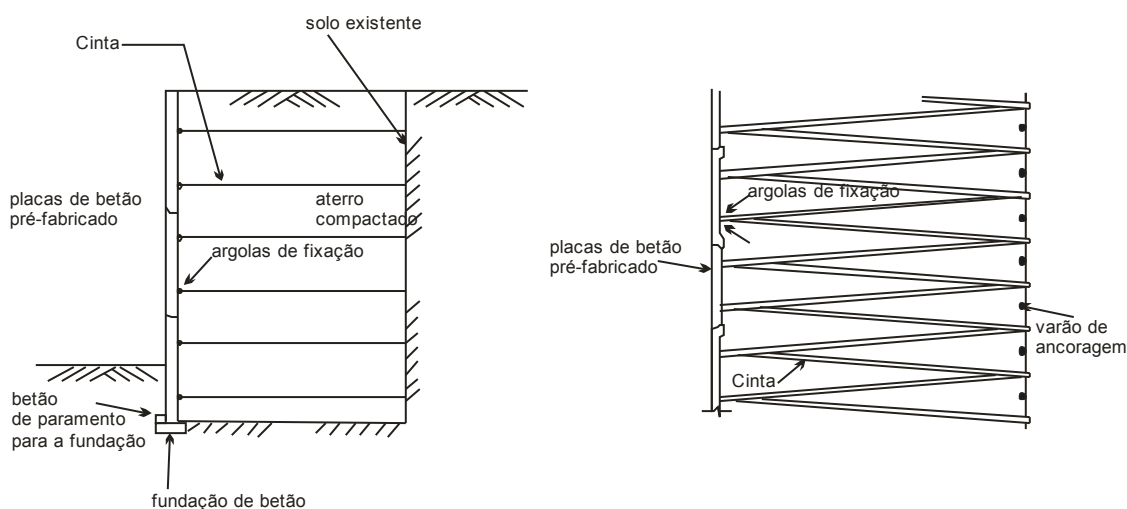


Figura 3 - Esquema de aplicação dos reforços entre camadas de aterro em perfil (à esquerda) e em planta (à direita) (adaptado de Linear Composites, 2009).

A resistência das cintas à tracção, a curto prazo, não tem um comportamento uniforme de deformação com o aumento do valor da tracção. A curva típica de deformação/carga de tracção segundo o fabricante das cintas de reforço (Linear Composites, 2009) é apresentada na Figura 4.

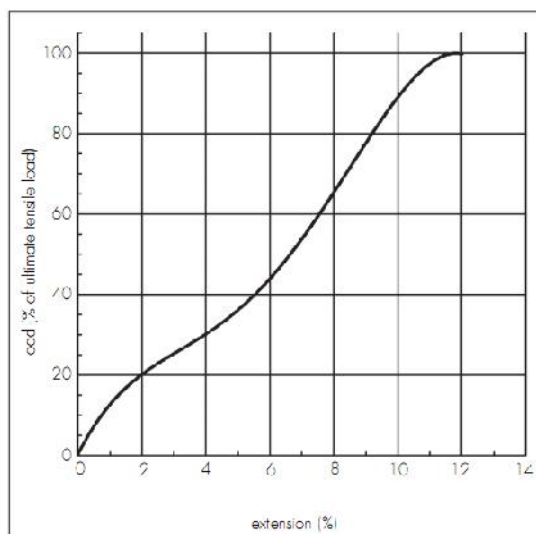


Figura 4 – Curva de deformação em função da tensão aplicada às cintas de reforço dos muros (Adaptado de Linear Composites, 2009).

Pelo gráfico constante na Figura 4 e segundo as especificações técnicas do fabricante (Linear Composites, 2009), a extensão das cintas na carga de ruptura será de  $12\% \pm 2\%$  do comprimento. Com estes elementos, torna-se possível calcular a deformação máxima para as cintas de reforço, mediante o comprimento aplicado, bem como calcular a mesma deformação para os troços a monitorizar.

### 2.3 - Equipamento para instrumentação

Tendo em vista a necessidade de ultrapassar as limitações acima descritas, bem como a obrigatoriedade do equipamento ficar no meio do aterro e haver necessidade das leituras serem feitas de forma remota, a selecção recaiu sobre equipamentos de corda vibrante em detrimento de equipamentos mecânicos.

Os equipamentos de leitura mecânica necessitam de estar ao alcance do operador para que a leitura seja realizada, ou seja, neste caso para instalação no meio de um muro de terra armada onde não há acesso, a sua aplicação fica obrigatoriamente excluída.

Os equipamentos com sensores de corda vibrante são ligados a um cabo eléctrico que poderá ter o comprimento que se deseje, permitindo que o ponto de leitura possa ser distante do local de instalação do sensor. Uma vez que o sinal de saída deste tipo de sensores é frequência e não voltagem, ao contrário de outros tipos de equipamento, a transmissão de sinal pode ser efectuada a distâncias que podem ser superiores a 2000 m, sem degradação significativa da qualidade do sinal, resultante do aumento da resistência com o aumento do comprimento do cabo, penetração de humidade ou flutuações de temperatura.

Este tipo de metodologia de instrumentação permite ainda que o sensor fique de imediato disponível para monitorização após a instalação, ficando cabo de espera ou a acrescentar à medida que o muro é executado em altura. Deste modo permite o acompanhamento das deformações em todas as fases de execução.

A elevada precisão requerida para a monitorização das cintas de reforço dos muros de terra armada, levou a equacionar a instalação de equipamentos de corda vibrante como strain gages, jointmeters, strandmeter e crackmeter. Todos apresentam elevada precisão de leitura, mas os 3 primeiros possuem campo de leitura muito reduzido, recaindo assim a escolha sobre o Crackmeter Modelo 4420 da Geokon (Figura 5), com adaptações introduzidas pelo Departamento Técnico da CEGÊ, Lda.



Figura 5 – Crackmeter Modelo 4420 da Geokon (Adaptado de Geokon, 2010).

Este modelo tem opção de campos de leitura de 12,5 mm, 25 mm, 50 mm, 100 mm e 150 mm, com um comprimento de sensores de respectivamente 325 mm, 333 mm, 378 mm, 543 mm e 685 mm, uma resolução de 0,025% F.S. (Full Scale – campo de leitura) e precisão de  $\pm 0,1\%$  F.S. Este instrumento possui incorporado um termómetro, de forma a poderem ser efectuadas correcções da deformação em função da variação da temperatura.

No sentido de salvaguardar a medição de todas as deformações possíveis, a selecção do equipamento, quanto ao campo de leitura, teve em conta a deformação máxima possível para as cintas, em detrimento das deformações máxima expectáveis em projecto, uma vez que as primeiras são maiores.

Segundo as especificações técnicas das cintas de reforço (Linear Composites, 2009) a deformação máxima é de  $12\%+2\%$  do comprimento. Assim, torna-se possível avaliar essa deformação para o comprimento dos sensores, que no fundo representam a extensão do reforço a monitorizar.

No quadro 1 apresenta-se o cálculo da deformação máxima de cada sensor para o comprimento em monitorização.

Quadro 1 – Deformação máxima do reforço em função do comprimento monitorizado.

Sensor / campo de leitura (mm)	Comprimento do sensor (mm)	Deformação máxima no comp. do sensor $12\%+2\%$ (mm)
12,5	325	$39 \pm 6,5$
25	333	$40 \pm 6,7$
50	378	$45,4 \pm 7,6$
100	543	$65,2 \pm 10,9$
150	685	$82,2 \pm 13,7$

Analisando os dados, verifica-se que o sensor que tem maior precisão e que melhor se adapta à monitorização dos deslocamentos máximos possíveis é o de 50 mm de campo de leitura.

### 3 - INSTALAÇÃO DOS SENSORES

#### 3.1 - Fixação dos sensores às cintas de reforço dos muros

O Crackmeter Modelo 4420 da Geokon, é habitualmente utilizado para monitorização de deslocamentos de fissuras, encontrando-se optimizado para ser instalado em estruturas de betão ou rocha. A sua fixação em caso de utilização em betão ou rocha é assegurada pela aplicação de pernos de varão de aço nervurado em furos pré-executados (Figura 5), ficando solidários com a estrutura com a aplicação de um ligante do tipo resina epóxica de secagem rápida e de elevada resistência ou através de calda de cimento.

Para monitorização das cintas (reforços) foi desenvolvido pela CÊGÊ, um sistema de fixação que permitisse a solidarização do sensor, sem que fossem realizados quaisquer furos nas cintas que colocassem em causa a sua resistência.

Como o sensor permite ser fixo nas suas extremidades através de parafusos, foi desenvolvida uma estrutura de fixação com barra de aço inox com uma dimensão de 128x50x5 mm. As barras são

colocadas em cada um dos extremos do instrumento de forma a abraçar a cinta e apertadas por meio de 4 parafusos (Figura 6, esquerda).

Uma das limitações do equipamento de monitorização instalado (crackmeters) é a sua resistência física à passagem sobre ele de equipamento pesado (regularização de camadas do aterro e compactação) utilizado durante execução do aterro e ao peso do aterro que lhe fica subjacente, uma vez que este fica no seu seio.

Tendo em vista dar resposta a este problema foram desenvolvidas pela CÊGÊ, protecções em chapa de aço de 5 mm de espessura, moldadas de forma a albergar o sensor no seu interior, sem restringir de alguma forma a movimentação quer das cintas de reforço, quer dos crackmeters (Figura 6, direita).

Com a aplicação desta protecção, o sensor fica no interior de uma caixa com resistência às adversidades da execução e peso do aterro.

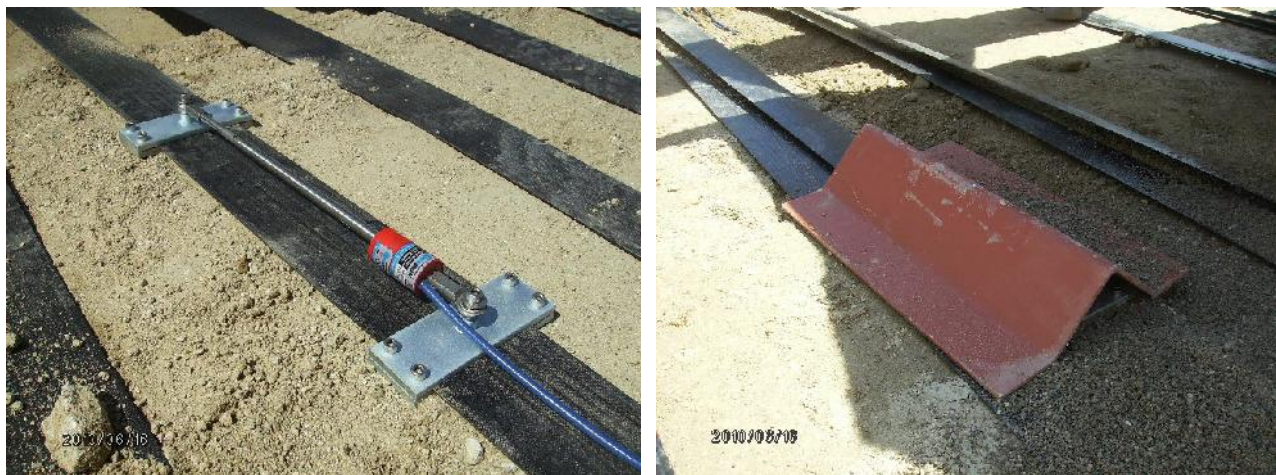


Figura 6 – Peças de fixação entre crackmeter e cintas de reforço do muro (esquerda). Protecções do sensor (direita).

A instalação é feita de forma muito rápida, resumindo-se a colocar as fixações nas cintas de reforço e ligar as fixações ao sensor por meio de parafusos.

O sensor fica posicionado de forma a medir essencialmente extensões, uma vez que este é o comportamento previsto para a deformação das cintas. Assim os crackmeters são instalados de forma a ficarem quase fechados, conforme as recomendações das especificações técnicas do fabricante para estes casos (Geokon, 2010).

O cabo para leitura pode ser enterrado de imediato por uma questão de protecção, através da abertura de um pequeno roço ao longo do aterro e desviado para onde se pretenda fazer a leitura (Figura 7).



Figura 7 – Crackmeters instalados na cinta de reforço do muro e protecções do sensor.

## 4 - RESULTADOS OBTIDOS

### 4.1 - Deslocamentos medidos nos crackmeters

Na obra da Auto-Estrada do Marão foram instalados até ao momento 25 crackmeters nas cintas de reforços de muros de terra armada, localizados em 4 muros distintos. A monitorização destas estruturas levou à sua instalação a diferentes cotas no interior dos muros e a diferentes distâncias ao paramento (Figura 8).

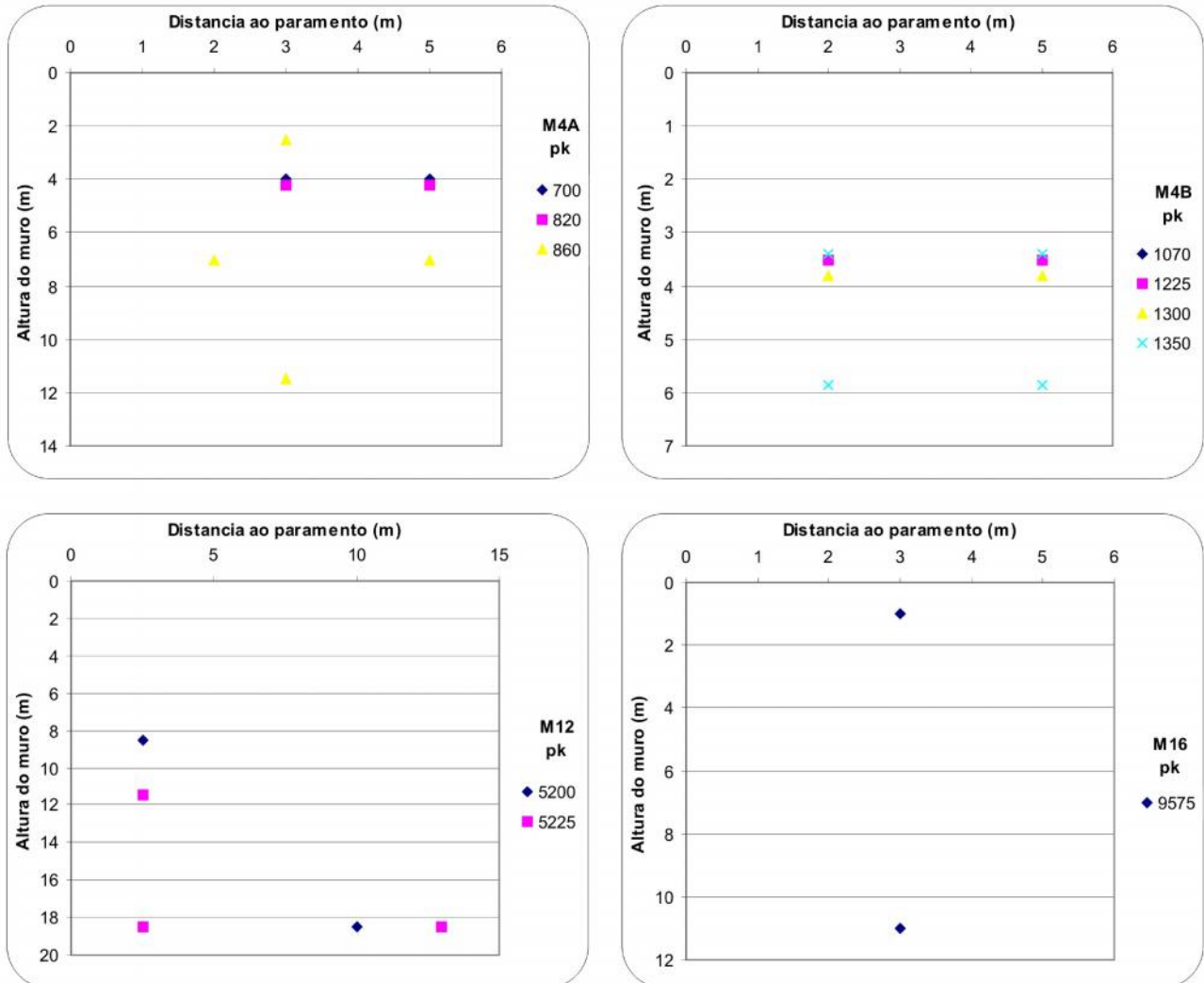


Figura 8 – Esquema em secção com a disposição de instalação dos crackmeters nos diferentes muros.

Nos gráficos presentes na Figura 9 é possível observar a deformação, no geral crescente, em função do aumento da altura do muro sobre as cintas de reforço do muro onde se instalaram os sensores (crackmeters).

Com a conclusão do muro em termos altimétricos, a deformação permanece constante, ou com alterações pouco significativas em relação à dimensão de deslocamento registada até essa altura. Nos gráficos da Figura 9 essa informação também é visível, revelada pela alteração de valores de deformação no final de cada linha, no entanto, em alguns casos não é evidente por permanecerem constantes.

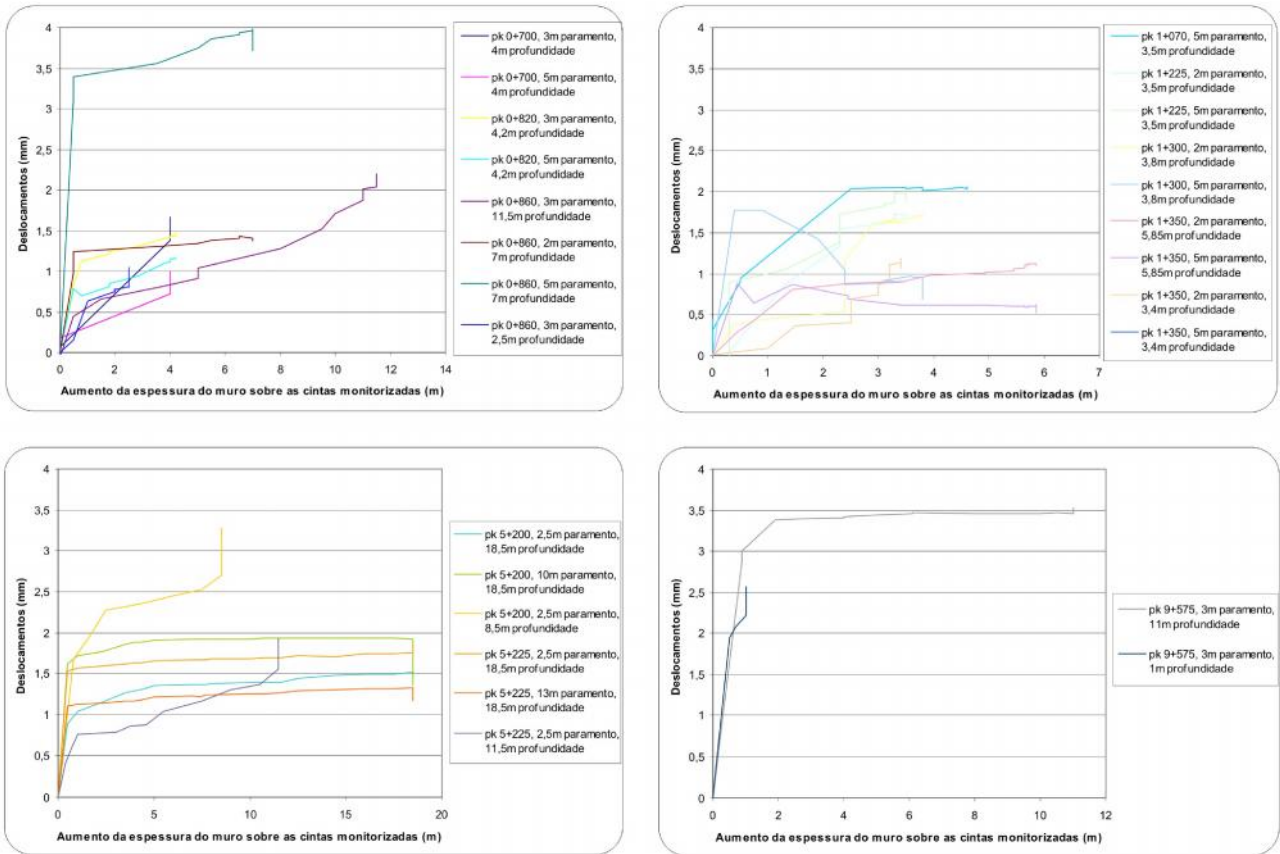


Figura 9 – Deslocamento com o aumento de altura do muro sobre o crackmeter.

Pelos dados apresentados, verifica-se que para a maioria dos casos a deformação mais significativa ocorre associada à aplicação das primeiras camadas de aterro (espessura de aproximadamente 0,5 m de cada camada de material constituído por saibro granítico) sobre as cintas de reforço que foram monitorizadas.

Tendo como objectivo verificar a deformação em função da localização onde se encontram os sensores, foram projectados os dados nos gráficos de deformação máxima em função da distância ao paramento (Figura 10) e deformação em função da espessura do muro sobre os sensores (Figura 11).

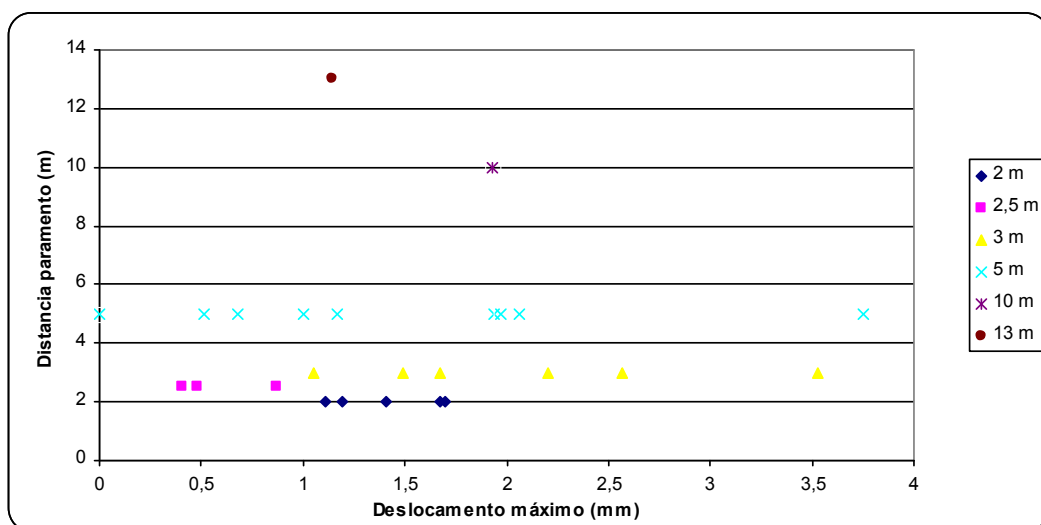


Figura 10 – Deslocamentos máximos verificados em função da distância ao paramento do muro.



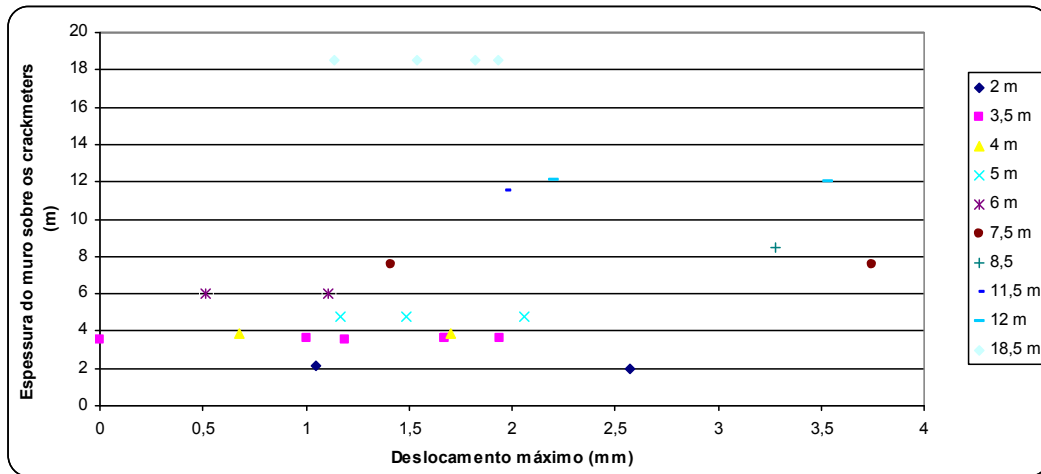


Figura 11 – Deslocamentos máximos verificados em função da espessura do muro sobre os crackmeters.

Para a localização dos sensores em relação à distância ao paramento, aparentemente não se observa nenhum padrão de comportamento, verificando-se uma grande dispersão de deformações, o que poderá significar que horizontalmente a força a que os reforços ficam sujeitos é semelhante.

Quanto à profundidade de instalação, ou seja, altura dos aterros sobre as cintas de reforço monitorizadas, apesar de uma grande dispersão, aparentemente há um aumento de deslocamentos para profundidades mais elevadas, o que se interpreta como um aumento da força exercida pelas cintas de reforço do muro em profundidade.

#### 4.2 - Resistência à tracção nas cintas de reforço

Tendo em conta que os sensores são do Modelo 4420-50 da Geokon, com um comprimento de 378 mm, temos para os valores de deslocamento máximos verificados uma percentagem de deformação que não chega a 1%.

De acordo com as especificações das cintas de reforço e com o gráfico presente na figura 4, anteriormente apresentado, para deslocamentos inferiores a 1%, a percentagem de força de resistência à tracção da cinta de reforço pode ser dada pela seguinte expressão [1]:

$$T = 12,793 * (Df) - 0,0679 \quad [1]$$

Na expressão [1],  $T$  representa a percentagem de força máxima de resistência à tracção instalada e  $Df$  é a percentagem de deformação máxima.

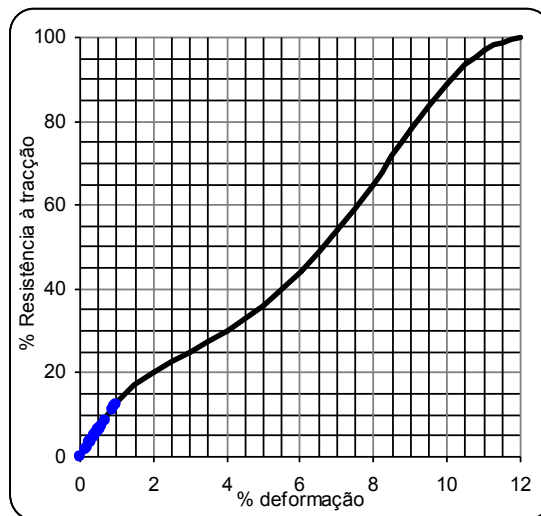


Figura 12 – Resistência à tracção face à deformação medida.

Sendo as cintas de reforço onde os crackmeters foram aplicados, as de grau 50, com uma resistência à tracção máxima de 56 kN, ou seja que corresponde aos 100% da resistência, os valores da percentagem de tensão medida são em todos os casos inferiores a 12%, o que indica que as cintas instrumentadas não chegam a ultrapassar uma força de resistência à tracção de 7 kN.

### 4.3 - Outros instrumentos de monitorização

Os muros onde se aplicaram os crackmeters nas cintas de reforço, também foram alvo de monitorização pelas metodologias aqui designadas de mais tradicionais (alvos topográficos e inclinómetros).

A superfície exterior foi monitorizada pela instalação e leitura de alvos topográficos de fita retro-reflectora, enquanto os deslocamentos horizontais junto ao paramento dos muros, pelo seu interior, foram monitorizados com calhas inclinométricas.

Os alvos topográficos foram instalados a cotas diferentes dos crackmeters e no processo de leitura houve necessidade de troca de equipamentos de leitura e operador, o que levou a várias zeragens, pelo que os resultados obtidos ficam fora de uma comparação directa imediata. Refira-se ainda que face às condições locais as leituras topográficas registaram oscilações por vezes significativas entre campanhas de observação, sendo o erro inerente a este tipo de leitura muito superior ao dos crackmeters (pelo menos 50x superior). Deste modo estes dados não serão analisados, por não serem relevantes face ao objectivo do trabalho, no entanto revelam o valor acrescido do tipo de monitorização com os crackmeters de corda vibrante.

Os inclinómetros são constituídos por calha de polipropileno de 67 mm de diâmetro e foram instalados nos muros de terra armada aproximadamente a 0,5 m do interior do paramento e encastrados aproximadamente 5 m no maciço de fundação dos muros. O maciço de fundação dos muros trata-se de granito, classificado como medianamente ( $W_3$ ) a muito alterado ( $W_4$ ) segundo os critérios sugeridos pela Sociedade Internacional de Mecânica das Rochas (ISRM, 2007).

Os inclinómetros, como permitem a medição da deformação horizontal ao longo de toda a altura do muro, contemplam os deslocamentos específicos à cota onde se encontram os crackmeters instalados nos reforços do muro. Na Figura 13 apresentam-se os resultados para os mesmos locais às mesmas profundidades dos crackmeters instalados nas cintas de reforço.

Como se pode observar, em termos genéricos, os resultados dos crackmeters mostram deslocamentos acumulados mais elevados que os inclinómetros, o que seria expectável uma vez que os crackmeters entraram em observação mais cedo que os inclinómetros, que apenas ficaram disponíveis após todo o muro se encontrar executado.

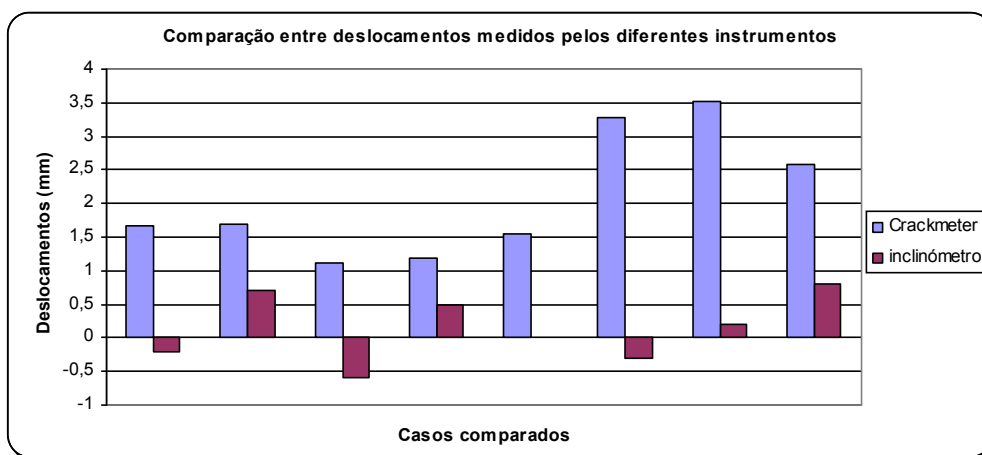


Figura 13 – Deslocamentos verificados em locais onde se encontram instalados simultaneamente inclinómetros e crackmeters.

Os valores de deslocamento observados nos crackmeters também se revelam mais consistentes quando comparados com os dos inclinómetros. Nos crackmeter os deslocamentos são no sentido de extensão dos reforços, enquanto nos inclinómetros, em alguns casos, verifica-se deslocamento para o interior do muro e não para o seu exterior, como é expectável.

## 5 - CONCLUSÕES

Apresentou-se neste documento uma nova metodologia para a monitorização das cintas de reforço dos muros de terra armada, que revelou resultados de deformação muito satisfatórios e mais precisos, quando comparados com resultados obtidos através de outros métodos de monitorização mais tradicionais, pela sua elevada precisão, mas principalmente por entrarem em actividade mais cedo, constituído desta forma um complemento significativo na monitorização deste tipo de estruturas.

A instrumentação das cintas de reforço dos muros de terra armada com crackmeters de corda vibrante adaptados a esta aplicação, permite uma avaliação específica das deformações ao nível dos reforços dos muros de terra armada, permitindo ainda calcular a força de resistência à tracção exercida pelas mesmas.

Outra grande vantagem deste tipo de instrumentação é o de permitir iniciar a observação da evolução da resistência à tracção instalada nas cintas de reforço dos muros de terra armada de forma imediata e logo após a sua instalação.

Os dados recolhidos mostraram que até ao momento para estes casos a força de resistência à tracção instalada nas cintas de reforço dos muros de terra armada fica dentro da segurança em termos do seu limite máximo de resistência.

A obtenção destes elementos de deformação dos reforços dos muros de terra armada permite um incremento de precisão aos modelos de projecto e eventualmente num futuro um dimensionamento mais pormenorizado e confiante deste tipo de estruturas.

## AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem à Infratúnel – Construtores do Túnel do Marão, ACE pela autorização concedida na divulgação dos dados recolhidos no âmbito da construção da Auto-Estrada do Marão.

## REFERÊNCIAS

- Dinis da Gama, Farinha, F., Sousa, M. (2002). A deformabilidade dos geossintéticos no projecto da fundação de aterros de resíduos sólidos urbanos. *Actas do 8º Congresso Nacional de Geotecnia*. Lisboa.
- Dunnicliff, J. (1988). *Geotechnical Instrumentation for Monitoring Field Performance*. John Wiley & Sons. New York, USA.
- Geokon (2010). *Geotechnical Instrumentation* (Technical Specification Model 4420 Crackmeter), Lebanon, New Hampshire, USA.
- Linear Composites (2009). *Paraweb straps for reinforced soil retaining walls and bridge abutments* (Technical Specification) Keighley, West Yorkshire, UK.
- International Society for Rock Mechanics (ISRM). The Complete ISRM Suggested Methods for Rock Characterization, Testing and Monitoring: 1974-2006. Suggested Methods Prepared by the Commission on Testing Methods, International Society for Rock Mechanics, R. Ulusay and J.A. Hudson (Eds.), Compilation Arranged by the ISRM Turkish National Group, Ankara, Turkey (2007).
- Lopes, P., Lopes, L. (2000a). Geossintéticos associados - avaliação dos comportamentos à tracção-deformação, ao punçoamento estático e ao rasgamento. *Geotecnia* nº90. SGP.
- Lopes, P., Lopes, L. (2000b). Estudo do comportamento mecânico de geotexteis associados. *Actas do 7º Congresso Nacional de Geotecnia*, Vol. II p. 1097-1107. Porto.