



Novos Sistemas de Observação Geodésica de Barragens

André Belazaima Gonçalves
Fernandes

Mestrado em Engenharia Geográfica

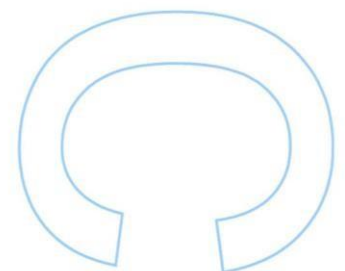
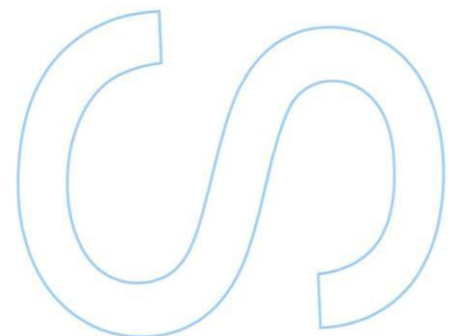
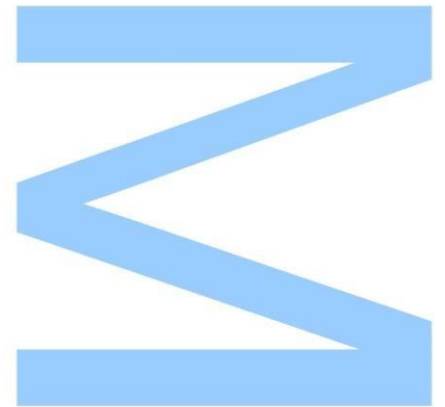
Departamento de Geociências, Ambiente e
Ordenamento de Território

Orientador

Professor Doutor José Alberto Álvares Pereira Gonçalves,
Professor Auxiliar, Faculdade de Ciências da Universidade
do Porto

Coorientadora

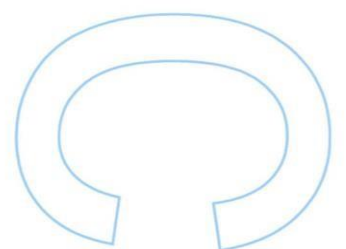
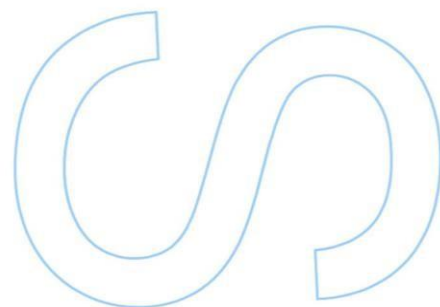
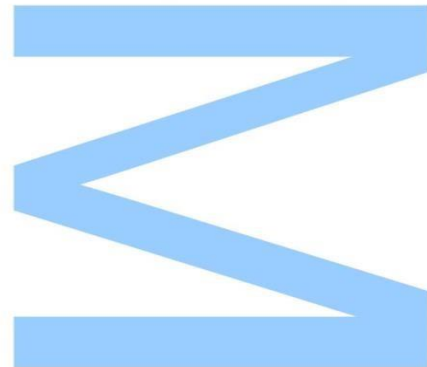
Eng.ª Elisa Almeida, EDP Produção





Todas as correções determinadas pelo júri, e só essas, foram efetuadas.
O Presidente do Júri,

Porto, ____/____/____



Agradecimentos

A conclusão desta dissertação representa o fim de um ciclo académico que muito me marcou, essencialmente por alguns erros que cometi na licenciatura, mas que no fim se traduzem numa grande lição de vida que caracteriza muito do que considero ser hoje. A ambição e a vontade que tive durante o mestrado, e que mantenho para alcançar um percurso profissional marcado pelo sucesso, muito se deve a todos os momentos que fui vivendo ao longo de todo este tempo. Para o sucesso nesta fase tao importante na minha vida, muitas pessoas contribuíram e por isso sinto o dever de lhes agradecer.

Ao Professor José Alberto Gonçalves, orientador da dissertação, agradeço todo o apoio prestado ao longo deste caminho. Foi um privilégio ter sido seu aluno durante todo o meu percurso académico.

À EDP – Gestão da Produção de Energia S.A, pela oportunidade concedida para realizar o meu estágio curricular. Ao longo dos 6 meses passei por uma experiencia desafiante, estimulante e enriquecedora a todos os níveis que muito contribuiu para me definir em termos profissionais e pessoais. Para tal, contribuíram de forma imensurável pessoas como a Eng.^a Elisa Almeida, Eng. Daniel Pimentel, Eng. David Fernandes, Dr. João Madeira, Carlos Pestana, João Barroso, Jofre Castro, Alexandre Barreto, entre outros.

À Eng.^a Elisa, coorientadora desta dissertação, pela transmissão de todos os conhecimentos, pelo incentivo constante, pela paciência e compreensão que sempre demonstrou ter ao longo de todo este tempo.

Ao Eng. Daniel Pimentel e ao Eng. David Fernandes, pelo incentivo, pela amizade e mais importante que tudo, por me terem ensinado tanto ao longo destes 6 meses.

Ao Dr. João Madeira pela amizade, embora não trabalhasse no grupo da Informação Geográfica, foi essencial para a minha adaptação e muito aprendi com ele também.

Ao Carlos Pestana, João Barroso, Jofre Castro e Alexandre Barreto pelos conselhos e por partilharem todos os conhecimentos adquiridos ao longo de uma vida.

A todos eles muito obrigado, as palavras serão sempre escassas para descrever o que é partilhar o dia-a-dia com grandes profissionais.

Aos meus pais, pelo apoio incondicional em todo o meu percurso académico.

À minha namorada, Marianne Felgueiras, pela paciência e essencialmente por estar sempre ao meu lado.

Aos meus colegas de curso por todos as experiencias que partilhamos.

O meu profundo e sentido agradecimento a todas as pessoas que contribuíram para a concretização desta dissertação, estimulando-me intelectual e emocionalmente.

Resumo

Esta dissertação vem na sequência do estágio curricular realizado na EDP – Gestão da Produção de Energia S.A, no âmbito do Mestrado em Engenharia Geográfica. O estágio teve uma duração de 6 meses, com início a 6 de Outubro de 2014 a 30 de Abril de 2015, orientado pela Eng^a Elisa Almeida (EDP Produção) e co-orientado pelo Professor Dr. José Alberto Gonçalves (FCUP).

O objetivo principal desta dissertação é apresentar os novos sistemas de observação geodésica implementados na construção dos mais recentes Aproveitamentos Hidroelétricos do grupo EDP, casos da barragem do Baixo Sabor (escalão de montante), barragem de Foz Tua e a barragem de Ribeiradio.

No âmbito da monitorização de barragens, as observações geodésicas surgem como uma família de métodos a utilizar, sendo de entre todos o conjunto mais “completo” (por ser de carácter absoluto e extensível à envolvente da estrutura). É-lhes atribuído um elevado grau de confiança e surgem como elemento agregador de outra instrumentação de ordem geotécnica dispersa pela estrutura. Estes métodos de observação estão constantemente a ser atualizados e modernizados, o que comprova a importância dada a esta independência e carácter absoluto

A evolução tecnológica que se fez sentir nas últimas décadas, abriu em definitivo novas perspetivas para a forma como os métodos geodésicos são implementados na observação de grandes estruturas. Por um lado, o aparecimento de estações totais com distanciómetros capazes de oferecer medições com precisão sub-milimétrica, levou a que, para além da observação angular, a observação linear (distâncias) assumia cada vez mais um papel determinante na forma como os sistemas de observação geodésica são concebidos. Por outro lado, a evolução das estações totais robotizadas e sistemas autónomos capazes de as gerir, veio alterar também o paradigma da alta dependência de recursos humanos associada às campanhas de observação geodésica até à data.

Ainda dentro do contexto dos métodos geodésicos, importa destacar também as constantes melhorias que os sistemas de geodesia espacial têm sofrido nos últimos anos. Essa evolução nos sistemas GNSS, levou a que esta técnica possa ser considerada para observação contínua e permanente do comportamento estrutural de grandes barragens.

O aparecimento destes novos sistemas irá dar resposta a novas necessidades, ou ainda à adaptação de sistemas existentes a novas realidades. Ao longo desta dissertação apresentam-se os últimos passos dados neste sentido pela EDP Produção,

na implementação dos novos sistemas de observação geodésica, e estudados neste estágio.

Palavras-chave: Sistema de Observação Geodésica, Baixo Sabor, Foz Tua, Ribeiradio, Estação total, GNSS

Abstract

This report is the outcome of the traineeship held in EDP - Management S.A Energy Production within the Master of Geotechnical Engineering. The stage had a duration of 6 months, started October 6, 2014 and ending on April 30, 2015, directed by the teacher Dr. José Alberto Gonçalves (Faculty of Sciences of University of Porto) and coordinated by Eng Elisa Almeida (EDP Produção) .

The main objective of this dissertation is to present the new geodetic observation systems implemented in the construction of the latest hydroelectric plants of the EDP Group, cases of the Baixo Sabor (amount of level), Foz Tua and the Ribeiradio. From the monitoring of dams, geodetic observations emerge as one of the methods to be used, and among all the most "complete" (being absolute nature and applies to the surrounding structure). A high degree of confidence is assigned to them, and they emerge as a factor adding to other instrumentation scattered by the structure. Observational methods are constantly being updated and modernized, which proves the importance given to this independence and absolute character.

Technological progress that was felt in the last decades has ultimately opened new prospects for how geodetic methods are implemented on the observation of large structures. On one hand, the new total stations with distance meters able to provide measurements of sub-millimeter accuracy, led, in addition to the angular observation, the linear observations (distances) to assume an increasingly important role in the manner geodetic observation systems are designed. On the other hand, the evolution of robotic total stations and autonomous systems able to manage them, also contributed to reduce high dependency paradigm of human resources associated with the geodetic observation campaigns to date.

Still within the context of geodetic methods, it is also important to highlight the constant improvements that the space geodesy systems have gone through in recent years. This evolution in the GNSS system has meant that this technique can be considered for continuous observation and permanent structural behavior of large dams.

The emergence of these new systems will respond to new needs, or the adaptation of existing systems to new realities. Throughout this dissertation are presented the latest steps in this direction by EDP Production in implementing the new geodetic observing systems, which were studied in this traineeship.

Keywords: Geodetic Observing Systems , Baixo Sabor , Foz Tua, Ribeiradio , total station , GNSS

Índice

Agradecimentos.....	i
Resumo	iii
Abstract	v
Índice de figuras	x
Índice de tabelas	xii
Acrónimos.....	xiii
1. Introdução.....	1
1.1. Caracterização do problema	2
1.2. Objetivos.....	4
1.3. Justificativa	4
1.4. Estrutura da dissertação	6
2. Barragens.....	8
2.1. Barragens em Portugal.....	8
2.2. Tipos de Barragens em Betão.....	10
2.2.1. Gravidade	10
2.2.2. Arco-Gravidade	11
2.2.3. Abóbada	12
2.3. Distribuição geográfica das barragens do grupo EDP	14
2.4. Segurança de barragens.....	15
2.4.1. Entidades envolvidas no controlo e segurança de barragens	16
2.4.2. Legislação Aplicável	17
3. Monitorização de barragens.....	19
3.1. Instrumentação para monitorização de estruturas.....	21
3.2. Monitorização Geodésica	21
3.3. Conceitos genéricos e métodos geodésicos aplicados à Monitorização de barragens ..	23
3.3.1. Poligonação.....	24
3.3.2. Triangulação e Trilateração.....	25
3.3.3. Irradiação.....	26
3.3.3.1. Irrradiada simples	26
3.3.3.2. Intersecção direta	26
3.3.4. Nivelamento Geométrico	27
4.1. Redes geodésicas para monitorização	29
4.1.1. Materialização da Rede.....	30
4.1.2. Estabilidade dos pontos de referência	31
4.2. Instrumentação Geodésica	32
4.2.1. Níveis óticos e Digitais	32
4.2.2. Estações totais	32

4.3.	Descrição dos principais erros que afetam as medições com estações totais	34
4.4.	Classificação dos erros	34
4.4.1.	Erros grosseiros	34
4.4.2.	Erros aleatórios	35
4.4.3.	Erros sistemáticos	35
4.5.	Principais erros instrumentais	35
4.5.1.	Erro devido a não horizontalidade do eixo secundário	36
4.5.2.	Erro devido à inclinação do eixo de colimação	37
4.5.3.	Erro devido à não verticalidade do eixo principal.....	37
4.5.4.	Erro de colimação do ponto zero ATR	37
5.	Automatização na monitorização de estruturas	40
5.1.	Monitorização automática contínua com recurso a uma Estação Total	41
5.2.	GNSS	43
5.2.1.	Casos de GNSS aplicado a monitorização estrutural de Barragens	44
6.	Descrição dos Sistemas de Observação Geodésica da barragem do Baixo Sabor, Foz Tua e Ribeiradio	47
6.1.	Aproveitamento Hidroelétrico do Baixo Sabor	47
6.1.1.	Enquadramento	47
6.1.2.	Sistema de Observação Geodésica.....	48
6.1.3.	Altimetria.....	49
6.1.3.1.	Descrição do Sistema.....	49
6.1.3.2.	Metodologia operativa	50
6.1.4.	Planimetria.....	51
6.1.4.1.	Descrição do Sistema.....	51
6.1.4.2.	Poligonais	51
6.1.4.3.	Metodologia operativa	53
6.1.5.	Convergência das encostas a montante e a jusante da barragem.....	54
6.1.6.	GNSS.....	54
6.1.6.1.	Rede de Estações GNSS	56
6.1.6.2.	Equipamento GNSS	57
6.2.	Aproveitamento Hidroelétrico de Foz Tua.....	60
6.2.1.	Enquadramento	60
6.2.2.	Sistema de Observação Geodésica.....	61
6.2.3.	Altimetria.....	62
6.2.3.1.	Descrição do Sistema.....	62
6.2.4.	Planimetria.....	63
6.2.4.1.	Poligonais	63
6.2.4.2.	Sistema Automático de Monitorização Geodésica.....	64
6.2.4.2.1.	Estação Total.....	67
6.2.4.2.2.	Prismas das referências	68

6.2.4.2.3.	Prismas dos pontos objeto	69
6.2.4.2.4.	Sensor meteorológico.....	70
6.2.4.2.5.	Sistema de comunicação	70
6.2.4.3.	Função do Sistema.....	71
6.3.	Aproveitamento Hidroelétrico de Ribeiradio – Ermida	72
6.3.1.	Enquadramento	72
6.3.2.	Sistema de Observação Geodésica.....	73
6.3.3.	Altimetria.....	73
6.3.3.1.	Metodologia operativa	74
6.3.4.	Planimetria.....	75
6.3.4.1.	Metodologia operativa	75
6.3.5.	Implementação do Sistema de Observação Geodésica	76
6.3.5.1.	Rede Geodésica.....	77
6.3.6.1.	Equipamentos e Materiais	79
7.	Considerações finais	83
8.	Bibliografia	85

Índice de figuras

FIGURA 1 – BARRAGEM DE CASTELO DE BODE	9
FIGURA 2 - FORÇAS EXERCIDAS SOBRE UMA BARRAGEM DO TIPO GRAVIDADE	10
FIGURA 3 – BARRAGEM DO CARRAPATELO	11
FIGURA 4 - FORÇAS EXERCIDAS NUMA BARRAGEM DO TIPO ARCO-GRAVIDADE	11
FIGURA 5 – BARRAGEM DE RIBEIRADIO	12
FIGURA 6 - FORÇAS EXERCIDAS NUMA BARRAGEM DO TIPO ABÓBODA.....	13
FIGURA 7 - BARRAGEM DO BAIXO SABOR (ESCALÃO DE MONTANTE)	13
FIGURA 8 - BARRAGEM DA AGUIEIRA	ERRO! MARCADOR NÃO DEFINIDO.
FIGURA 9 - DISTRIBUIÇÃO GEOGRÁFICA DAS BARRAGENS DO GRUPO EDP	14
FIGURA 10 – ESQUEMA DE UMA POLIGONAL	25
FIGURA 11 – MÉTODO DE IRRADIAÇÃO	26
FIGURA 12 – NIVELAMENTO GEOMÉTRICO	27
FIGURA 13 - ESQUEMA ILUSTRATIVO DE REDE GEODÉSICA.....	31
FIGURA 14 - EXEMPLO DE UM NÍVEL DIGITAL.....	32
FIGURA 15 - EXEMPLO DE ESTAÇÃO TOTAL	33
FIGURA 16 - REPRESENTAÇÃO DOS EIXOS QUE COMPÕEM UMA ESTAÇÃO TOTAL	36
FIGURA 17 - EXEMPLOS DE ERROS INSTRUMENTAIS	38
FIGURA 18 - ESTAÇÃO TOTAL ROBOTIZADA NA BARRAGEM DE FOZ TUA	41
FIGURA 19 – BARRAGEM DO BAIXO SABOR (ESCALÃO DE MONTANTE)	47
FIGURA 20 - EXEMPLO DE UM NÍVEL	50
FIGURA 21 - EXEMPLO DE UMA MIRA CÓDIGO DE BARRAS	50
FIGURA 22 - EXEMPLO DE RETORREFLETOR ESTACIONADO EM CACHORRO METÁLICO	52
FIGURA 23 - EXEMPLO DE PILAR NUMA GALERIA DE VISITA.....	52
FIGURA 24 - EXEMPLO DE UMA GALERIA DE VISITA DA BARRAGEM DO BAIXO SABOR.....	53
FIGURA 25 - EXEMPLO DE ESTAÇÃO EM BASE DE PAREDE NUMA GALERIA DE VISITA	53
FIGURA 26 - FIGURA ILUSTRATIVA DO SISTEMA DE OBSERVAÇÃO DA CONVERGÊNCIA DAS ENCOSTAS..	54
FIGURA 27 - LOCALIZAÇÃO DOS PONTOS OBJETO NO CORPO DA BARRAGEM PARA OBSERVAÇÃO POR GNSS	55
FIGURA 28 - REPRESENTAÇÃO DOS PONTOS QUE CONSTITUEM O SISTEMA DE OBSERVAÇÃO GEODÉSICA POR GNSS.....	56
FIGURA 29 - BARRAGEM DE FOZ TUA	60
FIGURA 30 - EXEMPLO DE GALERIA DE VISITA EM FASE FINAL DE CONSTRUÇÃO NA BARRAGEM DE FOZ TUA	63
FIGURA 31 - EXEMPLO DE ESTACIONAMENTO DA ESTAÇÃO TOTAL PARA OBSERVAÇÃO DA POLIGONAL NA BARRAGEM DE FOZ TUA	64
FIGURA 32 - ESTAÇÃO TOTAL ROBOTIZADA INSTALADA NA BARRAGEM DE FOZ TUA.....	65
FIGURA 33 - ESTAÇÃO TOTAL ROBOTIZADA LEICA TM50.....	68
FIGURA 34 - CONJUNTO DO PRISMA GPR112	68
FIGURA 35 - LOCALIZAÇÃO DE DUAS REFERÊNCIAS	69
FIGURA 36 - PRISMA GMP104	69
FIGURA 37 - BARRAGEM DE RIBEIRADIO.....	72
FIGURA 38 - EXEMPLO DE EXTENSÓMETRO DE VARAS VERTICAIS COM PONTOS DE REFERÊNCIA PARA FECHO DE LINHA DE NIVELAMENTO.....	73
FIGURA 39 - EXEMPLO DE TACO DE NIVELAMENTO E RESPECTIVA CAIXA DE PROTEÇÃO.....	73
FIGURA 40 - ALÇADO COM A LOCALIZAÇÃO APROXIMADA DOS PONTOS OBJETO E DOS PONTOS DE REFERÊNCIA	74
FIGURA 41 - REPRESENTAÇÃO ESQUEMÁTICA DOS PONTOS OBJETO COLOCADOS NO PARAMENTO.....	75
FIGURA 42 - REPRESENTAÇÃO DA REDE GEODÉSICA DA BARRAGEM DE RIBEIRADIO.....	77
FIGURA 43 - ESQUEMA DA CONSTITUIÇÃO E CONSTRUÇÃO DO PILAR	78
FIGURA 44 - PILAR DE REFERÊNCIA PARA OBSERVAÇÃO DA BARRAGEM	78

FIGURA 45 - ESTAÇÃO TOTAL, LEICA TM30	80
FIGURA 46 – PRISMA GPH1P	80
FIGURA 47 – PRISMA GMP104	80
FIGURA 48 – PRISMA GPH1P ESTACIONADO SOBRE O PILAR DE REFERÊNCIA E ESTAÇÃO METEOROLÓGICA	81
FIGURA 49 – PRISMA GMP104 INSTALADO NO PARAMENTO	81
FIGURA 50 – NIVEL LEICA DNA03	81

Índice de tabelas

TABELA 1 – ERROS INSTRUMENTAIS	38
--------------------------------------	----

Acrónimos

AHBS - Aproveitamento Hidroelétrico do Baixo Sabor
 AHFT – Aproveitamento Hidroelétrico de Foz Tua
 AHRE - Aproveitamento Hidroelétrico de Ribeiradio-Ermida
 APA - Agência Portuguesa do Ambiente
 ATR - Automatic Target Recognition
 DEM - Distanciómetros eletromagnéticos
 EDP – Energias de Portugal
 GDJ - Galeria de drenagem de jusante
 GGD – Galeria Geral de Drenagem
 GNSS - Global Navigation Satellite System
 GPS - Global Positioning System
 GV – Galeria de Visita
 INAG - Instituto Nacional da Água
 LNEC – Laboratório Nacional de Engenharia Civil
 LNG - Linha de nivelamento geométrico
 MNQ - Método dos Mínimos Quadrados
 NMC - Nível de máxima cheia
 NPA - nível de pleno armazenamento
 PD – Posição direta
 PI – Posição inversa
 PO – Ponto objeto
 RINEX - Receiver Independent Exchange Format
 RPB - Regulamento de pequenas barragens
 RSB – Regulamento de segurança de barragens
 SOG – Sistema de observação geodésica

CAPÍTULO I

Introdução

1. Introdução

A EDP, Energias de Portugal, possui mais de 50 grandes barragens em betão como parte integrante do seu Centro Produtor Hidroelétrico, distribuídas geograficamente ao longo de todo o país. De forma a cumprir a legislação nacional existente sobre segurança de barragens e no sentido de detetar atempadamente eventuais problemas estruturais, todas elas são observadas por diversos métodos de algum modo complementares, incluindo os geodésicos (Almeida, et al., 2015). Estes, são essenciais para permitir a integração de conjuntos de pontos representativos não só da estrutura principal, mas também caracterizadores de uma envolvente, dentro e fora da zona de influência (Almeida, et al., 2015). Os deslocamentos de um conjunto discreto e representativo de pontos da estrutura, fundações e área envolvente são assim variáveis de controlo consideradas fundamentais para a análise do comportamento das grandes barragens (CASACA, 2005). Desta forma, os métodos geodésicos caracterizam-se e evidenciam-se dos outros métodos, por permitirem que os deslocamentos a quantificar não só possuam um carácter relativo, mas também um carácter absoluto. Assim, independentes dos restantes métodos de observação, estes assumem especial importância no estudo do comportamento estrutural das barragens, providenciando um modo de os relacionar, integrando-os e verificando-se mutuamente (Almeida, et al., 2015).

Os Sistemas de Observação Geodésica de uma grande barragem em Portugal, são normalmente compostos por dois sistemas independentes, planimétrico e altimétrico. Esta separação, deve-se à necessidade de quantificar separadamente os deslocamentos horizontais e verticais dos pontos objeto (PO) que melhor caracterizam o comportamento da estrutura. Assim, os PO são materializados de forma distinta nos dois sistemas, sendo que as grandezas observadas, bem como o correspondente equipamento de observação e método de observação, são também distintos (Almeida, et al., 2015)

No contexto da observação geodésica de barragens, a quantificação dos deslocamentos apoia-se sempre em observações de pontos de referência e consideram sempre uma campanha $E0$ como época de referência. Geralmente, e sempre que possível, esta é estabelecida e observada preferencialmente antes do primeiro enchimento da albufeira. A época de observação correspondente à campanha E_n fornece os vetores de deslocamento entre estes dois momentos distintos da vida da estrutura (Almeida, et al., 2015).

No caso da EDP, existe, assim, um histórico importante de todas as campanhas de observação geodésica realizadas em cada barragem, que é preservado e continuado ao longo do tempo.

A conceção dos sistemas de observação geodésica e a estimação dos deslocamentos são tarefas complexas baseadas em modelos estocásticos. A utilização destes modelos que representam os erros de observação em conjunto com o ajustamento pelo método dos mínimos quadrados, nomeadamente por variação de coordenadas, permite a estimação dos deslocamentos e o seu controlo de qualidade por intermédio de testes estatísticos.

A escolha de um conjunto adequado de pesos (grau de confiança atribuído) é muito importante, de forma a garantir um equilíbrio entre o peso atribuído aos ângulos e distâncias e também a caracterizar qualidade dos pontos de referência (Almeida, et al., 2015).

Recentemente, com o fim da construção dos Aproveitamentos Hidroelétricos (AH) de Ribeiradio-Ermida, Baixo Sabor (Escalões de Montante e Jusante) e aproximação do fim de construção de Foz Tua, foram implementados novos sistemas de observação geodésica (SOG) em cada uma das 5 barragens. Estes, serão objeto de estudo ao longo desta dissertação com ênfase para os pioneiros passos que foram dados pela EDP Produção no sentido da inovação e modernização de técnicas e métodos de observação geodésica

1.1. Caracterização do problema

Nas grandes estruturas em betão, com destaque para as barragens por terem associado um risco potencial significativo, as atividades de observação e controlo de segurança assumem particular importância em todas as fases de vida destas obras, incluindo o projeto, a construção e a exploração. Nos últimos anos, a crescente valorização do estudo do comportamento das obras de engenharia, em especial as barragens, tem assumido particular importância procurando modernizar técnicas e metodologias de observação.

Dentro deste contexto, a EDP, como empresa líder no sector da energia e amplamente reconhecida pela criação de valor, responsabilidade e inovação, segue invariavelmente esta tendência procurando sempre as soluções que melhor garantem a segurança dos seus ativos. Com mais de 50 grandes barragens como parte integrante dos Centros Produtores Hidroelétricos, a EDP possui a notável histórico de ausência acidentes, possuindo ainda uma quantidade apreciável de dados acerca da segurança de quase todos os Aproveitamentos Hidroelétricos que explora atualmente.

A monitorização de uma barragem é feita por variados métodos, que se complementam e validam mutuamente. Estes, de forma geral, estão divididos em dois grupos distintos: a instrumentação de ordem geotécnica (fios de prumo, extensómetros, etc), e os métodos geodésicos. Sobre os métodos geodésicos, a constante evolução tecnológica muito tem contribuído para o surgimento de novas técnicas de observação.

A implementação de um sistema de observação geodésica, é um desafio bastante complexo, que se pode considerar um processo evolutivo, desde a fase da idealização do sistema até à fase da sua materialização. Quando se idealiza um sistema de observação geodésica, existem uma série de fatores que devem ser considerados, que podem, ou não, validar a exequibilidade de um determinado método de observação.

A procura de uma redundância apropriada para as observações geodésicas de forma a aumentar a fiabilidade de um determinado sistema, bem como a otimização de procedimentos de observação e equipamentos é um desafio constante para a melhoria dos sistemas de observação geodésica.

Seguindo a tendência da evolução, e não desprezando a fiabilidade de todos os sistemas por técnicas de geodesia convencionais, que tão boas provas tem dado ao longo dos anos, a EDP procurou as melhores soluções disponíveis, no contexto da observação geodésica para as novas barragens. Como consequência, nos novos Aproveitamentos Hidroelétricos foram instalados sistemas de observação geodésica que se caracterizam pela inovação.

Na barragem de Ribeiradio, foram instalados prismas no paramento, que permitem além da observação angular para os mesmos, a observação linear, ou seja, permite a incorporação da medida das distâncias, aumentando significativamente a redundância nas observações e a robustez do sistema. Este facto, por si só, não constitui o único fator de inovação. Pela primeira vez, a observação geodésica da barragem é feita com uma estação total em modo automático, através da funcionalidade de reconhecimento automático de prismas.

No caso da barragem do Baixo Sabor, de encontro com a evolução das técnicas por geodesia espacial e também pelo local da barragem o permitir, foi instalado um sistema de observação geodésica com base no Sistema Global de Navegação por Satélite (GNSS), que permite a monitorização continua e permanente da barragem. Um sistema deste género, não considerando algumas experiências de âmbito académico, é o primeiro a ser instalado em Portugal para a monitorização de uma barragem.

No caso de Foz Tua, último sistema de observação geodésica a ser implementado, pela primeira vez a observação geodésica de uma barragem da EDP é feita com recurso a uma Estação Total robotizada, que permite realizar medições para os prismas

instalados no paramento da barragem de forma automática e contínua (24h). Este sistema, caracteriza-se por ser completamente independente de influência humana na fase de operação, sendo aliás controlado de forma remota.

Estes novos sistemas de observação geodésica implementados, marcam um ponto de viragem na realidade da observação geodésica de barragens em Portugal, e constituem um passo importante para a modernização e inovação dos métodos geodésicos aplicados à monitorização de barragens.

1.2.Objetivos

Este trabalho foi realizado em estágio curricular na EDP - Gestão de Produção de Energia, S.A., no departamento de Estudos e Engenharia de Equipamentos, em particular no grupo de Informação Geográfica que, entre outras atividades, é responsável pela observação geodésica de mais de 50 aproveitamentos hidroelétricos.

Esta dissertação teve como objetivo principal apresentar os novos métodos de observação geodésica implementados nos mais recentes aproveitamentos hidroelétricos do Grupo EDP, casos de Ribeiradio- Ermida, Baixo Sabor e Foz Tua. Nos três casos, foram implementados sistemas de observação geodésica que, de certa forma, se distinguem pela inovação no método ou técnica de observação. Ao longo da dissertação, serão apresentados de forma detalhada, sustentados com a fundamentação teórica ligada a conceção dos mesmos.

1.3.Justificativa

São diversos os motivos que justificam e motivam a apresentação de novas técnicas e métodos de observação geodésica, mas, essencialmente deve-se à extrema importância que os métodos geodésicos podem assumir no controlo de estruturas e como a evolução tecnológica tem contribuído para evolução dos mesmos. No caso particular de barragens, as campanhas de observação geodésica, tradicionalmente, são uma tarefa de trabalho intensivo e altamente dependente da especialização da equipa de observação. Estes factos, sugerem uma necessidade do desenvolvimento de técnicas e métodos de observação de forma a automatizar a recolha de dados e conseqüentemente reduzir a dependência de recursos humanos, tornando a observação mais eficaz e mais económica.

Ao longo dos últimos anos, houve inúmeros avanços tecnológicos, que podem mudar este paradigma da alta dependência de recursos humanos e permitem explorar novas realidades na forma como a observação geodésica de barragens é realizada atualmente.

Dentro deste contexto, destacam-se dois pontos marcantes: o primeiro está relacionado com o aparecimento da nova geração de Estações Totais e o segundo com desenvolvimento de técnicas por geodesia espacial, baseadas em Sistemas Globais de Navegação por satélite (GNSS).

O aparecimento da nova geração de Estações Totais que, além de permitirem medir direções angulares horizontais e ângulos verticais, também passaram a incorporar distanciômetros de alta precisão, foi o primeiro passo de grande relevância dado neste sentido da modernização. No seguimento da evolução destes instrumentos, surgiram as Estações Totais robotizadas, com tecnologia de reconhecimento automático de prismas ATR (Automatic Target Recognition), que permitem operar sistemas de observação geodésica de forma remota, reduzindo significativamente a necessidade de recursos humanos e conseqüentemente os custos de observação. Esta evolução tecnológica, marca invariavelmente um ponto de viragem sobre a forma como a observação geodésica é realizada em grandes estruturas, sendo que as barragens não são exceção, como prova o novo sistemas de observação geodésica implementado na recente barragem de Foz Tua.

O exponencial desenvolvimento do GNSS, tem impulsionado aplicação desta técnica na monitorização de barragens e abriu definitivamente novas perspectivas para os levantamentos de precisão. Atualmente, com a evolução tecnológica de todas as componentes que integram um sistema deste género (recetores, antenas, etc), aliado ao aumento da robustez da constelação espacial que constitui, o GNSS é uma técnica que já provou ser válida para a observação geodésica de barragens. Assim, começa atualmente a exercer um papel importante na monitorização de barragens, seja para a determinação de deslocamentos de pontos na estrutura, ou na definição e controlo de redes geodésicas de referência.

A exploração de todos os avanços tecnológicos levou ao surgimento de novos métodos de observação geodésica aplicados em barragens, assumindo-se estes, como uma das ferramentas fundamentais para a monitorização da segurança de barragens.

1.4. Estrutura da dissertação

A presente dissertação desenvolve-se ao longo de sete capítulos.

O **primeiro capítulo** é composto pela introdução, caracterização do problema, objetivo justificativa e por fim a estrutura da dissertação.

O **segundo capítulo** é sobre o panorama nacional de barragens e aborda ainda a realidade nacional sobre segurança de barragens, descrevendo as entidades envolvidas e a Legislação Nacional que vigora atualmente em Portugal.

O **terceiro capítulo** inicia o tema da monitorização de barragens, dando destaque à importância dos métodos geodésicos na monitorização da segurança de barragens e descreve os principais métodos geodésicos utilizados para a observação geodésica de barragens.

O **quarto capítulo** fala de forma genérica de alguns aspetos a ter em conta na implementação de um sistema de observação geodésica, dos equipamentos utilizados e os principais erros a considerar na utilização dos mesmos.

O **quinto capítulo** introduz o tema das novas metodologias de observação aplicadas à observação geodésica de barragens.

O **sexto capítulo** apresenta os três casos de estudo, descrevendo detalhadamente os sistemas de observação geodésicos implementados em cada barragem.

O **sétimo e último capítulo** corresponde as considerações finais sobre o tema da observação geodésica aplicada a monitorização de barragens.

CAPÍTULO II

Estado da arte sobre barragens e segurança de barragens

2. Barragens

De acordo com a definição adiantada pelo Regulamento Segurança de Barragens (RSB), barragem é “o conjunto formado pela estrutura de retenção, fundação, zona vizinha a jusante, órgãos de segurança e exploração e albufeira, com exceção dos diques fluviais e costeiros e ensecadeiras que não permaneçam para além do período de construção” (APA ,2016).

Portugal é um país com elevado potencial hídrico e desde muito cedo percebeu a importância da gestão e exploração dos recursos hídricos. Segundo (APA,2016) existe um conjunto imenso de razões que justificam a construção de barragens onde se destacam as seguintes:

- Rega
- Produção de energia
- Abastecimento de água, para usos domésticos e industriais
- Mitigação de cheias
- Regularização de caudal de rios
- Outras

Atualmente, as barragens são encaradas como projetos de múltiplos fins que além de todos os benéficos energéticos inerentes à construção das mesmas, potenciam o desenvolvimento económico do país e em particular às regiões que as envolvem. No entanto, paralelamente aos importantes benefícios que proporcionam, descritos anteriormente, as barragens também têm associados impactos negativos, não só de carácter ambiental, mas também de carácter social como por exemplo o deslocamento de pessoas, entre outras. Estes factos, levam a que as preocupações com o ambiente assumam um papel de destaque e sejam sempre consideradas desde a fase de conceção até à exploração destas obras. (APA, 2016)

2.1. Barragens em Portugal

Em Portugal, os recursos hídricos superficiais são dependentes das características geográficas, climáticas e fisiográficas, e as disponibilidades hídricas têm, em média, valores apreciáveis no país. (APA, 2016)

A disposição irregular destes recursos justifica em parte, a atual distribuição geográfica das barragens no país, com maior presença de Aproveitamentos Hidroelétricos a Norte.

No Sul, a presença de barragens está maioritariamente relacionada com o abastecimento público de água e com o regadio. A fraca presença de cursos de água naturais e o baixo registo de pluviosidade registados a Sul, justificam a necessidade da criação de reservatórios artificiais de água, como serve de exemplo, a barragem do Alqueva.

O abastecimento público a partir de albufeiras existe em várias cidades portuguesas, desde logo em Lisboa, a partir da albufeira de Castelo de Bode, representada na figura 1.



Figura 1 – Barragem de Castelo de Bode

No Norte do País, onde os recursos são mais abundantes, mais regulares e onde as próprias características fisiográficas são mais favoráveis para a construção de barragens, construíram-se aproveitamentos hidroelétricos para a produção de energia, tanto de regularização como de fio de água. Em Portugal, segundo a definição do RSB existem cerca de 250 grandes barragens, ou seja, com altura superior a 15 metros ou armazenamento superior a 1 hm³ (1 milhão de metros cúbicos), onde a maior parte destas está concentrada a Norte do país, justificado pelas razões referidas anteriormente (APA, 2016).

2.2. Tipos de Barragens em Betão

A forma como as barragens de betão são projetadas e posteriormente construídas tem evoluído significativamente ao longo dos últimos anos, acompanhando a evolução dos materiais utilizados e técnicas de construção. Hoje, existem variados tipos de barragens de betão, que se distinguem não só pela própria geometria, mas também pelo seu funcionamento estrutural.

2.2.1. Gravidade

As barragens de gravidade são barragens que resistem à impulsão horizontal da água exclusivamente pelo seu peso próprio, transmitindo as tensões à fundação dos blocos por fluxos em planos verticais como se ilustra na figura 2. A utilização de contrafortes a jusante permite aligeirar a parede da barragem, fazendo com que estas não sejam muito exigentes em relação à qualidade da rocha do maciço de fundação. Adequam-se a serem implantadas em vales largos embora possam ser também construídas em vales estreitos (Jesus, J., 2009).

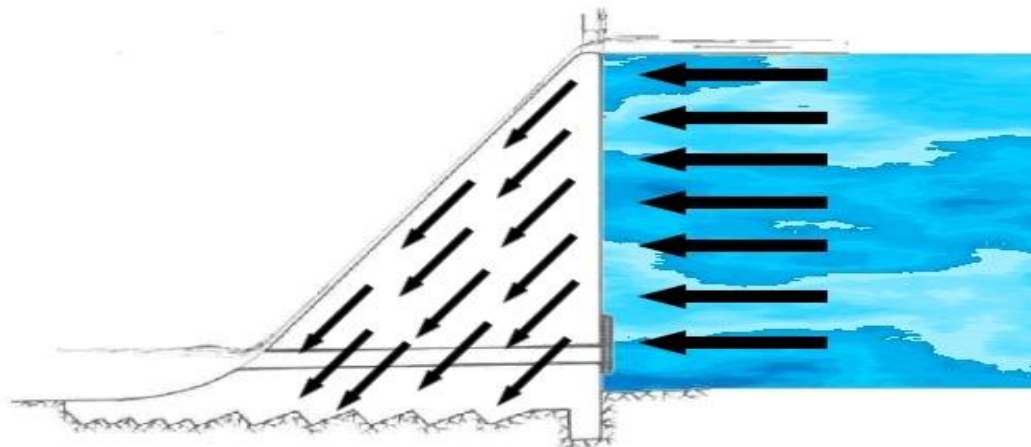


Figura 2 - Forças exercidas sobre uma barragem do tipo gravidade (Fonte: Jesus, J., 2009)

A barragem do Carrapatelo, representada na figura 3, é um exemplo de uma barragem do tipo gravidade.



Figura 3 – Barragem do Carrapatelo

2.2.2. Arco-Gravidade

Em vales muito largos, torna-se por vezes necessário arranjar uma solução intermédia entre o perfil gravidade e a abóbada. As barragens arco-gravidade têm a particularidade de apresentarem uma solução mista que concilia as vantagens entre o perfil de gravidade e de abóbada. Assim, estas barragens caracterizam-se por descreverem um arco em planta e uma secção transversal triangular típica das barragens gravidade, com uma ligeira inclinação a montante e uma inclinação a jusante menos acentuada, como se ilustra na figura 4. (Jesus, J., 2009)

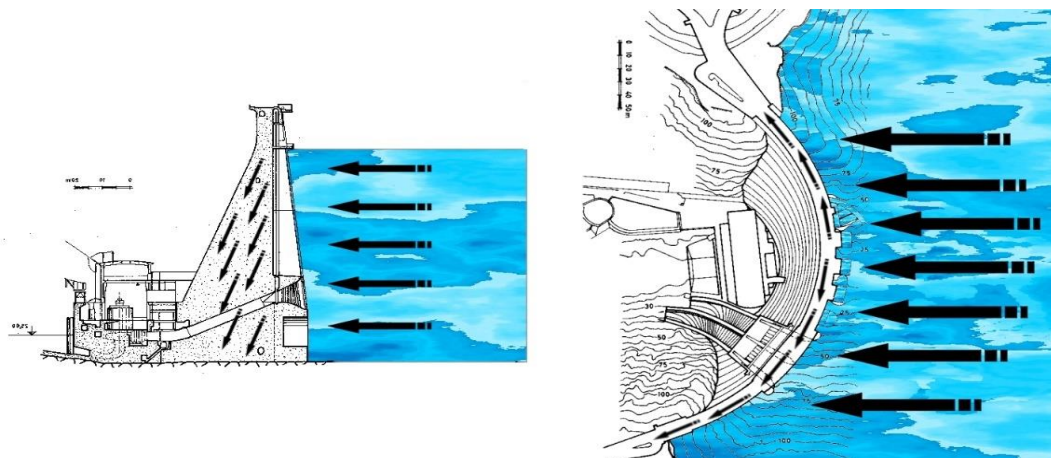


Figura 4 - Forças exercidas numa barragem do tipo Arco-Gravidade (Fonte: Jesus, J., 2009)

Em Portugal existem varias barragens deste tipo, entre as quais, se pode destacar a contruída mais recentemente, a Barragem de Ribeiradio representada na figura 5.



Figura 5 – Barragem de Ribeiradio

2.2.3. Abóbada

As barragens abóbada, também designadas por barragens de dupla curvatura são aquelas que se distinguem por necessitarem para a sua estabilidade da contribuição do efeito da reação dos encontros (encostas do vale), onde a forma é essencial para a sua estabilidade. Este tipo de barragem, enquadra-se e adequa-se preferencialmente em vales em V relativamente estreitos. Apresentam uma secção transversal e longitudinal em arco, o que permite reduzir substancialmente a espessura da abóbada e o volume da barragem (Jesus, J., 2009). Destacam-se assim entre os diversos tipos de barragens, por serem as mais esbeltas, por necessitarem de menos quantidade de betão para a sua construção, mas também por serem as mais exigentes na fase de projeto e construção.

As barragens em abóbada distribuem a maior parte dos esforços para o maciço de fundação lateral, por efeito de arco o que permite tirar um melhor partido das propriedades mecânicas do betão como se ilustra na figura 6 (Jesus, J., 2009). A escolha do local destas barragens deve responder a vários critérios relacionados com a geometria do vale, as condições topográficas, a qualidade da rocha de fundação e dos encontros e as condições geológicas e geotécnicas. (Jesus, J., 2009).

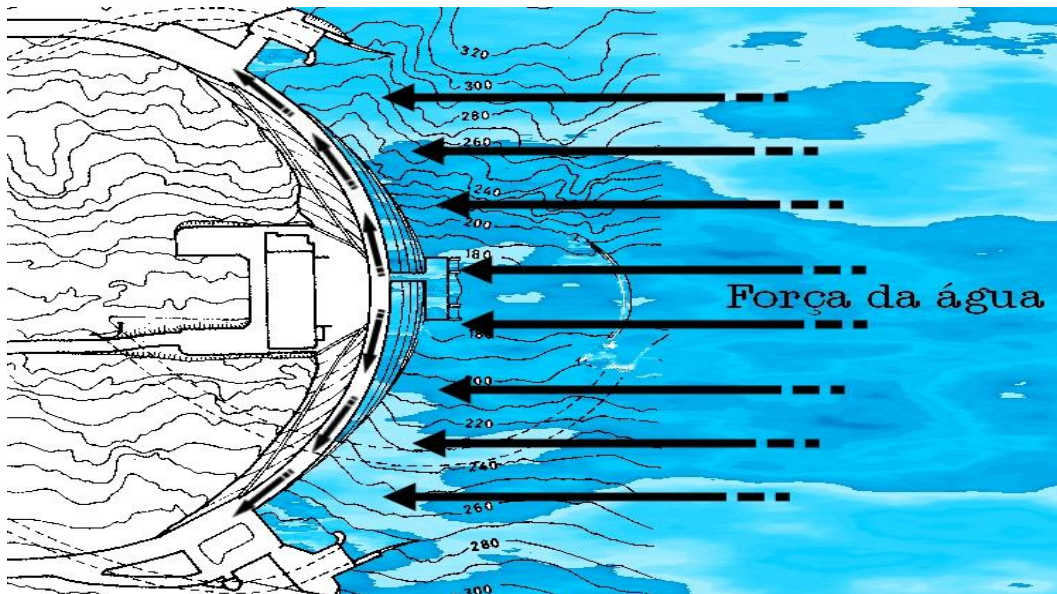


Figura 6 - Forças exercidas numa barragem do tipo abóboda (Fonte: Jesus, J., 2009)

Em Portugal existem diversos exemplos de barragens abóbada de dupla curvatura, e muito recentemente foram construídas mais duas barragens deste tipo, os casos do Baixo Sabor (escalão de montante), representada na figura 7, e o caso da barragem de Foz Tua.



Figura 7 - Barragem do Baixo Sabor (escalão de montante)

2.3. Distribuição geográfica das barragens do grupo EDP

A EDP, Energias de Portugal, possui mais de 50 grandes barragens como parte integrante dos seus Centros Produtores Hidroelétricos. Como referido anteriormente, a presença de recursos hídricos é relativamente abundante em Portugal. Como o clima no Norte é mais temperado e também mais chuvoso existe maior presença de recurso hídricos com potencial de exploração, o que por consequência resulta e justifica uma maior abundância de projetos hidroelétricos a Norte do país. Em contraste com esta realidade, a Sul, a escassez de pluviosidade leva a que exista uma necessidade elevada de retenção de água o que justifica a presença de barragens, embora em número significativamente inferior às existentes a norte. A figura 9, representa a distribuição geográfica das barragens do grupo EDP, em Portugal.

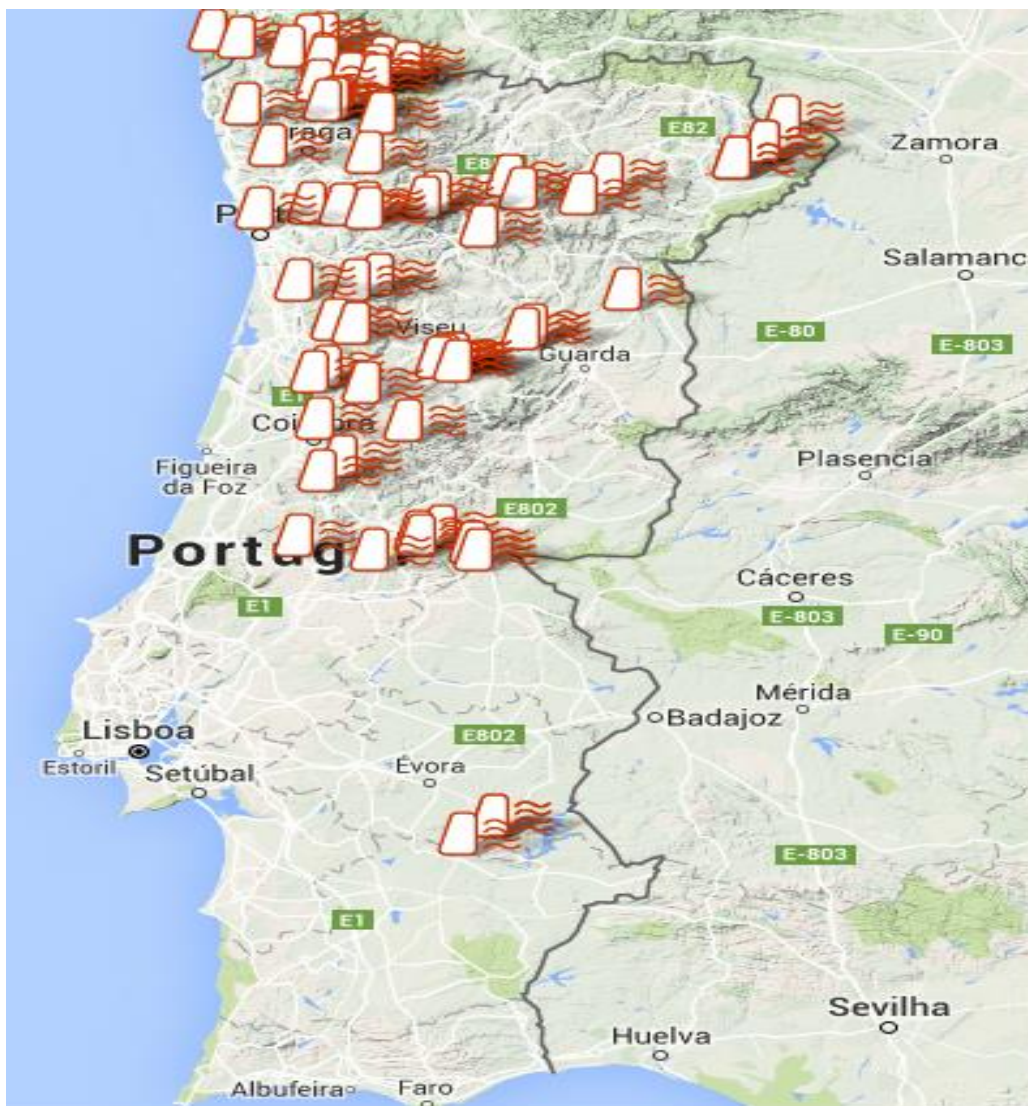


Figura 8 - Distribuição geográfica das barragens do Grupo EDP (Fonte: www.edp.pt)

2.4. Segurança de barragens

O tema da segurança de barragens, desde sempre constituiu um motivo de preocupação para a sociedade, devido aos elevados riscos que estão associados a este tipo de estruturas. Embora a possibilidade de rotura, seja hoje considerada remota, principalmente nas barragens de betão, deve-se promover a segurança de barragens em dois níveis diferentes, a gestão em exploração normal e gestão em situações de emergência. Assim, o estabelecimento e cumprimento escrupuloso de regras de exploração, de programas de inspeção, observação e manutenção, bem como a definição de planos de atuação em casos de emergência, tornam-se fundamentais na gestão do risco e aplicação do plano de segurança.

A EDP – Gestão da Produção de Energia detêm a concessão da utilização dos recursos hídricos (para fins de produção de energia) relativos a um vasto conjunto de Aproveitamentos Hidroelétricos. De forma a cumprir todas as obrigações no papel de dono de obra e assegurar o normal funcionamento deste parque hidroelétrico, a gestão da exploração assenta em três atividades fundamentais: a segurança das barragens, a operação e a manutenção. O principal objetivo destas atividades, passa por detetar atempadamente situações potencialmente perigosas e acionar os meios necessários para as corrigir (Ferreira, I., 2014).

O controlo de segurança de barragens na EDP, e a qualidade colocada nos projetos e construção remonta à década de 40, no início do processo de eletrificação nacional com vista à produção em escala de energia elétrica para dar início ao processo de industrialização do país.

Em Portugal, há cerca de 20 anos que existe legislação nacional sobre segurança de barragens com o objetivo de estabelecer as competências das entidades da administração pública envolvidas no controlo de segurança, entre os quais a Agência Portuguesa do Ambiente (Autoridade Nacional de Segurança de Barragens) e o LNEC – Laboratório Nacional de Engenharia Civil (assessor da Autoridade). Esta define ainda, um vasto conjunto de obrigações dos donos de obra, no âmbito do controlo de segurança nas suas componentes estrutural, hidráulica, operacional e ambiental (Ferreira, I., 2014).

Para cumprir a legislação, aplicável a um universo de mais de 50 barragens, a EDP sistematizou procedimentos e atividades que são fundamentais para a gestão do plano de segurança. Entre essas tarefas, refiram-se genericamente as inspeções visuais, a recolha de dados dos sistemas de instrumentação instalados e as observações geodésicas.

2.4.1. Entidades envolvidas no controlo e segurança de barragens

Na monitorização de uma barragem existem varias entidades com responsabilidades no controlo de segurança da estrutura. Segundo (APA, 2016) e de acordo com o Regulamento de Segurança de Barragens (RSB) as entidades responsáveis são:

- **Dono de Obra** - Entidade responsável pela barragem para efeitos de aplicação do Regulamento, em virtude de deter um título jurídico suficiente para construir ou explorar a barragem ou, na ausência daquele título, em virtude da efetiva execução material da obra ou da sua exploração (APA, 2016).
- **Agência Portuguesa do Ambiente (APA)** – Designa-se por Autoridade Nacional de Segurança de Barragens (Autoridade) o organismo (APA) com competência genérica de controlo de segurança das barragens, cabendo-lhe promover fiscalizar o cumprimento dos normativos legais de segurança de barragens (APA, 2016).
- **Laboratório Nacional de Engenharia Civil (LNEC)** - na qualidade de consultor da Autoridade em matéria de controlo de segurança das barragens (APA, 2016).
- **Autoridade Nacional de Proteção Civil (ANPC)**- como entidade orientadora e coordenadora das atividades de proteção civil ao nível nacional (APA, 2016).
- **A Comissão de Segurança de Barragens (CSB)** - cujo presidente é designado por despacho do membro do Governo com tutela sobre a APA, sendo os restantes membros designados pela entidade que representam, funciona junto da APA e tem a composição e as competências definidas no RSB, nomeadamente de analisar a situação das barragens portuguesas do ponto de vista da segurança (APA, 2016).

2.4.2. Legislação Aplicável

Os principais normativos de segurança em vigor em Portugal no que diz respeito ao controlo e segurança de barragens de acordo com (APA, 2016) são:

- **Regulamento de segurança de barragens (RSB)** - Dec. Lei 344/2007 de 15.10.2007
 - Normas de Projeto de Barragens
 - Normas de Observação e Inspeção de barragens
 - Normas de Construção
 - Normas de Exploração

O RSB aplica-se:

- a) A todas as barragens de altura igual ou superior a 15m, medida desde a cota mais baixa da superfície geral das fundações até ao coroamento, ou a barragens de altura igual ou superior a 10m cuja albufeira tenha uma capacidade superior a $1hm^3$ (APA, 2016).
- b) Às barragens de altura inferior a 15m que não estejam incluídas na alínea anterior e cuja albufeira tenha uma capacidade superior a $100\ 000m^3$ (APA, 2016).
- c) Poderão ainda ser sujeitas às disposições nele contidas “outras barragens, desde que, (...), a entidade competente verifique a existência de risco potencial elevado ou significativo” (APA, 2016).

- **Regulamento de pequenas barragens (RPB)**

O RPB aplica-se:

- a) Ao projeto, construção, exploração e observação de barragens com altura igual ou inferior a 15m, medida desde a parte mais baixa da superfície geral das fundações até ao coroamento e capacidade de armazenamento inferior a $100\ 000m^3$ (APA, 2016).
- b) Para as barragens de altura inferior a 8m é dispensada a aplicação das disposições que constituem o diploma, exceto quando especiais condições técnicas assim o exigirem (APA, 2016).
- c) A verificação do condicionalismo previsto no número anterior é feita pelo Instituto APA (APA, 2016).

CAPÍTULO III

Monitorização de barragens e métodos geodésicos

3. Monitorização de barragens

Nas últimas décadas, à medida que a altura das estruturas aumentava e as suas geometrias adquiriam formas mais arriscadas, técnicas de monitorização foram desenvolvidas e tornaram-se essenciais nas grandes barragens, tanto para a avaliação de seu desempenho como para garantir as suas condições de segurança (Siguel, Alyne., 2013). As barragens, são obras com um risco inerente associado extremamente elevado, que em caso de rotura, podem ter efeitos catastróficos, principalmente nos vales a jusante da mesma. Por este motivo, há uma crescente valorização dos sistemas de inspeção e observação face aos custos e riscos relativos aos grandes empreendimentos. (Ribeiro, F., 2008).

O controlo de segurança de uma grande barragem, baseia-se na análise do seu comportamento estrutural, com base na observação de um conjunto de variáveis, designadas variáveis de controlo, que caracterizam a relação entre as ações que incidem sobre as obras (gravidade, temperatura, etc) e a resposta estrutural correspondente (deslocamentos, deformações, etc) (CASACA, 2005).

Monitorizar uma barragem, é recolher dados através de instrumentação apropriada, ao longo do tempo, seguido de análises e interpretação de resultados com o objetivo de detetar alterações nas grandezas de interesse. Este processo permite acompanhar e controlar o comportamento das estruturas das barragens e das suas fundações a médio e longo prazo.

Os principais meios disponíveis para avaliar a segurança destas construções ao longo de sua “vida útil” são: inspeções visuais, observação geodésica, levantamentos batimétricos e instrumentação (Ribeiro, F., 2008).

A medição de deslocamentos planimétricos (X,Y) de pontos localizados em barragens são uma das grandezas mais importantes para caracterizar o comportamento de uma estrutura (Castro e Henriques, 2008). A monitorização destas componentes é assim essencial para o controlo da segurança de grandes estruturas, em especial barragens. A comparação entre as “respostas” observadas (obtidas através da monitorização) e as calculadas em projeto (deslocamentos, tensões, etc) obtidas por meio de modelos numéricos permitem perceber se o comportamento da estrutura está dentro do que era expectável para a mesma (Ribeiro, F., 2008). No âmbito da monitorização de barragens, existem essencialmente dois métodos para medir estas componentes, o primeiro é baseado na instrumentação de ordem geotécnica (fios de prumo, extensómetros, etc) e o segundo é baseado nos métodos geodésicos. Desde

muito cedo que estes dois métodos se complementam e coexistem em muitas das barragens de betão portuguesas.

Ambos os métodos apresentam vantagens e desvantagens. Os métodos geodésicos utilizando uma rede de pontos intervísiveis, que permita a observação de ângulos e distâncias, proporciona geralmente observações superabundantes que gera redundância suficiente para análises estatísticas de qualidade e deteção de erros. No entanto, a necessidade de condições atmosféricas favoráveis, pessoal especializado, a duração das campanhas com janelas temporais apertadas e a relativa complexidade do cálculo, apresentam-se como as maiores limitações dos métodos geodésicos. Estes factos, levaram a que outros métodos, como os de instrumentação geotécnica, tenham assumido um papel de destaque na observação de estruturas. Estes caracterizam-se, por serem facilmente adaptados a vertente de automatização e monitorização contínua, e muito embora tenham custos de instalação bastantes superiores, acabam por oferecer maior rendimentos de exploração.

Com a evolução dos métodos geodésicos, esta realidade tem vindo a ser alterada com o surgimento de novos métodos geodésicos, caracterizados pela baixa dependência de influência humana e por permitirem efetuar também medições de forma contínua e permanente.

Atualmente, com a facilidade da integração dos resultados de ambos os métodos, há um interesse crescente em correlacionar as informações dos sensores geotécnicos e geodésicos para desenvolver um “modelo de deformação” integrado (Ribeiro, F., 2008). Esta integração, que pode ser feita através da sincronização do tempo das observações, irá permitir que ambos os métodos se validem e verifiquem mutuamente, o que definitivamente permite melhorar os parâmetros do modelo de deformação que são a base para a gestão de riscos (Ribeiro, F., 2008).

Ainda dentro deste contexto da monitorização de estruturas e como referido anteriormente, os métodos geodésicos exigem uma grande frequência de aquisição de dados e mão de obra muito especializada. Estes, são alguns dos fatores que sugerem, que os métodos geodésicos rapidamente se têm que adaptar a novas realidades, que passam pela automatização na aquisição dos dados.

A instrumentação pode ser pouco útil para a monitorização da segurança da barragem se não existir uma organização com recursos humanos e orçamentos suficientes para realizar as leituras e analisar os resultados em tempo útil (Viseu e Almeida, 2000).

3.1. Instrumentação para monitorização de estruturas

Os três principais objetivos da instrumentação de barragens são: verificar as hipóteses, critérios e parâmetros adotados durante a fase de projeto, verificar a adequação dos métodos construtivos e verificar as condições de segurança da barragem (Siguel, Alyne., 2013). Este tipo de monitorização consiste na instalação de diversos tipos de sensores (extensómetros, fios de prumo, entre outros) ao longo da estrutura, normalmente durante a fase construção, que tem como finalidade detetar eventuais deformações durante o tempo de vida útil da barragem.

Este tipo de instrumentação em barragens, é essencial por fornecer informações altamente precisas e por atualmente serem facilmente integrados nos sistemas automáticos de aquisição de dados (Siguel, Alyne., 2013). Apresenta ainda, ao contrário dos métodos geodésicos, a vantagem de ser completamente independente das condições ambientais ou da visibilidade, o que permite grande grandes frequências na aquisição de dados. No entanto, tem a grande limitação de fornecer apenas medidas pontuais e relativas ao longo do tempo.

Os métodos geodésicos, assumem assim um papel importante na monitorização de grandes barragens, por permitirem medidas com carácter absoluto e por fornecerem informações não apenas sobre a barragem, mas também sobre a área que a envolve. Desta forma, considera-se que, embora a realização de campanhas geodésicas seja bastante onerosa e por isso exista uma menor frequência de aquisição de medidas, estas são absolutamente essenciais para a validação das leituras realizadas com a instrumentação geotécnica (de carácter contínuo, ou não).

3.2. Monitorização Geodésica

A Geodesia, desde sempre esteve ligada à monitorização de barragens, principalmente no que diz respeito à análise de deslocamentos e deformações. Os métodos geodésicos, há muito tempo que fazem parte dos planos de observação de grandes barragens. Em Portugal, a barragem de Santa Luzia, foi a primeira em que esta metodologia foi aplicada, decorria o ano de 1942.

O planeamento de um sistema de observação geodésica envolve vários passos desde da escolha em função da morfologia do terreno, do número, da localização e da acessibilidade dos pontos objeto até a localização e forma de materialização dos pontos, grandezas observadas e equipamentos utilizados (CASACA, 2005).

No início, quando a observação por métodos geodésicos começou a ser introduzida nas grandes barragens, apenas ângulos horizontais e eventualmente verticais, eram medidos a partir de uma rede de pilares considerados estáveis, localizados fora do corpo da barragem. Mais tarde, com o aparecimento dos distanciômetros eletrónicos, introduziu-se a observação linear, ou seja, as distâncias passaram também a ser observadas, permitindo aumentar significativamente a redundância e robustez dos sistemas. A metodologia da trilateração, rapidamente foi integrada nos planos de observação das barragens que já contavam com uma rede de observação geodésica.

Atualmente, considera-se como observação geodésica de grandes barragens de betão, as atividades destinadas à monitorização de deslocamentos de um conjunto discreto de pontos notáveis, levada a cabo por métodos da Geodesia, nomeadamente, recorrendo à observação de redes de nivelamento geométrico (altimetria), redes de triangulação e trilateração (planimetria), e mais recentemente através de geodesia espacial GNSS.

Na observação geodésica de barragens as grandezas medidas são: ângulos horizontais e verticais, distâncias e desníveis. A partir destas medidas, indiretamente é possível obter coordenadas de um ponto. Embora, por definição, os deslocamentos são espaciais (3D), no que diz respeito à observação de grandes estruturas, especialmente barragens, é comum fazer uma divisão entre deslocamentos verticais (altimétricos) e deslocamentos horizontais (planimétricos). Assim, os Sistemas de Observação Geodésica de uma grande barragem em Portugal, são normalmente compostos por dois sistemas independentes - planimétrico e altimétrico. Os métodos geodésicos para observação de barragens, baseiam-se em redes altimétricas e planimétricas locais, observadas por métodos e equipamentos completamente distintos. Em ambos os casos, como referido anteriormente, os procedimentos geodésicos de quantificação de deslocamentos consideram sempre uma campanha "E0" como época de referência, idealmente estabelecida e observada antes do primeiro enchimento da albufeira. A época de observação correspondente à campanha "En" fornece os vetores de deslocamento entre estes dois momentos distintos da vida da estrutura (Almeida, et al., 2015).

O objectivo de uma campanha de observação geodesica consiste em determinar e comparar as coordenadas de pontos em duas épocas de observação distintas, e verificar se, dentro de um certo nível de confiabilidade (significância), houveram variações significativas nestas coordenadas (SILVEIRA, 2003). Os métodos geodésicos, produzem observações superabundantes, que geralmente oferecem redundância suficiente, permitindo estimar diretamente os deslocamentos sofridos pelos

vértices, identificar erros e, adicionalmente, fatores de variância que são indicadores da qualidade das observações realizadas (Neves, R., 2008).

O ajustamento das redes de observação geodésica, é feito geralmente através do Método dos Mínimos Quadrados (MNQ), de forma a obter uma solução unívoca e a estimativa sobre os eventuais erros (Aguirre, 2000). Por norma, para este efeito é utilizado o conceito do método da variação de coordenadas para o tratamento das diferenças das observações entre duas épocas.

Ainda sobre a realização de campanhas de observação geodésica é essencial alertar para alguns dos fatores que devem ser considerados aquando do seu planeamento, onde se pode destacar as seguintes:

- ser realizada em épocas diferentes do ano, de forma a contornar o efeito das condições atmosféricas (contração do betão no inverno e dilatação no verão),
- quando a periodicidade apenas pode ser anual, repetir sempre na mesma época do ano, para melhor comparar/analisar resultados,
- as medições obedecerem a altos padrões de exatidão, existir repetibilidade e integração das observações, entre outras.

Por fim, importa destacar que deve obrigatoriamente existir uma análise rigorosa dos dados recolhidos, de forma a evitar que erros de medição ou do ajustamento sejam interpretados como deslocamentos.

3.3. Conceitos genéricos e métodos geodésicos aplicados à Monitorização de barragens

A monitorização de barragens, através dos métodos geodésicos, envolve geralmente uma rede geodésica. Segundo (CASACA, 2005) os vértices da rede podem ser classificados quanto a sua função em:

- **Pontos objeto** – são os pontos cujos deslocamentos se pretendem determinar, ou seja, são uma variável de controlo.
- **Pontos de referência** – pontos que se destinam a construir a rede de referência, cuja posição pode ser considerada fixa ao longo do tempo ou cujos deslocamentos podem ser determinados por outros métodos;

- **Pontos auxiliares** – pontos que se destinam a reforçar a configuração geométrica da rede

Ainda segundo (CASACA, 2005) os vértices podem ser classificados ainda, quanto a sua função operativa:

- **Pontos estação** - utilizados para o estacionamento dos instrumentos de medição (Estações Totais, Níveis, etc) e muitas vezes utilizados para estacionar prismas passando a ter a função de pontos alvo. Necessitam assim de acesso fácil e boas condições para as operações de medição;
- **Pontos alvo** – pontos que servem exclusivamente para serem visados, são geralmente materializados por alvos óticos de pontaria, por prismas retroreflectores ou por peças de centragem forçada chumbadas em pilaretes.

Os métodos geodésicos convencionais utilizados para a observação planimétrica de uma barragem, são essencialmente os seguintes:

- Poligonação
- Triangulação e Trilateração
- Irradiação

No que diz respeito a determinação vertical (altimetria), até à data, e considerando apenas as técnicas de âmbito geodésico, o método utilizado é:

- Nivelamento geométrico

3.3.1. Poligonação

A poligonação é um dos métodos mais utilizados para a determinação de coordenadas de pontos em topografia, por permitir tal como na irradiação, posicionar sequencialmente um grande número de pontos objeto. No entanto, são figuras bastante frágeis ou pouco consistentes com vista a uma boa precisão de coordenação, essencialmente quando são de grande extensão. Este facto, deve-se ao seu constrangimento geométrico, apenas dois pontos fixos nas extremidades.

Quando se trata de poligonais para observação de galerias interiores de barragens, as poligonais são sempre apoiadas em pontos de referência, de extensões relativamente curtas e são geralmente designadas como poligonais fechadas, ou seja, terminam sempre num ponto de coordenadas conhecidas. É claro que esta

obrigatoriedade é resultado dos constrangimentos da poligonal (pontos de apoio fixos), o que, por sua vez resulta numa confirmação dos resultados ou na sua maior fiabilidade e conduz à condição de compensação ou ajustamento da poligonal.

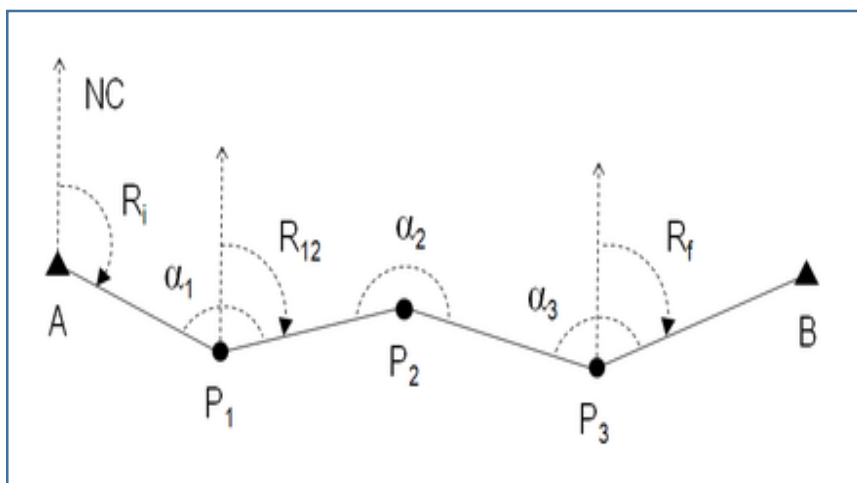


Figura 9 – Esquema de uma poligonal

3.3.2. Triangulação e Trilateração

A triangulação é um método geodésico clássico para a determinação de coordenadas planimétricas de pontos e foi o primeiro a ser utilizado na observação geodésica de barragens. Consiste, de forma simples, na medição dos ângulos internos das figuras que compõem a rede de triângulos composta pelos seus vértices (Neves, R., 2008).

A trilateração é um processo similar à triangulação, envolve também a formação de figura geométricas que se reduzem a triângulos, mas em vez dos ângulos são medidas as distâncias.

No passado, numa rede de triangulação apenas eram observados ângulos horizontais. No entanto, com a evolução tecnológica dos equipamentos e consequente aparecimento das estações com totais com os DEM incorporados, passou a ser possível a observação angular e linear ao mesmo tempo, pelo que a combinação dos dois métodos rapidamente foi introduzida na monitorização de estruturas.

3.3.3. Irradiação

A determinação das coordenadas de um ponto podem ser obtidas através do método da irradiação (figura 11). Este método baseia-se na medição de direções horizontais, ângulos verticais e distâncias dos pontos de interesse em relação a uma direção conhecida assumida como referência (Neves, R., 2008). Este método, desde o aparecimento dos DEM com grande precisão, passou a ser utilizado recorrentemente em aplicações de âmbito geodésico, nomeadamente na monitorização de estruturas em betão, com alvos colocados sobre as mesmas.

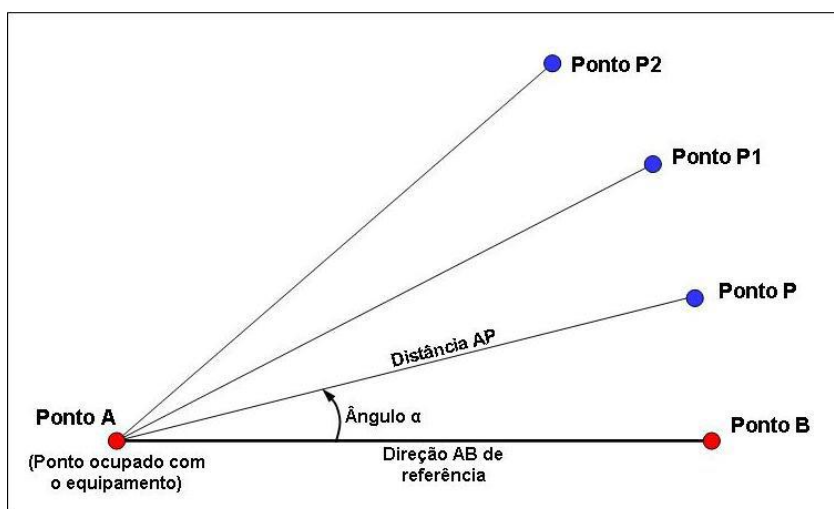


Figura 10 – Método de Irradiação (Fonte: Neves, R., 2008)

3.3.3.1. Irradiada simples

A irradiada simples é uma forma de coordenação direta de pontos novos, a partir de um ponto conhecido, onde são medidas a distância ao ponto a coordenar e o ângulo entre uma direção de referência e a direção desse ponto (Antunes, C., 1995)

3.3.3.2. Intersecção direta

A intersecção direta representa a coordenação de um ponto não estacionável, em que se observam os ângulos a partir de outros pontos intervisíveis e com coordenadas conhecidas, medidos entre a direção do ponto desconhecido e uma outra qualquer direção de referência. A intersecção direta mais comum é o caso onde existe intervisibilidade entre os pontos de apoio, onde são observados os ângulos entre as visadas dos pontos de apoio e a direção do ponto a determinar, sendo necessário observar o mínimo de dois ângulos com dois pontos conhecidos. Sempre que existe

redundância, caso da observação de barragens, o problema de cálculo deve ser resolvido pelo método de ajustamento dos mínimos quadrados (Antunes, C., 1995).

3.3.4. Nivelamento Geométrico

O nivelamento geométrico (figura 12), é o método operativo utilizado para a determinação da diferença de nível entre dois pontos da superfície do terreno. O nivelamento é realizado com um nível e duas miras sobre os pontos cuja cota se pretende determinar. Colocando-se o nível aproximadamente equidistante dos pontos a nivelar minimizam-se os erros sistemáticos decorrentes da curvatura terrestre, das condições atmosféricas e de colimações residuais. Em alguns casos, por limitação da distância ou desnível, é necessário utilizar pontos auxiliares, isto é, pontos que servem apenas para a ligação entre pontos de referência e pontos objeto, ou para a ligação entre pontos objeto. Nestes casos, a linha é subdividida em secções mais pequenas sendo determinada a diferença de nível para cada ponto auxiliar, de forma que o desnível total entre os pontos objeto seja a soma dos desníveis intermédios.

Em barragens, as linhas de nivelamento geométrico de precisão são sempre fechadas, e é sempre realizada uma operação de contranivelamento, ou seja, são repetidas as observações por ordem inversa.

Em relação aos níveis, o erro que ocorre com maior frequência é erro de colimação (linha de pontaria não paralela ao plano horizontal ou de colimação) decorrente de uma má retificação da nivela ou do sistema de compensação. O efeito deste erro elimina-se utilizando a metodologia de “estacionamento a meia distância”.

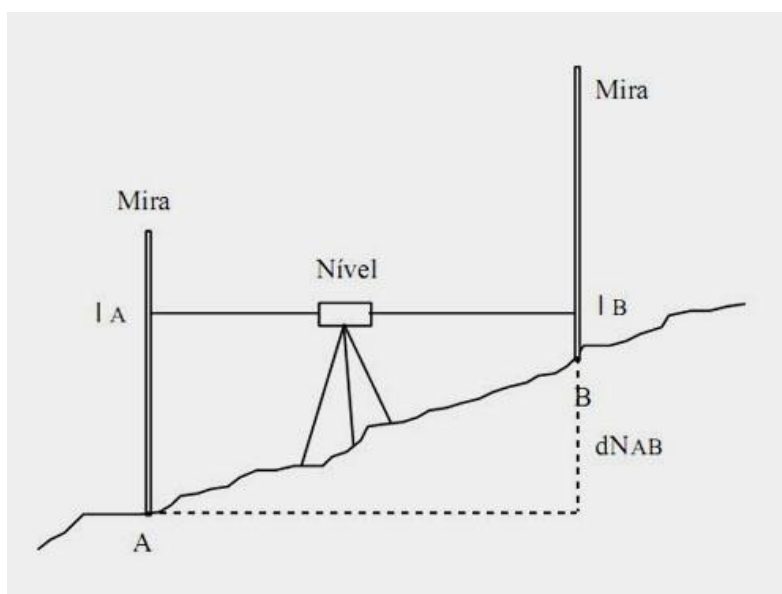


Figura 11 – Nivelamento geométrico

CAPÍTULO IV

Rede de observação geodésica, equipamentos e erros associados

4.1. Redes geodésicas para monitorização

Um projeto de uma rede geodésica para monitorização envolve, imprescindivelmente, vários pontos bem distribuídos e materializados, de forma assegurar a confiabilidade das medições e garantir o vínculo entre os mesmos e ainda para verificar a estabilidade das referências ao longo do tempo (Ribeiro, F., 2008).

Na monitorização de estruturas com recurso a estações totais, cada ponto da rede deve ser intervisível com o máximo número possível de pontos objeto da estrutura de forma a aumentar a redundância e conseqüente robustez do sistema, e com pelo menos dois outros pontos da rede de referência.

Desde que a observação geodésica foi introduzida nas grandes barragens abóbada portuguesas, sempre que a morfologia das encostas a jusante da barragem o permitia, procurava-se implantar quatro pilares de estacionamento, dois em cada margem, formando um quadrilátero (Ribeiro, F., 2008). No universo das barragens da EDP, existem muitas onde este sistema de pilares foi implementado. No entanto, com o decorrer dos anos, e com a experiência advinda da exploração dos sistemas, percebeu-se que esta geometria apresentava algumas limitações. Por um lado, a proximidade entre os dois pilares dianteiros e a barragem, além de não os permitir considerar fixos por estarem dentro da zona de influência da mesma, obrigava a pontarias muito inclinadas para muitos dos alvos colocados no paramento da barragem. Por outro lado, o afastamento entre os dois pilares traseiros e a barragem obrigava a pontarias muito distantes, significativamente afetadas pelo efeito da variação atmosférica ao longo das visadas.

Entretanto, com o aparecimento dos distanciómetros eletromagnéticos (DEM) de precisão, o paradigma da conceção dos sistemas de observação geodésica foi completamente revolucionado. Os DEM, permitem medir as distâncias entre margens opostas, tornando desnecessários dois pilares na mesma margem para esse efeito. Hoje, sempre que possível as redes geodésicas são formadas por apenas dois pilares a jusante da barragem, a uma distância intermédia da mesma de forma a reduzir a distância e inclinação das visadas. A redundância necessária pode obter-se repetindo, de forma independente, as medições: observando as duas estações da base ao início da manhã e repetindo a observação da base ao fim da tarde. (Ribeiro, F., 2008). Como referido anteriormente, as distâncias e a visibilidade entre os pontos da rede de referência e os pontos objeto são também fatores importantes quando são utilizadas estações totais, pois não podem ser um fator para a degradação da precisão das medições.

Para a definição do layout da rede, alguns pré-requisitos devem ser analisados e considerados, dos quais se destacam os seguintes:

- Geometria da estrutura e da rede;
- Localização de terrenos estáveis para instalação das referências
- Métodos de levantamento geodésico e equipamentos a serem utilizados;
- Tipo de materialização dos pontos a ser utilizada;
- Precisão e exatidão;
- Duração da monitorização;
- Frequência.

4.1.1. Materialização da Rede

Os pontos da rede de referência são sempre materializados sobre grandes maciços rochosos, validados segundo uma avaliação geológica e o mais próximo possível da estrutura a ser monitorizada, sem, no entanto, estarem dentro da zona de influência da mesma.

Um dos fatores mais importantes a considerar na materialização dos pontos da rede geodésica são a durabilidade e a estabilidade ao longo do tempo. Para que uma rede geodésica possa oferecer resultados com elevado grau de fiabilidade, a estabilidade posicional das referências é essencial. A falha deste requisito, vai piorar substancialmente a precisão das observações e conseqüentemente levar a perda de confiança nos resultados (Ribeiro, F., 2008).

Para a materialização dos pontos de referência da rede, geralmente são utilizados pilares de betão armado, com boas fundações e com dispositivos de centragem forçada, de forma a garantir a estabilidade dos instrumentos e a sua instalação sempre na mesma posição.

Para a materialização dos pontos objeto, geralmente são utilizados prismas retrorrefletores ou alvos óticos de acordo com o plano de observação definido. A forma e o método de instalação são avaliados e definidos da forma que se considerar mais adequada para cada caso.

4.1.2. Estabilidade dos pontos de referência

Numa campanha de observação geodésica de uma barragem, os deslocamentos absolutos dos pontos objeto são determinados a partir da rede de referência que se presume ser estável. Esta, entre outras, é a condição primária para que uma rede geodésica permita obter resultados fiáveis. Desta forma, pode considerar-se que qualquer ponto da rede de referência que não seja estável, ou deixe de o ser a partir de um determinado momento, deve ser identificado antes do cálculo dos deslocamentos dos pontos objeto (Ribeiro, F., 2008). Caso contrário, a análise e interpretação dos deslocamentos pode levar a conclusões erradas. A título exemplificativo, supõem-se o seguinte caso:

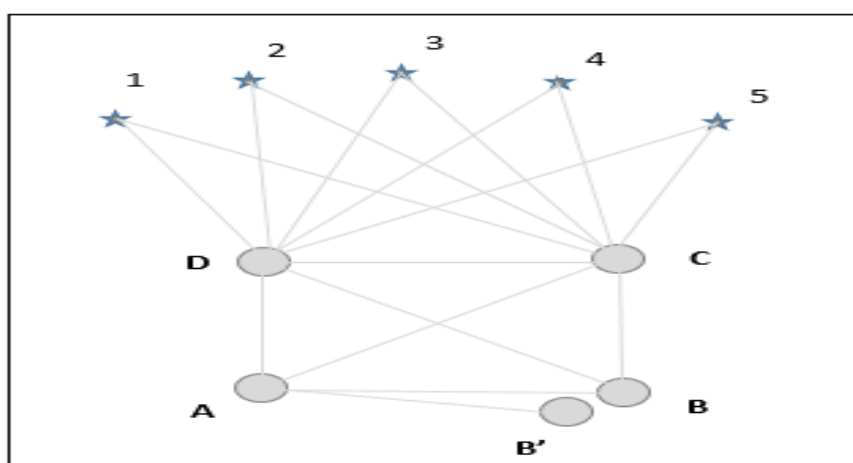


Figura 12 - Esquema ilustrativo de rede geodésica (adaptado de (Ribeiro, F., 2008))

A figura 13 ilustra uma rede geodésica para observação de pontos objeto colocados sobre uma estrutura. Os pontos A, B, C, D são da rede de referência, e os restantes são considerados pontos objeto. No caso do ponto B se deslocar para B', e não for detetado no cálculo, e o mesmo ponto B for usado com o ponto A como referência fixa comum para duas campanhas de observação, todos os pontos objeto e os pontos de referência C e D vão apresentar alterações significativas nas suas coordenadas, mesmo que na realidade elas sejam estáveis (Ribeiro, F., 2008). Este é um exemplo que ilustra bem a importância da estabilidade das referências para que uma rede geodésica seja capaz de produzir bons resultados. É fundamental, que as referências possam ser consideradas estáveis (fixas) para que exista uma avaliação e análise correta dos deslocamentos dos pontos objeto. Hoje em dia, mesmo nos sistemas de observação geodésica mais antigos e seguindo a tendência de incorporar a observação linear na observação geodésica de barragens, é sempre que possível, realizada a medição de distâncias entre os pilares para que se possa aumentar a redundância do sistema, e perceber eventualmente alguma instabilidade posicional nas referências.

4.2. Instrumentação Geodésica

4.2.1. Níveis óticos e digitais

Existem essencialmente dois tipos de níveis: os óticos e os digitais (figura 14), embora com o decorrer do tempo, os primeiros tendam a desaparecer.

Um nível ótico convencional é constituído por uma nivela tórica solidaria com uma luneta de pontaria, por intermedio de uma estrutura metálica dotada de um dispositivo de fixação e centragem sobre um tripe (CASACA, 2005). Nos níveis automáticos (digitais), a nivela tórica é substituída por compensadores (baseados em pêndulos) que, sob o efeito do campo gravítico, corrigem automaticamente o erro de colimação vertical da linha de pontaria da luneta (CASACA, 2005).

O princípio de funcionamento de um nível automático é o processamento unidimensional de imagens, a partir de uma mira codificada em código de barras. A leitura da mira codificada é feita através de uma rede de sensores óticos, que reconhecem a codificação da mira através de um processo de correlação de imagens entre a imagem da mira e uma imagem padrão gravada na memória do instrumento (CASACA, 2005). Atualmente, a precisão destes equipamentos é considerada sub-milimétrica.



Figura 13 - Exemplo de um nível digital

4.2.2. Estações totais

Os instrumentos mais utilizados em geodesia são designados por estações totais eletrónicas ilustradas na figura 15, utilizadas para a medição de ângulos e distâncias. São aparelhos constituídos por um teodolito eletrónico digital, um instrumento de medição eletrónica de distâncias e um computador, responsável pelo processamento de dados.

A medição eletrónica de distâncias (EDM – Electronic Distance Measurement), baseia-se na emissão retro-reflexão de ondas eletromagnéticas, geralmente nas bandas

visível, infravermelhas próximas e das micro-ondas (CASACA, 2005). A medição do intervalo de tempo gasto no percurso de ida e volta entre um emissor-recetor. Nestes aparelhos o emissor e o recetor estão localizados na mesma unidade requerendo apenas um refletor, posicionado sobre a outra extremidade da distância a medir, responsável pela reflexão da onda emitida e pelo seu envio para o recetor.

A medição das distâncias, é fortemente condicionada pelo efeito das condições atmosféricas. Embora atualmente, já existam estações totais com sensores incorporados que efetuam as correções em tempo real, nas estações totais mais comuns, estas variáveis têm de ser introduzidas manualmente através do teclado para que o processador da estação calcule o valor das partes por milhão (ppm) a ser corrigido. Outra solução, e muitas vezes usada, passa por corrigir a posterior em gabinete as distâncias antes de realizar o ajustamento.

A constante evolução tecnológica, permitiu também que surgissem as estações totais robotizadas, permitindo que hoje, estas possam ser operadas de forma completamente autónoma e remota. Hoje, estes equipamentos podem atingir precisões sub-milimétricas em determinadas condições.



Figura 14 - Exemplo de Estação Total

4.3. Descrição dos principais erros que afetam as medições com estações totais

Em trabalhos de levantamento topográfico, em particular os de âmbito geodésico, que procuram resultados de alta precisão, é essencial que os equipamentos utilizados estejam em perfeitas condições, devidamente verificados e calibrados, para que possam oferecer níveis altos de precisão/exatidão.

As observações, mesmo quando realizadas em condições supostamente idênticas, são acompanhadas dos “inevitáveis erros de medição”. Para tal, muito fatores podem contribuir, como por exemplo: falhas humanas, imperfeições nos equipamentos, e a influência das condições ambientais.

Existem sempre erros e imperfeições que se cometem na medição de qualquer grandeza, ou seja, existe uma natureza estatística das observações. Mesmo em condições ideais, sempre que uma grandeza é sujeita a um processo de medição, quando repetida várias vezes, nunca resulta um valor numérico igual, mas sim diferentes valores que giram em torno de um valor médio, que se considera representativo da grandeza a ser medida.

Estes erros podem ser classificados em três grupos distintos: grosseiros, sistemáticos e acidentais ou aleatórios.

4.4. Classificação dos erros

4.4.1. Erros grosseiros

Os erros grosseiros, caracterizam-se por serem geralmente grandes. Ocorrem essencialmente por engano/descuido do operador e são por norma os que ocorrem com maior frequência. Geralmente, são facilmente identificados pela experiência e por um processo de verificação cuidadoso de todo o trabalho, de forma a eliminá-los repetindo uma ou mais medições. O avanço tecnológico ao nível dos equipamentos, retirando a parte manual de registo de dados, veio reduzir drasticamente a probabilidade de um erro grosseiro acontecer, e consequentemente aumentar a fiabilidade nos dados, desde a sua fonte até ao momento do seu processamento.

4.4.2. Erros aleatórios

Os erros aleatórios/acidentais são os mais preocupantes por não assumirem um carácter determinístico conhecido, ou seja, são todos aqueles que resultam no final, depois de os erros grosseiros e os erros sistemáticos terem sido eliminados. Caracterizam-se por serem de pequena magnitude, e são em grande parte a razão pela qual um conjunto de medidas repetidas, não apresenta o mesmo valor. Resultam de fatores que se encontram fora do alcance do observador e obedecem a leis da probabilidade. Não existe uma forma absoluta de eliminá-los ou controlá-los completamente, mas podem ser estimados através de métodos estatísticos. O ajustamento do conjunto de toda as combinações de medidas efetuadas, permite estimar este erro.

4.4.3. Erros sistemáticos

Os erros sistemáticos alteram a observação de forma sistemática, em sinal e/ou magnitude, podendo variar em magnitude ao fim de longos períodos de tempo. São considerados como os mais perigosos porque geralmente tendem a acumular-se. Estes erros ocorrem de uma forma determinística, eles dependem não só do observador, bem como do instrumento utilizado e das condições ambientais do trabalho (Antunes, C., 1995). Para combater este tipo de erros deve-se calibrar (aferir e retificar) os instrumentos, bem como usar técnicas de operação apropriadas. Se a grandeza destes erros for determinada, devem-se corrigir as observações desses mesmos erros antes de as tratar matematicamente, caso contrário, devem modelar-se os erros de modo a serem incluídos como parâmetros (incógnitas) no processo de observação e estimação (Antunes, C., 1995)

Entre esta classe de erros, destacam-se os erros derivados das condições atmosféricas e os erros instrumentais.

4.5. Principais erros instrumentais

Consideram-se erros instrumentais, os resultados de alguma imperfeição durante o processo de construção ou ajuste do instrumento. Embora, o efeito de muitos destes erros possa ser minimizado ou até eliminado, através da adoção de procedimentos adequados de levantamento, os equipamentos utilizados em contexto geodésico devem ser retificados e calibrados, de forma a evitar que alguns erros instrumentais afetem a exatidão e a precisão das observações.

Teoricamente, as Estações Totais devem satisfazer as seguintes exigências:

- O eixo de visada ZZ deve ser perpendicular ao eixo secundário KK
- O eixo secundário KK deve ser perpendicular ao eixo principal VV
- O eixo principal VV deve estar exatamente na perpendicular
- A leitura do círculo vertical deve ser exatamente igual a zero no zénite

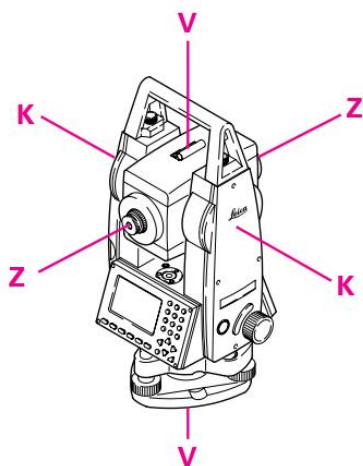


Figura 15 - Representação dos eixos que compõem uma Estação Total

VV – Eixo vertical, principal ou de rotação do teodolito

ZZ – Eixo de colimação ou linha de visada

KK – Eixo secundário ou de rotação da luneta

Quando estas exigências não são cumpridas, resultam erros instrumentais dos quais importa destacar os principais:

4.5.1. Erro devido a não horizontalidade do eixo secundário

Este erro ocorre pela falta de perpendicularidade entre o eixo secundário (eixo de rotação da luneta) e o eixo principal (eixo de rotação do teodolito), ilustrado na figura 17. Causado por um desvio do eixo mecânico de rotação da luneta com a linha perpendicular ao eixo principal, que é o eixo de rotação do limbo horizontal. A minimização desse efeito ocorre quando as observações são realizadas nas duas posições da luneta (PD e PI).

4.5.2. Erro devido à inclinação do eixo de colimação

Este erro é causado pela falta de perpendicularidade entre o eixo de colimação ou linha de visada e o eixo secundário ou de rotação da luneta (figura 17). A não ocorrência de perpendicularidade entre os eixos citados causa um erro na medida das direções horizontais. A sua minimização é feita realizando observações nas duas posições da luneta (PD e PI).

4.5.3. Erro devido à não verticalidade do eixo principal

Ocorre quando o eixo principal não coincide com a direção da vertical que passa pelo centro do equipamento. Este erro impossibilita a obtenção da linha horizontal de visada. Atualmente, as estações totais que dispõem de compensadores eletrônicos, a correção desse erro é feita de forma automática, desde que a inclinação esteja dentro dos parâmetros do compensador.

O não nivelamento do equipamento, causa erros nas medidas dos ângulos horizontais e verticais que não podem ser eliminados mesmo com medições nas posições direta e inversa da luneta (figura 17).

4.5.4. Erro de colimação do ponto zero ATR

Corresponde a não coincidência da pontaria com o centro do prisma. O erro de zero ATR, mesmo após um correto ajustamento ATR, ocorre devido aos fios do retículo poderem não ficar posicionados exatamente no centro do prisma numa determinada medição (figura 17). Segundo LEICA (2004), esta ocorrência é normal. Para acelerar a medição em modo ATR, a mira telescópica não está normalmente posicionada de modo exacto no centro do prisma. Os pequenos desvios e os desvios do modo ATR, são medidos individualmente para cada medição e corrigidos eletronicamente.

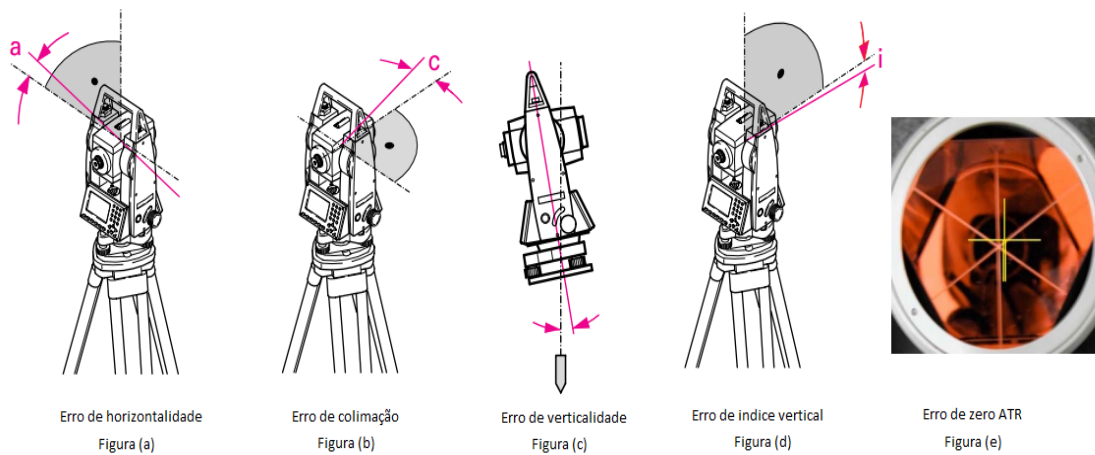


Figura 16 - Exemplos de erros instrumentais

Na tabela 1, encontra-se o resumo dos tipos de erros, qual a componente afetada e se é possível eliminá-los com pontaria direta e inversa, ou através de correções feitas pelo próprio instrumento.

Erro do instrumento	Efeito Hz	Efeitos V	Eliminação através de medidas em PD e PI	Correção automática
Erro de colimação	●	-	●	●
Erro de horizontalidade	●	-	●	●
Erro de índice do compensador (Longitudinal)	-	●	●	●
Erro de índice do compensador (Transversal)	●	-	●	●
Erro do índice vertical	-	●	●	●
Erro de zero no ATR	●	●	-	●

Tabela 1 – Erros instrumentais

CAPÍTULO V

Automatização e novas técnicas de observação geodésica

5. Automatização na monitorização de estruturas

As barragens constituem um tipo especial de obras que requer um grande investimento financeiro e cujo eventual colapso pode ter consequências catastróficas. A instrumentação, a observação e a interpretação do comportamento estrutural de barragens, apresenta-se como um conjunto de ferramentas essenciais para controlar os riscos associados à exploração deste tipo de infraestruturas. Hoje, existe a necessidade de contruir novas estruturas, de maior dimensão e com exigências técnicas cada vez mais complexas em todas as fases, desde o projeto à execução, as barragens não são exceção.

Acompanhando esta necessidade e evolução, os próprios sistemas de monitorização tem sido objeto de desenvolvimentos significativos. A monitorização do comportamento de estruturas, é hoje fundamental para a gestão do risco associada às grandes obras de engenharia, desde a fase da construção até ao fim do tempo de vida útil da mesma. A medição das grandezas na monitorização do comportamento das estruturas é realizada com recurso a sistemas que são parte integrante da estrutura e todos se caracterizam pelo elevado grau de automatização.

A sua integração na estrutura, permite o seu acompanhamento permanente, medindo e interpretando o comportamento da estrutura 24 horas por dia. A otimização destes sistemas, bem como a capacidade de automatização é hoje considerada uma preocupação central aquando da elaboração do plano de segurança das barragens. Ao contrário do que acontecia no passado, onde algum destes sensores já eram instalados, atualmente é possível o estabelecimento de comunicação entre o sistema instalado na estrutura e uma estação remota, viabilizando-se deste modo a transferência, em tempo real, de toda a informação disponível.

Seguindo esta tendência, também as observações de estruturas dentro do âmbito geodésico, tem sido alvo de uma constante evolução, existindo já no mercado soluções que permitem uma total independência de recursos humanos na fase de operação.

A EDP, instalou recentemente sistemas de observação geodésica nas suas mais recentes barragens, que se caracterizam precisamente pelo alto grau de automatização, como é o caso da estação total robotizada instalada em Foz Tua e o sistema GNSS instalado no Baixo Sabor.

5.1. Monitorização automática contínua com recurso a uma Estação Total

As empresas com responsabilidade na fase de construção civil ou manutenção e exploração de ativos, são desafiadas continuamente a executar obras de forma cada vez mais segura e eficiente. Para oferecer serviços de melhor qualidade, é cada vez mais necessário compreender a condição e o comportamento das estruturas sobre as quais se realizam intervenções de construção ou manutenção.

A EDP, segue invariavelmente esta tendência procurando sempre as soluções que melhor garantem a segurança dos seus ativos. Como tal, o aproveitamento Hidroelétrico de Foz Tua constitui um passo importante e pioneiro neste sentido, visto que a observação da estrutura contempla um sistema de observação geodésica automático e contínuo com recurso a uma Estação Total robotizada, representada na figura 18.



Figura 17 - Estação Total robotizada na barragem de Foz Tua

A adoção de novas políticas no que diz respeito à implementação de sistemas de monitorização com carácter contínuo, permite que os técnicos responsáveis tenham à sua disposição um vasto conjunto de informação de enorme importância. Estas políticas podem contribuir para evitar ou detetar atempadamente vários tipos de problemas de segurança, desde situações ocasionais decorrentes do normal avanço da obra, até problemas estruturais que podem comprometer a segurança a vários níveis.

Embora o investimento inicial seja mais avultado, o investimento em sistemas de monitorização contínuos permite poupar consideráveis recursos financeiros visto poderem ter um enorme impacto na componente da responsabilidade civil, já que normalmente auxiliam na tomada de decisão em momentos anteriores aos incidentes. Outro aspecto muito relevante inerente a este tipo de sistemas, decorre do facto de

operarem de forma totalmente automática, com implicação direta na poupança em recursos humanos. É ainda importante referir que os sistemas de monitorização contínuos, permitem obter uma série temporal de resultados, com a periodicidade desejada, que ajudam a evidenciar tendências fiáveis e contínuas.

Considera-se que este tipo de sistemas, representa uma alternativa à realização de medições efetuadas por métodos geodésicos convencionais manuais, e podem-se destacar um conjunto de vantagens em comparação com os métodos tradicionais:

- Permitem dispor de uma frequência de leituras muito elevada e de um seguimento 24 horas por dia, todos os dias do ano, possibilitando um conhecimento exaustivo do comportamento da estrutura. Desta forma, torna-se possível aferir possíveis anomalias no momento em que estas ocorrem, quantificando e registando a sua evolução temporal e não apenas o seu estado final;
- A evolução das medições obtidas pode servir para definir a frequência de leituras mais indicada para cada momento. No caso de serem observadas variações significativas nas medições, permite aumentar a frequência dos ciclos de medição. Em caso contrário, se existir uma estabilização nas medições, permite diminuir a frequência de leitura, com isto permite um compromisso entre economia e fiabilidade do sistema;
- No caso de as medições previstas inicialmente não serem consideradas suficientes e ser recomendável um aumento das frequências das mesmas não existe qualquer custo operacional adicional;
- Um número elevado de leituras evita interpretações erróneas devidas a erros pontuais de leitura e por outro lado ajudam a evidenciar tendências fiáveis e contínuas;
- Os sistemas permitem a emissão de avisos de forma automática no caso de serem superados os limites predefinidos de deslocamento para cada ponto objeto. As leituras são incorporadas na base de dados do sistema de forma imediata, permitindo o cálculo rápido dos deslocamentos dos pontos objeto e emissão, caso necessária, das correspondentes mensagens de notificação, pré-aviso ou atenção
- Reduzem significativamente a interferência e necessidade de intervenção na zona de monitorização. A necessidade de intervenção no local de estacionamento do sistema existe apenas na fase de construção e implementação, ou em eventuais situações de manutenção/assistência técnica

O objetivo final dos sistemas de monitorização contínuos é a mitigação de incidentes nas obras ou infraestruturas acabadas, importando salientar que não garantem por si só uma garantia de risco zero, mas são sem dúvida uma ferramenta que em muito minimizam potenciais problemas. Por fim, é importante realçar que uma vez instalado um sistema é possível geri-lo de uma forma relativamente simples, ainda que a correta interpretação dos resultados continue a ser uma tarefa unicamente humana.

5.2. GNSS

A avaliação das condições de utilização das estruturas de engenharia civil constitui atualmente um dos maiores desafios, colocado às entidades responsáveis pela sua exploração. O envelhecimento das estruturas existentes e as novas exigências funcionais e de segurança obrigam a que cada vez mais seja necessário compreender a condição e o comportamento das estruturas sobre as quais se realizam intervenções de manutenção, para que mesmo dentro de ambientes movimentados seja possível executar obras de forma rápida, segura e com o mínimo de incidentes.

O GNSS (Global Navigation Satellite System) é um sistema de posicionamento e de navegação que recorre aos satélites dos sistemas norte-americano GPS, russo GLONASS e europeu Galileo, etc. O GNSS pode ser utilizado em diversas aplicações com diferentes níveis de precisão, estando estes dependentes de vários fatores, nomeadamente do tipo de posicionamento, do equipamento e das metodologias de observação. Quando as coordenadas são obtidas de uma forma relativa, ou seja, são obtidas em relação a um recetor GNSS de referência, e o processamento é efetuado com base na medição da fase das portadoras dos sinais emitidos pelos satélites, em vez da medição do tempo gasto a percorrer a trajetória satélite – antena (pseudo-distâncias), consegue-se obter uma precisão milimétrica, compatível com a exigência que é colocada no controlo de segurança da maioria das obras de engenharia. A aplicação de sistemas de monitorização estrutural baseados em sistemas globais de navegação por satélite (GNSS) tem demonstrado recentemente significativos desenvolvimentos, sobretudo devido às novas soluções tecnológicas dos recetores, mais avançados e também mais económicos, e ao desenvolvimento de modelos de processamento de sinal. Por outro lado, a programada colocação em órbita de mais satélites, e a disponibilização de mais informação a partir daqueles que mais recentemente têm entrado ao serviço, torna previsível uma utilização mais robusta, mais fiável e mais alargada destes sistemas.

O GNSS é uma ferramenta muito útil quando aplicada a monitorização porque apresenta várias vantagens sobre as técnicas terrestres clássicas, das quais se podem destacar as seguintes:

- Medição em taxas elevadas de observação com uma latência baixa;
- Opera sob quaisquer condições meteorológicas;
- Faculta medições sincronizadas;
- Não requer linha de vista para alvos ou marcas, pode medir linhas de base (distâncias) longas;
- Necessidade de manutenção relativamente baixa e uma vida útil de serviço longa;
- Fornece informações de tempo muito rigorosas para sincronismo com outros sensores.

5.2.1. Casos de GNSS aplicado a monitorização estrutural de Barragens

Pela primeira vez em Portugal uma barragem, a barragem do Baixo Sabor contempla um sistema de observação permanente por geodesia espacial recorrendo ao sistema GNSS. No entanto, existem várias barragens espalhadas pelas mais diversas geografias onde este método já foi aplicado e validado.

Existem vários estudos da aplicação de técnicas de GNSS aplicadas a monitorização de barragens. Um dos primeiros, foi realizado entre setembro de 1995 até Novembro de 1997 aplicado na barragem em arco de Pacoima, com 113m de altura, localizada na califórnia, Estados Unidos. O sistema era composto por 3 recetores GPS, dedicados a monitorização dos deslocamentos em pontos colocados no corpo da barragem. O objetivo principal do estudo era a preocupação com a estabilidade da estrutura, especialmente por esta se encontrar numa zona de forte possibilidade de ocorrência sísmica. Foram colocados dois recetores para pontos objeto no coroamento da barragem (um junto ao encontro e outro no meio da barragem) e um terceiro recetor, definido como estação de referência, foi colocado num pilar localizado a 2.5km da barragem num local considerado estável. Os resultados alcançados, já na década de 90 e considerando todas as limitações que o sistema GPS ainda apresentava, abriram boas perspectivas para a possibilidade do uso do GPS na monitorização estrutural (Ribeiro, F., 2008).

Na década de 2000, o US ARMY CORPS OF ENGINEERS, órgão responsável pelo desenvolvimento e manutenção dos recursos hídricos no Estados Unidos, iniciou

o sistema de monitorização da barragem Libby, localizada no estado de Montana. O sistema era constituído por 6 recetores GPS definidos como estações ou pontos objeto localizados ao longo dos 880m do coroamento da barragem, com uma altura de 120m. Duas estações de referência estavam localizadas em cada lado da barragem, permitindo gerar as correções diferenciais. Um software de pós-processamento armazenava os dados em bruto das oitos estações GPS, e calculava as posições em tempo real. De referir, que 4 dos recetores estavam localizados em blocos coincidentes com os fios de prumo diretos, para que fossem comparadas as leituras horizontais dos sistemas. A monitorização durou 4 anos, entre 2001 e 2005. Os resultados demonstraram um alto nível de concordância entre o GPS e os fios de prumo. Este caso de estudo, qualificou e validou a tecnologia GPS como alternativa a monitorização do comportamento estrutural de barragens (Ribeiro, F., 2008).

No Brasil, na barragem de betão e terra de Três Irmãos, pertencente a Companhia Energética de São Paulo, com um comprimento total de 3.640m foi utilizada a tecnologia GPS para a determinação de deslocamentos horizontais. Foram realizadas duas campanhas de observação GPS, em setembro de 2003 e maio de 2005. O objetivo principal era um ponto objeto na tomada de água, sendo que este bloco estava instrumentado com um fio de prumo direto, cujas leituras serviram para posterior comparação dos deslocamentos. Além deste ponto principal de interesse, foram instalados mais dois recetores no corpo da barragem e um terceiro fora do corpo da barragem. Os resultados apresentados, deram boas indicações da aplicabilidade deste método, visto que, existiu uma enorme concordância entre os resultados GPS e o fio de prumo (Ribeiro, F., 2008).

Ainda no Brasil, na barragem principal de Funil localizada no estado do Rio de Janeiro, houve um estudo onde foi verificada a confiabilidade do GPS na monitorização do deslocamento horizontal de um ponto objeto localizado no coroamento da barragem. A barragem de Funil, é uma barragem de betão em arco de dupla curvatura com 85m de altura e 360m de comprimento no coroamento. Neste estudo foram realizadas duas campanhas de observação, novembro de 2005 e abril de 2006. No ponto objeto monitorizado por GPS, alvo principal deste estudo, existia nesse bloco um prumo ótico e um alvo para trilateração a partir da rede geodésica. As três metodologias de instrumentação foram comparadas e os resultados demonstraram que as diferenças não foram significativas entre os três métodos, o que comprovou a viabilidade do uso da tecnologia GPS na monitorização de barragens (Ribeiro, F., 2008).

CAPÍTULO VI

Descrição dos Sistemas de Observação
Geodésica da barragem do Baixo Sabor, Foz tua e Ribeiradio

6. Descrição dos Sistemas de Observação Geodésica da barragem do Baixo Sabor, Foz Tua e Ribeiradio

6.1. Aproveitamento Hidroelétrico do Baixo Sabor

6.1.1. Enquadramento

O aproveitamento hidroelétrico do Baixo Sabor (AHBS) fica situado no concelho de Torre de Moncorvo, distrito de Bragança, no troço inferior do rio Sabor, afluente da margem direita do rio Douro. O AHBS (figura 19) integra um conjunto de duas barragens que em conjunto e nas respetivas albufeiras irão mais do que duplicar o volume de armazenamento português da bacia do rio Douro. Ambas as centrais são dotadas de grupos reversíveis possibilitando assim uma melhor gestão do armazenamento da água e da produção de energia, alavancada pela localização estratégica que permite otimizar toda a cascata do Douro, a jusante. A barragem do escalão de montante do AHBS é constituída por uma abóbada de betão de dupla curvatura, fundada num maciço granítico, com uma altura máxima de 123 m acima da fundação e cujo coroamento tem um desenvolvimento em planta com cerca de 505 m, a uma altitude cerca de 236 m. A barragem encontra-se situada a 12,6 km a montante da confluência do rio Sabor com o rio Douro. A barragem dispõe de descarregador de cheias de superfície com quatro vãos equipados, cada um com 16 m de largura, descarga de fundo na zona central e bacia de dissipação a jusante. A albufeira criada pela barragem terá uma capacidade de cerca de 1095 hm³ para o nível de pleno armazenamento (NPA) à cota (234,00) correspondendo a uma área inundada de cerca de 2819 ha, e de cerca de 1275 hm³ para o nível de máxima cheia (NMC) à cota (235,00) sendo a correspondente área inundada igual a cerca de 3100 ha.



Figura 18 – Barragem do Baixo Sabor (escalão de montante)

6.1.2. Sistema de Observação Geodésica

O sistema de observação geodésica da barragem é constituído por uma componente altimétrica, destinada à monitorização de deslocamentos verticais, e por uma componente planimétrica, destinada à monitorização de deslocamentos horizontais de pontos notáveis da obra, designados por pontos objeto. O sistema altimétrico é baseado em linhas de nivelamento geométrico de precisão e o sistema planimétrico está dividido em dois sistemas independentes: o primeiro consiste em poligonais de precisão no interior de galerias de visita e o segundo numa rede de estações permanentes do *Global Navigation Satellite System* (GNSS), instaladas no coroamento. Os dois sistemas, planimétrico e altimétrico, estão apoiados em pontos de referência considerados fixos, isto é, pontos cuja posição, com base numa avaliação geotécnica foram considerados estáveis ao longo do tempo ou pontos cujo deslocamento vertical é medido com recurso a um extensómetro de varas vertical fundado num maciço rochoso a uma profundidade tal que o ponto de amarração pode ser considerado fixo. Sempre que possível, mesmo os pontos considerados fixos são controlados através da instrumentação, de forma a permitir controlar a qualidade das observações e a estabilidade relativa dos pontos.

Importa referir, que o sistema de observação geodésica previsto inicialmente no plano de observação da obra, contemplava uma rede de triangulação-trilateração materializada nas encostas a jusante. No entanto, após varias visitas técnicas, com especialistas da Geodesia e da Geologia, verificou-se que as condições proporcionadas pela topografia do vale não eram favoráveis para a instalação de um sistema convencional do género da triangulação planimétrica. As vertentes a jusante apresentam um declive muito acentuado, o que obrigaria a pontarias muito inclinadas entre as estações e os pontos objeto colocados no paramento da barragem, o que, inevitavelmente introduziria erros sistemáticos nas leituras dos ângulos azimutais e nas distâncias, além de ser extremamente incómodo para os operadores.

Por outro lado, foi possível confirmar a exequibilidade da instalação de uma pequena rede de estações permanentes GNSS para monitorizar, com elevada frequência de medição, os deslocamentos horizontais de três pontos do coroamento. O sistema de observação geodésica do escalão de montante do AHBS também contempla um sistema, baseado na medição de distâncias com o distanciómetro eletromagnético (DEM) de um taqueómetro eletrónico, para monitorização da convergência das encostas do vale, na vizinhança da barragem, a montante e a jusante.

6.1.3. Altimetria

6.1.3.1. Descrição do Sistema

O sistema de observação altimétrica da barragem é constituído por cinco linhas de nivelamento geométrico (LNG) de precisão:

- Coroamento da barragem, à cota 236,00 m;
- Galeria de visita GV2, à cota 209,10 m;
- Galeria de visita GV4, à cota 169,10 m;
- Galeria de visita GV6, à cota 129,10 m;
- No troço horizontal da galeria geral de drenagem (GGD)
- Na galeria de drenagem de jusante (GDJ), à cota 113,00 m. Esta LNG consiste num circuito fechado que percorre as duas galerias de drenagem.

A LNG do coroamento é composta por 30 pontos objeto, materializados por tacos de nivelamento (figura 6.2), localizados no meio de cada bloco, com exceção dos cinco blocos onde se inserem os descarregadores, em que os pontos estão colocados sobre o eixo de simetria dos pilares. Esta linha de nivelamento está apoiada em dois pontos de referência, margem esquerda e margem direita, materializados também por tacos de nivelamento chumbados nos maciços de amarração das cabeças de medida dos extensómetros de varas verticais, ilustrado na figura 6.3. Os extensómetros estão instalados perto da berma de estrada, fora da zona de influência da barragem, e a sua localização foi escolhida por especialistas da Geotecnia.

Entre os dois pontos de referência (extensómetros) e os dois pontos objeto situados nos encontros das respetivas margens da barragem, devido ao desnível existente, estão materializados pontos auxiliares, de modo a evitar que sejam medidos desníveis entre pontos a distâncias superiores a 25 m.

As LNG das galerias de visita GV2, GV4 e GV6 estão apoiadas em pontos de referência, situados nas extremidades dos seus prolongamentos “encosta adentro” e fixados no maciço de fundação, junto aos pilares de fecho das poligonais.

A GV2, GV4 e GV6 são compostas por 32, 22 e 15 pontos objeto, respetivamente. A linha de nivelamento que percorre o troço horizontal da GGD e a GDJ está apoiada em extensómetros de fundação e é composta por 6 pontos objeto. Todos os pontos objeto, estão materializados por tacos de nivelamento protegidos de ações danosas por

caixas com tampas. Para facilitar o arquivo e gestão da informação, todos os pontos objeto do nivelamento estão designados por um código alfanumérico.

6.1.3.2. Metodologia operativa

Os desníveis entre os pontos objeto, pontos de referência e pontos auxiliares são medidos com recurso a equipamentos para nivelamento geométrico de precisão. Para tal, recorre-se a um nível eletrónico (figura 20) que permite a medição de desníveis e o registo automático de leituras para uma mira de invar com escala graduada em código de barras (figura 21). O nivelamento geométrico de precisão, pretende atingir uma incerteza de medição (desvio Padrão de um desnível) sub-milimétrica, tornando a qualidade do equipamento e a perícia da equipa de observação fundamentais.



Figura 19 - Exemplo de um nível



Figura 20 - Exemplo de uma mira código de barras

Para conseguir atingir estes níveis de precisão, é indispensável seguir rigorosamente um código de boas práticas durante a campanha de observação, das quais é importante salientar as seguintes:

- As leituras são realizadas, quando necessário, com o instrumento protegido da incidência direta da radiação solar (LNG coroaamento), por intermédio de um guarda-sol;
- O aparelho deve estar devidamente estacionado e a meia distância entre os pontos (leitura atrás e leitura à frente), dentro ou fora do alinhamento a medir, nunca ultrapassando os 30m;

- A mira ser mantida na posição vertical, sobre o ponto a medir, com a ajuda de um nível de bolha circular;
- A operação de nivelamento é seguida sempre de uma operação de contra nivelamento.

Após a realização da campanha de observação geodésica, os deslocamentos verticais são obtidos diretamente do ajustamento, pelo método da variação de coordenadas (Casaca, 2001), considerando as variações sofridas pelos desníveis entre duas épocas de observação, convencionando-se que os deslocamentos positivos correspondem a um empolamento e os deslocamentos negativos correspondem a um assentamento.

6.1.4. Planimetria

6.1.4.1. Descrição do Sistema

Para a monitorização de deslocamentos horizontais da barragem estão instalados dois sistemas independentes, o primeiro constituído por três linhas poligonais de precisão em galerias de visita e o segundo consistindo numa pequena rede de três estações permanentes GNSS, no coroamento da barragem, apoiadas numa estação permanente de referência, no maciço rochoso na margem direita, a jusante da barragem. Para a monitorização da convergência das encostas, está instalado um sistema de observação planimétrica muito simples, baseado em cinco pilares de estacionamento geodésico (estações), dois a montante (PMD e PME) e três a jusante (PJD1, PJD2 e PJE).

6.1.4.2. Poligonais

O sistema de observação planimétrico da barragem é constituído por três poligonais de precisão instaladas em galerias interiores:

- Galeria de visita GV2 à cota 209.10m
- Galeria de visita GV4 à cota 169.10m
- Galeria de visita GV6 à cota 129.10m

A GV2 é constituída por 12 pontos objeto, a GV4 por 10 e por fim a GV6, na cota mais baixa por 7 pontos objeto.

Os vértices das poligonais das galerias de visita estão materializados por cachorros metálicos com centragem forçada (figura 22) adequada ao estacionamento de alvos retrorrefletores e de taqueómetros. As bases de estacionamento tem um rasgo radial para evitar que a base do taqueómetro rode em torno da rótula de centragem durante as medições. Os cachorros estão selados no hasteal de montante das galerias, a meio dos blocos selecionados e com a base de estacionamento a uma altura cerca de 1,15 m do pavimento da galeria. Os pontos de referência das poligonais são os seus pontos extremos da margem direita e margem esquerda, materializados por pilares com centragem forçada (figura 23). Os pontos de referência, por se encontrarem no interior do maciço rochoso de fundação, são considerados fixos. No entanto, esta premissa, é sempre confirmada, confrontando os deslocamentos dos vértices das poligonais próximos dos fios-de-prumo invertidos com os deslocamentos medidos com os coordenómetros.



Figura 21 - Exemplo de retrorrefletor estacionado em cachorro metálico



Figura 22 - Exemplo de pilar numa galeria de visita

Para facilitar o arquivo e gestão da informação, os pontos objeto, que coincidem com os vértices das poligonais, são designados por um código alfanumérico iniciado por PGM2, PGM4 e PGM6, no caso das galerias GV2, GV4 e GV6, respetivamente. A designação dos vértices recebe o código da galeria seguido do código do bloco em que se encontram.

6.1.4.3. Metodologia operativa

Para a observação das poligonais nas galerias de visita (figura 24) é usado uma estação total topo de gama (figura 25), com 0.5" (0.15mgon) de precisão angular nos círculos de medição horizontal e vertical e precisão de 0.6mm +1ppm na medição de distâncias para retrorrefletores. Embora do ponto de vista logístico, a medição com uma estação total motorizado seja preferível por ser mais rápida, mais cómoda e mais fiável (leitura automática), a utilização da estação total em modo manual, para a observação dos ângulos horizontais, fornece valores com maior precisão, para distancias inferiores a 30 metros.

A estação total é estacionada em todos os vértices, exceto no primeiro e no último. Em cada estacionamento, é necessário estacionar dois alvos retrorrefletores, um no vértice imediatamente anterior e o outro no vértice seguinte. As leituras são efetuadas na posição direta do instrumento, no sentido progressivo, e repetidas na posição inversa do instrumento, no sentido retrógrado. Para efetuar a correção das distâncias medidas entre os vértices da poligonal, são registados os dados atmosféricos (temperatura, humidade e pressão).



Figura 24 - Exemplo de estação em base de parede numa galeria de visita



Figura 23 - Exemplo de uma galeria de visita da barragem do Baixo Sabor

As variações dos ângulos horizontais e distâncias observados em duas épocas distintas, tratadas pelo método da variação de coordenadas, permite obter diretamente os deslocamentos sofridos pelos vértices da poligonal entre as duas épocas.

6.1.5. Convergência das encostas a montante e a jusante da barragem

Para a monitorização da convergência das encostas, está instalado um sistema de observação planimétrica (figura 26), baseado em cinco pilares de estacionamento geodésico (estações), dois a montante (PMD e PME) e três a jusante (PJD1, PJD2 e PJE). Os pilares PMD, PJD1 e PJD2 situados na margem direita e os pilares PME e PJE situados na margem esquerda.

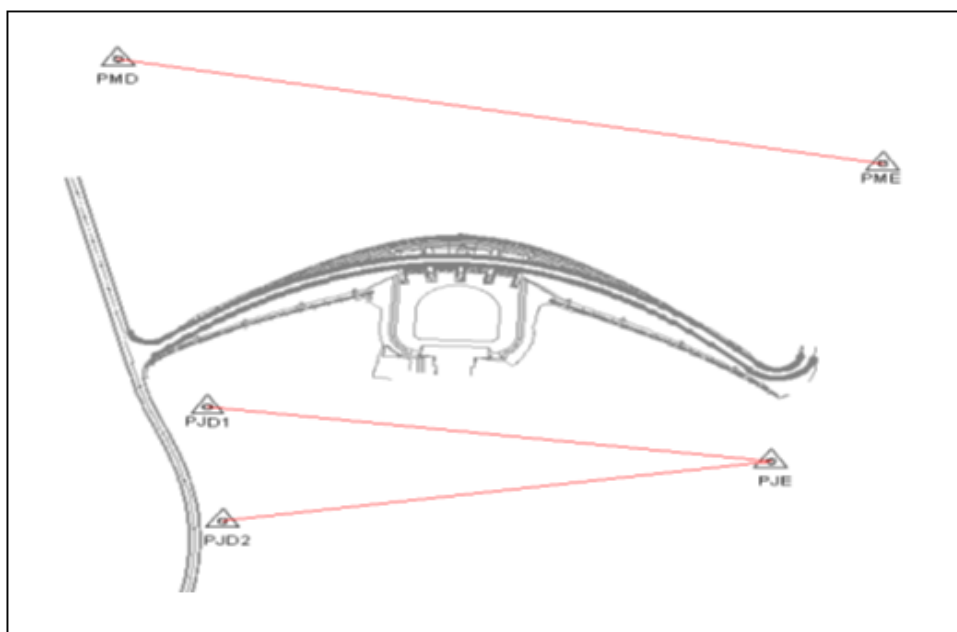


Figura 25 - Figura ilustrativa do sistema de observação da convergência das encostas

Este sistema contempla apenas a medição de distâncias entre os pilares e em cada estacionamento da estação total são medidas a temperatura, a humidade relativa e a pressão atmosférica junto às estações de modo a introduzir correções atmosféricas nas distâncias observadas. Devido a elevada magnitude das distâncias envolvidas (entre 370 e 520 m), estes parâmetros atmosféricos são medidos nos dois extremos das distâncias.

6.1.6. GNSS

Pela primeira vez em Portugal uma barragem é observada em permanência por geodesia espacial recorrendo ao sistema GNSS. Este, amplamente reconhecido pela sua versatilidade, exatidão e operacionalidade sob quais quer condições meteorológicas, permite medir movimentos de pequena amplitude, quer de baixa frequência, quer de elevada frequência. Apesar destas características possibilitarem a

utilização do GNSS numa grande gama de aplicações, a observação com o GNSS nestas barragens terá como objetivo medir as três componentes dos deslocamentos em pontos estratégicos, caracterizados por serem de pequena amplitude e de baixa frequência. Em cada barragem estão materializados três pontos objeto (figura 27) e uma estação de referência fora da zona de influência da obra, com boa fundação, excelentes condições de visibilidade espacial e a menos de 1km de distância da estrutura a monitorizar que vai permitir operar o GNSS em modo relativo – o modo mais preciso. A estação fixa define um ponto de referência estável que permite a aplicação de correções às observações e modelações atmosféricas dos pontos na barragem. No final, resulta uma observação continuada, de elevada amostragem, que permite determinar, com carácter absoluto, as tendências dos vetores de deslocamento da barragem com precisão milimétrica, de forma remota e possibilitando alarmes em tempo real.

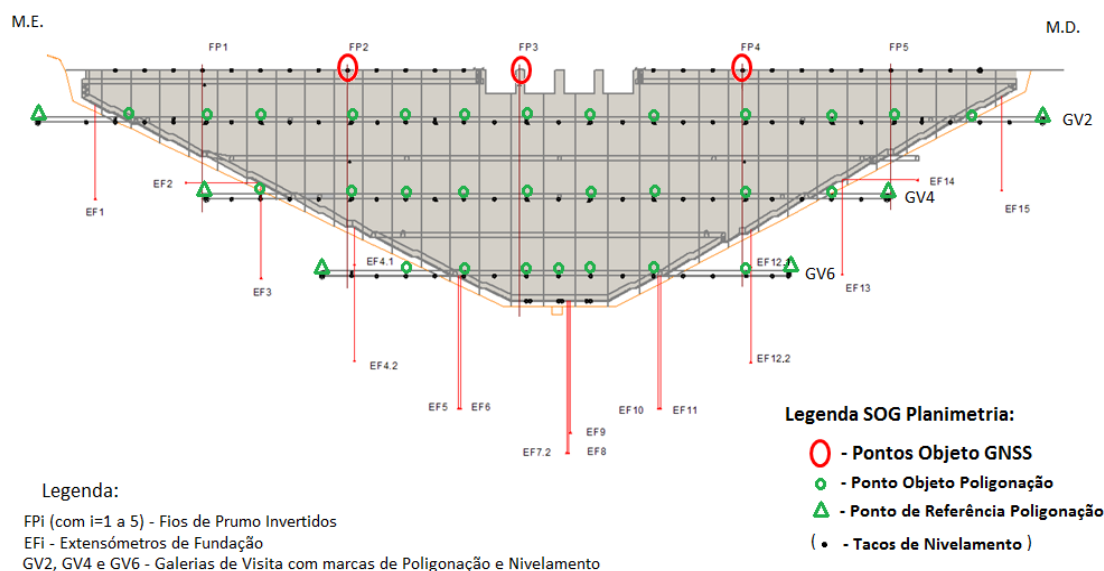


Figura 26 - Localização dos pontos objeto no corpo da barragem para observação por GNSS

6.1.6.1. Rede de Estações GNSS

O sistema de observação geodésica GNSS, representado na figura 28, é constituído por quatro estações GNSS permanentes: três localizadas no coroamento da barragem, e uma outra localizada na margem direita, para funcionar como estação de referência.



Figura 27 - Representação dos pontos que constituem o sistema de observação geodésica por GNSS

As antenas das estações no coroamento com funções de ponto objeto, estão instaladas a alturas superiores a 3 metros acima do pavimento da estrada, de forma a minimizar a interferência no sinal causada pela passagem de veículos pesados de grandes dimensões, efeitos de multicaminho eventualmente causados por peças metálicas que fazem parte do corpo da barragem e até para evitar situações de vandalismo ou roubo. As três estações permanentes GNSS, estão instaladas em locais em que existe nesses blocos fios de prumo, de forma a aumentar a redundância de todo o sistema de observação da barragem, e também para se validarem mutuamente. A estação de referência, como referido anteriormente, está localizada na margem direita, a jusante da barragem, fora da zona de influência da barragem numa zona considerada estável do ponto de vista geotécnico. Para escolher o ponto da estação de referência importa destacar alguns dos aspetos que foram considerados, tais como:

- Estar na margem direita devido aos condicionamentos existentes na margem esquerda, por esta se encontrar em Zona de Proteção Especial.

- Ter o horizonte livre, as vertentes muito inclinadas do vale do Sabor, nas vizinhanças da barragem de montante, obrigaram a que a estação fosse localizada nos pontos de maior altitude da margem direita, de forma a existir também boa visibilidade para a constelação de satélites GNSS.
- Existir condições geológicas para contruir um pilar de estacionamento para antena de referência com boa fundação.
- Estar à menor distância possível da barragem – obriga a estação a estar localizada nas proximidades do alinhamento definido pela tangente ao ponto central do coroamento.
- Haver linha de vista entre a estação de referência e a barragem – esta condição é imposta exclusivamente pelo facto de a comunicação entre a estação de referência e a barragem ser do tipo wireless, devido ao seu baixo custo e à sua fiabilidade.

Embora este método seja pioneiro em Portugal na observação de barragens, com base em experiencias anteriores, espera-se atingir uma incerteza de medição sub-milimétrica para os deslocamentos planimétricos das estações permanentes GNSS da barragem, com sessões de processamento de dados com a duração de vinte e quatro horas.

6.1.6.2. Equipamento GNSS

Para a implementação da rede de estações GNSS permanentes foram instalados uma série de equipamentos com determinadas especificações, enunciadas de forma sucinta de seguida:

- Computador e software
- Recetores e Antenas GNSS
- Comunicações
- Energia
- Monumentação

Computador e Software

O computador tem características que permite utilizar os *softwares* GNSS com eficácia necessária e com alta capacidade de armazenamento. O *software* permite fazer toda a gestão da rede de estações GNSS (frequência de amostragem das observações, de processamento, armazenamento das observações em formato RINEX e acesso remoto com possibilidade de alteração dos parâmetros). Permite também o processamento das observações em tempo real, horário (processamento no final de cada hora com os ficheiros das observações de todas as estações da última hora) e diário (processamento no final de cada dia com os ficheiros das observações de todas as estações do último dia). Finalmente, também permite o tratamento de séries temporais, com saídas gráficas, e, ainda, a possibilidade de acionar um sinal de alarme no caso de falha das observações GNSS ou de obtenção de uma solução anómala.

Antenas GNSS

As antenas GNSS são geodésicas com plano de terra integrado e com modelo de variação do centro de fase absoluta conhecido, todas do tipo choque ring. Permitem receber sinais dos satélites dos GPS (L1/L2C/L2P/L5), GLONASS (L1/L2) e Galileo (L1/E5a/E5b/E5a+b), operam sobre condições de humidade e temperatura (-20°C e +70 °C) elevada de forma continuada.

Comunicações

Para a comunicação entre as estações de referência e as respetivas estações objeto, no coroamento de cada barragem, está instalada uma comunicação wireless (modem) que assegura a transmissão total e contínua dos dados até a uma distância de 1500 m com linha de vista, isto é, sem haver qualquer prejuízo pelo facto da estação de referência se encontrar mais distante no que diz respeito a perda de dados e à latência, mesmo para frequências de amostragem até 20 Hz. As estações GNSS do coroamento estão ligadas à rede de fibra ótica da barragem através de um comutador.

Energia

As estações GNSS no coroamento estão alimentadas com a corrente elétrica disponível nas obras, de 220 V, e de fontes de alimentação para transformar a energia elétrica de corrente alternada para corrente contínua. As duas estações GNSS de referência estão alimentadas com painéis solares fotovoltaicos e com baterias de 12 V de gel de chumbo que garantam o funcionamento contínuo do recetor GNSS, da

comunicação wireless entre a estação de referência e o coroamento, e do termóstato e da ventilação forçada do armário onde irão ficar acondicionados estes equipamentos

Monumentação e acessórios

Para a estação de referência foi construído um pilar de betão armado com 3,0 m de altura e secção circular, com 0,60 m diâmetro (de modo a ter rigidez suficiente para suportar a ação do vento). Este pilar está envolvido por uma manilha exterior de betão armado com 0,70 m de diâmetro interno para proteção térmica, ficando uma caixa de ar de 0,05 m entre o pilar e o tubo. O diâmetro aparente do pilar é de 0,85 m. No topo do pilar está instalada, numa centragem forçada, a antena GNSS sendo que na base há um abrigo, onde está colocado o armário onde fica acondicionado o recetor GNSS, o modem wireless e respetivos acessórios.

6.2. Aproveitamento Hidroelétrico de Foz Tua

6.2.1. Enquadramento

O aproveitamento hidroelétrico de Foz Tua (AHFT) fica situado no rio Tua, afluente da margem direita do rio Douro que define os limites dos concelhos de Alijó, no distrito de Vila Real, e Carrazeda de Ansiães, no distrito de Bragança. A barragem do AHFT (figura 29), situada a 1,1 km a montante da confluência com o rio Douro, é constituída por uma abóbada de betão de dupla curvatura, num vale profundamente encaixado, fundada num maciço granítico, com uma altura máxima de 108 m acima da fundação e cujo coroamento, à altitude de 172 m, apresenta um desenvolvimento de cerca de 275 m. A barragem dispõe de descarregador de cheias de superfície com quatro vãos equipados, cada um com 16 m de largura, descarga de fundo na zona central e bacia de dissipação a jusante. A bacia hidrográfica com 3809 km² cria uma albufeira que para o nível de pleno armazenamento (NPA) à cota (170,00) tem um volume de 106,1 hm³ e uma área inundada de 420,9 ha. A albufeira terá, em condições normais, um regime de exploração entre o nível de pleno armazenamento e o nível mínimo de exploração à cota (167,00). O nível mínimo de exploração extraordinário situa-se à cota (162,00).

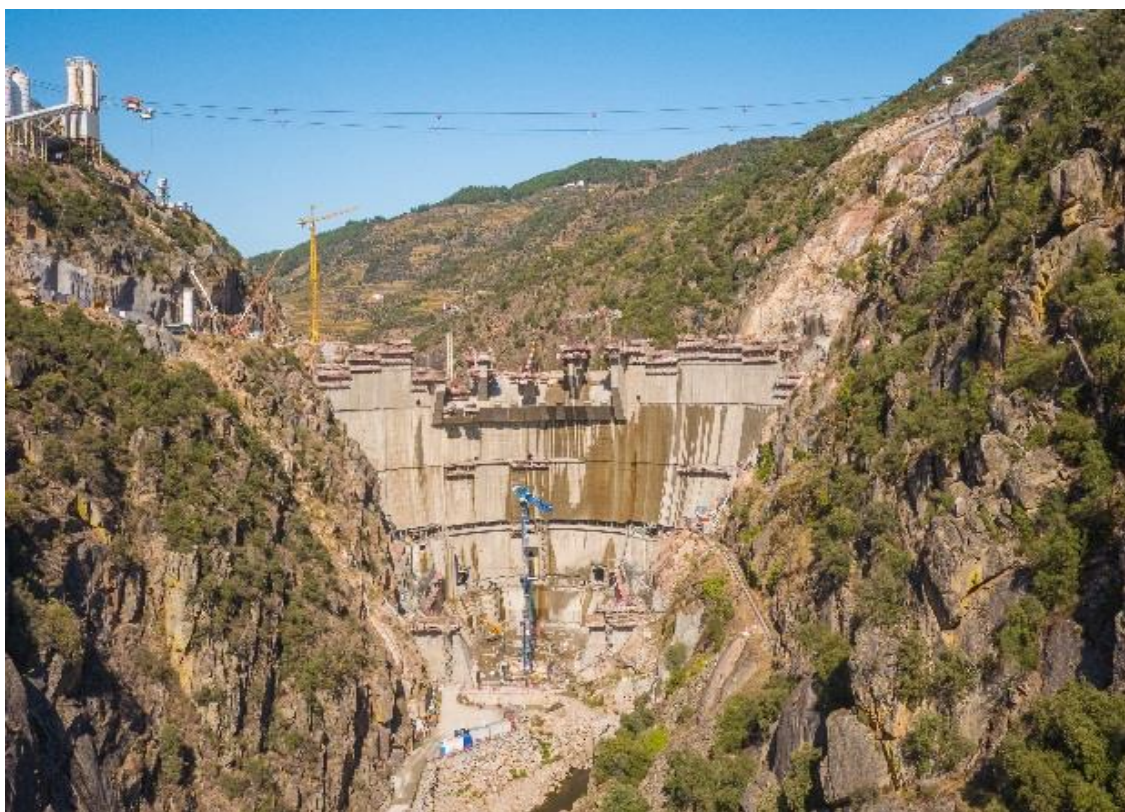


Figura 28 - Barragem de Foz Tua

6.2.2. Sistema de Observação Geodésica

O sistema de observação geodésica da barragem é constituído por uma componente altimétrica, destinada à monitorização de deslocamentos verticais de pontos objeto no coroamento e nas galerias interiores, e por uma componente planimétrica, destinada à monitorização de deslocamentos horizontais, quer de pontos objeto no paramento de jusante da barragem, quer por linhas de poligonação em galerias de visita. A altimetria é baseada em linhas nivelamento geométrico de precisão e a planimetria está dividida em dois sistemas independentes: o primeiro consiste em poligonais de precisão para observação das galerias de visita e o segundo consiste num sistema de monitorização geodésica automático e contínuo, com recurso a uma estação total robotizada, para observação dos pontos objetos colocados no paramento a jusante da barragem. Esta solução inovadora, pioneira em Portugal na observação geodésica de barragens, surge na sequência da melhoria e procura constante de novas soluções para a observação geodésica de todas as barragens e após verificar-se em várias visitas técnicas, que as condições proporcionadas pela topografia do vale, especialmente na margem direita, apresentava algumas limitações dentre as quais se podem destacar as seguintes:

- Dificuldade em encontrar pontos que pudessem ser considerados fixos na encosta;
- As marcas de pontaria próximas das margens dificilmente seriam visíveis da mesma margem a não ser de estações muito próximas da barragem, o que obrigaria a algumas pontarias muito inclinadas;
- Os comprimentos de muitas pontarias óticas das estações para as margens seriam grandes, potenciando o efeito dos erros de pontaria, refração, etc;
- Para intersectar adequadamente todas as marcas de pontaria previstas entre as cotas 129 à cota 167, seriam necessários pilares a varias cotas, alguns dos quais, forçosamente, em locais de muito difícil acesso.

Estes fatores, determinaram que não estavam reunidas as condições necessárias para a instalação de um sistema convencional do género da triangulação planimétrica, como estava previsto inicialmente no plano de observação da barragem. Assim, como referido anteriormente optou-se por uma solução inovadora com recurso a uma estação total robotizada que é capaz de se adaptar as exigentes condições do vale e ao mesmo tempo fornecer uma solução continua de aquisição de dados, essencial principalmente para a fase do primeiro enchimento da albufeira e para a fase de entrada em exploração.

6.2.3. Altimetria

6.2.3.1. Descrição do Sistema

O sistema de observação altimétrica da barragem é constituído por cinco linhas de nivelamento geométrico (LNG) de precisão:

- Coroamento da barragem, à cota 172m;
- Galeria de visita GV2, à cota 149m;
- Galeria de visita GV4, à cota 108 m;
- No troço horizontal da galeria geral de drenagem GGD, à cota 67m;
- Galeria de drenagem de jusante GDJ, à cota 75 m.

As linhas de nivelamento são constituídas por pontos objeto materializados por tacos de nivelamento ao longo de toda a galeria, apoiadas em pontos de referência (junto aos pilares), situados nas duas extremidades, margem esquerda e margem direita. À semelhança do que acontece no caso da barragem do Baixo Sabor, os pontos de referência são considerados pontos fixos com recurso a uma avaliação geotécnica. Estes estão solidários com o maciço rochoso, podendo assim ser considerados estáveis ao longo do tempo. Sempre que possível, mesmo os pontos considerados fixos são controlados através da instrumentação, de forma a permitir controlar a qualidade das observações e a estabilidade relativa dos pontos.

A LNG do coroamento , ainda por materializar devido aos trabalhos de construção ainda decorrentes, será composta por 19 pontos objeto, instalados a meio de cada bloco, com exceção dos cinco blocos onde se insere o descarregador, em que será ser colocado um par de pontos (um a montante e outro a jusante) sobre o eixo de simetria dos pilares. Esta linha de nivelamento estará apoiada em dois pontos de referência, margem esquerda e margem direita, materializados por tacos de nivelamento chumbados nos maciços de amarração das cabeças de medida dos extensómetros de varas verticais. Os extensómetros serão instalados perto da berma de estrada, fora da zona de influência da barragem.

As LNG das galerias de visita (figura 30) GV2 e a GV4, serão compostas por 19 e 18 pontos objeto, respetivamente, e serão apoiadas em pontos de referência situados nas extremidades dos seus prolongamentos amarrados com o maciço de fundação. Os pontos objeto das galerias serão colocados a meio dos blocos e recebem o código da galeria seguido do código do bloco em que se encontram. Na GGD e na GDJ serão colocados 5 pontos objeto em cada galeria, sendo que ambas as linhas serão apoiadas em extensómetros de fundação.



Figura 29 - Exemplo de galeria de visita em fase final de construção na barragem de Foz Tua

6.2.4. Planimetria

O sistema planimétrico está dividido em dois sistemas independentes: o primeiro consiste em poligonais de precisão para observação das galerias de visita e o segundo consiste num sistema de monitorização geodésica automático e contínuo, com recurso a uma estação total robotizada para observação dos pontos objetos colocados no paramento a jusante da barragem, materializados com alvos retrorrefletores.

6.2.4.1. Poligonais

O sistema de observação planimétrico da barragem é constituído por três poligonais de precisão:

- Coroamento, à cota 172m
- Galeria de visita GV2, à cota 149m
- Galeria de visita GV4, à cota 108m

Os vértices das poligonais das galerias de visita (figura 31), estão materializados por cachorros metálicos com centragem forçada adequada ao estacionamento de alvos retrorrefletores e de taqueómetros. À semelhança do projeto da barragem do Baixo Sabor, os cachorros estão selados no hasteal de montante das galerias, a meio dos blocos selecionados e com a base de estacionamento a uma altura cerca de 1,15 m do pavimento da galeria. Estas bases de estacionamento tem um rasgo radial para evitar que a base do taqueómetro rode em torno da rótula de centragem durante as medições. Os pontos de referência das poligonais são os seus pontos extremos da margem direita e margem esquerda, materializados por pilares com centragem forçada. Os pontos de referência, por se encontrarem no interior do maciço rochoso de fundação, são considerados fixos.



Figura 30 - Exemplo de estacionamento da estação total para observação da poligonal na barragem de Foz Tua

6.2.4.2. Sistema Automático de Monitorização Geodésica

Este sistema, inovador e pioneiro em Portugal na observação geodésica de barragens visa possibilitar a monitorização contínua e automática de pontos objeto no paramento da barragem, a partir de uma estação total robotizada com reconhecimento automático de prismas desde o primeiro enchimento da albufeira. No paramento estão instalados 15 pontos objeto de acordo com o estabelecido no plano de observação da estrutura, colocados criteriosamente por toda a estrutura, a cotas variáveis e alguns

deles em blocos chave, onde existe instrumentação de ordem geotécnica de forma aos resultados dos vários sensores de instrumentação se poderem validar mutuamente. Em relação as referências foram colocadas três na margem direita e uma na margem esquerda, especialmente bem distribuídas e colocadas em locais estratégicos com garantia geológica de estabilidade posicional. A estação está instalada a jusante da barragem, na margem esquerda, sobre um pilar de betão com centragem forçada, com uma proteção a sua volta (figura 32). Essencialmente, o sistema é constituído pelos seguintes elementos principais:

- Estação total robotizada, incluindo a sua proteção contra condicionamentos atmosféricos
- Estação meteorológica
- Sistema de comunicação
- Dispositivo de controlo
- Softwares

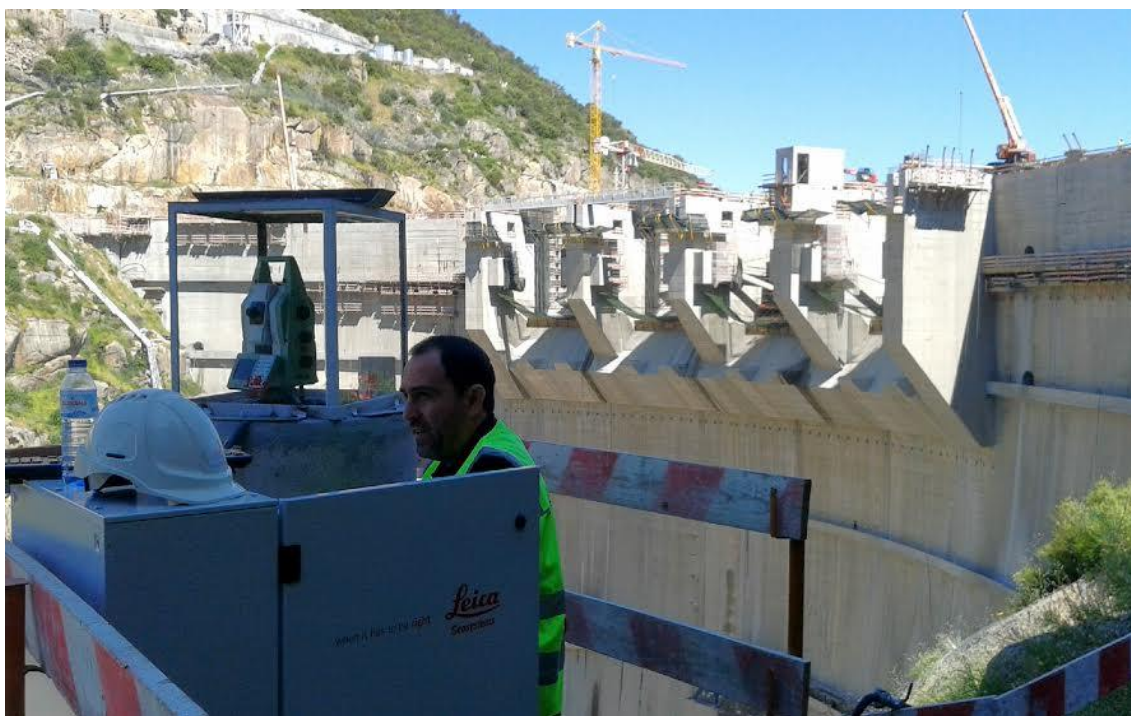


Figura 31 - Estação total robotizada instalada na barragem de Foz Tua

Especificações técnicas

Este sistema foi concebido para a obtenção de deslocamentos com exatidões submilimétricas. O sistema é essencialmente constituído por:

- a) A estação total robotizada permite a medição de ângulos e distancias, em modo ATR (*Automatic Target Recognition*)

- b) Prismas dos pontos objeto e das referências
- c) Estação meteorológica permite a medição dos dados atmosféricos (pressão, humidade e temperatura) junto à estação e posterior integração no cálculo dos deslocamentos – correção das distancias
- d) Sistema de comunicação permite o acesso remoto ao dispositivo de controlo
- e) A estação e restantes equipamentos estão protegidos perante condições climatéricas desfavoráveis, sem prejudicar visadas nem obrigando a visitas/manutenções periódicas e garantindo os intervalos térmicos de funcionamento do equipamento

Em relação ao software, permite a realização de forma automática de múltiplas tarefas das quais, de forma muito sucinta se destacam as seguintes:

- Cálculo e exportação de soluções discretas e conjuntos de séries, em formato numérico e gráfico, com possibilidade de análise dos resíduos obtidos.
- Sobre a consulta e visualização dos dados, destaca-se de forma sucinta a possibilidade de obter:
 - a. Coordenadas obtidas para um prisma num dado intervalo de tempo (representação da evolução das soluções para as componentes X, Y e Z)
 - b. Movimentos obtidos para um prisma num dado intervalo de tempo (representação da evolução das componentes transversal, longitudinal e vertical)
- Sobre a consulta de informação analítica, destaca-se a possibilidade de obter:
 - a. Tabela numérica onde é possível consultar os valores obtidos em todos os sensores
 - b. Consulta rápida do comportamento de cada sensor nos últimos ciclos realizados
 - c. Informação sobre o último ciclo realizado (quando ocorreu, que tarefas estavam previstas e se foram bem sucedidas) e alerta sobre o inicio do próximo ciclo (quando e quais as tarefas previstas)
- Sobre as opções e forma de calculo, destaca-se a possibilidade de:
 - a. Configurar ciclos de medições automáticas com várias opções de configuração, por exemplo a escolha do período diário para observação
 - b. Diminuir o campo de busca ATR para garantir que prismas alinhados, em relação à linha de pontaria, sejam encontrados na sua ordem correta
 - c. Definição de perfis para cálculo e representação dos resultados;
 - d. Obtenção de valores médios diários;

- Emissão de relatórios com deslocamentos, resíduos e gráficos em formato e frequência a definir pelo utilizador. Exportação automática em formatos personalizados para integração em base de dados.
 - a. Definição do layout dos gráficos
 - b. Programação do envio em intervalos diários, semanais ou mensais
 - c. Resumo da informação essencial relativa ao processamento automático para publicação e distribuição de relatórios em formato PDF
- Integração de dados meteorológicos para correções atmosféricas
- Sistema de definição de alertas para intervalos de deslocamentos configurados pelo utilizador.

6.2.4.2.1. Estação Total

A estação total instalada para a observação geodésica da barragem de Foz Tua foi especialmente concebida para operar em projetos de monitorização estrutural e contínuo. Faz parte da nova geração de estações totais da LEICA, e o modelo escolhido foi a TM50, ilustrada na figura 33. Como características principais, esta estação tem 0.5" (0.15mgon) de precisão angular nos círculos de medição horizontal e 0.6mm + 1ppm de precisão na medição de distâncias para primas. Integra a tecnologia de reconhecimento automático de primas (ATR – Automatic Target Recognition), que permite identificar e medir ao centro de um prisma sem qualquer intervenção do operador. Em modo ATR, esta estação permite medir para prismas circulares do tipo GMP104 (escolhidos para os pontos objeto) e GPR112 (escolhidos para as referências) distâncias com precisão sub-milimétrica para valores inferiores a 400m. Em relação as medições angulares, consegue reconhecer e medir para um prisma circular até 3000m com a mesma precisão angular (horizontal e vertical) do sistema de pontaria e medição manual (ou seja, 0.5"). Em relação ao modo em operação, a estação demora 2.4 segundos em cada medição simples, a mudança de face é feita em 2.9 segundos e faz uma rotação de 180° em apenas 1 segundo graças ao sistema de motorização de última geração que integra tecnologia piezoelétrica.



Figura 32 - Estação Total robotizada Leica TM50

A estação está instalada sobre o pilar num sistema de forçagem centrada do tipo Wild e fixa no topo do tubo de betão. Está protegida por uma estrutura com forma de prisma quadrangular, em que a base inferior da proteção não está tapada de forma a poder assentar no pilar. A base superior está coberta por uma tampa em aço INOX, com um sistema de fixação simples de forma a poder ser removida quando necessário. As 4 faces laterais da proteção, estão tapadas com vidros temperados, com baixo coeficiente de refração, de forma a não interferir com a exatidão das medições.

6.2.4.2.2. Prismas das referências

Os prismas instalados para utilizar como referências pertencem ao conjunto da família Leica GPR112, e estão representados na figura 34. No total foram colocadas quatro referências, três na margem direita e uma na margem esquerda, como referido anteriormente.



Figura 33 - Conjunto do prisma GPR112

Estes prismas caracterizam-se pela sua qualidade de construção, salientando a integração de películas interiores de filtragem que previnem a condensação na superfície de reflexão, assim como minimizam o impacto direto da poeira e das gotas da chuva. Este é um fator importante dado que, as referências estão colocadas em sítios

remotos ao longo de duas encostas bastante acentuadas, o que limita o acesso as mesmas, figura 35.



Figura 34 - Localização de duas referências

6.2.4.2.3. Prismas dos pontos objeto

Estão instalados um total de 15 pontos objeto, localizados conforme o definido no plano de observação. Os prismas escolhidos para os pontos objeto foram os GMP104, ilustrados na figura 36. Trata-se de um prisma que, pelas suas características físicas (em “L”, com 2 aberturas laterais e 1 parafuso), permite total mobilidade bidirecional na fixação na estrutura. Esta característica é determinante para que os prismas possam estar devidamente orientados para a estação total, de forma a permitir a sua leitura e não prejudicar o reconhecimento automático por parte da estação.



Figura 35 - Prisma GMP104

6.2.4.2.4. Sensor meteorológico

O sensor meteorológico instalado permite a medição dos seguintes dados atmosféricos, com vista a integração dos mesmos para a redução das distâncias observadas:

- Temperatura do ar
- Pressão atmosférica
- Humidade relativa do ar

Em relação a temperatura o sensor tem um intervalo de medição de -40°C a $+60^{\circ}\text{C}$ com uma resolução de 0.1°C e uma precisão de 0.3°C . Para a pressão o intervalo de medição encontra-se entre os 600 e os 1100hPa de pressão absoluta com uma resolução de 0.1hPa e uma precisão de 0.8hPa. Para a humidade relativa do ar, o intervalo encontra-se entre os 10 e 100% com uma resolução de 0.1% e uma precisão de 2%. Sobre a humidade, importa referir que embora esta possa influenciar a redução das distâncias inclinadas, o seu impacto é extremamente reduzido, ou mesmo irrelevante, tendo em conta a metodologia da observação aplicada neste sistema.

6.2.4.2.5. Sistema de comunicação

Todos as componentes do sistema ficam instaladas no pilar: a estação total e o sensor meteorológico no exterior, e os restantes equipamentos dentro de uma caixa de armazenamento colocada junto ao pilar. Para o armazenamento está colocado dentro da caixa um computador industrial com ligação direta (cabo) à estação total e ao sensor meteorológico. A comunicação com o exterior para fins de acesso remoto ao sistema, envio de notificações, relatórios e bases de dados para os *softwares* é feita através de uma ligação internet. Sobre este ponto, é importante destacar que mesmo que eventualmente surja uma interrupção do serviço de internet, o sistema continua a operar normalmente, porque todas as operações de armazenamento, calculo e representação gráfica são realizadas localmente no computador instalado junto ao pilar. Todas as funcionalidades dependentes das comunicações internet são automaticamente retomadas quando a ligação a internet é estabelecida.

6.2.4.3. Função do Sistema

O sistema implementado permite o controlo de movimentos planimétricos dos pontos objeto, materializados através de prismas refletores colocados em pontos de interesse previamente selecionados sobre o paramento da barragem. Como referido anteriormente, foi construído um pilar, margem esquerda, com boas condições de visibilidade, e assumido como fixo em relação aos movimentos da estrutura da barragem. Esta garantia é dada em função do local escolhido, por estar sobre um maciço rochoso validado geologicamente como estável. A estação total robotizada, fica fixa neste pilar, e é a partir deste que mede de forma automática e contínua, ângulos e distâncias, para todos os pontos objeto colocados sobre o paramento. A estação realiza também medições de ângulos e distâncias a outro conjunto de prismas refletores, colocados em pontos previamente selecionados nas encostas, exteriores à barragem e fora da sua zona de influência de forma a poderem ser considerados fixos (referências) relativamente aos movimentos da estrutura. O facto de a observação ser feita apenas de uma margem, o que significa não existir redundância não constitui qualquer limitação à operabilidade do sistema por este facto ser amplamente compensado pela elevada frequência de aquisição de dados.

6.3. Aproveitamento Hidroelétrico de Ribeiradio – Ermida

6.3.1. Enquadramento

O Aproveitamento Hidroelétrico de Ribeiradio-Ermida (AHRE), é o primeiro grande aproveitamento da bacia do rio Vouga, fica no Concelho de Oliveira de Frades, distrito de Aveiro. O principal objetivo do Aproveitamento de Ribeiradio – Ermida é regularizar o rio Vouga, pela criação de uma albufeira, contribuindo simultaneamente para produzir eletricidade, aproveitando uma queda significativa. Assim, para além de energia, ter-se-á uma reserva estratégica de água nesta bacia, um dos grandes rios nacionais ainda sem armazenamento relevante.

O AHRE é constituído por dois escalões, localizando-se no de montante a barragem de Ribeiradio (figura 37), e no de jusante, a cerca de 5km, a barragem de Ermida. A barragem de Ribeiradio, objeto de estudo nesta dissertação, é uma gravidade de betão, com fundação granítica, com um coroamento de 265m de desenvolvimento, a uma altitude máxima de 76m. A barragem dispõe de descarregador de cheias de superfície com três vãos equipados, cada um com 16 m de largura, descarga de fundo na zona central e bacia de dissipação a jusante. A barragem cria uma albufeira com 136hm³ para o nível de pleno armazenamento (NPA) à cota (110,00) e a albufeira terá, em condições normais, um regime de exploração entre o nível de pleno armazenamento e o nível mínimo de exploração à cota (85,00).



Figura 36 - Barragem de Ribeiradio

6.3.2. Sistema de Observação Geodésica

O sistema de observação geodésica da barragem, é constituído por uma componente altimétrica, destinada à monitorização de deslocamentos verticais de pontos objeto do coroamento, e por uma componente planimétrica, destinada à monitorização de deslocamentos horizontais de pontos objeto no paramento de jusante da barragem. O sistema altimétrico é baseado num nivelamento geométrico de precisão, enquanto o sistema planimétrico é baseado em taqueometria a partir de duas estações, materializados por pilares nas encostas a jusante da barragem.

Face às condições geológicas, geomorfológicas e hidrogeológicas da albufeira de Ribeiradio, considerou-se ainda necessário implementar um sistema de observação que permitisse detetar movimentos anómalos nas zonas identificadas como de maior risco associado à eventual instabilidade das encostas da albufeira.

6.3.3. Altimetria

O sistema de observação altimétrica da barragem é constituído por uma linha de nivelamento geométrico (LNG) de precisão que se desenvolve ao longo do coroamento da barragem, apoiada em extensómetros de varas verticais (figura 38) instalados nas duas margens. Os pontos objeto da LNG do coroamento estão materializados por tacos de nivelamento (figura 39), protegidos de ações danosas por caixas com tampas.



Figura 37 - Exemplo de extensómetro de varas verticais com pontos de referência para fecho de linha de



Figura 38 - Exemplo de taco de nivelamento e respetiva caixa de proteção

Os pontos objeto da LNG do coroamento, no total 15 (figura 40) estão designados por um código alfanumérico iniciado por N, seguido dos números identificadores das juntas que limitam o bloco, com início em N1 até N15. Os pontos de referência estão materializados por tacos de nivelamento colocados nos maciços de amarração das cabeças de medida dos extensómetros e são designados pelos códigos alfanuméricos NRE (margem esquerda) e NRD (margem direita). Para ligar o ponto de referência NRD ao ponto objeto N1 e o ponto de referência NRE ao ponto objeto N15 são necessários pontos auxiliares, destinados a manter os desníveis observados em comprimentos inferiores a 25m.

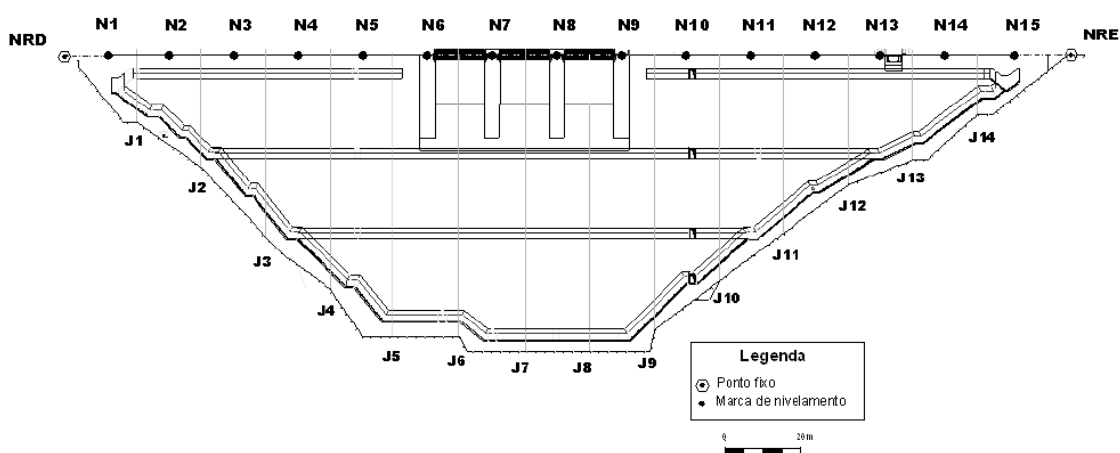


Figura 39 - Alçado com a localização aproximada dos pontos objeto e dos pontos de referência

6.3.3.1. Metodologia operativa

Os desníveis entre os pontos objeto, pontos de referência e pontos auxiliares são medidos com recurso a equipamentos para nivelamento geométrico de precisão. Para tal, recorre-se a um nível eletrónico que permite a medição de desníveis e o registo automático de leituras para uma mira de invar com escala graduada em código de barras. O processo prático é literalmente igual ao apresentado no caso do AHBS. Os deslocamentos verticais entre duas épocas de observação são obtidos diretamente do ajustamento, pelo método da variação de coordenadas, das variações sofridas pelos desníveis entre as duas épocas de observação. O ajustamento é constringido pelas correspondentes variações de nível dos pontos de referência, medidas nos maciços de amarração dos extensómetros de varas.

6.3.4. Planimetria

O sistema de observação geodésica (SOG) contempla 11 pontos objeto horizontais, distribuídos por 8 blocos de construção, entre as cotas 75 e 107 materializados no paramento de jusante da barragem, nas localizações esquematicamente apresentadas no alçado da figura 41. Estes pontos objeto, estão duplamente materializados quer em alvos de pontaria ótica, quer em retrorefletores e são observados, em ângulos e em distâncias, a partir de dois pilares da rede geodésica, um em cada margem a jusante da barragem. A dupla-materialização dos pontos objeto permite transformar a rede de triangulação numa rede mista de triangulação-trilateração, com grande robustez operacional, permitindo medir apenas ângulos, apenas distancias, ou ângulos e distancias.

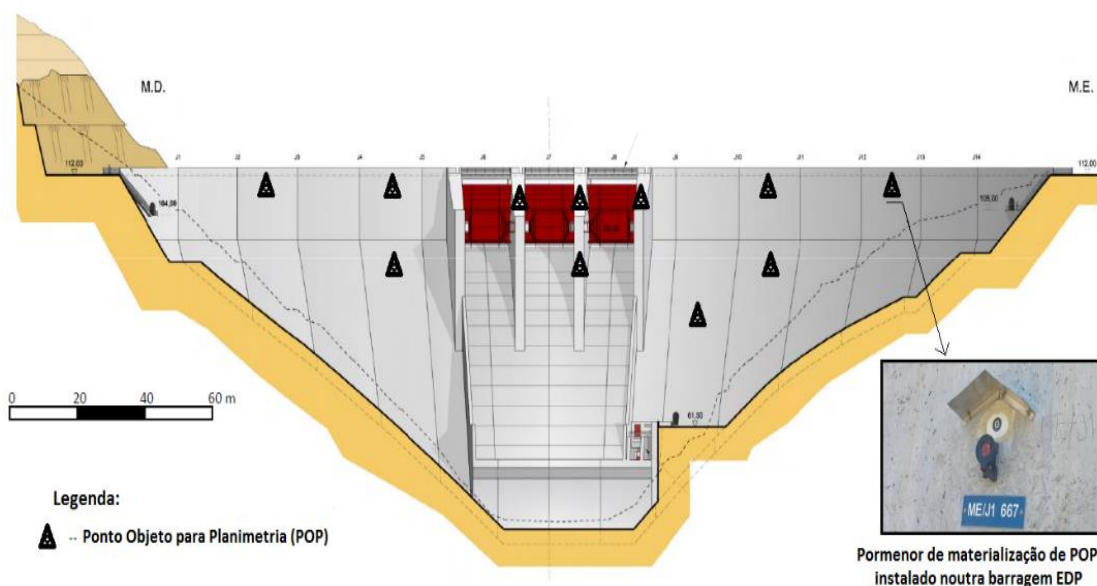


Figura 40 - Representação esquemática dos pontos objeto colocados no paramento

6.3.4.1. Metodologia operativa

A monitorização dos pontos materializados pelas posições dos primas instalados no paramento a jusante da barragem de Ribeiradio é feita pelo método de irradiação, também conhecido pelo método dos giros do horizonte através de intersecções diretas para todos os PO a partir dos pilares que formam a rede geodésica. Após um processo inicial de leitura manual e registo das observações angulares e lineares, realizadas em cada estação, a estação total Leica TM30 permite repetir aquela leitura em modo automático ATR (Automatic Target Recognition). Como as posições dos pontos objetos não variam muito entre as diferentes épocas de observação, após o registo inicial na

primeira época de observação, as observações realizadas nas épocas seguintes podem ser todas realizadas em modo automático.

Na prática, a campanha de observação geodésica é feita estacionando a estação total nos dois pilares, ambos com centragem forçada, margem direita e margem esquerda e feita a orientação para a referência no pilar oposto ao estacionamento. A partir daí é realizado um conjunto de irradiadas consecutivas (intersecções diretas), na posição direta e inversa, para os 11 pontos objetos materializados no paramento, sendo que o início e o fecho do giro é feito sempre no pilar oposto ao estacionamento, onde está estacionado um alvo do tipo Leica GH1P. Para a correção das distâncias são medidos dados atmosféricos, como a pressão atmosférica, temperaturas e humidade. A automatização completa da medição dos ângulos e distâncias, tem a importante vantagem de permitir diminuir o tempo de observação em cada estação, determinante em situações em que existem janelas temporais muito estreitas com condições atmosféricas adequadas à observação geodésica, tal como se verifica nos dias mais quentes do ano.

No entanto, neste caso em particular de Ribeiradio, a campanha de observação geodésica era realizada também em modo manual. Para as observações angulares, é estacionado um alvo de pontaria ótica do tipo “olho de boi” no pilar oposto ao estacionamento, para definir a orientação. A partir daí o método utilizado é exatamente o mesmo embora as pontarias para a medição angular sejam feitas para os alvos de pontaria ótica instalados no paramento.

6.3.5. Implementação do Sistema de Observação Geodésica

O sistema de observação geodésica de Ribeiradio é o primeiro das mais de 50 barragens com observação geodésica que pertencem ao grupo EDP, em que a observação é feita de modo automático, recorrendo ao modo ATR da estação total para reconhecer e efetuar as medições, ângulos e distâncias, para os prismas colocados no paramento. A implementação deste sistema foi um passo importante na modernização na forma com a observação geodésica de barragens de betão é realizada, quer pela colocação de prismas no paramento, embora no Alto Ceira II esta inovação fosse instalada primeiro, quer pela exploração das vantagens da taqueometria automática.

A conceção do sistema de observação geodésica para a barragem de Ribeiradio assenta essencialmente em duas preocupações centrais. A primeira passa por procurar aproveitar os desenvolvimentos tecnológicos que surgiram nos equipamentos taqueométricos de modo a automatizar e, conseqüentemente, encurtar a duração das

campanhas de observação geodésica. A simplificação e encurtamento da duração das campanhas de observação geodésica tem inúmeras vantagens das quais se destacam a melhoria da qualidade dos resultados, pois permite aproveitar melhor as janelas temporais em que se verificam condições atmosféricas favoráveis à observação e diminuição dos custos das campanhas, permitindo uma observação geodésica mais frequente da obra. A segunda passa por controlar o efeito dos movimentos devidos à deformação do maciço rochoso onde se encontram apoiadas a componente altimétrica e a componente planimétrica do sistema de observação geodésica.

O sistema de observação geodésica é constituído apenas por dois pilares, margem esquerda e margem direita. Ele foi concebido de forma a que o bom desempenho da componente planimétrica do sistema de observação geodésica dependa essencialmente da estabilidade posicional dos dois pilares de estacionamento, controlada mediante a medição da distância, e da realização das medições em condições atmosféricas favoráveis. Quanto ao bom desempenho a longo prazo da componente altimétrica do sistema de observação geodésica da barragem, está assegurado pelo apoio da linha de nivelamento do coroamento, nas suas extremidades, em extensómetros de varas, o que permite a correção de deformações superficiais do maciço rochoso e o controlo da qualidade das medições.

6.3.5.1. Rede Geodésica

A rede geodésica de referência, no AHRE, é composta por dois pilares geodésicos a jusante (PD e PE), representada na figura 42.

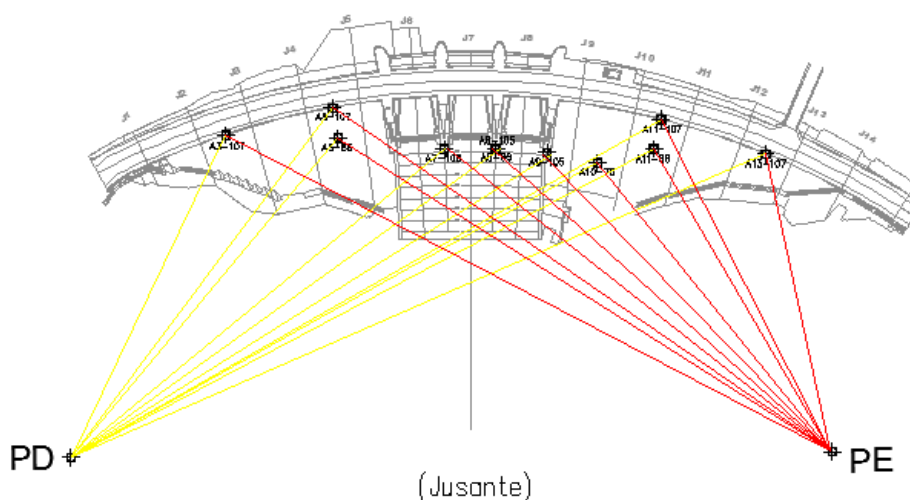


Figura 41 - Representação da rede geodésica da barragem de Ribeiradio

Os pilares que compõem a rede geodésica constituem pontos fixos que servem como referência para as observações. A fundação dos pilares PE e PD garantem a sua estabilidade posicional ao longo do tempo, sendo esta uma condição necessária para a exatidão dos deslocamentos determinados com as campanhas de observação geodésica. No entanto, esta estabilidade é controlada com a medição de distância entre os pilares que deverá, dentro do intervalo de erro da medição, manter-se constante.

Estão localizados relativamente próximos da barragem, a uma cota que minimiza as inclinações, fora da zona de influência da barragem e em posições que evitam pontarias rasantes às encostas, de forma a evitar que as leituras azimutais e as leituras lineares (distâncias) sejam sujeitas a desvios provocados pelos gradientes atmosféricos, essencialmente térmicos e de pressão.

São constituídos por manilhas cheias com betão (figura 43), solidarizadas, por varões de aço, com a fundação (figura 44), e com uma altura de cerca de 1,15 m acima da base superior da sapata de fundação. O diâmetro do pilar, é de 0.20cm, de modo a permitir o estacionamento do equipamento de medição. Os pilares de estacionamento estão rodeados por uma manilha exterior, para isolamento térmico, pintada com tinta branca, de modo a refletir parte da energia solar incidente e a evitar a eventual torção do pilar durante as medições.



Figura 43 - Pilar de referência para observação da barragem

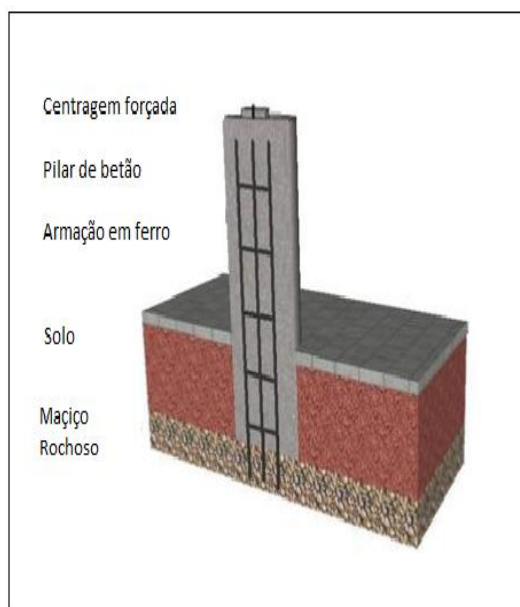


Figura 42 - Esquema da constituição e construção do pilar

A sapata que envolve o pilar, está dimensionada de modo a dar estabilidade ao pilar de estacionamento e a permitir ao operador movimentar-se à vontade em torno do pilar durante as medições.

A sapata está solidarizada com a rocha de fundação por intermédio de quatro varões verticais selados, pelo menos, 2 m na fundação.

No topo do pilar está colocada uma peça de centragem forçada (Wild), destinada a garantir o estacionamento de um taqueómetro ou de um alvo retrorefletor, sempre na mesma posição relativamente ao pilar. Esta garante a reocupação das mesmas posições em épocas diferentes de monitorização. De acordo com Nadal *et al.* (2000), a estimativa da repetibilidade na reocupação é da ordem das décimas de milímetro.

6.3.6.1. Equipamentos e Materiais

Para a realização das campanhas de observação geodésica do AHRE, são utilizados os seguintes equipamentos:

Planimetria

- Estação total Leica, modelo TM30
- Prismas circulares Leica GPM104
- Prisma de precisão Leica GPH1P
- Alvos de pontaria óptica do tipo “olho de boi”
- Base nivelante Leica WILD
- Estação meteorológica

Altimetria

- Nível LEICA, modelo DNA03
- Mira de nivelamento com código de barras

Estação total Leica TM30

A Leica TM30 (figura 45) é uma estação total robotizada, desenvolvida para medições de alta precisão em monitorização de estruturas. Quando devidamente operada, realiza as leituras de interesse independentemente do observador. Para tal, é apenas necessário aceder as configurações do sistema e indicar as características do projeto, como por exemplo, método de medição, tipo de refletor, orientação inicial e número de séries. Possibilita a realização de medições angulares com uma precisão de 0,5” e a medição de distâncias para prismas com uma precisão de 0,6 mm + 2ppm.

Incorpora, entre outras, a tecnologia ATR (Automatic Target Recognition) de longo alcance, que permite a medição automática de prismas até 3.000 m, e está preparada para trabalhar em contínuo (24/7) em condições de iluminação solar intensa ou de escuridão total.



Figura 44 - Estação Total, Leica TM30

Prismas circulares Leica GPM104 e GPH1P

O prisma GMP104 (figura 47) foi o modelo escolhido para instalar no paramento da barragem por ser adequado para instalações permanentes dada a sua robustez e por ser composto por um suporte metálico que permite a sua fixação e ajuste da orientação horizontal. O prisma GPH1P (figura 46), instalado sobre uma base do tipo WILD é o prisma utilizado para colocar no pilar oposto onde é estacionada a estação total, de forma a permitir definir uma orientação. Este prisma é caracterizado pela fabricação de alta precisão que permite máxima precisão na pontaria.



Figura 46 – Prisma GMP104



Figura 45 – Prisma GPH1P



Figura 48 – Prisma GMP104 instalado no paramento



Figura 47 – Prisma GPH1P estacionado sobre o pilar de referência e estação meteorológica

Nível LEICA DNA03

O Nível LEICA DNA03 (figura 50) pertence a 2ª geração de níveis digitais lançados pela Leica no mercado. Este nível caracteriza-se por ter um visor de grande dimensão, teclado alfanumérico, permitir um movimento horizontal bi-direcional e ter incluído um compensador de amortecimento magnético, etc. Este nível é indicado para nivelamentos de precisão. Quando devidamente operado com medições para miras com código de barras é capaz de atingir precisões sub-milimétricas.



Figura 49 – Nivel Leica DNA03

CAPÍTULO VII

Considerações finais

7. Considerações finais

A construção dos novos Aproveitamentos Hidroelétricos do grupo EDP e consequente instalação dos sistemas de observação geodésica apresentados ao longo desta dissertação, constituíram um passo importante na modernização de técnicas e métodos aplicados a monitorização geodésica de barragens bem como na mudança de paradigma da alta dependência de recursos humanos associada aos métodos geodésicos convencionais.

Os desenvolvimentos tecnológicos recentes no que refere à instrumentação em uso em topografia de precisão proporcionaram um incremento na qualidade da medição de distâncias, facilitando ainda os procedimentos de observação por recurso à automatização. A recente instalação de refletores nos paramentos de barragens constitui uma inovação relevante nesse sentido. As tradicionais interseções diretas aos PO foram assim complementadas com medição de distâncias, permitindo aumentar a redundância e robustez dos sistemas de observação geodésica de estruturas. Esta alteração permitiu também explorar as vantagens da automatização de observações que a utilização de uma estação motorizada proporciona, havendo assim um incremento na qualidade das grandezas observadas.

Neste domínio dos novos taqueómetros eletrónicos motorizados a exploração das vantagens da vertente da monitorização remota e continuada, pelo menos durante a fase do primeiro enchimento da albufeira e nos primeiros anos de exploração, onde o conhecimento do comportamento da estrutura é ainda mais relevante, pode vir, sempre que possível, a ser considerada uma técnica fundamental para a monitorização de barragens.

Por outro lado, a utilização deste tipo de sistemas nos AH já existentes com métodos de observação geodésica convencionais, além de ser extremamente oneroso, apresenta aspetos de concretização com alguma complexidade, já que as barragens se encontram em espaços acessíveis, abertos e não vigiados. Assegurar a fiabilidade do sistema, ou seja, a continuidade sem interrupção, transmissão de dados em tempo real, alimentação elétrica e a segurança da própria instrumentação instalada localmente são aspetos que tem de considerados no caso das estações totais em funcionamento remoto.

Dentro deste contexto de evolução tecnológica, e apoiando-se em desenvolvimentos no domínio da informática e das telecomunicações, o desenvolvimento do próprio sistema GNSS alargou o leque de soluções para a

observação geodésica de estruturas, e pela primeira vez em Portugal uma barragem é observada por geodesia espacial em modo contínuo e permanente.

Atualmente, vários estudos já realizados afirmam que a monitorização de estruturas de betão baseada em tecnologia DGPS veio a alcançar resultados cuja sensibilidade é milimétrica. Esta precisão, adaptando-se à quantificação de deslocamentos horizontais em barragens de betão, levou a que fosse instalado na barragem do Baixo Sabor um sistema de monitorização baseado em geodesia espacial, em simultâneo com os sistemas de auscultação clássicos.

Estes inovadores passos dados pela EDP Produção no âmbito da monitorização das barragens com base em métodos geodésicos, advém do facto de a EDP estar em contínua evolução, procurando sempre as melhores soluções de forma a garantir o controlo da segurança de todos os ativos que fazem parte dos seus centros produtores hidroelétricos, onde os métodos de observação geodésica estão sempre presentes.

Com esta dissertação, pretendeu-se dar a conhecer os mais recentes passos dados nesse sentido da modernização de métodos e técnicas geodésicas aplicadas a monitorização de barragens, com especial destaque para a constante evolução dos equipamentos utilizados em Geodesia/Topografia de precisão e como esta já está a ser aproveitada para a observação de estruturas.

8. Bibliografia

Agência Portuguesa do Ambiente (2016), O papel das barragens, Acedido em 15 de Dezembro de 2015, em <http://www.apambiente.pt>

Agência Portuguesa do Ambiente (2016), Legislação aplicável, Acedido em 15 de Dezembro de 2015, em <http://www.apambiente.pt>

Agência Portuguesa do Ambiente (2016), Entidades envolvidas, Acedido em 15 de Dezembro de 2015, em <http://www.apambiente.pt>

Agência Portuguesa do Ambiente (2016), As barragens em Portugal, Acedido em 15 de Dezembro de 2015, em <http://www.apambiente.pt>

Almeida, E. ; Fernandes, D ; Pimentel, D. ; Pestana, C.; Fernandes, A. (2015) Novos Sistemas de Observação Geodésica em Novos Aproveitamentos Hidroeléctricos. Conferência Nacional de Cartografia e Geodesia.

Aguirre, J. P. (2000). *Análise de Deslocamento numa mina a Céu Aberto* - Universal Federal do Paraná.

Antunes, C. (1995) Levantamentos Topográficos - Apontamentos de Topografia, Faculdade de Ciências da Universidade de Lisboa

Casaca, J., Matos, J., & Baio, M. (2005). *Topografia geral*. Lisboa: Lidel.

Casaca, J. (1990). O estado actual da aplicação dos métodos geodésicos à observação de barragens. Publicação da Secção de Vias de Comunicação do Departamento de Engenharia Civil da Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, em Ciclo de Conferências "A topografia, do passado ao futuro.

CASACA, J., HENRIQUES, M. J. (2002) The Geodetic Surveying in the monitoring of large dams ins Portugal. Em Internacional Federation os Surveyors International Congress, Washington, D.C. American Society for Phtogrammetry and Remote Sensing.

Castro, A. T., & Henriques, J. M. (2008). *Monitoring planimetric displacements in concrete dams. 13ª FIG - Simpósio sobre análises e medidas de deformação. 4ª IAG - Simpósio sobre geodésia para engenharia geotécnica e estrutural*. Lisboa.

Chaves, C. J. (1994). Controle de Deformações em Barragens: Métodos de monitorização e viabilidade de utilização do GPS. Escola politécnica da universidade de São Paulo.

Chaves, C. J. (2005). Detecção de deslocamentos horizontais com pendulos directos e GPS. *Congresso brasileiro de Cartografia*.

Cruz, T. P. (2004). *100 barragens brasileiras: casos históricos, materiais de construção, projeto*. São Paulo: Oficina de Textos.

DEPARTMENT OF ARMY . (2002). *Manual Deformation monitoring and control surveying*. Washington, DC: U. S. ARMY CORPS OF ENGENEERS.

Ferreira, I. (2014) Gestão da exploração e segurança das barragens, Revista 56

- Guedes, Q. M. et al. (2006) Monitorização do deslocamento horizontal do fecho do arco de coroamento da barragem casca de Funil de Furnas S.A por auscultação geodésica, prumo otico e GPS. Em conferência sobre instrumentação de barragens.
- Hudnut, K. W. ; BEHR, J. A. (1998) Continuous GPS monitoring of structural deformation at pacoima dam . Seismological Research Letters.
- Kahmen, H., & Faig, S. W. (1994). *Surveying. Berlim; New York: Walter de Gruyter.*
- Jesus, J., (2009). Barragens Abóbada em Betão Compactado com Cilindros, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto
- LEICA, Leica Geosystems. Leica TPS1200. (2006). GeoCOM Reference Manual. *Surveying & Engineering Division.*
- Miranda, F. I., Faggion, P. L., & Veiga, A. I. (2009). *Método para a monitorização de pontos em áreas instáveis. Boletim de Ciências Geodésicas, sec. Artigos, Curitiba .*
- Monico, G. F. (2008). *Posicionamento pelo GNSS: descrição, fundamentos e aplicações. ed 2. .* São Paulo: UNESP.
- Nadal, A. C., Veiga, K. A., Faggion, L. P., Freitas, C. R., Filho, D.-Z., Granemann, A. C., . . . Santos, P. D. (2004). *Integração da Auscultação Geodésica com a Instrumentação de Controle e Segurança da Barragem de Salto Caxias. Relatório Técnico.* Universidade Federal do Paraná.
- Neves, R., (2008) Processamento e análise de levantamentos geodésicos aplicados à monitorização de estruturas civis, Universidade Federal do Paraná.
- Ribeiro, F. (2008) Proposta de metodologia para verificação da estabilidade dos pilares de redes para monitorização geodésica de barragens - Estudo de caso, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo
- Seeber, G. (2003). *Satellite Geodesy: foundations methods, and applications. ed 2.* Nova York.
- Silveira, J. F. (2003). A instrumentação e comportamento de fundações de barragens de betão.
- Silva, D. D. (1986). *Aplicação da Mecânica dos Corpos Deformáveis à Análise de Consistência de Observações em Redes Geodésicas Horizontais- Dissertação de Mestrado – Curso de Pós- Graduação em Ciências Geodésicas .* Curitiba: Universidade Federal do Paraná.
- Syguel, A. (2013) Monitorização da barragem de Mauá utilizando irradiação tridimensional, Universidade Federal do Paraná
- Veiga, K. A., Zanetti, Z. A., & Faggion, L. P. (2007). *Fundamentos de Topografia -Módulo I.* Curitiba: Universidade Federal do Paraná, Departamento de Geomática.
- Veiga, K. A., Zanetti, Z. A., & Faggion, L. P. (2012). *Fundamentos de Topografia.* Curitiba: Universidade Federal do Paraná, Departamento de Geomática.
- Viseu, T., & Almeida, B. A. (2000). Plano de Emergência Interno de barragens. *5º Congresso da água,* Lisboa.

