

## Distanciómetros Eletrónicos na Monitorização de Barragens – um apontamento histórico

Elisa ALMEIDA<sup>1</sup>, Daniel PIMENTEL<sup>1</sup> e David FERNANDES<sup>1</sup>

<sup>1</sup> EDP Gestão da Produção de Energia, S.A.

(elisa.almeida@edp.pt; daniel.pimentel@edp.pt; david.fernandes@edp.pt)

**Palavras-chave:** Monitorização, Observação de Estruturas, Métodos Geodésicos, Topografia de Precisão, Distanciómetros, Barragens

**Resumo:** Os Métodos Geodésicos na Observação de Barragens, quando aplicados à quantificação de deslocamentos horizontais em "pontos objeto" representativos do comportamento da estrutura a monitorizar, baseavam-se tradicionalmente na medição de ângulos horizontais com recurso a teodolitos de precisão.

Com o aparecimento dos distanciómetros eletrónicos e a sua evolução tecnológica, a medição eletromagnética de distâncias veio a proporcionar técnicas mistas por observação de diferentes tipos de grandezas (ângulos e distâncias) na estimação dos deslocamentos horizontais.

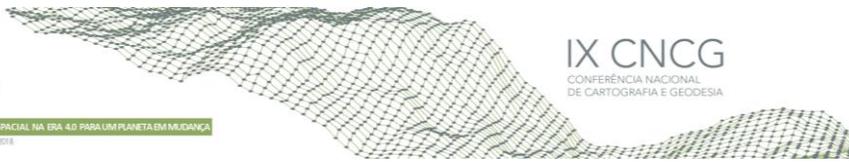
A aquisição pela Direcção Operacional do Equipamento Hidráulico (DOEH) / Electricidade de Portugal (EDP), em 1989, do distanciómetro submilimétrico Kern Mekometer ME 5000, instrumento único em Portugal, veio a possibilitar a implementação da poligonização de precisão no interior das galerias de visita da barragem do Alto Lindoso, tendo assim constituído um marco na monitorização de estruturas por métodos geodésicos.

Este artigo apresenta as alterações decorrentes da introdução da medição de distâncias na monitorização de barragens por métodos geodésicos, referindo a importância que em particular este equipamento teve no processo. Pelas características únicas que possui, o distanciómetro KERN Mekometer ME 5000 foi recentemente entregue à Direcção Geral do Território (DGT) para que integrasse o acervo do Museu de Geodesia.

Formatted: Normal (Web), Indent: Left: 0 cm, Hanging: 1,27 cm

Formatted: Portuguese (Portugal)

Formatted: Portuguese (Portugal)



## 1. Introdução aos Métodos Geodésicos

A monitorização de deslocamentos em grandes barragens de betão é uma atividade do domínio da Observação de Estruturas cuja unidade de medida pode considerar-se o milímetro (mm), pelo que globalmente, e nos mais variados métodos métricos que a suportam, procura-se atingir uma precisão milimétrica. Assim, os Métodos Geodésicos, que desempenham um papel fundamental na observação deste tipo de barragens, requerem incertezas de medição submilimétricas (Casaca *et al.*, 2015), enquadrando-se nas técnicas e metodologias da Topografia de precisão / Geodesia aplicada. Para tal materializam-se e quantificam-se separadamente as componentes planimétrica e altimétrica dos deslocamentos dos “pontos objeto” (PO), situados em locais representativos do comportamento da estrutura a monitorizar. Neste artigo será abordada exclusivamente a componente planimétrica, que tradicionalmente se tem baseado na medição de ângulos horizontais com recurso a teodolitos de precisão. Os PO planimétricos, tipicamente materializados no paramento de jusante da barragem, são observados a partir de uma rede de triangulação cujos pilares (de estacionamento) e referências (de pontaria) estão também usualmente localizados a jusante da barragem e em ambas as margens (MD e ME), sendo alguns de entre eles considerados “firmes”, tal como na configuração da rede planimétrica da barragem de Venda Nova (Figura 1).

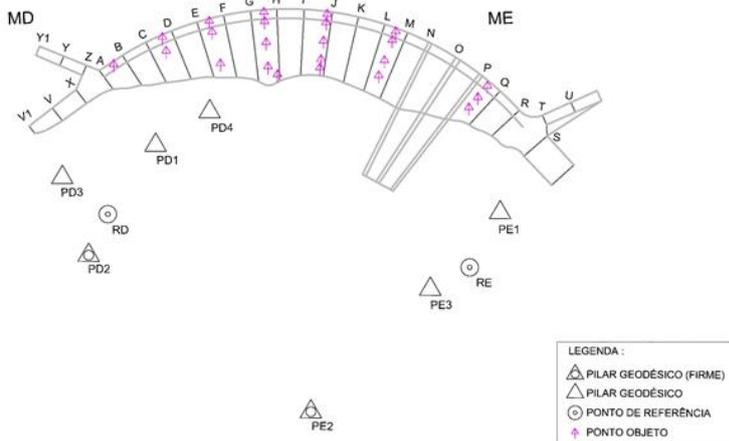


Figura 1 – Rede Planimétrica da Barragem de Venda Nova

Deste modo os deslocamentos horizontais são calculados a partir de leituras azimutais realizadas por instrumentos topográficos estacionados nos pilares e através de interseções diretas aos PO, sendo a medição de distâncias essencialmente usada aquando do estabelecimento da própria rede, para lhe dar escala no seu cálculo inicial (isto é, medição de uma base), e posteriormente para avaliação da sua estabilidade. Esta medição de distâncias, necessariamente efetuada com a maior precisão disponível nas técnicas topográficas, recorreu, antes do aparecimento dos distanciômetros, a fitas/fios de invar, ou à estadia de invar. Esta metodologia obrigava a que a base a medir para o estabelecimento da rede de triangulação fosse curta e plana, quase impossível de realizar entre margens opostas.

## 2. Medição eletrónica de distâncias na monitorização de barragens

Com o aparecimento dos distanciômetros eletromagnéticos (DEM) – indiferentemente designados por distanciômetros eletrónicos – cujo desenvolvimento científico teve origem pouco antes da segunda metade do século XX e cuja comercialização teve início há cerca de 50 anos, a medição de distâncias veio a tornar-se mais fácil e vantajosa. Se bem que inicialmente ainda de aplicação muito restrita, quase exclusivamente em uso pelas autoridades nacionais de Geodesia de cada País no estabelecimento da rede de apoio primária, pois recorria a instrumentos dispendiosos e de complexa utilização.

No caso da observação geodésica de barragens, os distanciômetros vieram a ser usados no estabelecimento e seguimento das redes de triangulação locais (Figura 2), possibilitando que estas fossem também de trilateração, podendo assim, eventual e adicionalmente, serem usadas para avaliação de “convergência de encostas”. Mas principalmente permitiram a introdução de técnicas de quantificação de deslocamentos horizontais que, para além da anteriormente “exclusiva” medição de ângulos horizontais, permitem recorrer também à medição de distâncias. O que veio a dar uma força acrescida à quase até então inexistente poligonação de precisão aplicada à monitorização de barragens de betão.

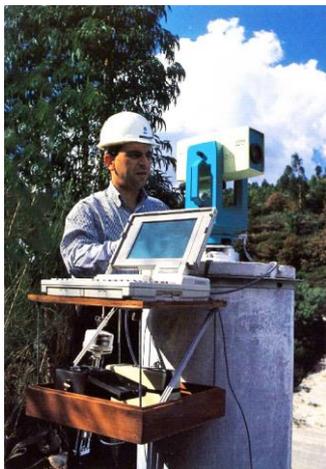


Figura 2 – Barragem de Crestuma – Observação da Rede de Triangulação com recurso ao Kern Mekometer ME 5000

### 2.1 O Kern Mekometer 5000 e outros distanciômetros.

Os distanciômetros eletrónicos, instrumentos cujo processo de medição se baseia na emissão/receção de ondas eletromagnéticas (como laser, ondas rádio ou infravermelhos), tiveram construtores pioneiros na antiga URSS, tendo tido posteriores e importantes desenvolvimentos na Suécia, aonde veio a nascer o primeiro “Geodimeter” (nome que resulta de “geodetic distance meter”) em 1943. Na África do Sul vinha a ser comercializado o Telurómetro (1957), seguindo-se nos anos 60 um significativo desenvolvimento já protagonizado pelos fabricantes suíços e alemães (Wild, Zeiss, Kern) que vieram a dominar o mercado mundial da Topografia. Entretanto a família nórdica “Geodimeter” continuou a desenvolver-se apresentando outros modelos. A partir dos anos 70, começaram a ser lançados distanciômetros de origem japonesa das marcas Topcon e Sokkisha (Rüeger, 1996).

O Kern Mekometer, do qual se disse ter sido o primeiro distanciómetro submilimétrico fabricado no mundo, teve uma primeira versão, a 3000, disponibilizada comercialmente em 1973. Este modelo foi adquirido pelo então Núcleo de Medidas Geodésicas do LNEC na década de 80 e veio a ser aplicado nas de redes geodésicas locais de alta precisão instaladas para a determinação de deslocamentos em grandes obras de engenharia (Matos, 2004). Posteriormente a Kern desenvolveu o “topo de gama” na versão 5000, tendo existido em toda a Ibéria apenas dois exemplares, um em Portugal (EDP) e outro em Espanha (Instituto de Astronomía y Geodesia) o qual veio a ser também usado em monitorização geodésica de grandes barragens (Del Pozo *et al.*, 1992). O modelo 5000, que começou a ser anunciado comercialmente em 1987, destinava-se a um nicho de mercado ainda mais restrito. Fazia agora uso de um laser de Hélio/Neon e apresentava sobre o anterior a grande vantagem da medição da distância não ser afetada por erros cíclicos, através da introdução da capacidade de fazer variar a frequência da portadora laser (Copeland-Davis, 1989). Um e outro modelo foram apresentados pelo seu fabricante – Kern & Co Aarau, Suíça – como permitindo atingir as incertezas de medição geodésica caracterizadas por desvios padrão de  $0.3 \text{ mm} \pm 3.0 \text{ ppm}$  (ME 3000) (Ogundare, 2015) e de  $0.2 \text{ mm} \pm 0.2 \text{ ppm}$  (ME 5000), tendo mesmo, na versão 5000, todos os resultados de práticas geodésicas excedido as próprias especificações de precisão do fabricante (Bell, 1992).

O distanciômetro Kern Mekometer 5000, adiante designado abreviadamente por ME 5000, foi adquirido pela EDP/Direcção Operacional do Equipamento Hidráulico no final dos anos 80, com o fim de possibilitar a introdução de poligonais de precisão no Sistema de Observação Geodésica a implementar nas galerias de visita da barragem do Alto Lindoso, cuja construção decorria. Neste âmbito veio ainda a ser utilizado em poligonização de precisão nas barragens de Touvedo (também em galerias de visita) e nas barragens de Pracana (Figura 3), Santa Luzia e antiga Alto Ceira (poligonização exterior ao corpo da barragem). Foi ainda usado no estabelecimento/seguinte de redes de triangulação utilizadas na monitorização geodésica de barragens como a do Torrão e a de Crestuma (Figura 2), como antes referido.



Figura 3 – Barragem de Pracana – poligonal no paramento de jusante, materializada por pilares de centragem forçada (cota 83)

## 2.2 Poligonização de Precisão. O caso da barragem do Alto Lindoso.

A barragem do Alto Lindoso é uma abóbada de betão com 110 m de altura e 300 m de desenvolvimento no coroamento. O seu sistema planimétrico de observação geodésica é composto por três poligonais com a seguinte configuração (Figura 4):

- Poligonal da Galeria de Visita 1 (GV1) – dois pilares de referência e 16 PO;
- Poligonal da GV2 – dois pilares de referência e 14 PO;
- Poligonal da GV3 – dois pilares de referência e 10 PO.

Todos os pilares de referência têm fundação em rocha sã e são considerados firmes (situam-se no prolongamento das GV em escavação no maciço rochoso) e todos os 40 PO são materializados por bases de parede instaladas em betão de primeira fase.

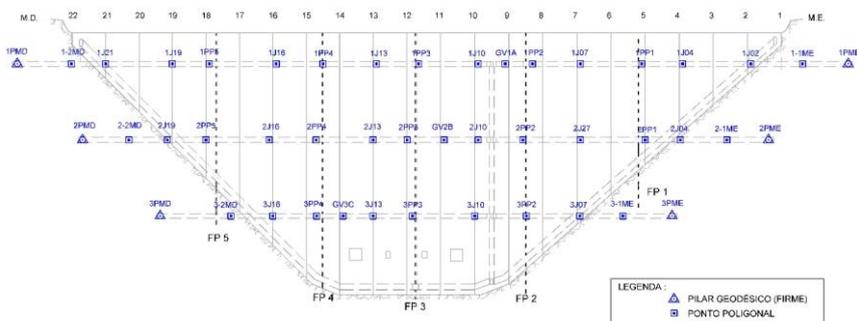
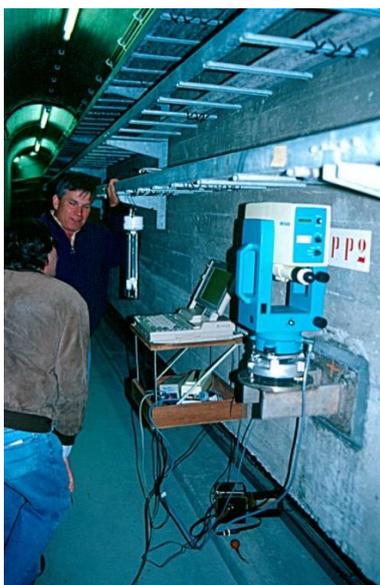


Figura 4 – Esquema do Sistema Planimétrico da Barragem do Alto Lindoso

Tal como aconteceu com os primeiros DEM, também o ME 5000 é um instrumento fisicamente independente do teodolito, donde para a realização da poligonal é necessário alternar, em duas passagens distintas, a medição de distâncias (Figura 5) e a medição de ângulos (Figura 6), visando respetivamente os respetivos prismas refletores e alvos óticos.



**Figura 5** – Barragem do Alto Lindoso – poligonal de precisão – medição de distâncias (ME 5000)



**Figura 6** – Barragem do Alto Lindoso – poligonal de precisão – medição de ângulos (Kern E2)

Na monitorização de barragens é sempre necessário recorrer a dispositivos de centragem forçada para garantir a necessária precisão do processo, sendo que no caso particular das poligonais os próprios PO são também "pontos de estação". Estes têm, tipicamente, materializações de dois tipos: os tradicionais pilares ou, como no caso do Alto Lindoso, bases metálicas de parede, seladas lateralmente no hastead da galeria de visita, fundadas em betão estrutural (Figuras 5 e 6).

As correções meteorológicas, sendo essenciais na determinação precisa de distâncias, constituem o maior grau de incerteza associado ao processo de medição por distanciómetros eletrónicos (Bird, 1989). A velocidade de propagação das ondas através da atmosfera, variando com a temperatura, pressão e humidade, obriga à medição destes parâmetros – os quais variam ainda ao longo do próprio trajeto percorrido, desde a emissão à receção. Donde é imprescindível o uso de psicrómetros (temperatura húmida e seca) e altímetros/barómetros (Figuras 2 e 5) para que a correção à distância possa ser calculada e introduzida, minimizando o efeito destes erros ambientais de natureza sistemática. Assim, a poligonização de precisão aplicada ao caso da monitorização de barragens desenvolve-se preferencialmente no interior das galerias de visita interiores ao corpo destas estruturas, ambientes estes que proporcionam uma grande estabilidade atmosférica.

Note-se ainda que devido às curtas distâncias que as poligonais materializadas nas galerias de visita da barragem do Alto Lindoso possuem – variando entre os 6 e os 30 metros – era necessário que o ME 5000 funcionasse com a introdução de distâncias pré-conhecidas suficientemente próximas da distância a medir. Neste caso tornava-se imprescindível que o procedimento de medição recorresse a um programa externo ("software" PROMEKO) para inicializar os parâmetros do instrumento, pelo que o funcionamento do ME 5000 não dispensava o acoplar de um contemporâneo (anos 90) computador portátil, montado num dispositivo especialmente idealizado para esse fim (Figuras 2 e 5).

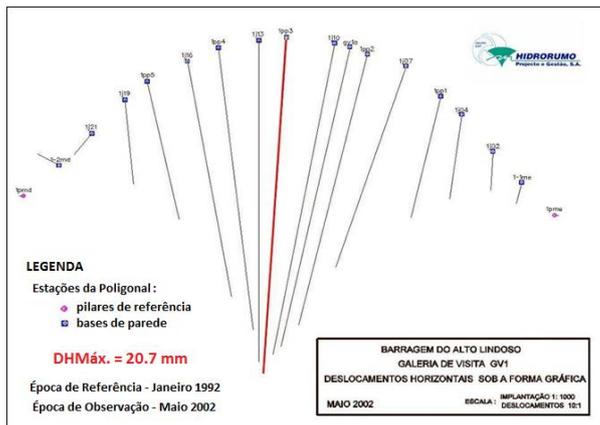
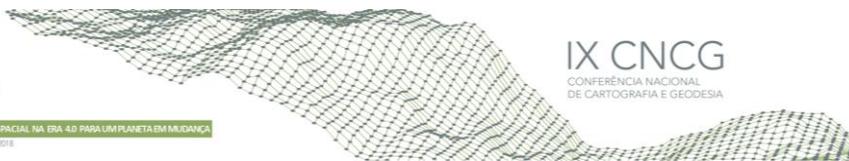


Figura 7– Barragem do Alto Lindoso – Deslocamentos horizontais apresentados na forma gráfica

Recorrendo ao conjunto Kern E2 + ME 5000 e com a primeira Época de Referência datada de janeiro de 1992, com campanhas de periodicidade tipicamente anual e durante um período de observação de mais de dez anos, foram obtidos resultados francamente positivos. A representação gráfica dos deslocamentos horizontais obtidos na poligonal que percorre a galeria de cota mais elevada (GV1) da barragem do Alto Lindoso após 10 anos (Figura 7), dá-nos conta de uma situação de deformação/deslocamento da estrutura para jusante, que virá a regredir em anos subsequentes, de acordo com o comportamento estrutural previsto para a juventude de uma abóbada de betão alta e esbelta. No entanto a precisão absoluta dos valores obtidos e aqui apresentados não foi a que se pretendia atingir, pois alguns anos depois e face a diferentes questões que foram surgindo ao longo de todo o processo – como a confrontação com resultados obtidos em fios-de-prumo invertidos – sentiu-se a necessidade de rever parametrizações associadas aos procedimentos de cálculo. Constatou-se, por exemplo, que os pesos atribuídos à medição de distâncias no cálculo da poligonal estavam subdimensionados, o que tinha resultado, não só da inexperiência dos técnicos envolvidos/falta de "histórico" para reflexão, mas também das próprias especificações de precisão dos fabricantes. Neste momento existe uma maior confiança na qualidade da medição das distâncias, tendo assim os velhos e precisos ângulos horizontais perdido algum do seu estatuto. Embora as reparametrizações recentemente introduzidas, que equilibraram a confiança atribuída aos ângulos e distâncias, tenham sido benéficas, ainda há necessidade de melhorar. Pelo menos nos casos mais desfavoráveis de poligonais mais extensas e de distâncias menos homogêneas - como o caso aqui apresentado da GV1 do Alto Lindoso.



Figura 8 – Barragem do Alto Lindoso – poligonal de precisão – taqueómetro eletrônico (Leica TC 2003)



Figura 9 – Barragem do Alto Lindoso – poligonal de precisão – prisma refletor (Leica GPH1P) para TC 2003

Por falência técnica do primeiro teodolito eletrónico de precisão, e não obstante dispor-se de um número apreciável destes, já há mais de 10 anos que se veio a ter de substituir o conjunto Kern E2 + ME 5000. Mas enquanto este último ia perdendo, um a um, os seus parceiros, entretanto iam surgindo outros distanciómetros de “mais fácil” utilização. Primeiramente acopláveis a teodolitos, mas já na altura (da falência dos E2) comercializados em conjuntos compactos teodolito/distanciómetro, os taqueómetros eletrónicos, também comumente designados por estações totais. Assim nos anos 90 foram sendo adquiridos os Geodimeter da série 600 e os Wild/Leica como o TC 2003 (Figuras 8 e 9), sendo que uns e outros vieram a “destronar” definitivamente o ME 5000, apesar destes distanciómetros mais modernos não apresentarem uma incerteza na medição de distâncias mais favorável (tipicamente  $1.0 \text{ mm} \pm 1.0 \text{ ppm}$ ).

### 2.3 Manutenção dos Sistemas / Calibração e Sistema de Confirmação Metrológica

Para além das correções ambientais a aplicar às distâncias observadas, cuja incerteza de medição não se encontra incluída na incerteza instrumental indicada pelo construtor, é também imprescindível aplicar correções instrumentais (Casaca *et al.*, 2015). Assim e para minimizar o efeito destes erros, também de natureza sistemática, é fundamental manter o distanciómetro calibrado.



Figura 10 – GEObase de Estremoz (IPCC) – Calibração do ME 5000



Figura 11 – Base de Calibração da Mata das Virtudes – (IGC, estabelecida nos anos 60)

Ao pretender medir-se a variação das distâncias entre duas épocas, a precisão absoluta não parece ser, à partida, um fator crítico. Pelo que “bastaria” manter este tipo de erros instrumentais constantes, para que o seu efeito fosse eliminado. Mas não só existem variações temporais significativas que acompanham o próprio envelhecimento do instrumento, até à sua “morte”, processo que termina com a sua substituição por um outro, como a própria manutenção do caráter absoluto da medição é importante para permitir o interface/a alternância com outras equipas de observação/outros instrumentos e respetivos conjuntos de acessórios. Saliente-se ainda a importância de todos os acessórios ao instrumento principal terem de fazer parte deste processo de calibração, nomeadamente o estabelecimento do valor da chamada constante do prisma, a qual varia com o retrorefletor utilizado. Assim, a determinação de uma constante aditiva rigorosa é um processo fundamental de calibração de um distanciómetro, devendo ser realizado periodicamente e de acordo com os melhores procedimentos. Durante a sua vida útil o ME 5000 era calibrado com frequência, recorrendo aos serviços técnicos da Divisão de Geodesia do antigo Instituto Geográfico Cadastral (IGC) / Instituto Português de Cartografia e Cadastro (IPCC). Para tal procedia-se a campanhas de calibração conjuntas, quer na GEObase de Estremoz (Figura 10), quer na Base da Mata das Virtudes (Figura 11), alternando e comparando os mais precisos distanciómetros em uso à época (início dos anos 90). Estas infraestruturas geodésicas – GEObase e Mata das Virtudes – que têm por principal finalidade o suporte a testes e estudos de modelos geodésicos e geodinâmicos diversos (Teixeira Pinto *et al.*, 1995), permitiram a aferição de instrumentos de elevada precisão como o ME 5000.

Atualmente a calibração das estações totais e outros equipamentos de Topografia de precisão em uso nas observações geodésicas, decorre de acordo com o protocolo estabelecido no Sistema de Confirmação Metrológica (SCM) do Sistema de Gestão de Qualidade, Ambiente e Segurança (SGQAS) da EDP Produção, por encomenda da certificação/calibração aos

laboratórios do respetivo fabricante. No que refere ao ME 5000, este encontrava-se em situação de “sem utilização” no SCM (desde 2003), situação que foi descontinuada com a sua recente entrega à “Casa Mãe” da Geodesia Portuguesa (Figura 12).



Figura 12 – Oferta do ME 5000 à DGT / Museu da Geodesia (maio 2018)

### 3. Considerações Finais – O legado do ME 5000

A medição de distâncias de precisão, integrante dos processos de monitorização geodésica de deslocamentos em grandes barragens de betão, só se tornou possível com a utilização de distanciómetros de alta precisão e procedimentos complexos de observação. O difícil e exigente processo veio a “democratizar-se” com o aparecimento das modernas estações totais de precisão, que tem vindo a conquistar um espaço próprio na monitorização de barragens por métodos geodésicos. Não só facilitando a realização de poligonais de precisão no interior das galerias de visita, é ainda de considerar, atualmente, as suas mais-valias de automatização e controlo-remoto no processo de medição. Deste modo permitindo a quantificação remota de deslocamentos/deformações em tempo real e com possibilidade de emissão de aviso de alerta, sendo que atualmente a EDP Produção possui três LEICA NOVA TM50, estando uma delas em estação/observação permanente à barragem de Foz Tua.

No entanto foi o distanciómetro Kern Mekometer 5000 que, com o seu uso pioneiro na poligonação de precisão da barragem do Alto Lindoso, veio mostrar que a medição eletromagnética de distâncias tinha atingido a precisão e a desenvoltura necessárias à observação geodésica de barragens. Abrindo a porta aos avanços tecnológicos e à crescente precisão e difusão dos DEM. Pois apesar da incerteza de medição instrumental do ME 5000 não ser facilmente ultrapassável, a agilização do processo de medição e a grande redução nos custos de aquisição vieram a dar vantagem às modernas estações totais. Sendo que a introdução da medição eletrónica de distâncias, embora trazendo consigo as dificuldades da “mistura” de observáveis diferentes no processo de quantificação de resultados, trouxe um significativo aumento de redundância nas observações, o que resultou numa importante mais-valia para os Sistemas Planimétricos de Monitorização Geodésica.

#### Referências Bibliográficas

- Bell, B. (1992). Proceedings of the Workshop “The Use and Calibration of the Kern ME 5000 Mekometer”, Stanford Linear Accelerator Center (SLAC) da Universidade de Stanford, Califórnia.
- Bird, R.G. (1989). EDM Traverses. Measurement, Computation and Adjustment, Longman Scientific & Technical.
- Casaca, J.; Henriques, M. J.; Conde, V. R.; Candeias, H. (2015). A incerteza de medição dos distanciómetros eletromagnéticos usados na observação geodésica de barragens de betão. LNEC Relatório 47/2015 – DBB/NGA.
- Copeland-Davis, T.W. (1989). Can the Kern ME5000 Mekometer replace invar measurements? SLAC, Stanford University.
- Del Pozo, A.N.G.; Durán, J.L.V.; Martínez, J. V.; García, G.D. (1992). Distancimetría submilimétrica en el control geodésico de la presa del Atazar. Revista TOPCART, n.ºs 49, 50 e 51; Colegio Oficial de Ingenieros Tecnicos en Topografía.
- Matos, J. (2004). Engenharia Geográfica em Portugal nos Séculos XIX e XX. In Movimentos de Inovação e Engenharia em Portugal no Século XX, Coord. Manuel Heitor, José Brandão de Brito, Maria Fernanda Rollo, Edições Dom Quixote.
- Ogundare, J. O. (2015). Precision Surveying: The Principles and Geomatics Practice. John Wiley & Sons.
- Rüeger, J. M. (1996). Electronic Distance Measurement: An Introduction. Springer-Verlag Berlin Heidelberg.
- Teixeira Pinto, J.; Agria Torres, J.; Lisboa, M. M.; Ribeiro, H. C. (1995). Expansão da GEOBASE. Publicação do IPCC “Cartografia e Cadastro”, N.º 3, dezembro 1995.