



Monitorização de deslocamentos em barragens de aterro com o GNSS

José Nuno LIMA¹

¹Laboratório Nacional de Engenharia Civil, Avenida do Brasil, 101 1700-066 Lisboa

(jnplima@lnec.pt)

Palavras-chave: GNSS, Monitorização, Barragens de Aterro, Geodesia

Resumo: Estudos levados a cabo numa base de 325 m permitiram caracterizar a incerteza na medição de deslocamentos com o GNSS, em função da duração da sessão de observação. Os resultados obtidos sugerem que sessões de observação GNSS com a duração de 5 minutos, por ponto objecto, permitem medir os deslocamentos em barragens de aterro com uma incerteza de 3 mm e 5 mm nas componentes horizontais e verticais, respectivamente.

Nesta comunicação apresentam-se e discutem-se os resultados obtidos.



1. Introdução

Com o objectivo de testar a viabilidade da aplicação do GNSS (*Global Navigation Satellite System*), recorrendo às sessões de observação de curta duração, na monitorização de deslocamentos superficiais das grandes barragens de aterro, tem o Núcleo de Geodesia Aplicada (NGA) do Departamento de Barragens de Betão (DBB) do LNEC vindo a realizar alguns ensaios em grandes barragens nacionais. Neste artigo são apresentados os resultados das campanhas de observação GNSS efectuadas na barragem de Odelouca em Fevereiro de 2010, Janeiro de 2011, Junho de 2011 e Setembro de 2014, por uma equipa do NGA. Os resultados são os deslocamentos horizontais e verticais de sete pontos objecto situados no coroamento, previamente seleccionados para o ensaio, relativos à observação efectuada em Fevereiro de 2010.

O posicionamento relativo de precisão com o GNSS requer a utilização das observações de fase da onda portadora, em pelo menos dois receptores, e a fixação das ambiguidades no conjunto dos números inteiros, Z . Aumentando a distância entre os receptores GNSS, a fixação das ambiguidades torna-se mais difícil porque os efeitos provocados pela passagem dos sinais GNSS pela troposfera e pela ionosfera tornam-se mais desiguais em cada receptor. O procedimento mais comum para contornar este problema, no posicionamento estático relativo, é prolongar a sessão de observação. Em geral, prolongando a duração da sessão de observação possibilita a diminuição da incerteza dos deslocamentos medidos com o GNSS. Com efeito, esta afirmação é sustentada por uma longa série de testes realizados numa base de 325 m de comprimento, localizada no Campus do LNEC, com sessões de observação de diferente duração, desde 1 minuto a 24 horas. A Figura 1 resume os resultados obtidos nesta base, sendo as bolas roxas, as bolas azuis e as bolas laranjas os desvios padrão obtidos na componente Norte (S_N), na componente Este (S_E) e na componente altimétrica (S_h), respectivamente, para as diferentes sessões de observação. Verifica-se que o desvio padrão na componente Norte é semelhante ao da componente Este, sendo o desvio padrão da componente altimétrica três vezes superior. Estes podem ser expressos por (1)

$$S_N = S_E = \frac{1}{2\sqrt{T}} \text{ mm}; \quad S_h = \frac{3}{2\sqrt{T}} \text{ mm} \quad (1)$$

Onde S_N , S_E e S_h são os desvios padrão nas componentes Norte, Sul e altimétrica, respectivamente, e T a duração da sessão de observação expresso em horas. Por exemplo, obtiveram-se para sessões de observação com a duração de 5 minutos desvios padrão de 1,8 mm nas componentes horizontais e 5,7 mm na componente vertical.

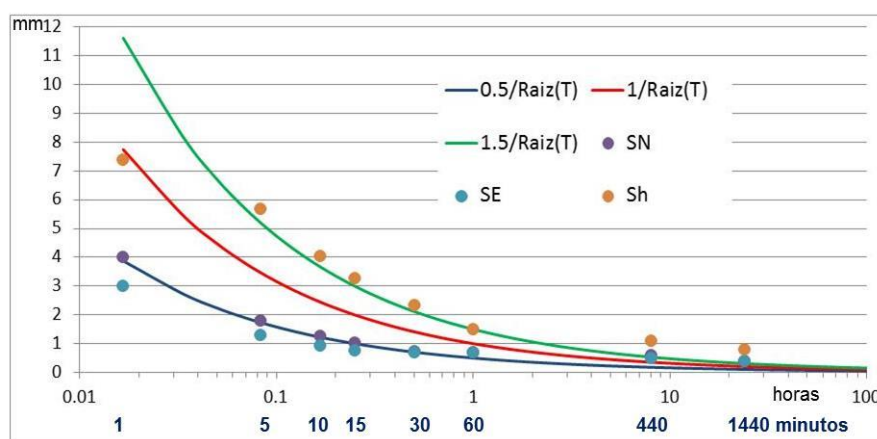


Figura 1 – Desvios padrão no posicionamento GNSS relativo na componente Norte (S_N , bolas roxas), na componente Este (S_E , bolas azuis) e na componente altitude (S_h , bolas laranjas), obtidos numa base do LNEC com 325m, para as sessões de 1 minuto, 5 minutos, 15 minutos, 30 minutos, 1 hora, 8 horas e 24 horas

2. Campanhas de observação GNSS e resultados

Aproveitando o sistema de observação topográfica instalado na barragem de Odelouca, têm-se realizado campanhas de observação GNSS em simultâneo com as campanhas de observação topográfica (LNEC, 2010; LNEC, 2011a; LNEC, 2011b e LNEC, 2014a), permitindo a determinação de deslocamentos horizontais e verticais de sete pontos materializados no coroamento da barragem (altitude 106 m) por dois métodos completamente independentes.

Para a observação GNSS foram utilizados dois receptores GNSS Topcon GB-1000 e duas antenas Choke Ring Topcon TPSCR3_GGD. Este equipamento é de precisão geodésica, tem acesso às duas ondas portadoras L1 e L2, transmitidas pelos satélites do GPS e do GLONASS. A utilização de antenas do tipo Choke Ring permitiu reduzir consideravelmente a recepção dos sinais (emitidos pelos satélites) reflectidos por alguma superfície reflectora nas vizinhanças da antena GNSS, minimizando um dos erros que mais afecta a precisão do posicionamento com o GNSS (conhecido, na literatura especializada, por *multipath*).

O GNSS permite um posicionamento tridimensional num sistema de referência global (e.g. WGS-84, ITRF2005, ETRS89), podendo as suas coordenadas ser transformadas para um referencial local (na parametrização associada a um referencial cartográfico, ou a um plano horizontal, duas coordenadas são horizontais e a terceira é vertical). Para facilitar a comparação com os deslocamentos obtidos nas campanhas topográficas, separam-se os deslocamentos horizontais dos deslocamentos verticais.

Assim, os deslocamentos horizontais obtidos com o GNSS foram comparados com os obtidos com o taqueómetro eletrónico Leica TCA2003 e os deslocamentos na componente altimétrica obtidos com o GNSS foram comparados com os deslocamentos verticais obtidos pelo nivelamento geométrico.

Em todas as campanhas foi seguido o mesmo plano de observação GNSS: um dos recetores GNSS permaneceu estacionado num dos pilares que definem o quadro de referência do sistema de observação topográfica da barragem, o ponto PEJ, enquanto o segundo recetor foi sucessivamente estacionado em vários pontos: durante uma hora, em cada um dos pilares do quadro de referência (PEM1, PDM e PDJ); e durante cinco minutos, em cada um dos pontos objeto do coroamento seleccionados (1CJ, 3CJ, 7CJ, 9CJ, 11CM, 12CM e 13CM).

As observações registadas nos dois recetores foram processadas em modo estático relativo com o *software* Pinnacle da Topcon, dando origem aos vetores GNSS representados na Figura 2.

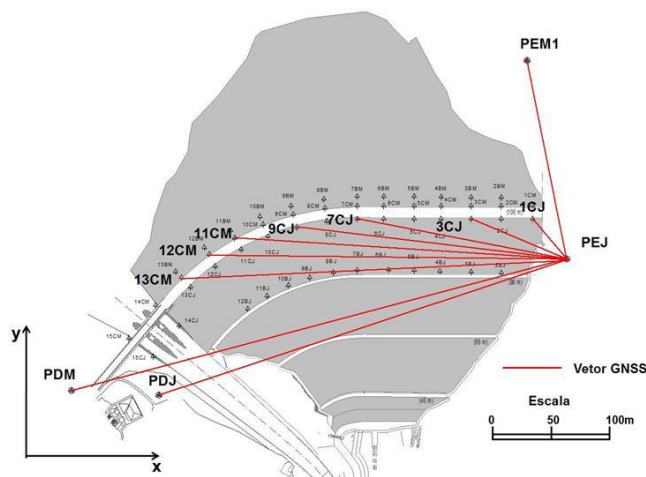


Figura 2 – Esquema do sistema de observação GNSS e o referencial local da barragem

Para minimizar os erros de posicionamento absoluto associados ao GNSS, obtiveram-se as coordenadas do ponto PEJ, no *datum* nacional PT-TM06, através da estação GNSS de Lagos, que é a estação mais próxima da Rede Nacional de Estações Permanentes da Direcção Geral do Território (DGT). Para isso, foram processadas, também com o Pinnacle, as observações da estação GNSS de Lagos em conjunto com as observações registadas no PEJ. De seguida, fixando as coordenadas no PT-TM06 obtidas para PEJ e através dos vectores GNSS obtiveram-se as coordenadas dos restantes pontos neste *datum*. Finalmente, as



coordenadas destes pontos foram transformados para o referencial local da barragem, definido em LNEC (2010) e representado na Figura 2. O referencial local da barragem é definido por um referencial cartesiano cujo eixo das ordenadas (yy) é paralelo aos perfis 1 a 6 da barragem, com sentido positivo para montante e cujo eixo das abcissas (xx) tem sentido positivo dirigido para a margem esquerda (cf. Figura 2).

2.1 Planimetria

Pelo facto do GNSS permitir um posicionamento tridimensional, a determinação dos deslocamentos horizontais e verticais foi realizada em simultâneo (utilizando as mesmas observações e o mesmo processamento dessas observações). No entanto, nesta subsecção referir-se-ão apenas os deslocamentos horizontais.

Comparando as coordenadas no referencial local da barragem obtidas das observações GNSS de Fevereiro de 2010 e das observações GNSS de Janeiro de 2011, resultaram os deslocamentos horizontais entre estas duas épocas (Quadro 1); analogamente, os deslocamentos horizontais entre Fevereiro de 2010 e Junho de 2011, por comparação das coordenadas obtidas nas respectivas épocas (Quadro 2); e os deslocamentos horizontais entre Fevereiro de 2010 e Setembro de 2014, por comparação das coordenadas obtidas nas respectivas épocas (Quadro 3).

É de salientar que nos deslocamentos obtidos com o taqueómetro as coordenadas dos pontos que definem o quadro de referência (PEJ, PDM, PDJ, PEM1 e PEM2) ficaram constringidas à variância de $0,01\text{mm}^2$, mas nos deslocamentos obtidos com o GNSS apenas se fixaram as coordenadas de PEJ. Nos três quadros apresentam-se também as diferenças dos deslocamentos obtidos pelos dois métodos, assim como a estatística associada a essas diferenças.

Na Figura 3 representam-se os deslocamentos horizontais dos sete pontos objecto do coroamento observados com os dois métodos independentes, entre as épocas de Fevereiro de 2010 e Janeiro de 2011. Na Figura 4 também se representam os deslocamentos horizontais nos mesmos pontos, mas agora referentes às épocas de Fevereiro de 2010 e de Junho de 2011. Finalmente, na Figura 5 mostram-se os deslocamentos horizontais nos mesmos pontos, referentes às épocas de Fevereiro de 2010 e de Setembro de 2014.

Quadro 1 – Deslocamentos horizontais dos pontos observados com o GNSS, entre Fevereiro de 2010 e Janeiro de 2011, e comparação com os deslocamentos obtidos com o taqueómetro TCA2003

Ponto	Deslocamento horizontal com o GNSS (mm)		Deslocamento horizontal com o TCA2003 (mm)		Diferença (mm)	
	dx	dy	dx	dy	dx	dy
1CJ	-7,1	-8,0	-6,7	-7,7	-0,4	-0,3
3CJ	-6,6	-17,3	-8,4	-13,4	+1,8	-3,9
7CJ	+2,9	-9,2	-1,7	-6,8	+4,6	-2,4
9CJ	+9,4	-7,6	+7,0	-5,3	+2,4	-2,3
11CM	+12,0	-5,7	10,9	-8,2	+1,1	+2,5
12CM	+7,1	-4,6	+7,2	-3,8	-0,1	-0,8
13CM	+6,6	-2,7	+7,2	-2,8	-0,6	+0,1
Média					+1,3	-1,0
Desvio Padrão					1,9	2,1
Amplitude					5,2	6,4



Quadro 2 – Deslocamentos horizontais dos pontos observados com o GNSS, entre Fevereiro de 2010 e Junho de 2011, e comparação com os deslocamentos obtidos com o taqueómetro TCA2003

Ponto	Deslocamento horizontal com o GNSS (mm)		Deslocamento horizontal com o TCA2003 (mm)		Diferença (mm)	
	dx	dy	dx	dy	dx	dy
1CJ	-5,8	-14,1	-6,7	-11,7	+0,9	-2,4
3CJ	-5,7	-20,2	-3,9	-17,6	-1,8	-2,6
7CJ	+2,7	-13,4	+0,8	-14,5	+1,9	+1,1
9CJ	+10,1	-14,8	+8,9	-13,3	+1,2	-1,5
11CM	+13,5	-7,9	+14,2	-12,5	-0,7	+4,6
12CM	+11,3	-7,0	+11,3	-6,3	0,0	-0,7
13CM	+6,9	-5,7	+11,3	-5,8	-4,4	+0,1
Média					-0,4	-0,2
Desvio Padrão					2,1	2,5
Amplitude					6,3	7,2

Quadro 3 – Deslocamentos horizontais dos pontos observados com o GNSS, entre Fevereiro de 2010 e Setembro de 2014, e comparação com os deslocamentos obtidos com o taqueómetro TCA2003

Ponto	Deslocamento horizontal com o GNSS (mm)		Deslocamento horizontal com o TCA2003 (mm)		Diferença (mm)	
	dx	dy	dx	dy	dx	dy
1CJ	-6,6	-38,3	-7,9	-39,4	-1,3	-1,1
3CJ	+4,1	-54,5	+0,8	-54,4	-3,3	+0,1
7CJ	+10,3	-48,6	+2,7	-45,9	-7,6	+2,7
9CJ	+25,2	-41,1	+22,3	-40,0	-2,9	+1,1
11CM	+29,1	-21,6	+27,3	-30,9	-1,8	-9,3
12CM	+25,3	-14,1	+24,7	-15,9	-0,6	-1,8
13CM	+21,3	-12,2	+21,5	-12,6	+0,2	-0,4
Média					-2,5	-1,2
Desvio Padrão					2,4	3,6
Amplitude					7,8	10,4

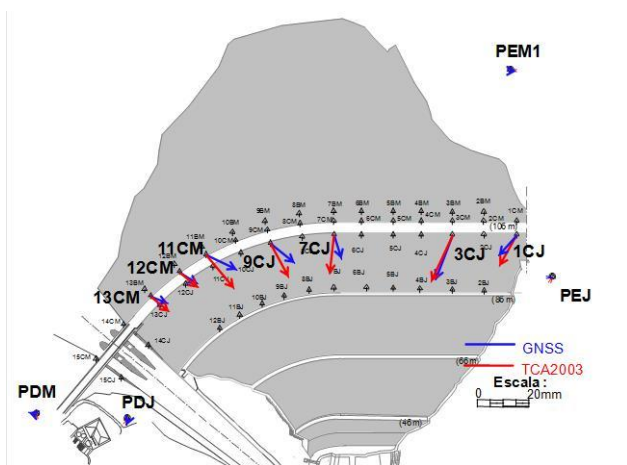


Figura 3 – Deslocamentos horizontais obtidos com o GNSS e com o taqueómetro TCA2003, entre Fevereiro de 2010 e Janeiro de 2011

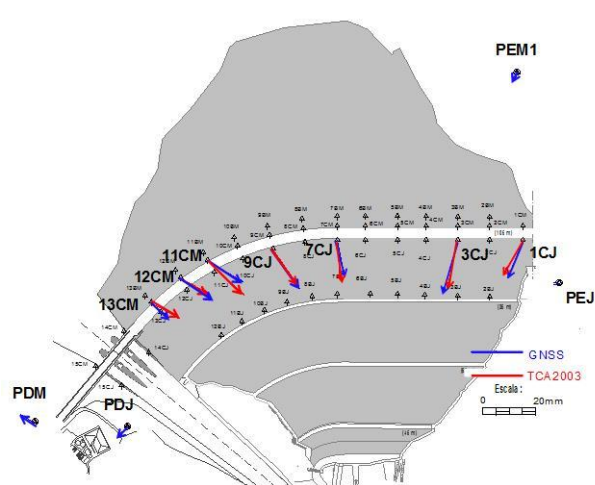


Figura 4 – Deslocamentos horizontais obtidos com o GNSS e com o taqueómetro TCA2003, entre Fevereiro de 2010 e Junho de 2011

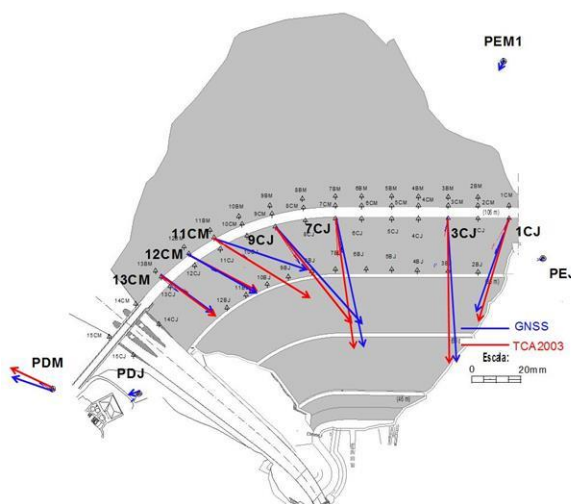


Figura 5 – Deslocamentos horizontais obtidos com o GNSS e com o taqueómetro TCA2003, entre Fevereiro de 2010 e Setembro de 2014

Conforme se pode ver na Figura 5, o ponto estação PDM sofreu um deslocamento significativo, não sendo por isso, ao contrário das épocas anteriores, considerado no cálculo dos deslocamentos observados pelo taqueómetro Leica TCA 2003 um ponto fixo. Em rigor, não foi um ponto constrangido com a variância de 0,01mm².

2.2 Altimetria

A determinação dos deslocamentos verticais (variação das cotas ou das altitudes dos pontos, entre duas épocas) na barragem de Odelouca é feita por nivelamento geométrico, com excepção dos pontos situados no paramento de montante, cujos deslocamentos verticais são determinados por nivelamento trigonométrico, uma vez que não há condições para a realização de nivelamento geométrico (LNEC, 2011b).

Os deslocamentos verticais referem-se a eixos com a direcção da vertical em cada ponto e sentido positivo dirigido para o Zénite: deslocamentos verticais positivos indicam empolamentos dos pontos, deslocamentos verticais negativos correspondem a assentamentos. No caso do GNSS, os deslocamentos verticais são obtidos das variações das altitudes elipsoidais medidas.



Embora a altitude elipsoidal dum ponto seja definida pela normal ao elipsóide nesse ponto, localmente a variação da altitude elipsoidal é igual, em valor, à variação da altitude ortométrica ou da cota. No Quadro 4 comparam-se as variações das altitudes elipsoidais (dh) medidas pelo GNSS com as variações das altitudes ortométricas (dH) obtidas pelo nivelamento geométrico, entre as épocas de Fevereiro de 2010 e Janeiro de 2011 (designada por 2011a), as épocas de Fevereiro de 2010 e Junho de 2011 (2011b) e as épocas de Fevereiro de 2010 e Setembro de 2014, respectivamente.

Quadro 4 – Deslocamentos verticais dos pontos observados com o GNSS, entre Fevereiro de 2010 e Janeiro de 2011 (2011a), entre Fevereiro de 2010 e Junho de 2011 (2011b) e entre Fevereiro de 2010 e Setembro de 2014 e as respectivas comparações com os deslocamentos obtidos com o nivelamento geométrico para as mesmas épocas

Ponto objecto	Desloc GNSS (mm)	Desloc nivelamento (mm)	Diferenças (mm)	Desloc GNSS (mm)	Desloc nivelamento (mm)	Diferenças (mm)	Desloc GNSS (mm)	Desloc nivelamento (mm)	Diferenças (mm)
	dh(2011a)	dH (2011a)	dh – dH	dh (2011b)	dH (2011b)	dh – dH	dh (2014)	dH (2014)	dh – dH
1CJ	-12,8	-11,8	-1,0	-12,2	-16,0	+3,8	-50,41	-47,2	+3,2
3CJ	-39,0	-39,6	+0,6	-48,3	-49,9	+1,6	-112,75	-110,0	+2,7
7CJ	-63,0	-65,2	+2,2	-80,0	-80,5	+0,5	-157,18	-168,6	-11,4
9CJ	-50,4	-51,5	+1,1	-68,3	-66,4	-1,9	-134,44	-140,5	-6,0
11CM	-24,6	-21,4	-3,2	-32,2	-28,1	-4,1	-52,95	-55,1	-2,2
12CM	-19,6	-15,6	-4,0	-19,2	-21,3	+2,1	-33,46	-42,9	-9,4
13CM	-11,5	-14,1	+2,6	-21,1	-19,3	-1,8	-43,24	-41,1	+2,2
	Média		-0,2	Média		+0,0	Média		-3,0
	Desvio padrão		2,6	Desvio padrão		2,6	Desvio padrão		5,6

Na Figura 6 comparam-se os deslocamentos verticais medidos pelos dois métodos utilizados, nivelamento geométrico e GNSS, referidos à época de Fevereiro de 2010, das épocas de Janeiro de 2011, Junho de 2011 e Setembro de 2014.

A comparação só é possível nos sete pontos do coroamento, onde os deslocamentos foram observados pelos dois métodos. Para a determinação dos deslocamentos verticais com o GNSS, fixou-se a altitude elipsoidal do ponto do quadro de referência PEJ. No entanto, a linha de nivelamento do coroamento está apoiada em quatro referências exteriores à barragem, duas em cada margem.

3. Discussão dos resultados e conclusões

Os resultados obtidos com o GNSS mostram que pode ser uma técnica expedita para medir com precisão os deslocamentos horizontais e verticais numa barragem de aterro. De facto, da comparação dos deslocamentos horizontais obtidos com o GNSS com os deslocamentos medidos com o taqueómetro TCA2003, obtêm-se desvios padrão entre 1,9 mm e 3,6 mm. Analogamente, na comparação dos deslocamentos verticais obtidos com o GNSS com os deslocamentos verticais medidos com o nivelamento geométrico, obtêm-se desvios padrão inferiores a 6 mm.

Uma importante contribuição da observação GNSS foi a detecção da instabilidade de um dos pontos que definem o quadro de referência da observação topográfica da barragem. De facto, em Junho de 2011 o ponto PDM apresentava um deslocamento em planimetria, inferior a 5mm na direcção horizontal, não sendo ainda, contudo, significativamente superior ao nível de incerteza dos deslocamentos medidos com o GNSS. A campanha de Setembro de 2014 veio confirmar a tendência do deslocamento do ponto PDM na mesma direcção, mas agora com uma amplitude de 1 cm, razão pela qual este ponto deixou estar estrangido com uma variância de 0,01mm².

A observação com o GNSS é mais simples do que a observação topográfica clássica, mas requer, no entanto, os mesmos cuidados de centralização e de nivelamento das bases e, ainda, a medição rigorosa das alturas das antenas GNSS em relação às

referências – não dispensando, portanto, duma equipa especializada e experiente para a observação. É obrigatória a utilização de equipamento de precisão geodésica, recomendando-se a utilização de antenas do tipo *Choke Ring*.

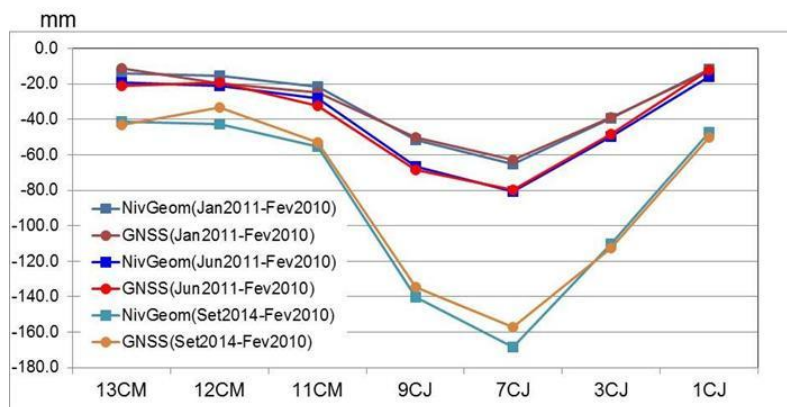


Figura 6 – Comparação dos deslocamentos verticais obtidos por nivelamento geométrico e por GNSS, referidos à época de Fevereiro de 2010, das épocas de Janeiro de 2011, Junho de 2011 e Setembro de 2014

Embora a observação expedita com o GNSS possa ser mais demorada do que a observação topográfica clássica (observação com o taqueómetro mais nivelamento geométrico), beneficia da importante vantagem de poder ser feita sob quaisquer condições meteorológicas e a qualquer hora do dia (não sendo necessário observar nas horas de menor refração atmosférica). A observação GNSS poder-se-á tornar ainda mais competitiva com a utilização de mais equipamentos a registar em simultâneo. Por exemplo, com um terceiro receptor GNSS (um fixo e dois móveis), o mesmo trabalho de observação será reduzido para metade do tempo.

Ensaio realizados no LNEC (Lima *et al.*, 2007 e Lima *et al.*, 2015) mostraram que aumentando a duração da sessão de observação com o GNSS os níveis de incerteza diminuem, sendo os melhores resultados obtidos quando as estações GNSS operam em modo contínuo (estações permanentes).

Referências Bibliográficas

- Lima, J. N., Henriques, M.J., Casaca, J. (2007). A Incerteza de Vectores GNSS em Função do Comprimento e da Duração da Sessão, Cartografia e Geodesia 2007, Lidel Edições Técnicas, pp 383 – 391.
- Lima, J.N., Conde, V., Candeias, H. (2015). Quality assessment of GNSS with short-length session in the displacement measurement of a large embankment dam, proceedings of Dam World 2015, Second international Dam World Conference, Portugal, Lisbon, LNEC, April 21-24 2015.
- LNEC, (2010). Barragem de Odelouca: Resultados da Observação Topográfica Efectuada em Fevereiro de 2010, Nota Técnica nº 14/2010 do DBB/NGA, LNEC, Lisboa, 2010.
- LNEC, (2011a). Barragem de Odelouca: Resultados da Observação Topográfica Efectuada em Janeiro de 2011, Nota Técnica nº 02/2011 do DBB/NGA, LNEC, Lisboa, 2011.
- LNEC, (2011b). Barragem de Odelouca: Resultados da Observação Topográfica Efectuada em Junho de 2011, Nota Técnica nº 14/2011 do DBB/NGA, LNEC, Lisboa, 2011.
- LNEC, (2011c). Observação GNSS dos deslocamentos superficiais numa barragem de aterro: O caso da barragem de Odelouca. Nota Técnica n.º 19/2011 do DBB/NGA, LNEC, 2011.
- LNEC, (2014a). Barragem de Odelouca: Resultados da observação topográfica efectuada em setembro de 2014. Nota Técnica n.º 19/2014 do DBB/NGA, LNEC, 2014.
- LNEC, (2014b). Barragem de Odelouca: Resultados da observação GNSS realizada em setembro de 2014. Nota Técnica n.º 50/2014 do DBB/NGA, LNEC, 2014.