

EXPERIMENTAÇÃO PARA TESTE DO MÉTODO EXTENSOMÉTRICO DE MONITORIZAÇÃO DE CONVERGÊNCIAS EM TÚNEIS

EXPERIMENTATION FOR THE TESTING OF THE EXTENSOMETRIC METHOD FOR MONITORING CONVERGENCES IN TUNNELS

Costa e Silva, Matilde, *Centro de Geotecnia, IST, Lisboa, Portugal, matilde.horta@ist.utl.pt*
Reis e Sousa, Manuel, *Centro de Geotecnia, IST, Lisboa, Portugal, reis.sousa@mail.ist.utl.pt*
Ferreira, Miriam, *Centro de Geotecnia, IST, Lisboa, Portugal, miriamferreira@portugalmail.pt*

RESUMO

Para se avaliar o grau de segurança de grandes obras subterrâneas, mormente túneis ferroviários ou rodoviários, é necessário monitorizar continuamente o seu comportamento. Recentemente, foi desenvolvido o MEMCOT (Método Extensométrico de Monitorização de Convergências em Túneis), de fácil aplicação, e que permite informação permanente sobre deslocamentos (convergências) nos pontos considerados mais sensíveis daquelas estruturas. Para analisar tais comportamentos, foi ensaiado um modelo construído em tubo de PVC, submetido a várias solicitações que ocasionavam deformações medidas em quatro secções transversais e respectivos deslocamentos entre pontos opostos da periferia. Descrevem-se os ensaios realizados, analisam-se os resultados obtidos e avalia-se a relevância da nova metodologia para a segurança de túneis, quer na fase de construção, quer em serviço.

ABSTRACT

To evaluate the degree of safety of large underground cavities, mainly railway or road tunnels, continuous monitoring of their behaviour is required. Recently the MEMCOT (Extensometric Method for Monitoring Convergences in Tunnels) was developed as a methodology of easy application that allows to evaluate permanent information on the displacements (convergences) at selected points of the structures of support of those tunnels. For analyzing that behaviour, the model of tunnel was constructed in PVC pipe, in which deformations at four sections were measured as well as relative displacements at opposite points of its contour. Testing procedures and results are presented and analyzed, leading to considerations on the relevance of the new methodology for tunnel safety, both under construction and in operation.

1 - INTRODUÇÃO

Para que em qualquer momento possa ser avaliado o grau de segurança de túneis, além da caracterização geotécnica dos maciços onde os mesmos são implantados, é indispensável conhecer as deformações (convergências) nas estruturas de suporte [1]. Até há relativamente pouco tempo, os métodos disponíveis para a medição de convergências baseavam-se em sistemas mecânicos ou sistemas ópticos. As medições com aqueles métodos, que são apenas periódicas, não permitem uma avaliação permanente sobre as condições de segurança da obra e obrigam a que, quando das medições, nas imediações das zonas a observar sejam interrompidos os trabalhos de execução da obra, ou que seja interrompida a circulação, caso a obra esteja já em exploração.

Recentemente Dinis da Gama [2], desenvolveu uma metodologia de fácil aplicação que permite informação permanente quanto a deslocamentos relativos (convergências) nos pontos

considerados mais sensíveis das estruturas de suporte daquelas obras. Este método, já patenteado, consiste, basicamente, em medir extensões em determinados pontos de estruturas metálicas (designadas cambotas) de suporte de grandes obras subterrâneas e mediante a utilização de programa de cálculo, previamente adaptado à geometria da obra, determinar os correspondentes deslocamentos relativos daqueles mesmos pontos. Para túneis já em serviço, o método extensométrico é igualmente aplicável em barras ou perfis de material de elevada resistência, previamente solidarizados com o revestimento do túnel. Geralmente, na medição das extensões são utilizados extensómetros eléctricos de resistência ou sensores de fibra óptica.

Para se avaliar o comportamento de um túnel em toda a sua extensão, quando sujeito a cargas, foi ensaiado um modelo tridimensional, no qual foram medidas deformações em vários pontos de quatro secções transversais do modelo e medidos, em alguns casos, deslocamentos relativos na coroa nas proximidades dos extremos (bocas) do modelo de túnel. Neste artigo descrevem-se os ensaios realizados, apresentam-se e analisam-se os resultados obtidos e tecem-se algumas considerações sobre a nova técnica para a medição de convergências em túneis, em regime permanente.

2 – ENSAIOS

O modelo ensaiado foi construído de tubo de PVC com diâmetro exterior de 200 mm e espessura da parede 4,5 mm, sendo de 400 mm o seu comprimento; as características elásticas do material (determinadas por ensaio de compressão uniaxial) são: módulo de deformabilidade 2,3 GPa e coeficiente de Poisson 0,34. À parede interior do tubo foram fixas, por meio de resina tipo epoxi, quatro lâminas extensométricas de aço inox, de espessura 0,35 mm, nas quais foram anteriormente aplicados cinco extensómetros eléctricos de resistência. Os extensómetros 1 e 5 permitem estudar a variação de uma corda máxima (diâmetro), os extensómetros 2 e 4 permitem estudar a variação de uma corda intermédia e o extensómetro 3 situa-se na coroa. Na Figura 1 a) indica-se a localização dos extensómetros numa secção transversal e na Figura 1 b) indica-se a localização das lâminas ao longo do modelo.

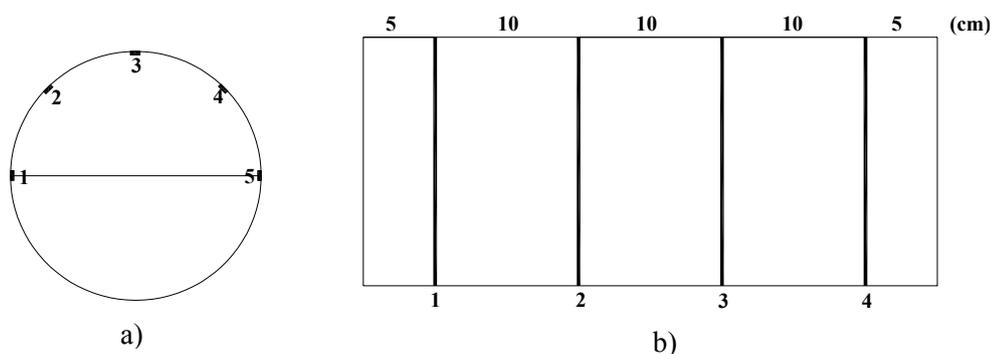


Figura 1 – Representação esquemática da localização dos extensómetros na secção do tubo (a) e localização das lâminas ao longo do comprimento do referido tubo (b).

Foram executados dois grupos de ensaios: os do primeiro grupo, designados por “fase de construção,” simulavam o túnel em construção, pois num dos extremos do modelo foi embebido em 15 mm um tampão em microbetão armado, desempenhando as funções da frente da escavação (topo do túnel), impedindo as deformações naquele extremo; os do outro grupo, designados por “fase de exploração”, foram efectuados sem o referido tampão, correspondendo, assim, á abertura total do túnel. Para a distribuição das cargas dos ensaios foram utilizadas três peças de microbetão armado com raio de curvatura semelhante ao do modelo.

Nos ensaios respeitantes à fase de construção foram aplicados três tipos distintos de carregamento. Num, as cargas foram uniformemente distribuídas e aplicadas a partir do topo (Figura 2); noutra, as cargas foram igualmente aplicadas a partir do topo, mas de forma diferenciada (Figura 2 e Figura 3); no último caso, as cargas foram uniformemente distribuídas, mas aplicadas ao centro do modelo (Figura 4).

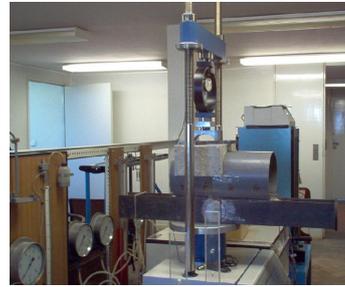


Figura 2 – Carga a partir do topo, em 130 mm. Figura 3 – Carga diferenciada, em 185 mm.

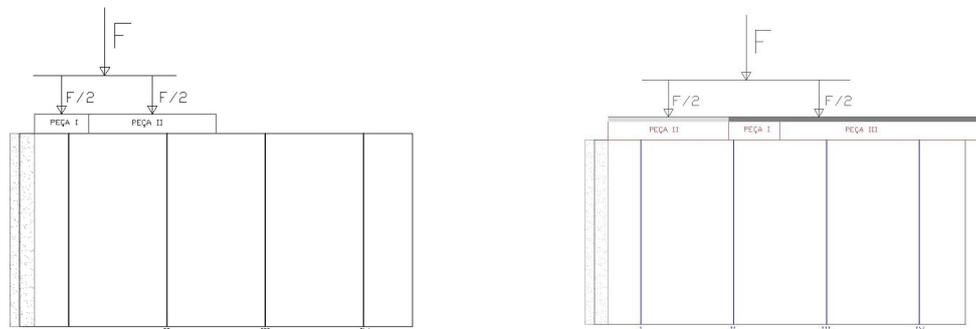


Figura 4 – Representação esquemática da carga diferenciada em 185 mm (a) e da carga diferenciada em 385 mm (b).

Nos ensaios respeitantes à fase de exploração foram aplicados dois tipos distintos de carregamento. Num, as cargas foram uniformemente distribuídas e aplicadas ao centro do modelo e no outro, as cargas foram aplicadas apenas ao longo de toda a geratriz superior do modelo.

Cada ensaio foi constituído por um ciclo de carga e descarga, medindo-se as deformações a diversos níveis da carga (patamares) e, também, em alguns casos, os deslocamentos de dois pontos da coroa e de dois pontos que definem um diâmetro do modelo, nas secções em que se situam as lâminas extensométricas 1 e 4.

3 - RESULTADOS DOS ENSAIOS E SUA ANÁLISE

O elevado número de medições sobre os vinte extensómetros eléctricos aplicados no modelo, efectuadas ao longo dos diversos ensaios e, porque a análise dos resultados vai ser feita em termos de convergências ou de divergências sob as cargas máximas de cada ensaio, entre pontos simétricos ou singulares das lâminas extensométricas aplicadas no modelo, leva a resumir os valores obtidos nos ensaios. Assim, os valores que se apresentam nos Quadros 1 a 5 respeitam à carga máxima do ensaio; para os extensómetros que permitem estudar as variações das cordas referidas em 2, os valores correspondem à soma das extensões de dois extensómetros simétricos. Dado que tanto os valores de carga máxima como a parte (comprimento) carregada do modelo foram diferentes de ensaio para ensaio, as cargas são expressas em forças por unidade de comprimento.

3. 1 – Ensaio respeitantes à fase de construção

Os resultados correspondentes aos ensaios da fase de construção são apresentados nos Quadros 1 a 3 e 6. A título de exemplo, na Figura 5 traçaram-se os diagramas extensões versus cargas por unidade de comprimento (lâmina 3), referentes ao ensaio de carga ao centro, em 55 mm.

3.1.1 - Ensaio de carga a partir do topo

Nestes ensaios, as cargas foram aplicadas a partir da suposta frente de escavação e segundo o sentido da boca do túnel. Foram efectuados quatro ensaios com este tipo de carregamento, sendo de 55, 130, 200 e 385 mm o comprimento carregado do modelo. No Quadro 1 apresentam-se os valores das extensões correspondentes às cargas máximas por unidade de comprimento.

Quadro 1 – Fase de Construção - Carga uniformemente distribuída, a partir do topo

Comprimento carregado (mm)	Carga máxima (kN/m)	Lâmina extensométrica	Extensões, ε (10^{-6})		
			ε_3	$\varepsilon_2 + \varepsilon_4$	$\varepsilon_1 + \varepsilon_5$
55	3,82	1	-112	140	-8
		2	-118	86	80
		3	-115	-73	126
		4	-103	-29	167
130	2,77	1	-57	44	55
		2	-37	205	10
		3	-137	-11	221
		4	-192	-39	349
200	2,25	1	-94	79	-3
		2	-217	226	-44
		3	-222	216	63
		4	-146	-117	348
385	1,64	1	-225	369	95
		2	-129	73	64
		3	-149	122	38
		4	-176	-94	296

Os resultados obtidos nos ensaios com carga uniformemente distribuída, aplicada a partir do topo, indicam que:

- Na coroa do túnel (ε_3) os valores de extensão em todas as quatro lâminas extensométricas e nos quatro ensaios realizados correspondem a convergências entre aqueles pontos e a base (piso) do túnel. No ensaio com carregamento ao longo de 55 mm, foi da mesma ordem de grandeza o valor da extensão medida nas quatro secções (lâminas) observadas. Nos ensaios com carregamento em 130 e 200 mm os valores das convergências são menores nas zonas mais próximas do topo e mais elevados nas zonas centrais e mais próximas da boca. No ensaio em que o comprimento carregado (385 mm) se estendeu a todo o túnel, o valor da deformação é superior nas proximidades dos extremos (topo e boca);
- Nos pontos que definem a corda intermédia ($\varepsilon_2 + \varepsilon_4$), de uma maneira geral, nas zonas mais próximas do topo do túnel registaram-se deformações de divergência e nas zonas mais próximas da boca do túnel registaram-se deformações de convergência;
- Nos pontos que definem a corda máxima ($\varepsilon_1 + \varepsilon_5$), com excepção do ensaio com carregamento em 200 mm, no qual se registaram pequenas deformações de convergência na zona do topo, nos demais ensaios, de uma maneira geral, foram registadas deformações de divergência ao longo de todas as secções transversais do túnel, sendo os valores daquelas deformações mais elevados nas zonas mais próximas da boca do túnel;
- Existe boa correlação entre deslocamentos e extensões medidos na coroa (ponto 3) correspondente à secção onde se situa a lâmina extensométrica 4 (zona da boca).

A forte influência da frente de escavação (tampão) na deformação do túnel, é bem evidenciada nos valores das extensões medidas nos ensaios.

3.1.2 - Ensaios de carga diferenciada

Nestes ensaios, as cargas foram aplicadas a partir da suposta frente de escavação (a 15 mm do extremo do tubo) e segundo o sentido da boca do túnel. Foram efectuados dois ensaios com este tipo de carregamento, tendo sido de 185 e 385 mm o comprimento carregado do modelo. Os valores das extensões correspondentes às cargas máximas por unidade de comprimento estão expressos no Quadro 2. No ensaio com carregamento em 185 mm (Figura 4a e Figura 3), metade da carga foi aplicada em 55 mm (zona próxima do topo) e a outra metade foi aplicada nos outros 130 mm; no ensaio com carregamento em 385 mm (Figura 4b), metade da carga foi aplicada em 130 mm (zona próxima do topo) e a outra metade foi aplicada nos restantes 255 mm.

Quadro 2 – Fase de Construção - Carga diferenciada, aplicada a partir do topo.

Comprimento carregado (mm)	Carga máxima (kN/m)	Lâmina extensométrica	Extensões, ϵ (10^{-6})		
			ϵ_3	$\epsilon_2 + \epsilon_4$	$\epsilon_1 + \epsilon_5$
185 (55 + 130)	2,92	1	-97	172	-148
		2	-193	25	248
		3	-281	-23	463
		4	-303	-103	630
385 (130 + 255)	1,87	1	-72	57	78
		2	-94	133	184
		3	-209	71	189
		4	-195	146	-6

Os resultados obtidos nos ensaios com cargas diferenciadas indicam que:

- Na coroa (ϵ_3) foram registadas deformações de convergência com o piso, em todas as secções observadas. Os valores dessas deformações são crescentes do topo para a boca do túnel;
- Na corda intermédia ($\epsilon_2 + \epsilon_4$), nas secções mais próximas da boca (lâminas 3 e 4) e para o ensaio com carregamento em 185 mm, foram registadas deformações de convergência de valor não excessivo; em todas as restantes secções foram registadas deformações de divergência, não se observando qualquer regularidade nos valores dessas deformações ao longo do túnel;
- Na corda máxima ($\epsilon_1 + \epsilon_5$), no ensaio com carregamento em 185 mm registaram-se deformações de convergência na secção correspondente à lâmina extensométrica 1 (mais próxima do topo) e nas restantes secções registaram-se deformações de divergência, deformações essas que são crescentes no sentido da boca do túnel; relativamente ao ensaio com carregamento em 385 mm, registaram-se deformações de divergência em todas as secções, sendo esses valores mais elevados na zona central do túnel (lâminas 2 e 3).

Os valores das extensões medidas nos ensaios com carga diferenciada, mormente os respeitantes à coroa, evidenciam a forte influência do tampão, que simula a frente de escavação, nas deformações ao longo do túnel.

3.1.3 - Ensaios de carga ao centro

Nestes ensaios, as peças de distribuição das forças foram aplicadas ao meio do modelo do túnel. Foram efectuados três ensaios com este tipo de carregamento, tendo sido de 55, 130 e 200 mm o comprimento carregado do modelo. Os valores das extensões correspondentes às cargas máximas por unidade de comprimento estão expressos no Quadro 3. Na Figura 5 traçaram-se, a

título de exemplo, os diagramas extensões – cargas por unidade de comprimento para o ensaio de carga ao centro, em 55 mm (lâmina 3).

Quadro 3 – Fase de Construção – Carga uniformemente distribuída ao centro

Comprimento carregado (mm)	Carga máxima (kN/m)	Lâmina extensométrica	Extensões, ε (10^{-6})		
			ε_3	$\varepsilon_2 + \varepsilon_4$	$\varepsilon_1 + \varepsilon_5$
55	3,82	1	-36	10	105
		2	-156	110	194
		3	-309	120	355
		4	-329	-36	588
130	3,69	1	-26	-47	110
		2	-60	182	374
		3	-263	12	358
		4	-305	-169	751
200	3,60	1	-89	26	121
		2	-398	262	189
		3	-758	568	395
		4	-650	-27	994

Os resultados obtidos nos ensaios com carregamento ao centro indicam que:

- Na coroa (ε_3), para os três ensaios, registaram-se deformações de convergência com o piso em todos os pontos de medição. Os valores dessas deformações são crescentes no sentido do topo para a boca do túnel; nas secções mais próximas da boca (lâminas 3 e 4), o acréscimo de deformação é bastante mais acentuado;
- Nos pontos que definem a corda intermédia ($\varepsilon_2 + \varepsilon_4$), para os três ensaios, registaram-se deformações de convergência na zona mais próxima da boca do túnel (lâmina 4); nas restantes três zonas observadas registaram-se deformações de divergência, sendo nas zonas centrais do túnel que essas deformações são mais significativas;
- Nos pontos que definem a corda máxima ($\varepsilon_1 + \varepsilon_5$) foram registadas deformações de divergência em todas as secções observadas, sendo o valor dessas deformações crescentes do topo para a boca do túnel; na secção mais próxima da boca (lâmina 4), o acréscimo de deformação é bastante mais acentuado.

3. 2 – Ensaio respeitantes à fase de exploração

Não obstante nesta fase já não existir o tampão que representava a frente de escavação (topo), na análise que se segue continua a designar-se por topo o extremo do modelo nas proximidades do qual se localiza a lâmina extensométrica 1 e por boca o extremo mais próximo da lâmina 4. Na fase que respeita ao túnel já concluído, foram utilizados dois tipos distintos de carregamento nos ensaios: num, as forças foram aplicadas ao centro do modelo, no outro, as forças foram aplicadas ao longo da geratriz superior do modelo, por intermédio de barra metálica rígida. Os resultados dos ensaios da fase de exploração são apresentados nos Quadros 4 a 6 e na Figura 6.

3.2.1 Ensaio de carga aplicada ao centro

Nestes ensaios, as peças de distribuição das forças foram aplicadas no centro do modelo do túnel. Foram efectuados quatro ensaios com este tipo de carregamento, tendo sido de 55, 130, 200 e 385 mm os comprimentos carregados do modelo. Os valores das extensões correspondentes às cargas máximas por unidade de comprimento estão expressos no Quadro 4.

Na Figura 6 traçaram-se, a título de exemplo, os diagramas extensões – cargas por unidade de comprimento para o ensaio de carga ao centro, em 55 mm (lâmina 1).

Quadro 4 – Fase de exploração - Carga uniformemente distribuída, ao centro

Comprimento carregado (mm)	Carga máxima (kN/m)	Lâmina exten-Sométrica	Extensões, ε (10^{-6})		
			ε_3	$\varepsilon_2 + \varepsilon_4$	$\varepsilon_1 + \varepsilon_5$
55	5,45	1	-299	-80	545
		2	-299	66	456
		3	-452	162	447
		4	-310	-55	496
130	2,31	1	-195	-56	462
		2	-85	-104	443
		3	-131	-13	466
		4	-131	-170	410
200	2,25	1	-490	-9	903
		2	-345	117	725
		3	-572	462	162
		4	-190	69	179
385	1,09	1	-99	73	328
		2	-90	-61	164
		3	-177	208	168
		4	-224	0	273

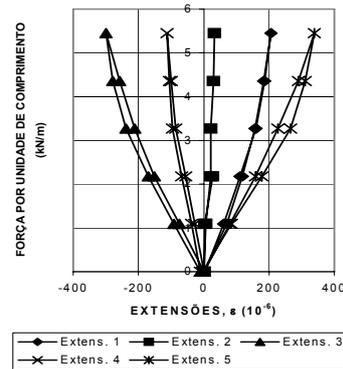
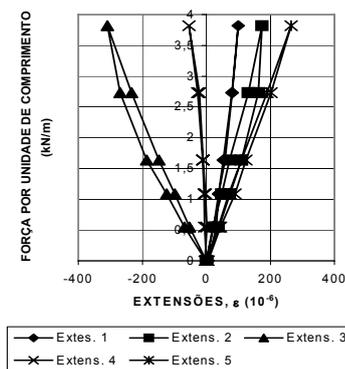


Figura 5 – Fase de construção (Lâmina 3)
(Carga ao centro, em 55 mm).

Figura 6 – Fase de exploração (Lâmina 1)
(Carga ao centro, em 55 mm).

Os resultados obtidos nos ensaios com cargas transmitidas ao centro do modelo, respeitantes à fase de exploração, isto é, sem qualquer impedimento nas deformações ao longo de todo o modelo, indicam que:

- Na coroa (ε_3) foram registadas deformações de convergência com o piso em todas as secções observadas e em todos os quatro ensaios. Para os quatro ensaios realizados não se observam correlações entre deformações e secções observadas, ou entre deformações e os comprimentos carregados no modelo;
- Nos pontos que definem a corda intermédia ($\varepsilon_2 + \varepsilon_4$), para o ensaio com carregamento em 130 mm foram registadas deformações de convergência ao longo de todo o modelo; para cada um dos restantes ensaios foram registadas deformações de divergência na maioria das secções observadas e, nos casos em que tal não se verificou, os valores das deformações de convergência são pouco expressivos;
- Nos pontos que definem a corda máxima ($\varepsilon_1 + \varepsilon_5$) foram registadas deformações de divergência ao longo de todo o modelo, em todos os ensaios realizados. Nos ensaios com carregamento em 55, 130, e 200 mm, os valores das deformações são mais elevados do que os respeitantes ao com carregamento em 385 mm;

Os resultados obtidos nos ensaios com carga uniformemente distribuída, aplicada ao centro do modelo, indicam uma resposta normal do modelo às cargas a que foi sujeito.

3.2.2 - Ensaio de carga aplicada ao longo da geratriz superior

Neste ensaio as forças foram aplicadas ao longo da geratriz superior do modelo por intermédio de barra metálica rígida. Os valores das extensões correspondentes à carga máxima por unidade de comprimento são apresentados no Quadro 5.

Quadro 5 – Fase de exploração – Carga ao longo da geratriz superior.

Comprimento carregado (mm)	Carga máxima (kN/m)	Lâmina exten-Sométrica	Extensões, ε (10^{-6})		
			ε_3	$\varepsilon_2 + \varepsilon_4$	$\varepsilon_1 + \varepsilon_5$
400	0,30	1	-276	42	350
		2	-279	76	400
		3	-339	84	405
		4	-345	81	398

Os resultados obtidos no ensaio com carga transmitida ao longo da geratriz superior do modelo, indicam que:

- Na coroa (ε_3) foram registadas deformações de convergência com o piso em todas as secções observadas. Os valores das deformações ao longo de todo o modelo não apresentam diferenças muito significativas;
- Nos pontos que definem a corda intermédia ($\varepsilon_2 + \varepsilon_4$) foram registadas deformações de divergência ao longo de todo o modelo. São relativamente baixos os valores medidos;
- Nos pontos que definem a corda máxima ($\varepsilon_1 + \varepsilon_5$) foram registadas deformações de divergência ao longo de todo o modelo.
- Para cada situação em estudo, (coroa, corda intermédia e corda máxima), de uma maneira geral, os valores das deformações medidas são da mesma ordem de grandeza;

3.2.3 – Correlações entre deslocamentos relativos e extensões medidos em laboratório

As correlações entre deslocamentos relativos medidos com deflectómetros digitais e as extensões medidas nos mesmos pontos do modelo (lâminas 1 e 4), encontram-se no Quadro 6.

Quadro 6 – Correlações entre deslocamentos relativos, δ (μ m) e extensões, ε (10^{-6})

Fase	Ensaio	Lâmina	Coroa (3)		Corda máxima (1+5)	
			Factor de Conversão, k ($\delta = k\varepsilon$)	Coefficiente de correlação	Factor de conversão, k ($\delta = k\varepsilon$)	Coefficiente de correlação
Construção	Carga a partir do topo, em 130 mm	4	5,465	0,994	----	----
Exploração	Carga ao centro, em 55 mm	1	5,205	0,999	----	----
		4	4,621	0,997	3,323	0,990
	Carga ao centro, em 200 mm	1	5,591	0,983	----	---
		4	4,874	0,999	3,638	0,996
	Carga ao centro, em 385 mm	4	5,005	0,997	4,144	0,992
	Carga na geratriz superior	1	3,904	0,987	----	----
4		3,760	0,999	3,311	0,991	

Da observação do Quadro 6 pode concluir-se que:

- Existe boa correlação entre deslocamentos e extensões medidos nos mesmos pontos do modelo (coroa - ponto 3 e corda máxima – pontos 1 e 5) respeitantes às secções onde se situam as lâminas extensométricas 1 e 4;
- Os factores que convertem os valores das deformações medidas em pontos da coroa em deslocamentos relativos daqueles mesmos pontos, são um pouco superiores aos factores que

convertem as deformações medidas em pontos da corda máxima em deslocamentos relativos daqueles pontos.

4 – COMPARAÇÃO ENTRE DESLOCAMENTOS MEDIDOS E DESLOCAMENTOS CALCULADOS

Com base no programa de cálculo que faz parte da nova metodologia para a medição de convergências em túneis, desenvolvida por Dinis da Gama, e na geometria do modelo ensaiado, aplicou-se o algoritmo matemático que permite converter as extensões medidas nos diferentes pontos do modelo em deslocamentos (convergências). Esta metodologia encontra-se descrita em [2].

No Quadro 7 apresentam-se, a título de exemplo, as extensões e os deslocamentos medidos sobre o modelo em alguns dos ensaios e, também, os deslocamentos correspondentes àquelas extensões e calculados mediante a aplicação do algoritmo matemático.

Quadro 7 – Extensões e deslocamentos medidos e deslocamentos calculados
(Fase de exploração)

Tipo de Carregamento	Lâmina Extens.	Valores medidos					Valores calculados		
		Extensões, ε (10^{-6})			Deslocamentos, δ (μ m)		Deslocamentos, δ (μ m)		
		ε_3	$\varepsilon_2 + \varepsilon_4$	$\varepsilon_1 + \varepsilon_5$	δ_3	$\delta_1 + \delta_5$	δ_3	$\delta_2 + \delta_4$	$\delta_1 + \delta_5$
Carga central (em 55 mm)	1	-299	-80	545	1576	----	1225	241	-2290
	2	-299	66	456	----	----	1225	-205	-1920
	3	-452	162	447	----	----	1839	-498	-1875
	4	-310	-55	496	1449	-1667	1269	166	-2082
Carga central (em 200 mm)	1	-490	-9	903	2442	----	1991	26	-3824
	2	-345	117	725	----	----	1410	-358	-3065
	3	-572	462	162	----	----	2316	-1423	-679
	4	-190	69	179	1029	-662	782	-212	-751
Carga central (em 385 mm)	1	-99	73	328	----	----	409	-224	-1372
	2	-90	-61	164	----	----	372	184	-686
	3	-177	208	168	----	----	729	-634	-706
	4	-224	0	273	1211	-1191	920	0	-1140
Carga ao longo da geratriz superior	1	-276	42	350	1006	----	1131	-128	-1463
	2	-279	76	400	----	----	1144	-232	-1674
	3	-339	84	405	----	----	1386	-256	-1695
	4	-345	81	398	1285	-1277	1410	-248	-1666

Comparando os deslocamentos medidos e calculados nos mesmos pontos do modelo (coroa e corda máxima), verifica-se que não são excessivos os desvios relativos entre valores experimentais e valores teóricos (desvio médio da ordem de 18%). Tal comprova a boa fiabilidade do método extensométrico para a determinação de convergências em túneis.

5 – CONCLUSÕES

Os resultados obtidos nos diversos tipos de ensaio efectuados sobre o modelo de túnel, permitem emitir as seguintes conclusões:

- De uma maneira geral, o comportamento do modelo às solicitações a que foi sujeito nos diversos modos de carregamento, não se afastou muito do do tipo elástico-linear;
- As forças aplicadas ao modelo do túnel nos diversos tipos de carregamento nos ensaios das duas fases (construção e exploração), originaram deformações de convergência entre a

coroa e o piso ao longo de toda a extensão do modelo. Na corda intermédia, aquelas mesmas forças originaram deformações de divergência ou deformações de convergência, consoante o tipo de carregamento e/ou a zona do modelo. Já na corda máxima (diâmetro) foram registadas, de uma maneira geral, deformações de divergência entre os pontos que definem aquela corda;

- Os valores das deformações medidas nos ensaios dos diversos tipos de carregamento respeitantes à fase de construção do túnel, mormente as deformações medidas na coroa do túnel, reflectem bem a influência da frente de escavação (tampão) no modo de deformação resultante da redistribuição das forças que vão sendo transferidas do maciço à medida que avança a escavação. Assim, mesmo nos casos em que as zonas mais próximas do topo são mais carregadas (cargas a partir do topo e cargas diferenciadas), de uma maneira geral, os valores das deformações são crescentes no sentido topo - boca;
- As deformações medidas nos ensaios dos dois tipos de carregamento respeitantes à fase de exploração do túnel, isto é, sem qualquer impedimento à livre deformação ao longo de todo o modelo, já não manifestam qualquer sentido preferencial quanto a aumento ou diminuição dos seus valores ao longo do modelo. Nos resultados dos ensaios de carga distribuída ao centro, é evidenciado o efeito de confinamento motivado pelas peças distribuidoras das forças. No ensaio em que as forças incidiram apenas sobre a geratriz superior do modelo, ou seja, sem qualquer restrição à livre deformação, os valores registados ao longo de todo o modelo para cada caso observado (coroa, corda intermédia e corda máxima) apresentam pequenas dispersões;
- Existem fortes correlações entre extensões e deslocamentos medidos nos mesmos pontos do modelo do túnel (coeficientes variando entre 0,983 e 0,999) e, independentemente do tipo de carregamento e do ponto do modelo, a dispersão entre os factores que correlacionam aquelas duas grandezas não é muito significativa;
- Como nota final, com base nos resultados obtidos nos ensaios e nas análises anteriormente efectuadas e, particularmente no que respeita à boa correlação entre extensões e deslocamentos medidos nos mesmos pontos do modelo e nas pequenas diferenças entre deslocamentos medidos e deslocamentos calculados, pode afirmar-se que o MEMCOT é o método mais adequado para aqueles fins, pois que, para além da fácil instalação sem colisão com as obras de construção e o tráfego, permite informação fiável e permanente, quanto ao estado de deformação das estruturas de suporte das obras subterrâneas, aumentando o nível de segurança destas.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

[1] Bock, H.(2005) - Instrumentación Geotécnica de Túneles. Cap. 16, Ingeotúneles No.9, Madrid.

[2] Dinis da Gama, C. (2004) – A Method for Continuous Monitoring of Tunnel Deformations during Construction and Service Phases. EUROCK 2004, Salzburg, pp.251-254.