



LABORATÓRIO NACIONAL
DE ENGENHARIA CIVIL

LEVANTAMENTO TÉRMICO DE PARAMENTOS DE BARRAGENS DE BETÃO PARA APOIO AO ACOMPANHAMENTO DA EVOLUÇÃO DE PATOLOGIAS

Processo 0404/112/17721

Lisboa • dezembro de 2013

I&D BARRAGENS DE BETÃO

RELATÓRIO 425/2013 – **DBB/NGA**

Título

**LEVANTAMENTO TÉRMICO DE PARAMENTOS DE BARRAGENS DE BETÃO
PARA APOIO AO ACOMPANHAMENTO DA EVOLUÇÃO DE PATOLOGIAS**

Autoria

DEPARTAMENTO DE BARRAGENS DE BETÃO

Maria João Henriques

Investigadora Principal, Núcleo de Geodesia Aplicada

Copyright © LABORATÓRIO NACIONAL DE ENGENHARIA CIVIL, I. P.

AV DO BRASIL 101 • 1700-066 LISBOA

e-mail: lnec@lnec.pt

www.lnec.pt

Relatório 425/2013

Proc. 0404/112/17721

LEVANTAMENTO TÉRMICO DE PARAMENTOS DE BARRAGENS DE BETÃO PARA APOIO AO ACOMPANHAMENTO DA EVOLUÇÃO DE PATOLOGIAS

Resumo

O relatório apresenta os princípios gerais da termografia e a sua aplicação prática no levantamento térmico de paramentos de barragens de betão para apoio ao acompanhamento da evolução de patologias. Apresentam-se aplicações relativas ao levantamento térmico dos paramentos de jusante das barragens do Alto Ceira II, Alto Ceira e Cabril. O levantamento realizado na primeira barragem, que se encontrava na fase final de construção e ainda vazia, permitiu a avaliação da qualidade dos resultados obtidos (temperaturas superficiais do paramento) por comparação com valores medidos por termómetros embebidos no betão. Nas outras duas barragens, ambas apresentando problemas de infiltrações, permitiu avaliar a aplicabilidade das imagens térmicas na deteção de ressurgimentos de água na superfície do betão, geralmente indicativas da existência de repasses de água.

Palavras-chave: Barragem de Betão, Levantamento Térmico, Temperatura, Paramento, Infiltração

THERMAL SURVEY OF CONCRETE DAM WALLS TO SUPPORT THE CONTROL OF THE EVOLUTION OF PATHOLOGIES

Abstract

The report presents the general principles of thermography and its practical application in the thermal survey of concrete dams as a useful tool to assist the monitoring of the evolution of pathologies. It is presented applications related to the thermal survey of the downstream faces of the dams Alto Ceira II, Alto Ceira and Cabril. The survey conducted in the first dam that was in the final stage of construction and still empty, allowed the evaluation of the quality of the results (temperatures of the surface of the downstream warroell) by comparing them with values measured by thermometers embedded in the concrete. In the other two dams, both presenting problems of infiltration, it was evaluated the applicability of thermal imaging on the detection of resurgences of water on the concrete surface, usually indicative of the existence of the transfer of water.

Keywords: Concrete Dam, Thermal Survey, Temperature, Face Wall, Infiltration

Índice

1	Introdução.....	1
2	Termografia	2
3	Medição de temperatura com câmaras térmicas.....	5
4	Levantamento térmico do paramento de jusante de barragens de betão	11
4.1	Considerações gerais	11
4.2	Barragem do Alto Ceira II	11
4.3	Barragem do Alto Ceira	25
4.4	Barragem do Cabril.....	32
5	Considerações finais.....	39
	Referências Bibliográficas.....	41

Índice de figuras

Figura 1.1 – Levantamento térmico de um edifício permitindo detetar deficiências na construção.....	1
Figura 2.1 – Três modelos de equipamentos para medição de temperatura por infravermelhos: duas câmaras termográficas e um termómetro pontual.	2
Figura 2.2 – Imagens térmicas de instalações elétricas defeituosas.....	2
Figura 2.3 – Imagens térmicas do interior de edifícios, respetivamente com mau isolamento térmico e com infiltrações.	3
Figura 2.4 – Cores indicativas da temperatura superficial de um mesmo objeto. Primeira paleta: cores variando entre violeta e amarelo. Segunda paleta: cores variando entre azul e vermelho	3
Figura 2.5 – Imagem de infravermelhos da fachada lateral de um edifício de betão apresentando uma falha do isolamento térmico (de FLIR, sem data).	3
Figura 2.6 – Fotografia da membrana de impermeabilização da cobertura do edifício da empresa Municipia.	4
Figura 2.7 – Imagem térmica da membrana.	4
Figura 2.8 – Imagem na banda do visível.	4
Figura 2.9 – Imagem na banda do infravermelho.	4
Figura 3.1 – Espectro eletromagnético e respetiva divisão em bandas.	5
Figura 3.2 – Esquema com a indicação da origem da radiação térmica incidente numa câmara térmica (D): A – meio envolvente; B – objeto; C – atmosfera.	6
Figura 3.3 – Radiância de um corpo negro de acordo com lei de Planck.	9
Figura 4.1 – Localização dos termómetros na barragem do Alto Ceira II.....	12
Figura 4.2 – Colocação de um termómetro junto ao paramento (em fundo a cofragem).	12
Figura 4.3 – Localização dos termómetros T16 a T20 (secção no bloco J4-J5, à cota inferior)	12
Figura 4.4 – Localização das centrais de leitura dos termómetros.....	13
Figura 4.5 – Câmara montada num tripé para obtenção de imagens no terceiro levantamento.	14
Figura 4.6 – Imagem termográfica da zona inferior da barragem.....	14
Figura 4.7 – Imagem na banda da radiação infravermelha afastada.	14
Figura 4.8 – Imagem da mesma zona na banda da radiação visível.	14
Figura 4.9 – Diferença entre a temperatura superficial obtida pela câmara térmica e a temperatura medida pelos termómetros superficiais embebidos no betão.....	15
Figura 4.10 – Temperaturas medidas nos termómetros de jusante e do ar.	17
Figura 4.11 – Temperaturas medidas nos termómetros superficiais e pela câmara térmica.	17
Figura 4.12 – Variações da temperatura medidas nos termómetros de jusante e na estação meteorológica, no dia 4 de junho de 2013.....	18
Figura 4.13 – Imagem térmica relativa às escorrências na zona do termómetro T26.....	18
Figura 4.14 – Orientação e inclinação do paramento de jusante nas zonas dos termómetros.....	19
Figura 4.15 – Irradiância solar direta instantânea incidente numa superfície ortogonal aos raios solares e em três zonas da barragem.	19
Figura 4.16 – Identificação de pontos homólogos: na esquerda a imagem térmica (imagem a corrigir); na direita o alçado (imagem de referência).	20
Figura 4.17 – Imagem térmica panorâmica (RGB) da barragem após a implementação de uma transformação para minorar a deformação da imagem original.....	20
Figura 4.18 – Composição GBR da imagem térmica panorâmica para realce de alguns pormenores relacionados com a temperatura superficial do paramento.	21

Figura 4.19 – Elementos de apoio à construção que estão na origem das diferenças de temperatura assinaladas a azul na Figura 4.18.....	21
Figura 4.20 – Sombras no paramento de jusante na imagem obtida às 13h13min, onde se vêem as sombras provocadas por elementos de apoio à construção.	21
Figura 4.21 – Radiação solar incidente em dois instantes distintos, calculada através de um modelo de elementos finitos.	22
Figura 4.22 – Pormenores das imagens térmicas.	23
Figura 4.23 – Paramento representado por uma escala cromática com amplitude de 78.8°C.	24
Figura 4.24 – Paramento representado por uma escala cromática com amplitude de 31.1°C.	24
Figura 4.25 – Variação de 10°C nas escalas cromáticas da Figura 4.23 e da Figura 4.24, respetivamente.	24
Figura 4.26 – Marcação da área mais fria do paramento na Figura 4.23.	24
Figura 4.27 – Marcação da área mais fria do paramento na Figura 4.24.	24
Figura 4.28 – Evolução da fendilhação do paramento de jusante da barragem do Alto Ceira entre 1994 e 2001.	25
Figura 4.29 – Fendas e deposição de carbonatos no paramento de jusante (margens esquerda e direita, respetivamente) da barragem do Alto Ceira.	25
Figura 4.30 – Imagem panorâmica da barragem do Alto Ceira.	26
Figura 4.31 – Imagem térmica panorâmica da barragem do Alto Ceira.	26
Figura 4.32 – Zonas do paramento apresentadas em pormenor nas duas figuras seguintes.	27
Figura 4.33 – Zonas da barragem com aspetos relevantes (zonas A a C)	27
Figura 4.34 – Zonas da barragem com aspetos relevantes (zonas D a F).	28
Figura 4.35 – Inspeção do paramento de jusante da barragem do Alto Ceira utilizando um bailéu.	29
Figura 4.36 – Estrutura de suporte do bailéu instalada no coroamento.	29
Figura 4.37 – Marcação das ocorrências com base no levantamento de 2001.	30
Figura 4.38 – Sobreposição de ocorrências na imagem térmica de Alto Ceira.	30
Figura 4.39 – “Repastes molhados” (linhas vermelhas), levantados em 2001, assinalados sobre a imagem térmica de 2013.	31
Figura 4.40 – Imagem do paramento com aplicação de realce da cor.	31
Figura 4.41 – Imagem térmica do paramento.	31
Figura 4.42 – Zonas mais frias.	31
Figura 4.43 – Sobreposição de duas imagens (Figura 4.40 e Figura 4.42).	31
Figura 4.44 – Fotografia da barragem do Cabril tirada no mesmo período e no mesmo local de onde foi realizado o levantamento térmico.	32
Figura 4.45 – Localização aproximada da câmara relativamente à barragem.	32
Figura 4.46 – Imagem térmica panorâmica da barragem do Cabril.	33
Figura 4.47 – Imagem térmica da barragem do lado de poente.	33
Figura 4.48 – Imagem da banda do visível cromaticamente transformada.	33
Figura 4.49 – Cortes da barragem ao longo dos eixos verticais de cinco blocos.	34
Figura 4.50 – Desenvolvimento das faixas cromáticas no perfil do bloco DE	34
Figura 4.51 – Zonas do paramento da barragem do Cabril apresentadas em pormenor nas figuras seguintes.	35
Figura 4.52 – Paramento da barragem junto ao encontro da margem direita.	35
Figura 4.53 – Zonas da barragem com aspetos relevantes (zonas A a C)	36
Figura 4.54 – Zonas da barragem com aspetos relevantes (zonas D e E).	37
Figura 4.55 – Zonas da barragem com aspetos relevantes (zonas F e G)	38
Figura 4.56 – Direção do sol em diferentes instantes do dia 4 de junho de 2013.	38

Índice de quadros

Quadro 3.1 – Origem da radiação incidente numa câmara térmica e expressões matemáticas que permitem estimar a radiação infravermelha incidente.	6
Quadro 3.2 – Valores de emissividade de alguns materiais (de FLIR, 2009).....	8
Quadro 4.1 – Características métricas das imagens térmicas obtidas por câmaras FLIR T335 em função da distância ao objeto.	11
Quadro 4.2 – Horas de início das campanhas de medição nos termómetros da barragem, no dia 4 de junho de 2013.	13
Quadro 4.3 – Valores de temperatura obtidos das imagens térmicas e dos termómetros de jusante.....	15
Quadro 4.4 – Horas a que foram obtidas as diferentes imagens e zonas cobertas por estas.	16

Agradece-se à empresa Municipia S.A. a realização dos levantamentos térmicos das barragens assim como a total disponibilidade para o posterior tratamento das imagens obtidas nos levantamentos e para prestação de informações fundamentais para a elaboração do presente relatório.

1 | Introdução

As câmaras termográficas, também designadas por câmaras de infravermelho ou simplesmente câmaras térmicas, formam uma imagem do objeto “fotografado” com base na radiação infravermelha incidente. Podem assim ser utilizadas na monitorização de estruturas desde que o fenómeno que se quer detetar e acompanhar tenha reflexos na temperatura superficial da estrutura. Os exemplos de aplicação mais frequentemente citados são os da deteção de infiltrações e de áreas com deficiente isolamento térmico (Figura 1.1).

No que respeita à utilização da termografia na área da engenharia civil, existe já no LNEC experiência na aplicação deste método de análise não só na inspeção de edifícios (Pinas dos Santos et. al, 2003 e Matias, 2004, 2006 e 2012) como também em estudos de materiais de revestimento.

No caso das barragens de betão, o levantamento térmico dos paramentos, que pode ser realizado em poucos minutos sem exigências especiais, permite observar variações na temperatura superficial do betão, o que possibilita a deteção de zonas de repasses de água, em geral associadas à existência de fendas. Este tipo de levantamento, se realizado de forma sistemática, com alguns cuidados na forma como as imagens são obtidas, poderá ser utilizado para determinar, com bastante rigor, a evolução de zonas afetadas por infiltrações. Se o levantamento for efetuado de forma regular e desde o início da obra, a deteção pode ser feita precocemente, antes do aparecimento de depósitos de carbonatos à superfície.

De modo a avaliar a aplicabilidade deste método na deteção de repasses em barragens de betão foram efetuados levantamentos térmicos dos paramentos de jusante das barragens do Alto Ceira II, Alto Ceira e Cabril.

O presente relatório está dividido em duas partes. Na primeira descrevem-se os princípios de medição de temperatura por câmaras térmicas e na segunda parte descrevem-se os aspetos relevantes da realização dos levantamentos térmicos das três barragens e os principais resultados obtidos.

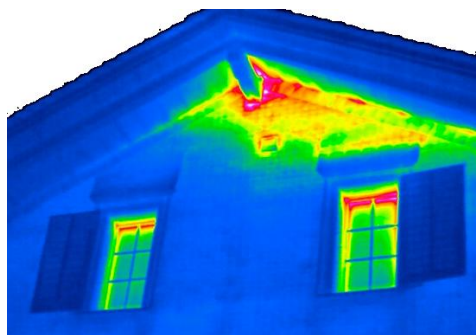


Figura 1.1 – Levantamento térmico de um edifício permitindo detetar deficiências na construção.

2 | Termografia

2.1 O termo “termografia” resulta da junção das palavras gregas “termo”, que significa calor, e “grafia”, que significa escrever ou desenhar. É um termo utilizado por uma tecnologia recente que permite a medição da temperatura superficial de objetos recorrendo a uma câmara especial (Figura 2.1), frequentemente designada câmara termográfica. Trata-se de um método passivo, remoto (pois o sensor não está em contacto com o objeto), sendo que a imagem com as temperaturas do objeto é visível no monitor das câmaras em tempo real. Alguns modelos de câmaras permitem a gravação das imagens obtidas em ficheiro, outros unicamente a visualização da temperatura. Este sistema é diferente de outro tipo de termómetros que também medem temperaturas remotamente mas de forma pontual. Destes é obtido um valor numérico por medição, correspondente a um valor médio da zona que está a ser “observada”, geralmente assinalada por um ponto de um feixe laser.



Figura 2.1 – Três modelos de equipamentos para medição de temperatura por infravermelhos: duas câmaras termográficas e um termómetro pontual.

Dos elementos disponibilizados por fabricantes de câmaras térmicas, no que respeita à utilização da termografia em inspeções, existem duas áreas que se destacam: i) em instalações elétricas, para detetar ligações em mau estado ou componentes defeituosos (Figura 2.2); e ii) na construção, para identificar falhas de isolamento ou zonas de infiltração de água (Figura 2.3). Para a visualização da temperatura a câmara converte automaticamente a temperatura superficial em falsas cores, sendo que em algumas câmaras o utilizador pode escolher a gama de cores que quer visualizar (Figura 2.4). A alteração das cores pode também ser efetuada, posteriormente, em computador.

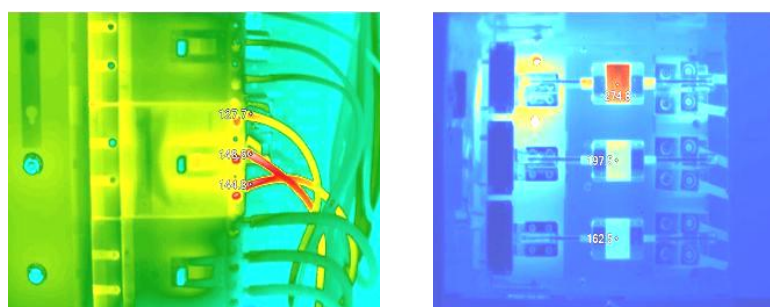


Figura 2.2 – Imagens térmicas de instalações elétricas defeituosas.

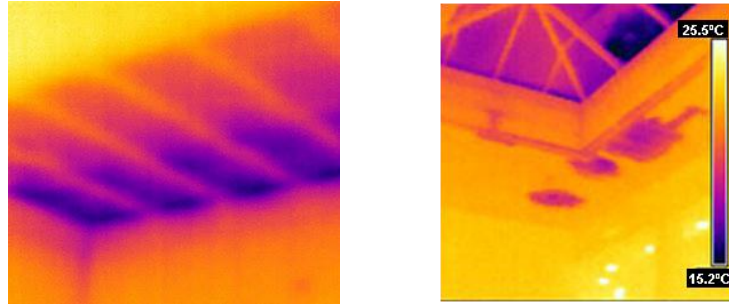


Figura 2.3 – Imagens térmicas do interior de edifícios, respetivamente com mau isolamento térmico e com infiltrações.

Vários modelos de câmara incluem na imagem uma legenda que permite estabelecer uma relação entre cores e temperaturas obtidas (Figuras 2.3 e 2.5). Na paleta escolhida na Figura 2.5 convencionou-se que as zonas de temperatura mais baixa são representadas a azul enquanto as de temperatura mais elevada são representadas a vermelho.

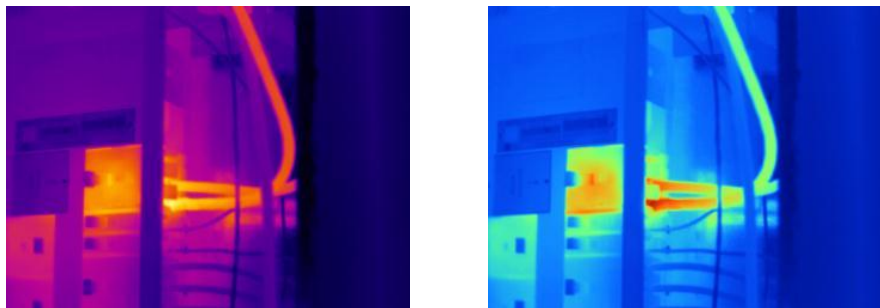


Figura 2.4 – Cores indicativas da temperatura superficial de um mesmo objeto. Primeira paleta: cores variando entre violeta e amarelo. Segunda paleta: cores variando entre azul e vermelho

2.2 No edifício apresentado na Figura 2.5, o isolamento térmico é obtido pela colocação de placas de material isolante entre as paredes exterior e interior. Na imagem, captada do exterior, fica destacada a zona onde não foi colocada uma das placas pois, como não foi isolada, apresenta-se mais quente que as zonas envolventes (o interior do edifício encontra-se a uma temperatura mais elevada que o exterior).

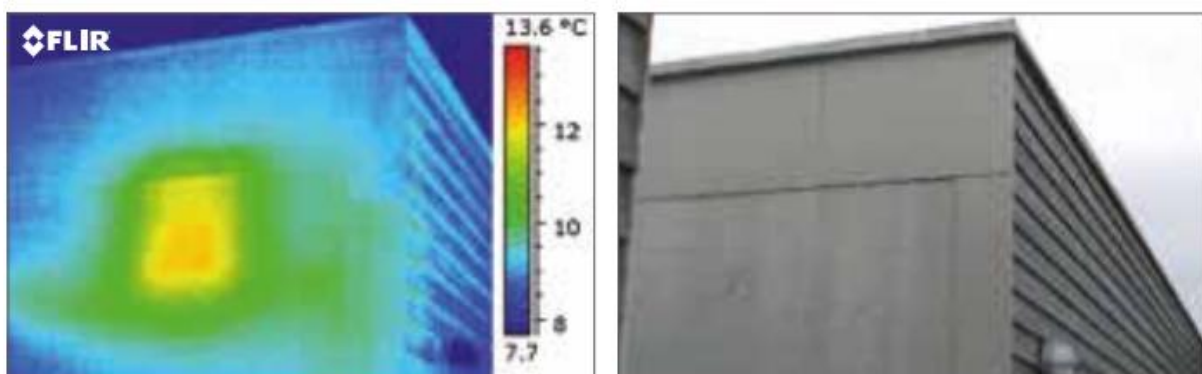


Figura 2.5 – Imagem de infravermelhos da fachada lateral de um edifício de betão apresentando uma falha do isolamento térmico (de FLIR, sem data).

2.3 As imagens térmicas podem também, em certas condições, detetar furos ou ligações não estanques em membranas impermeabilizantes. A existência de água debaixo da membrana, juntamente com condições ambientais propícias, pode levar à deteção da anomalia. Como exemplo apresentam-se duas imagens, fotografia na Figura 2.6 e imagem térmica na Figura 2.7, da cobertura de um edifício, obtidas no fim de um dia sem nuvens (temperatura máxima de 16°C). Dois dias antes tinha ocorrido precipitação. Em resultado da orientação do edifício (este-oeste), a zona esteve todo o dia exposta aos raios solares. Através da medição de temperatura detetam-se zonas mais frias, resultado da entrada de água para baixo da membrana. Nos quatros pontos onde se assinala a medição da temperatura (ver Figura 2.7) obtiveram-se os valores de 3,2°C e 3,8°C nos dois pontos situados à esquerda, e de 9,9°C e 8,9°C nos dois pontos situados à direita.



Figura 2.6 – Fotografia da membrana de impermeabilização da cobertura do edifício da empresa Municipalia.

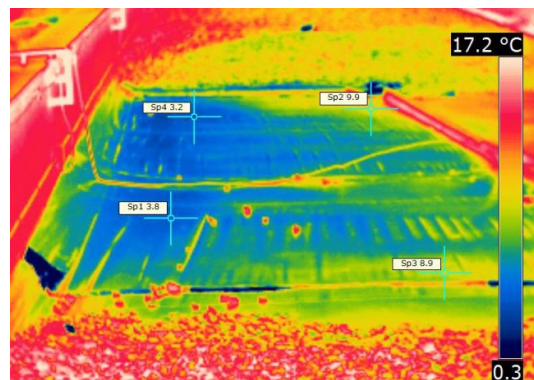


Figura 2.7 – Imagem térmica da membrana.

2.4 Uma das características do vidro é ser mais transparente em relação à radiação na banda do visível do que à radiação infravermelha afastada, característica esta que está na origem do chamado efeito de estufa, que ocorre, por exemplo, no interior de salas com janelas quando expostas à incidência direta da luz solar. Atualmente, para melhorar a eficiência energética dos edifícios, este efeito é maximizado pela utilização de vidros com composições químicas especiais. Na Figura 2.8 e na Figura 2.9 apresentam-se duas imagens obtidas pela câmara que foi utilizada para medir as temperaturas nos paramentos das barragens. A primeira imagem é uma fotografia normal onde se vê, através do vidro de uma janela, a paisagem que envolve o edifício da empresa Municipalia. Na segunda, obtida imediatamente a seguir, vê-se a imagem da radiação infravermelha emitida pelo operador refletida no vidro.



Figura 2.8 – Imagem na banda do visível.



Figura 2.9 – Imagem na banda do infravermelho.

3 | Medição de temperatura com câmaras térmicas

O aumento da temperatura de um objeto leva a um aumento da intensidade da radiação infravermelha emitida por este. As câmaras térmicas são capazes de medir a intensidade da radiação e, por aplicação de princípios da termodinâmica, torna-se possível estimar a temperatura dos objetos emissores da radiação.

Toda a matéria emite radiação eletromagnética, sendo que as câmaras térmicas detetam a radiação que se situa na banda do infravermelho do espectro eletromagnético (vulgo radiação infravermelha). Esta banda estende-se desde a extremidade do espectro visível (vermelho) até à zona das microondas (Figura 3.1). A própria banda dos infravermelhos pode ser subdividida, havendo nesta três regiões: i) infravermelho próximo (0,75 μm – 1,4 μm); ii) infravermelho médio (1,4 μm – 2,5 μm); iii) infravermelho afastado (2,5 μm – 1000 μm). De referir que não existe unanimidade nem no número de regiões em que se pode dividir a banda do infravermelho nem nos valores limite de cada intervalo.

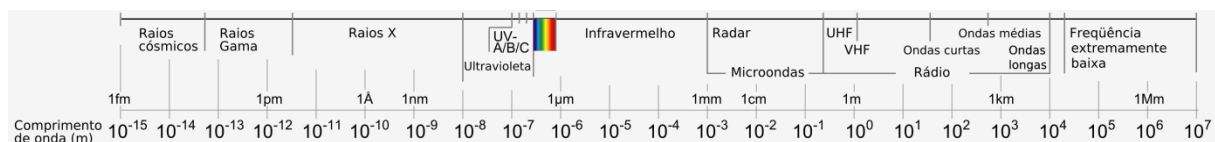


Figura 3.1 – Espectro eletromagnético e respetiva divisão em bandas.

Toda a matéria que se encontre a uma temperatura superior a 0°K ($-273,15^\circ\text{C}$) emite radiação na banda do infravermelho, sendo que a intensidade da radiação emitida é tanto maior quanto mais elevada é a temperatura superficial. As câmaras térmicas captam a intensidade da radiação infravermelha e convertem-na em informação visível (sob a forma de números ou de imagens). Para isso as câmaras térmicas integram um detetor de radiação infravermelha, que é um dispositivo eletrónico que converte a intensidade desta radiação eletromagnética num sinal elétrico. Este detetor é composto por microbolómetros, unidades que apresentam uma variação da resistividade elétrica quando alteram de temperatura em resultado da incidência de radiação com comprimento de onda no intervalo de 7,5 μm a 14 μm (zona do infra-vermelho afastado). Os microbolómetros encontram-se dispostos sob a forma de uma matriz o que permite de forma a criação de uma imagem do objeto “fotografado”. Para a visualização da informação recebida, as câmaras termográficas integram um processador matemático que efetua uma conversão dos valores de intensidade da radiação infravermelha (registados sob a forma de uma voltagem) em cores do espectro visível.

Para que as câmaras indiquem a temperatura superficial do objeto visado há que ter em consideração diversas leis da termodinâmica. Estas permitem estimar a temperatura do objeto visado a partir da intensidade da radiação eletromagnética incidente na câmara. A Figura 3.2 (adaptada de FLIR, 2010) ilustra a situação real no que respeita à incidência de radiação térmica numa câmara (identificada pela letra D). A radiação incidente na câmara provém das três fontes indicadas no Quadro 3.1.

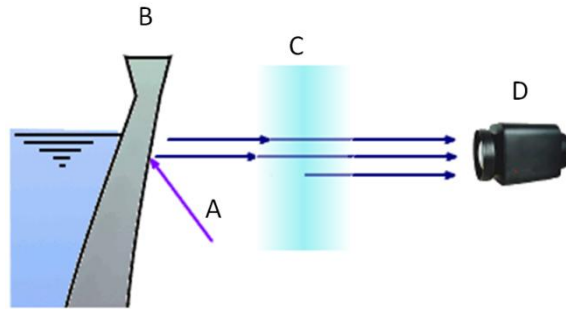


Figura 3.2 – Esquema com a indicação da origem da radiação térmica incidente numa câmara térmica (D): A – meio envolvente; B – objeto; C – atmosfera.

Quadro 3.1 – Origem da radiação incidente numa câmara térmica e expressões matemáticas que permitem estimar a radiação infravermelha incidente.

	Origem	Expressão	
1	radiação emitida pelo objeto B, que se encontra à temperatura T_{obj}	$\epsilon_{obj}T_{atm}W_{obj}$	(1)
2	radiação proveniente do meio envolvente A, o qual se encontra à temperatura T_{env} , que incide no objeto B e que é refletida por este e é transmitida pela atmosfera	$(1-\epsilon_{obj})T_{atm}W_{env}$	(2)
3	radiação emitida pela atmosfera C, situada entre o objeto B e a câmara	$(1-T_{atm})W_{atm}$	(3)

Nas expressões matemáticas apresentadas no Quadro 3.1 ϵ representa a emissividade, τ a transmissividade, W a potência da radiação, grandezas que serão seguidamente definidas, enquanto que os índices *obj*, *atm* e *env* indicam que as grandezas caracterizam o objecto, a atmosfera ou o meio envolvente. Estas expressões traduzem, de forma simplificada e numa situação ideal, a radiância espectral (energia irradiada por unidade de área) da radiação infravermelha incidente na câmara. Trata-se de uma situação ideal pois considera-se que o objeto e a atmosfera se comportam como corpos negros, e em simultâneo uma situação simplificada pois, por exemplo, o meio envolvente e a atmosfera são considerados como sendo homogéneos.

Um corpo negro, idealizado pelo físico Gustav Kirchoff, caracteriza-se por absorver toda a radiação eletromagnética incidente, independentemente da frequência e do ângulo de incidência. Por exemplo, a composição do corpo não afeta o seu comportamento térmico. Um corpo negro em equilíbrio térmico (ou seja com temperatura constante) emite tanta radiação quanto a que recebe, sendo que não reflete qualquer energia. Embora nenhum corpo apresente o comportamento de um corpo negro, existem materiais com um comportamento, nomeadamente térmico, muito semelhante ao de um corpo negro.

Um corpo real emite, nas mesmas condições térmicas, menos radiação que um corpo negro. A razão entre energia emitida por um dado corpo (corpo real) e a energia emitida por um corpo negro à mesma temperatura é designada por emissividade e é frequentemente representada pela letra ϵ . Pelo

exposto verifica-se que a emissividade de um corpo real tem sempre valores menores que um. Num corpo real a emissividade depende do comprimento de onda da radiação, da temperatura superficial, do acabamento da superfície (se está polida, oxidada, limpa, suja, húmida, seca, etc.) e do ângulo de emissão. Relativamente à radiação incidente neste tipo de corpo, verifica-se que parte da radiação pode ser parcialmente absorvida, parte pode ser refletida e uma parte transmitida, sendo que o comportamento de um corpo varia consoante o comprimento de onda da radiação incidente. À semelhança da emissividade, a absorvidade (razão entre a energia absorvida pelo corpo e a energia absorvida por um corpo negro à mesma temperatura) também só pode assumir valores entre 0 e 1.

Em certas aplicações há conveniência em definir outro tipo de corpo que não o negro: trata-se do corpo cinzento. Como um corpo real, um corpo cinzento tem emissividade menor que um, constante para todos os comprimentos de onda, e a absorvidade é também menor que um: não só não absorve toda a radiação incidente como emite menos radiação que um corpo negro. Nas três expressões apresentadas no Quadro 3.1 pode verificar-se que foi aplicada a simplificação de os corpos considerados serem cinzentos, pois não há qualquer referência a comprimentos de onda da radiação.

Para além da emissividade e da absorvidade torna-se necessário definir ainda a “transmitância”, τ , definida como a razão entre a energia incidente e a emitida, e a “refletância”, ρ , definida como a razão entre a energia incidente e a refletida que são também dependentes do comprimento de onda da radiação.

Para um corpo opaco (que se caracteriza por ter transmitância nula) verifica-se que

$$\rho = 1 - \epsilon . \quad (4)$$

expressão muito utilizada por ser mais fácil medir a refletância que a emissividade.

Com base na informação apresentada torna-se agora possível interpretar as expressões incluídas no Quadro 3.1, nomeadamente:

- O objeto B, que se encontra à temperatura T_{obj} , emite radiação com a potência $\epsilon_{obj} W_{obj}$, onde W_{obj} representa a potência da radiação emitida por um corpo negro à mesma temperatura. Como a radiação emitida por B atravessa a atmosfera, a qual transmite uma fração da radiação, a potência da radiação incidente na câmara com origem em B é $\epsilon_{obj} T_{atm} W_{obj}$.
- O meio envolvente ao objeto B emite radiação que incide sobre este. Considerando que o meio envolvente é homogéneo e uniforme, a potência da radiação incidente no objeto é W_{env} . Ao incidir em B, a fração da radiação $(1-\epsilon_{obj})$ é refletida e, por sua vez, parcialmente transmitida pela atmosfera. Por estes fatores a radiação incidente na câmara, proveniente do meio envolvente e refletida pelo objeto de estudo, é $(1-\epsilon_{obj}) T_{atm} W_{env}$.
- A atmosfera, que se encontra à temperatura homogénea T_{atm} , emite radiação que também incide sobre a câmara. A potência da radiação incidente na câmara com origem na atmosfera é $(1-T_{atm}) W_{atm}$.

A potência total da radiação incidente na câmara é então calculada por

$$W_{\text{total}} = \epsilon_{\text{obj}} T_{\text{atm}} W_{\text{obj}} + (1 - \epsilon_{\text{obj}}) T_{\text{atm}} W_{\text{env}} + (1 - T_{\text{atm}}) W_{\text{atm}} \quad (5)$$

$$U_{\text{total}} = \epsilon_{\text{obj}} T_{\text{atm}} U_{\text{obj}} + (1 - \epsilon_{\text{obj}}) T_{\text{atm}} U_{\text{env}} + (1 - T_{\text{atm}}) U_{\text{atm}} \quad (6)$$

sendo que a equação (6) surge por se considerar que

$$U = CW \quad (7)$$

onde C é uma constante e U o sinal gerado na câmara (volt). A equação (7) permite a conversão da potência da radiação infravermelha incidente num sinal elétrico, que é realizada pelos microbolómetros. Resolvendo a equação (6) em ordem a U_{obj} (C não é conhecido), obtém-se

$$U_{\text{obj}} = \frac{1}{\epsilon_{\text{obj}} T_{\text{atm}}} U_{\text{tot}} - \frac{1 - \epsilon_{\text{obj}}}{\epsilon_{\text{obj}}} U_{\text{env}} - \frac{1 - T_{\text{atm}}}{\epsilon_{\text{obj}} T_{\text{atm}}} U_{\text{atm}} \quad (8)$$

Nesta equação considerou-se que cada um dos elementos está a uma temperatura homogénea.

Para que o equipamento possa determinar a temperatura, é necessário a obtenção dos seguintes dados: i) emissividade do objeto, ϵ_{obj} (ver no Quadro 3.2 valores de emissividade de materiais); ii) humidade relativa da atmosfera, pois a transmitância da atmosfera é influenciada pela humidade; iii) temperatura da atmosfera; iv) distância da câmara ao objeto, pois influencia não só a absorção da radiação que atravessa a atmosfera como a radiação emitida pela atmosfera; e a v) efetiva temperatura superficial do meio envolvente ou a temperatura ambiente refletida, T_{env} . Como, em muitos casos, é difícil obter valores para estas grandezas questionar-se se é importante estimar as temperaturas superficiais absolutas ou se é suficiente detetar diferenças de temperatura, sem necessidade de as quantificar.

Quadro 3.2 – Valores de emissividade de alguns materiais (de FLIR, 2009).

Material	Temperatura	Gama da radiação	Emissividade
Água (camada com espessura superior a 0,1 mm)	0-100 °C	toda	0,95-0,98
Betão	20 °C	toda	0,92
Betão pavimento	5 °C	6.5-20 μm	0,974
Granito rugoso	21 °C	6.5-20 μm	0,879
Pavimento em asfalto	4 °C	6.5-20 μm	0,967
Solo seco	20 °C	toda	0,92
Solo saturado	20 °C	toda	0,95
Tijolo vermelho comum	20 °C	toda	0,93
Tijolo vermelho rugoso	20 °C	toda	0,88-0,93

Para estabelecer a interligação entre a temperatura superficial e a radiação térmica emitida, que depende de propriedades da superfície, entre as quais se incluem a temperatura, a absorvidade espectral e a radiancia espectral, há que considerar as seguintes leis da termodinâmica:

- i. Lei de Plank: exprime a radiância espectral de um corpo negro em função do comprimento de onda λ e da sua temperatura T

$$W_{\lambda n} = \frac{2\pi h c^2}{\lambda^5 (e^{hc/\lambda kT} - 1)} \quad (9)$$

onde $W_{\lambda n}$ representa a radiância espectral do corpo negro no comprimento de onda λ , c a velocidade da luz, h a constante de Plank e k a constante de Boltzmann. Na Figura 3.2 apresentam-se, sob a forma gráfica, para dois corpos negros às temperaturas de -10°C e $+10^\circ\text{C}$, os valores da radiância em função do comprimento de onda. Verifica-se que quanto mais elevada é a temperatura superficial do corpo radiante, menor é o comprimento de onda a que ocorre o máximo de radiância.

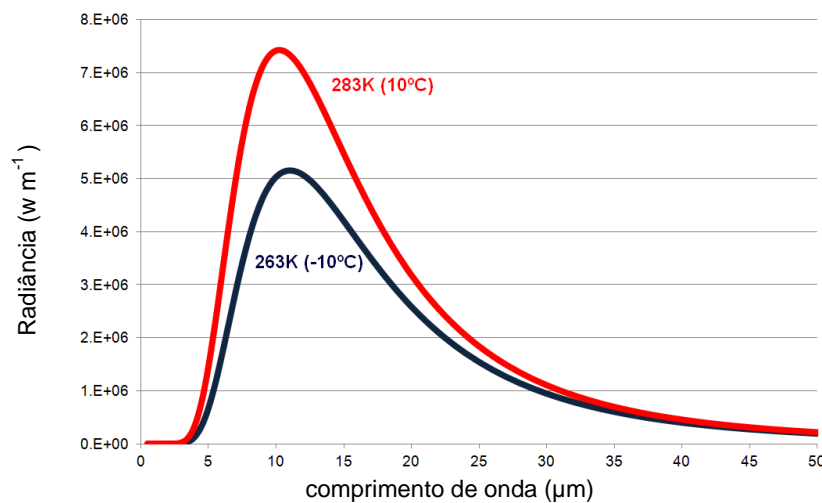


Figura 3.3 – Radiância de um corpo negro de acordo com lei de Planck.

- ii. Lei do deslocamento de Wien: diferenciando a fórmula de Planck em relação ao comprimento de onda obtém-se a fórmula de Wien. Esta permite verificar que existe uma relação inversa entre o comprimento de onda onde se situa a máxima emissão de radiação eletromagnética e a temperatura do corpo negro,

$$\lambda_{\max} = \frac{2898}{T} \quad (10)$$

- iii. Lei de Stefan-Boltzmann: a energia total emitida por um corpo negro por unidade de área e unidade de tempo (emitância, W) é proporcional à quarta potência da sua temperatura absoluta,

$$W = \sigma T^4 \quad (11)$$

As leis apresentadas aplicam-se todas, sem exceção, a corpos negros.

De uma forma geral, os corpos reais não apresentam comportamento uniforme com o comprimento de onda da radiação senão em zonas muito limitadas do espectro, em que apresentam um comportamento quase de corpo negro. No caso específico da radiação

infravermelha, objeto do presente estudo, as propriedades do corpo que mais influenciam a radiação são: i) emissividade, capacidade de um material em emitir radiação infravermelha, que depende das características da matéria que compõe a superfície do objeto e também, para alguns materiais, da temperatura do corpo; ii) refletância, capacidade de um material em refletir a radiação infravermelha, a qual depende também das características do corpo; e iii) transmitância, capacidade de um material em transmitir radiação infravermelha, a qual depende do tipo e espessura do material. Para o caso de um corpo real estas propriedades são dependentes do comprimento de onda da radiação. Para o de um corpo cinzento, o comprimento de onda da radiação incidente não influencia o comportamento térmico do corpo.

A emitância de um corpo cinzento (CC) relaciona-se com a temperatura de um corpo negro (CN) pela expressão resultante da expressão (11), que transcreve a lei de Stefan-Boltzmann,

$$W_{CC} = \epsilon_{CC} W_{CN} = \epsilon_{CC} \sigma T_{CN} \quad (12)$$

Esta expressão, interligada com as expressões (5) a (8), permite estimar a temperatura do objeto, a qual é realizada pelo equipamento, mediante o fornecimento de alguns dados por parte do operador, como foi anteriormente referido. Pode verificar-se que nas expressões referidas se considerou que o objeto, o meio envolvente e a atmosfera se comportam como corpos negros, forma de relacionar a voltagem com a temperatura destes.

4 | Levantamento térmico do paramento de jusante de barragens de betão

4.1 Considerações gerais

No dia 4 de junho de 2013 foi realizado o levantamento térmico dos paramentos de jusante das barragens do Alto Ceira II, Alto Ceira e Cabril, todas exploradas pela EDP. Na região, nesse dia, o tempo caracterizou-se por ser de céu limpo com algumas nuvens que, esporadicamente, tapavam o sol. A temperatura máxima do ar registada foi de 26 °C na zona das barragens do Alto Ceira (Alto Ceira II situa-se a cerca de 200 m a jusante da antiga) e de 30 °C na zona da barragem do Cabril.

Foi utilizada uma câmara termográfica FLIR T335 propriedade da empresa Municipia, tendo o equipamento sido operado por um técnico desta empresa. Apresenta dimensões médias, é relativamente leve (880 g), e para além de imagens térmicas (320×240 pixéis) permite também obter imagens convencionais (2048×1536 pixéis) e vídeos. No Quadro 4.1 apresentam-se as características métricas das imagens térmicas obtidas pela câmara em função da distância ao objeto. Relativamente à radiação, é sensível à radiação infravermelha situada no intervalo 7,5-1,3 µm e a sua sensibilidade térmica¹ é melhor que 50 mK (0,05°C) a 30°C. Para obter imagens de melhor qualidade deve ser instalada num suporte firme, um tripé por exemplo, durante a obtenção das imagens.

Quadro 4.1 – Características métricas das imagens térmicas obtidas por câmaras FLIR T335 em função da distância ao objeto.

Distância	Dimensão do pixel		Área coberta pela imagem	
	térmica	visível	largura	altura
20 m	2,8 cm	0,4 cm	9 m	6,7 m
50 m	8,4 cm	1,3 cm	26,9 m	20,2 m
100 m	14,0 cm	2,2 cm	44,8 m	33,6 m

4.2 Barragem do Alto Ceira II

A barragem do Alto Ceira II encontrava-se na fase final da construção, a poucos dias do início do primeiro enchimento. Na barragem estão colocados um total de 29 termómetros de resistência elétrica (T01, ..., T29, Figura 4.1) embebidos no betão e distribuídos por nove secções. Em oito destas secções existem três termómetros: um do lado de montante (de numeração inferior), junto ao paramento, o segundo no centro do bloco e o terceiro junto ao paramento de jusante (Figura 4.2). No bloco central, a uma cota inferior, onde a estrutura é mais espessa, existem cinco termómetros: três estão dispostos como os anteriormente descritos e os restantes dois localizam-se a um metro dos paramentos (Figura 4.3).

¹ Por exemplo, uma câmara que apresente uma sensibilidade térmica de 50 mK é mais precisa que uma com sensibilidade de 100 mK.

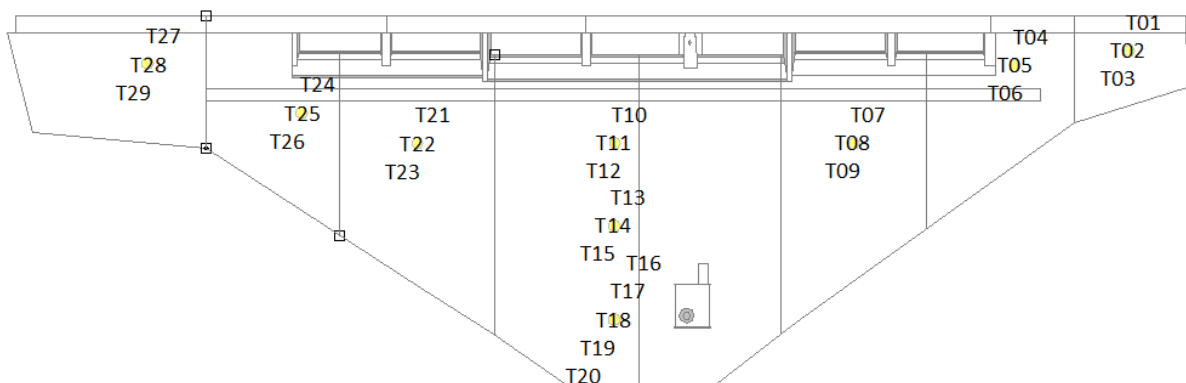


Figura 4.1 – Localização dos termómetros na barragem do Alto Ceira II.



Figura 4.2 – Colocação de um termómetro junto ao paramento (em fundo a cofragem).

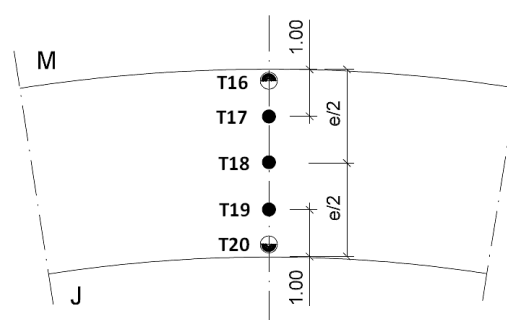


Figura 4.3 – Localização dos termómetros T16 a T20 (secção no bloco J4-J5, à cota inferior)

O princípio de funcionamento dos termómetros embebidos no betão baseia-se na relação entre a resistência elétrica e a temperatura. Nas campanhas de leitura o equipamento de medição fornece uma corrente estabilizada e conhecida, sendo gerada uma tensão que é medida por um potenciômetro que está integrado no referido equipamento de medição. Este também integra um processador que automaticamente transforma o valor obtido em temperatura.

Os termómetros de resistência elétrica instalados na barragem são da RST Instruments, modelo TM-1. Os elementos sensores destes instrumentos são em cobre, metal que apresenta uma relação muito linear entre a resistência elétrica e a temperatura. De acordo com o fabricante (RST Instruments, sem data), estes termómetros são especialmente adequados para medir a temperatura interna do betão sempre que não for necessária uma resposta rápida pois apresentam um tempo de resposta algo elevado, em parte devido à baixa velocidade de transferência da temperatura exterior ao termómetro para o elemento de deteção. O fabricante indica ainda que o erro de leitura é inferior a 0,5°C.

As primeiras campanhas de medição da temperatura do betão na barragem do Alto Ceira II realizaram-se durante a construção, no mês de dezembro de 2011, nos termómetros localizados no bloco central. As medições nos restantes termómetros iniciaram-se já em 2012, sendo que as datas de início das leituras estão relacionadas com as datas de betonagem das camadas.

No dia em que foi realizado o levantamento das temperaturas superficiais do paramento de jusante, foram efetuadas várias campanhas de leituras dos termómetros, indicando-se no Quadro 4.2 a hora de início de cada campanha. As leituras das temperaturas foram efetuadas nas sete centrais de leitura existentes no interior da barragem (ver localização aproximada das centrais de leitura e dos termómetros de jusante no alçado na Figura 4.4) por técnicos da EDP. As campanhas iniciaram-se alternadamente em cada margem.

Quadro 4.2 – Horas de início das campanhas de medição nos termómetros da barragem, no dia 4 de junho de 2013.

Campanha	Hora de início	Campanha	Hora de início
1	11h30min	4	12h45min
2	12h00min	5	13h00min
3	12h30min	6	13h15min

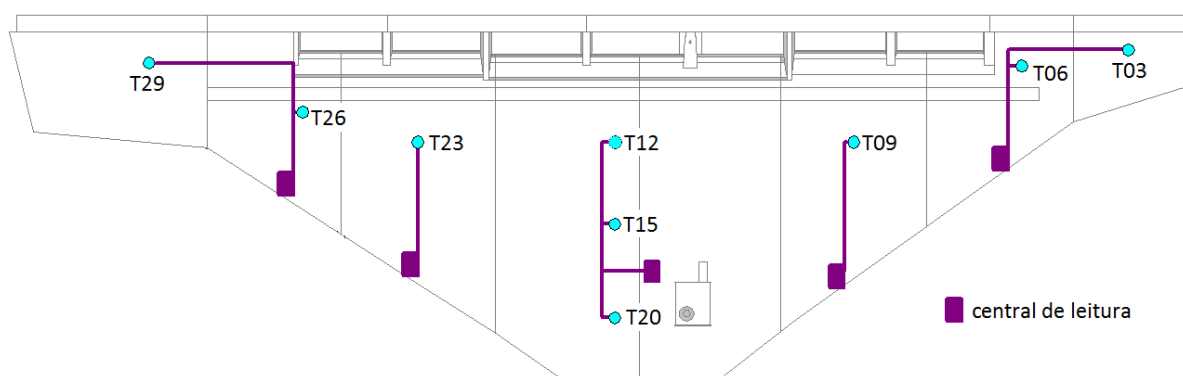


Figura 4.4 – Localização das centrais de leitura dos termómetros.

Foram realizados três levantamentos térmicos do paramento de jusante. No primeiro levantamento a câmara foi colocada no pilar de observação geodésica da margem esquerda, no segundo levantamento no pilar da margem direita e no terceiro levantamento foi colocada num tripé (Figura 4.5) que foi estacionado no centro do vale no lado de jusante, numa estrada temporária que ligava as duas margens (encontrava-se aproximadamente à cota do termómetro T20). Apresentam-se os valores de temperatura obtidos pela câmara térmica durante o terceiro levantamento, já que correspondem às melhores condições devido à posição da câmara relativamente à estrutura, e os valores obtidos pelos termómetros situados mais próximo do paramento de jusante. Este levantamento, iniciado às 12h51min, cobriu todo o paramento e parte do vale, demorou 27 minutos a ser realizado, tendo sido registadas 185 imagens (Figura 4.6).



Figura 4.5 – Câmera montada num tripé para obtenção de imagens no terceiro levantamento.



Figura 4.6 – Imagem termográfica da zona inferior da barragem.



Figura 4.7 – Imagem na banda da radiação infravermelha afastada.



Figura 4.8 – Imagem da mesma zona na banda da radiação visível.

Para visualizar a imagem térmica foi escolhida uma paleta de cores que variava entre o azul-escuro e o branco. Na Figura 4.7 apresenta-se uma das últimas imagens, a qual registou informação térmica da zona inferior do paramento. Nesta imagem é possível identificar a descarga de fundo, uma mangueira que a partir desta escoava água para jusante, e vários degraus. Na Figura 4.8 apresenta-se uma imagem na gama do visível da mesma zona.

Em cada uma das imagens, e por comparação com o desenho de um alçado com a localização da instrumentação instalada na barragem, identificou-se visualmente a localização aproximada dos pontos à superfície mais próximos dos termómetros superficiais de jusante e obteve-se o valor da temperatura nesse ponto. Para tal utilizou-se o programa ThermaCAM da FLIR que indica o valor numérico da temperatura quando se desloca o cursor sobre uma imagem térmica (o software apresenta o valor da temperatura associado a cada pixel da imagem). Dado que uma mesma zona do paramento é visualizada em diversas imagens, os valores de temperatura apresentados no Quadro 4.3 são a média dos valores obtidos. No mesmo quadro apresentam-se também o desvio padrão das temperaturas obtidas, o número de imagens onde cada um dos pontos foi identificado, a temperatura registada pelo termómetro mais próximo e a diferença entre as temperaturas da câmara e a medida pelo termómetro.

Quadro 4.3 – Valores de temperatura obtidos das imagens térmicas e dos termómetros de jusante.

Identificação do termómetro	Temperatura câmara (°C)	Desvio padrão (°C)	N.º imagens	Temperatura termómetro (°C)	Diferença de temperatura (°C)
T29	27,7	0,4	5	23,2	4,5
T26	18,2	0,6	13	16,4	1,8
T23	18,7	0,5	11	18,8	-0,1
T12	20,2	0,5	6	19,2	1,0
T09	20,9	0,6	7	20,6	0,3
T06	20,4	0,4	11	20,0	0,4
T03	20,0	0,1	2	20,1	-0,1
T15	20,8	1,0	4	17,8	3,0
T20	24,6	0,2	5	19,3	5,3

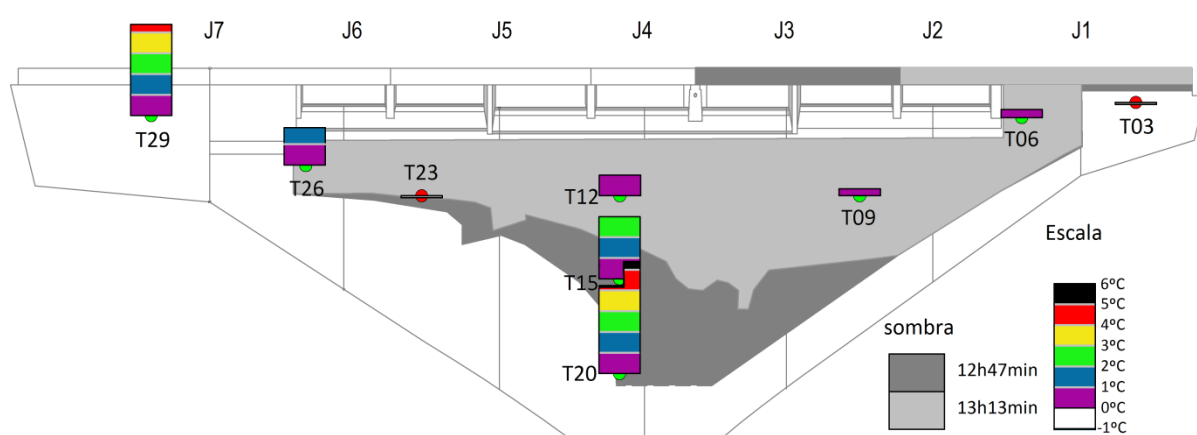


Figura 4.9 – Diferença entre a temperatura superficial obtida pela câmara térmica e a temperatura medida pelos termómetros superficiais embebidos no betão.

As diferenças estão também apresentadas, na forma gráfica, na Figura 4.9. A localização aproximada dos pontos está assinalada com um círculo, sendo que se utilizou o vermelho para indicar os dois pontos que têm diferença negativa da temperatura. A incidência de sol no paramento, nomeadamente na zona dos termómetros, variou ao longo do levantamento, como indicado no Quadro 4.4. A delimitação da zona do alçado que se encontrava à sombra em dois instantes diferentes foi realizada com base em duas fotografias obtidas às 12h47min e às 13h13min, como indicado na legenda.

O levantamento foi realizado de forma sistemática: i) fiadas horizontais começando pela cota superior; ii) cada fiada a começar pela margem direita; e iii) sobreposição horizontal e vertical. Assim, a zona do termómetro T29 encontra-se nas primeiras fotografias enquanto a do termómetro T20 nas últimas. No Quadro 4.4 indicam-se as zonas “fotografadas” em cada minuto. O número inscrito em cada célula indica em quantas imagens o termómetro surge (o termómetro não foi fotografado, mas foi obtida uma imagem da zona onde o termómetro se encontra). Exemplificando, das seis imagens obtidas às 12h51min, duas cobriam a zona do termómetro T29 e quatro a do termómetro T26. A zona do termómetro T29 voltou a ser “fotografada” às 12h56min. As últimas imagens cobriram unicamente a zona do termómetro T20. As cores das células indicam se no momento em que foi obtida a imagem a zona se encontrava ao sol (amarelo) ou à sombra (cinzento). Durante o levantamento houve uma paragem de cerca de sete minutos, entre as 13h08min e as 13h15min.

Quadro 4.4 – Horas a que foram obtidas as diferentes imagens e zonas cobertas por estas.

		Horas e minutos																								ΔTemp.					
		12h												13h																	
		51	52	53	54	55	56	57	58	59	0	1	2	3	4	5	6	7	8	15	16	17	18	19	20		21	22	23	24	
Termómetro	T29	2					3																						4.5		
	T26	4	1				1	3					1	3															1.8		
	T23		3	1				3	1					2	1														-0.1		
	T12									4						1	1												1.0		
	T09										4							3											0.3		
	T06				1	3						6						1											0.4		
	T03					2																							-0.1		
	T15															2	1			1									3.0		
	T20																									1			1	2	1

legenda: sombra sol

De acordo com a informação constante na Figura 4.9 e no Quadro 4.4, verifica-se que as maiores diferenças de temperatura ocorrem em zonas onde incidia radiação solar direta. A exceção é o termómetro T01 que, apesar de se encontrar numa zona exposta ao sol na altura do levantamento, apresenta uma diferença de temperatura muito pequena.

O que poderá estar na origem de situações tão díspares? Nos parágrafos seguintes serão analisados alguns fatores que poderão justificar quer a semelhança dos valores obtidos pela câmara pelos termómetros em zonas situadas à sombra quer as grandes diferenças nas zonas que se encontravam ao sol.

A temperatura do betão num ponto no interior de uma barragem, por exemplo situado junto aos termómetros, sofre a influência direta da temperatura do betão que o rodeia. A transmissão da energia térmica é efetuada por condução de zonas a temperatura mais elevada para zonas onde a temperatura é mais baixa. A camada exterior de betão, a dos paramentos, encontra-se ainda sob a influência da radiação (quer solar, direta ou difusa,- quer a emitida pelas superfícies do vale) e da temperatura do meio fluido que se encontra em contacto com os paramentos (transmissão por convecção), meio este que é o ar ou a água da albufeira (Silveira, 1958).

No gráfico da Figura 4.10 apresentam-se os valores de temperatura dos termómetros de jusante e do ar. Entre as 11h30min e as 13h15min (horas a que foram efetuadas a primeira e última campanhas de leitura) foram realizadas um total de seis campanhas de medição dos termómetros embebidos. Relativamente ao ar existem dados com periodicidade horária entre as 8h00 e as 16h00. Na Figura 4.11 apresentam-se os valores entre as 12h30min e as 13h15min com inclusão das temperaturas obtidas das imagens da câmara térmica.

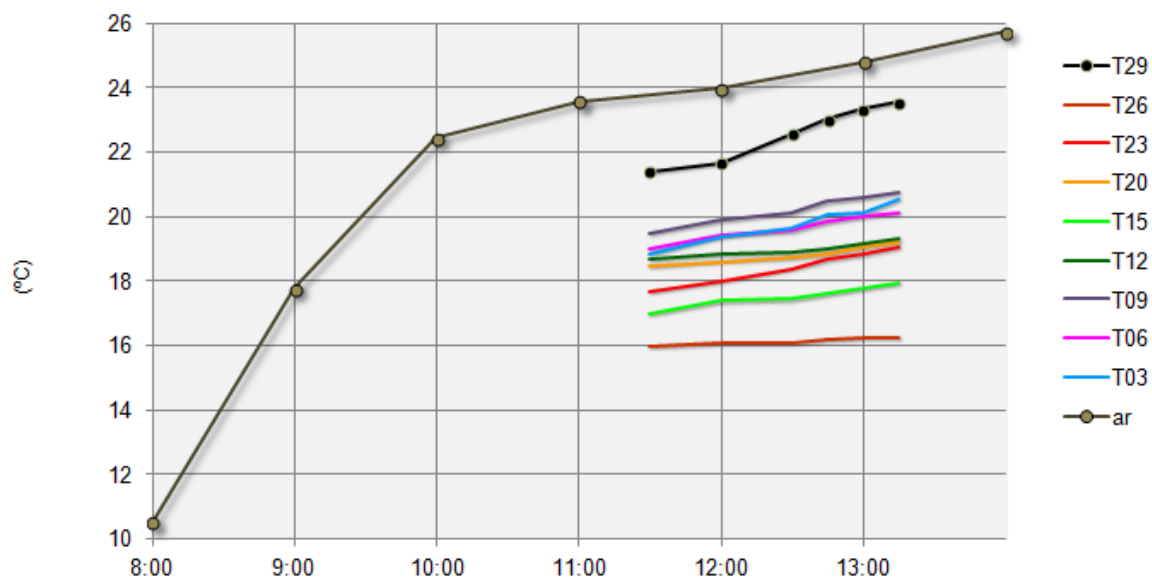


Figura 4.10 – Temperaturas medidas nos termómetros de jusante e do ar.

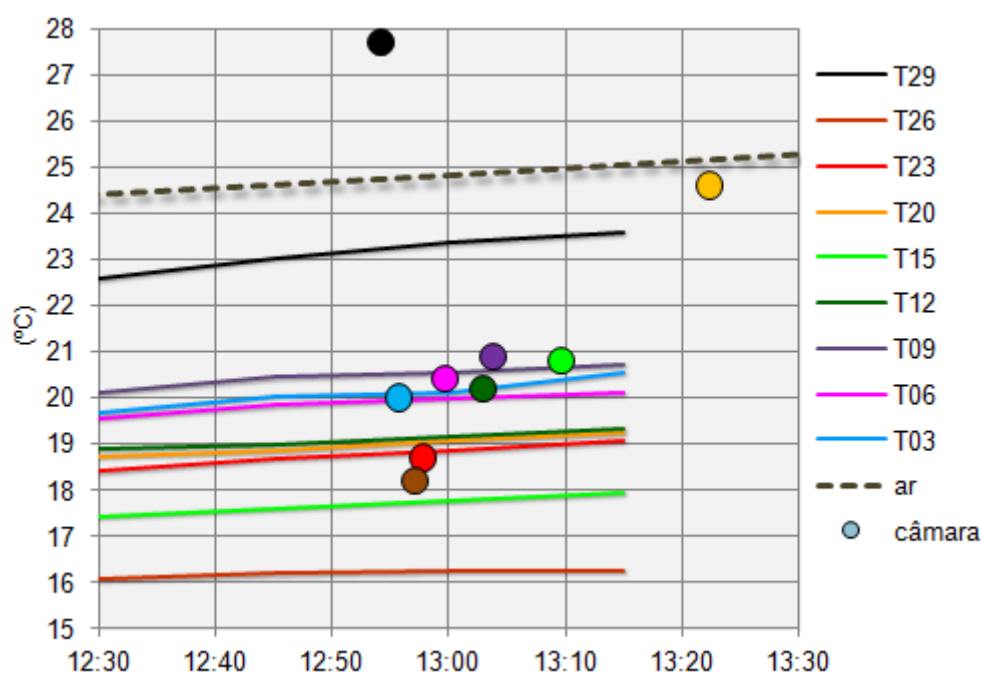


Figura 4.11 – Temperaturas medidas nos termómetros superficiais e pela câmara térmica.

Para as análises seguintes é importante saber como variaram os valores de temperatura registados pelos termómetros superficiais de jusante (Figura 4.12). Na Figura 4.12 inclui-se também a variação da temperatura do ar, sendo que a temperatura às 11h30min é a média das temperaturas registadas às 11h00min e às 12h00min. À semelhança da temperatura do ar, também as temperaturas registadas pelos termómetros entre as 11h30min e as 13h15min foram crescentes, tendo sido mais acentuada a do termómetro T29 e mais ligeira a do T26.

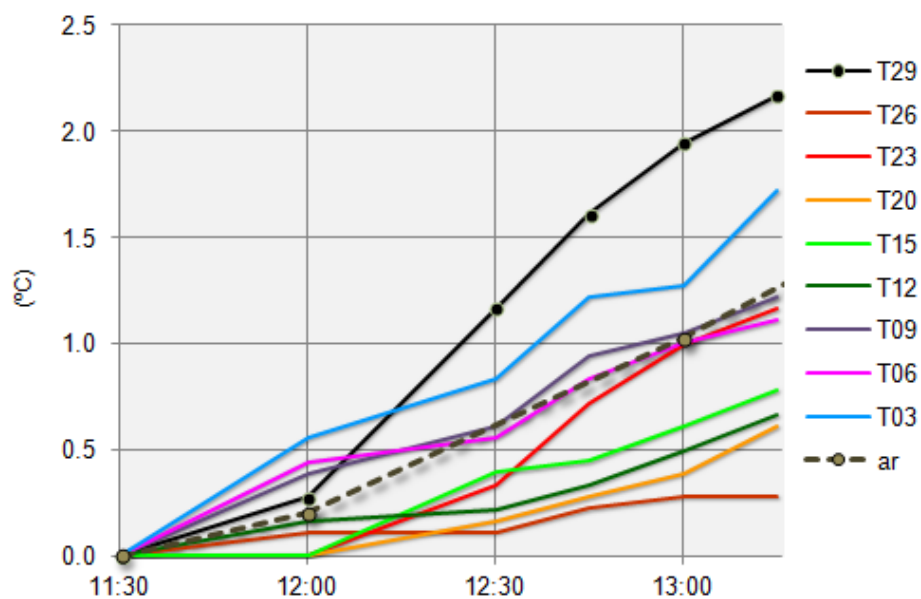


Figura 4.12 – Variações da temperatura medidas nos termómetros de jusante e na estação meteorológica, no dia 4 de junho de 2013.

As diferenças de temperatura obtidas, entre a câmara térmica e os termómetros, podem ser enquadradas numa das quatro situações seguintes:

- i. Paramento à sombra, diferença de temperatura reduzida, inferior a 1°C: termómetros T06, T09, T12 e T23. Não existindo incidência direta da radiação solar nestas zonas, as variações de temperatura da superfície resultam de variações da temperatura do ar em contacto com o paramento e da radiação emitida pelo meio envolvente. Estas variações refletem-se também na zona dos termómetros, os quais apresentam uma subida gradual de temperatura.
- ii. Paramento à sombra, diferença de temperatura próxima de 2°C: termómetro T26. A justificação desta diferença poderá estar relacionada com escorrências de água, visíveis nas manchas mais escuras, e portanto mais frias, das imagens térmicas da zona (uma das imagens térmicas é apresentada na Figura 4.13). Esta zona é, de entre as analisadas, a mais fria quer à superfície quer na zona dos termómetros, sendo também a que menos aqueceu entre as 11h30min e as 13h15min. Nas imagens, o ponto onde foi obtida a temperatura superficial não estava situado nas zonas mais frias do paramento. No entanto, o termómetro no betão sofre a influência das temperaturas superficiais inferiores.

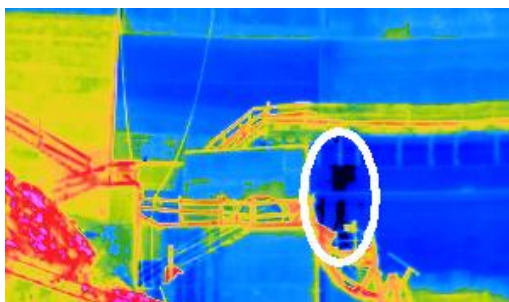


Figura 4.13 – Imagem térmica relativa às escorrências na zona do termómetro T26.

- iii. Paramento ao sol, diferença de temperatura reduzida, inferior a 1°C: termómetro T03. Tendo em conta a orientação da superfície (Figura 4.15) e a posição do sol ao longo do dia, verifica-se que os raios solares começaram a incidir naquela zona cerca das 12h30min, ou seja cerca de 20 minutos antes do período de obtenção das imagens, sendo o ângulo de incidência da radiação muito rasante. As temperaturas registadas pelo termómetro e a sua variação temporal são bastante elevadas, podendo existir condições locais que justifiquem o aumento elevado da temperatura do betão ainda antes da incidência direta da radiação solar no paramento.
- iv. Paramento ao sol, diferença de temperatura elevada, superior a 3°C: termómetros T15, T20 e T29. Nestas três zonas o sol incidiu diretamente, embora na zona do termómetro T15 somente a última das imagens tenha sido obtida com o paramento ao sol. O tempo de exposição deste à ação direta dos raios solares, assim como a quantidade total de radiação incidente, varia bastante. Na Figura 4.15 incluiu-se, para o termómetro T20, a informação da existência de sombra provocada por elementos de apoio à construção. Refira-se que o facto da superfície de jusante ter estado à sombra resulta unicamente da própria orientação da barragem. O relevo do vale envolvente irá influenciar a incidência da radiação no paramento mas mais tarde, ao sombrear progressivamente o paramento, sendo que na Figura 4.15 não está considerado o efeito da sombra provocada pelo vale durante o período da tarde.

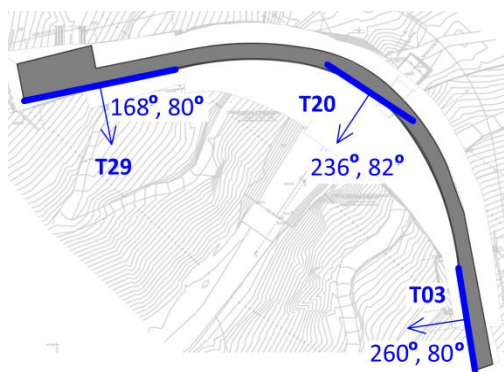


Figura 4.14 – Orientação e inclinação do paramento de jusante nas zonas dos termómetros.

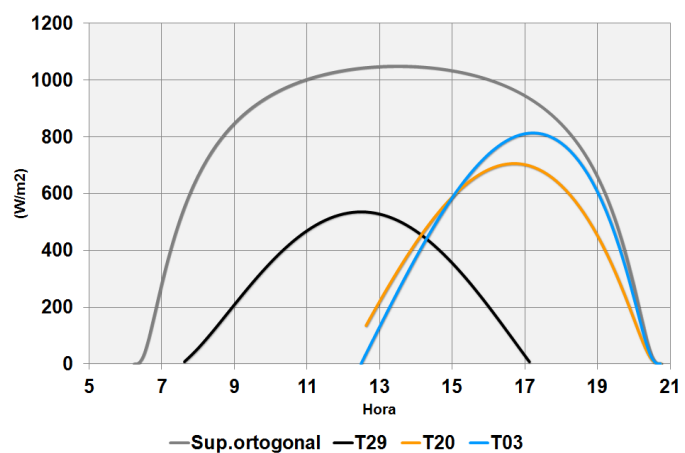


Figura 4.15 – Irradiância solar direta instantânea incidente numa superfície ortogonal aos raios solares e em três zonas da barragem.

Um elemento que se julga interessante para a análise das diferenças de temperatura realizada no ponto iv), consta do gráfico da variação das temperaturas medidas pelos termómetros (Figura 4.12). Neste gráfico deve-se realçar a variação da temperatura no termómetro T29, sendo a única zona onde foi detetada uma subida assinalável da temperatura, a qual ocorreu já depois das 12h00min, mais do que quatro horas após o sol ter começado a incidir nessa zona da barragem. Tendo em atenção que os termómetros apresentam um tempo de resposta algo elevado e que o próprio betão apresenta valores baixos de difusibilidade térmica², o facto de somente o termómetro que se encontra

² difusibilidade térmica - propriedade de um material que indica a rapidez com que uma alteração térmica é nele transmitida.

situado na zona onde há mais tempo incide o sol apresentar um efeito claro da alteração superficial da temperatura, é perfeitamente normal e plenamente justificado.

Como foi referido, o paramento de jusante foi coberto com um total de 185 imagens. Estas foram ligadas numa única imagem, uma imagem panorâmica, sobre a qual se aplicou uma transformação de modo a reduzir as deformações. Para tal utilizou-se o módulo Georeferencer do programa QGis, desenvolvido para georreferenciar imagens. Um dos processos de georreferenciação implementados no módulo recorre à identificação de pontos homólogos (Figura 4.16) na imagem panorâmica e no alçado da barragem (imagem de referência), tendo depois sido aplicada ainda no mesmo módulo a transformação do tipo “thin plate spline” e gerada uma nova imagem com menos distorções (Figura 4.17).

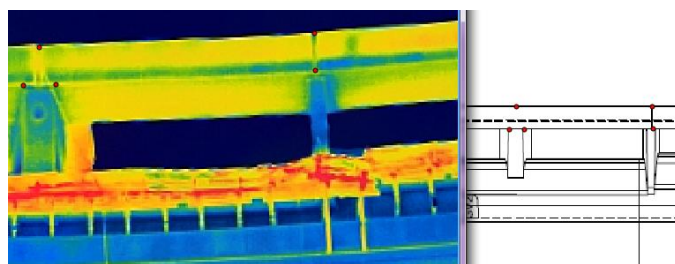


Figura 4.16 – Identificação de pontos homólogos: na esquerda a imagem térmica (imagem a corrigir); na direita o alçado (imagem de referência).

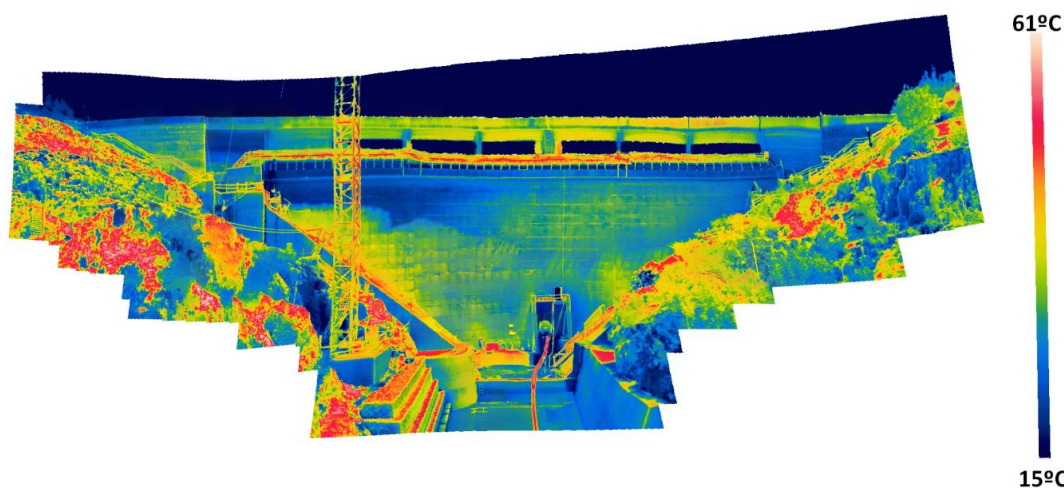


Figura 4.17 – Imagem térmica panorâmica (RGB) da barragem após a implementação de uma transformação para minorar a deformação da imagem original

Nas imagens digitais utiliza-se o sistema de cores denominado RGB, sendo que a cor de cada ponto (pixel) da imagem resulta da combinação de três cores fundamentais – vermelho (red), verde (green) e azul (blue) – sendo que a cada uma fica associada um valor de intensidade. São estes valores, que variam entre 0 e 255, que ficam registados nos ficheiros das imagens digitais. Na visualização, as intensidades correspondentes ao vermelho ficam associadas ao filtro vermelho (banda do vermelho) e assim sucessivamente. Certos programas de manipulação de imagens permitem escolher a banda em que se quer colocar os valores de intensidade. Assim, a imagem da Figura 4.18 resultou de colocar os valores de intensidade da cor vermelha na banda azul, da verde na vermelha e da azul na verde: a

imagem inicial apelidada de “RGB” passa a designar-se “BGR”. As alterações na coloração da imagem BGR permitem que se percebam mais facilmente diferenças de temperatura no paramento da barragem. As cores originais amarelo e azul foram transformadas em rosa e verde, cores que são visualmente mais distintas. Nesta nova imagem as zonas mais quentes da barragem ficaram representadas a rosa e as mais frias a verde (Figura 4.18). Realçam-se quatro zonas: i) 1 e 2 – a temperatura inferior resulta da sombra provocada por elementos associados à construção da obra (ver Figuras 4.20 e 4.21), situados por cima do passadiço, sob os descarregadores; ii) 3 – zona da barragem situada próximo da fundação onde, de acordo com modelo de previsão da irradiância solar incidente na barragem (Figura 4.22), é de esperar valores de temperatura elevados; e iii) 4 – zona sob o efeito de elevadas temperaturas de superfícies situadas na proximidade do paramento.

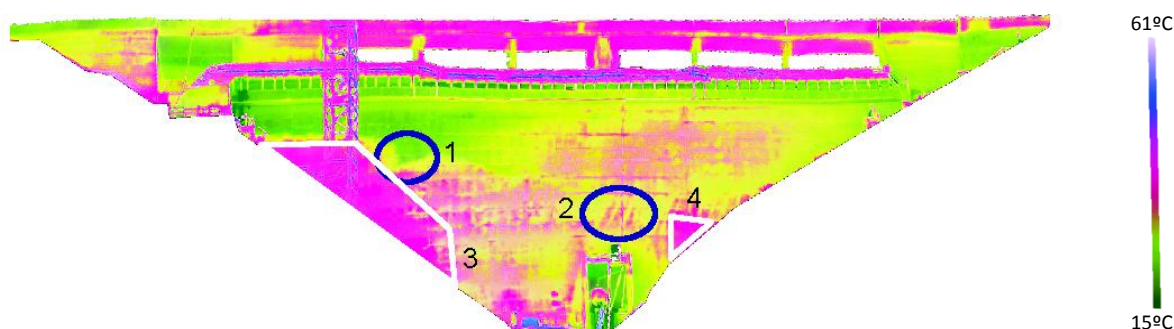


Figura 4.18 – Composição GBR da imagem térmica panorâmica para realce de alguns pormenores relacionados com a temperatura superficial do paramento.



Figura 4.19 – Elementos de apoio à construção que estão na origem das diferenças de temperatura assinaladas a azul na Figura 4.18.



Figura 4.20 – Sombras no paramento de jusante na imagem obtida às 13h13min, onde se vêem as sombras provocadas por elementos de apoio à construção.

A previsão da irradiância global incidente na superfície da barragem foi realizada pelo programa “Radiacao” (Leitão, 2012), utilizando um modelo de elementos finitos tridimensionais da barragem. Este programa gera imagens através das quais é possível identificar as zonas onde, em cada instante, incide mais radiação e também o valor da sua potência. Na Figura 4.21 apresentam-se duas das imagens obtidas onde é claramente visível que a zona assinalada por “3” na Figura 4.18 se encontra numa área da barragem onde, desde bastante cedo, ocorreu uma elevada incidência de radiação solar.

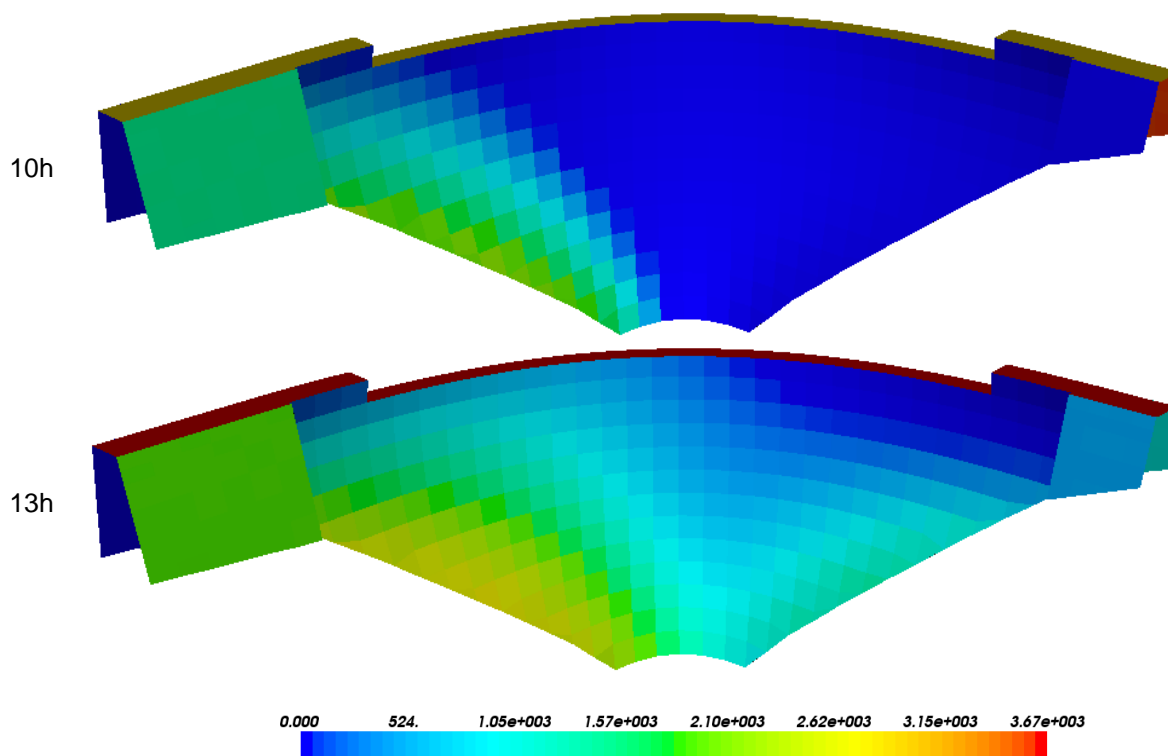


Figura 4.21 – Radiação solar incidente em dois instantes distintos, calculada através de um modelo de elementos finitos.

Em face dos valores de temperatura obtidos alerta-se que a medição de temperaturas dos paramentos de barragens de betão com câmaras térmicas, por esta dar unicamente informação sobre as temperaturas superficiais, não deve ser utilizada, salvo condições de observação excepcionais, para extrair informação sobre as condições térmicas da estrutura. A superfície do paramento de jusante da barragem, por ser fronteira entre o betão e ar, tem uma temperatura que é função das temperaturas destes dois meios, sendo que a incidência de radiação (direta do sol ou refletida por superfícies próximas) e o efeito do vento, podem alterar muito a temperatura superficial do betão e levar a que a superfície possa ter temperatura muito diferente da do betão da barragem.

Para além da análise efetuada sobre a imagem panorâmica poderá ser de interesse realçar alguns aspetos de pormenor, visíveis nas imagens isoladas (Figura 4.22) e que são descritos seguidamente. Das quatro imagens térmicas apresentadas nesta Figura somente a A está com a coloração original. Nas restantes três imagens foi aplicada uma homogeneização cromática.

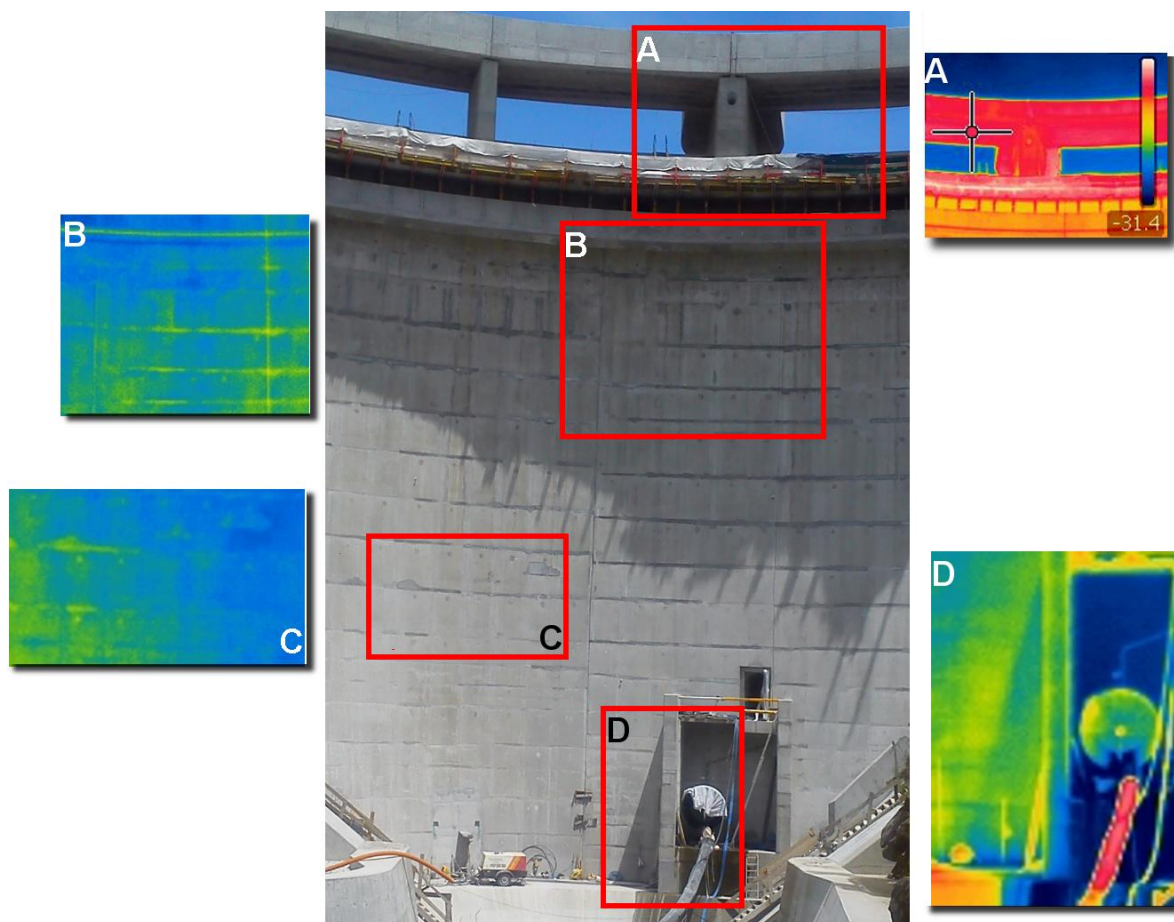


Figura 4.22 – Pormenores das imagens térmicas.

A – O céu limpo surge sempre com temperaturas muito baixas, da ordem de -30°C , resultado da baixa energia radiante emitida por este.

B – Na imagem térmica aparecem duas linhas verticais. A do lado esquerdo é o traço da junta J4. A do lado direito, mais visível e mais quente, é resultante da união dos painéis de cofragem utilizados durante a betonagem.

C – Pequenas áreas do paramento da barragem foram alisadas, tendo-se aplicado um betão com uma composição diferente, o qual apresenta também um comportamento térmico diferente.

D – A sombra provocada pela estrutura que envolve a descarga de fundo está visível nas duas imagens. Na imagem térmica fica destacado um objeto longilíneo a uma temperatura superior.

Termina-se esta subsecção do relatório com uma chamada de atenção para a vantagem de limitar a escala térmica durante a obtenção das imagens. Por defeito a câmara térmica ajusta a escala cromática (relacionada com as temperaturas) em função dos valores extremos de temperatura registados na imagem. Tal facto pode levar a que de um mesmo objeto possam ser obtidas imagens térmicas com coloração bastante diferente. Como exemplo apresenta-se a mesma área do paramento da barragem de Alto Ceira II junto ao encontro da margem direita em duas imagens térmicas. A primeira imagem térmica foi obtida durante o levantamento da zona superior da barragem (primeira fiada), e incluiu também a captação de uma área de céu, motivo pelo qual a temperatura mínima da imagem é $-30,9^{\circ}\text{C}$.

Já na segunda imagem, Figura 4.24, que se restringiu ao paramento e encosta, a temperatura mínima registada foi 15,1°C. Em ambas as imagens a temperatura máxima foi muito semelhante (47,9°C e 46,2°C, respetivamente). A superfície da barragem, que tinha temperaturas da ordem de 20°C, é apresentada em tons de amarelo na primeira imagem e em tons de azul na segunda imagem.



Figura 4.23 – Paramento representado por uma escala cromática com amplitude de 78.8°C.

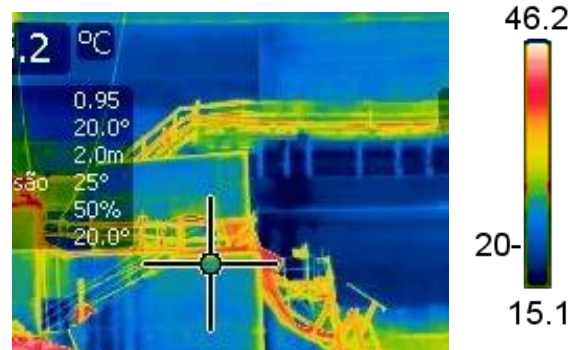


Figura 4.24 – Paramento representado por uma escala cromática com amplitude de 31.1°C.

Tal facto não constitui problema sendo que a questão se relaciona com a perda de informação na primeira imagem pois um mesmo intervalo de temperaturas fica representado por uma gama de cores menos variada. Na Figura 4.25 apresenta-se, para as duas escalas de temperatura utilizadas na Figura 4.23 e na Figura 4.24, uma variação cromática correspondente a uma variação de temperatura de 10°C.



Figura 4.25 – Variação de 10°C nas escalas cromáticas da Figura 4.23 e da Figura 4.24, respetivamente.

A restrição das temperaturas registadas pode permitir uma deteção mais completa e rigorosa de pormenores relacionados com variações de temperatura. Por exemplo, para os elementos mais quentes associados à barragem (guardas de proteção, por exemplo), apresentam-se na Figura 4.24 com uma maior variabilidade de cores, o que permite detetar mais elementos e diversos pormenores. No centro das duas imagens existe uma zona de escorrências já anteriormente citada e apresentada na Figura 4.13. Delimitando as zonas mais frias nas duas figuras obtêm-se áreas diferentes (áreas a vermelho apresentadas na Figura 4.26 e na Figura 4.27), sendo esta maior na segunda figura em resultado de uma maior diferença cromática na imagem original.

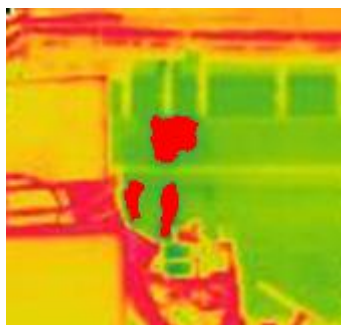


Figura 4.26 – Marcação da área mais fria do paramento na Figura 4.23.

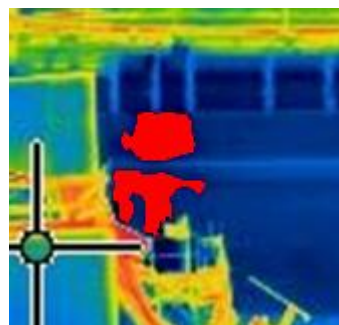


Figura 4.27 – Marcação da área mais fria do paramento na Figura 4.24.

4.3 Barragem do Alto Ceira

A barragem do Alto Ceira situa-se a cerca de 200 m a montante da nova barragem. É uma barragem abóbada que há muito apresentava problemas estruturais em resultado de reações expansivas graves, os quais ditaram a necessidade da sua substituição e demolição. Esta iniciou-se na segunda quinzena de junho, alguns dias depois de realizado o levantamento térmico. Em trabalhos de Camelo *et al.* (2007) e Tavares de Castro (2012) foram apresentadas diversas imagens onde estão patentes a evolução e o estado da deterioração estrutural (Figura 4.28 e Figura 4.29).

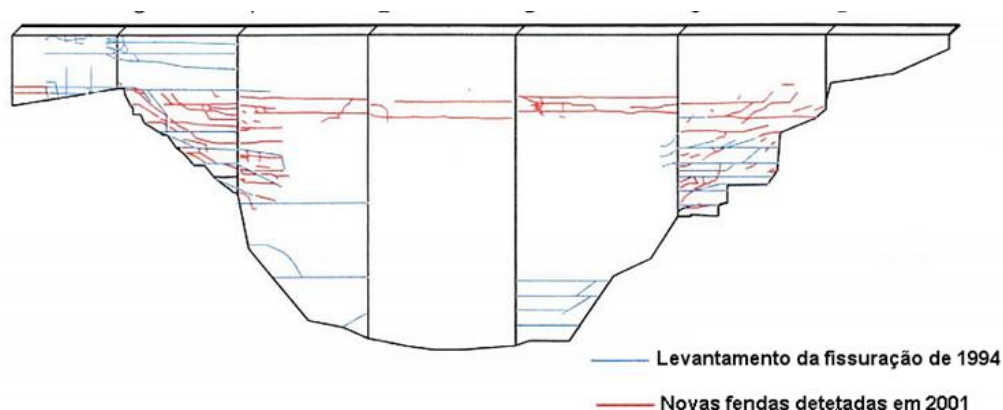


Figura 4.28 – Evolução da fendilhação do paramento de jusante da barragem do Alto Ceira entre 1994 e 2001.



Figura 4.29 – Fendas e deposição de carbonatos no paramento de jusante (margens esquerda e direita, respetivamente) da barragem do Alto Ceira.

O levantamento da temperatura superficial desta barragem foi semelhante ao que tinha sido realizado na nova barragem do Alto Ceira, cerca de uma hora antes. A câmara foi instalada num tripé, que foi colocado a cerca de 100 m de distância, junto à estrada que ligava as duas barragens. O ponto de vista era assim lateral, pelo que foram obtidas imagens em que a estrutura apresenta uma maior deformação. O levantamento térmico, realizado em sete minutos, incidiu unicamente na zona da abóbada, a qual foi coberta com 26 imagens. Foi também realizado um levantamento com fotografias, o qual incluiu

também, de forma parcial, a zona do descarregador de superfície. Cada conjunto foi depois reunido em duas imagens panorâmicas (Figura 4.30 e Figura 4.31).



Figura 4.30 – Imagem panorâmica da barragem do Alto Ceira.

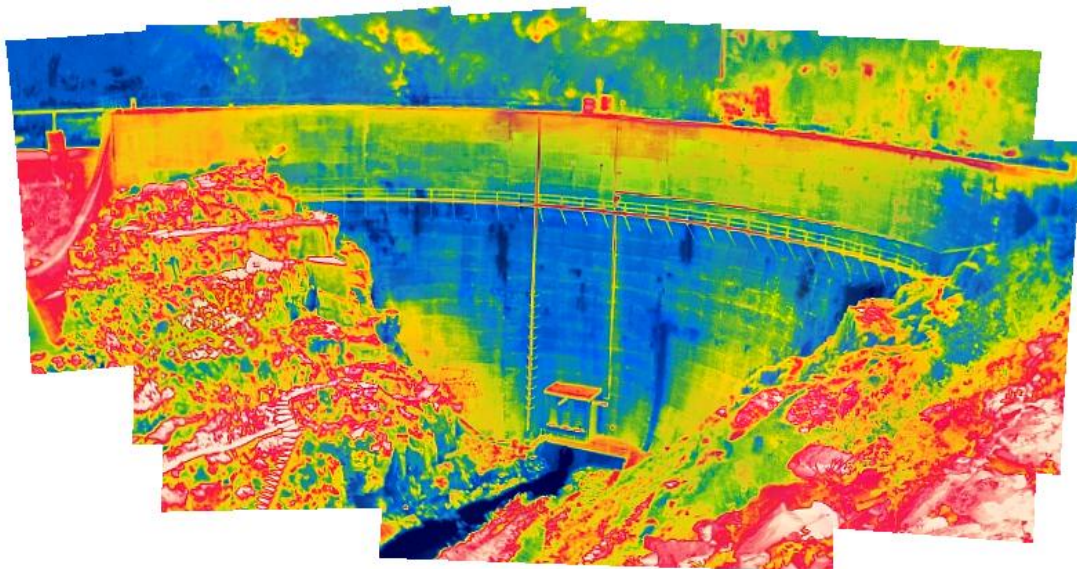


Figura 4.31 – Imagem térmica panorâmica da barragem do Alto Ceira.

Seguidamente destacam-se alguns pormenores da imagem térmica do paramento de jusante. As imagens térmicas foram alvo de processamentos de cores muito simples, realizados no programa de edição de imagens GIMP, com o objetivo de realçar os aspetos relevantes.

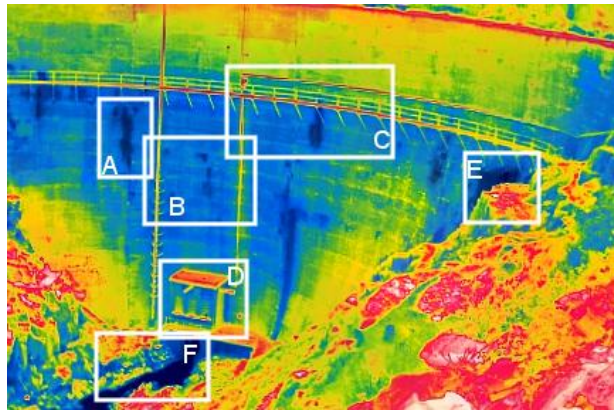


Figura 4.32 – Zonas do paramento apresentadas em pormenor nas duas figuras seguintes.

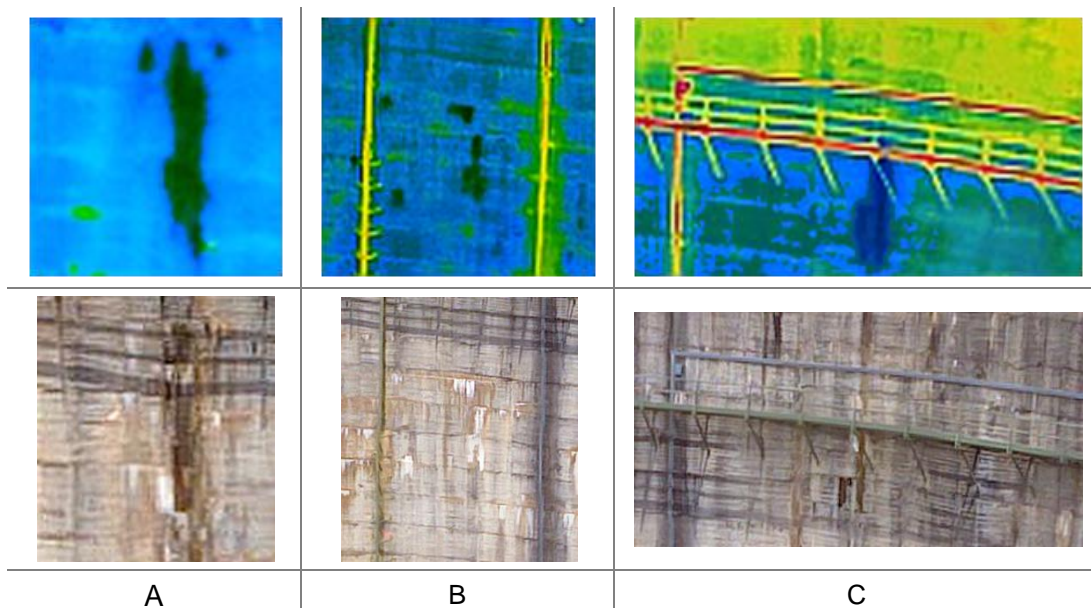


Figura 4.33 – Zonas da barragem com aspetos relevantes (zonas A a C)

No primeiro conjunto de imagens (Figura 4.33) há a realçar:

A – três zona mais frias (uma muito extensa e as outras duas pontuais) correspondentes a betão molhado. A água a escorrer no betão altera a cor deste, tornando-o mais escuro.

B – duas formas lineares com temperatura elevada que correspondem a dois tubos metálicos: o do lado esquerdo que protege um fio-de-prumo; o do lado direito que protegia o cabo elétrico que ligava o limnímetro (equipamento utilizado para medir o nível da água na albufeira) a uma central de leitura (esta central foi mudada de local, para próximo do coroamento; os tubos de proteção não foram retirados). No paramento, entre os tubos, destacam-se zonas mais frias. Na imagem da gama do visível vê-se que estas zonas correspondem a áreas onde ocorreu deposição de carbonatos, visíveis pela cor branca.

C – o passadiço e o tubo, ambos metálicos, estão a uma temperatura superior ao betão e bem identificáveis na imagem térmica. Um pouco acima do passadiço o tubo prolonga-se para a margem esquerda, paralelamente ao passadiço. Existem duas zonas de repasse, uma um pouco acima do passadiço, que deverá corresponder a uma fenda com maior expressão

que aquela que origina o segundo repasse, situado por debaixo do passadiço. A suposição que a fenda superior é maior que a inferior deve-se ao facto de a correspondente mancha indicativa da temperatura ter um desenvolvimento vertical bastante maior, situação que também se identifica na imagem da banda do visível, através da coloração do betão.

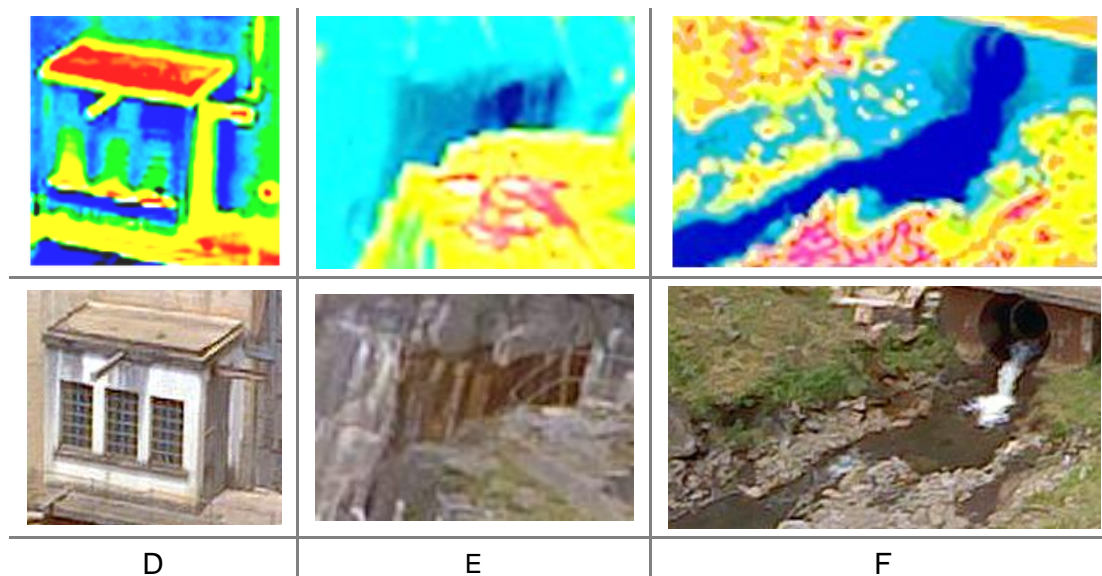


Figura 4.34 – Zonas da barragem com aspetos relevantes (zonas D a F).

No segundo conjunto de imagens (Figura 4.34) há a realçar:

D – zona onde é perceptível a influência das características das superfícies na temperatura superficial. A fachada sul da casa onde se encontrava o equipamento de abertura da descarga de fundo apresenta, na faixa por cima das janelas, duas zonas com coloração cinzenta (ao centro e à esquerda) que estão mais quentes que as zonas que na imagem da gama do visível estão com cor branca. Um dos vidros da janela da direita, mais exatamente o segundo a contar da direita na fiada inferior (dimensão aproximada de 25 cm por 32 cm), estará partido: a pequena mancha preta indica que aquela pequena área está muito mais fria, o que é consentâneo com a falta de vidro e de se estar a obter dados relacionados com a temperatura no interior dessa casa.

E – junto ao encontro da margem esquerda existem diversas fendas por onde há repasse de água. Na imagem existe uma zona situada no centro da área mais fria, onde o repasse terá maior expressão pois a imagem térmica apresenta uma coloração significativamente mais escura que as áreas confinantes.

F – esta zona foi seleccionada não porque incluía informação sobre a estrutura mas para realçar a diferença entre a informação que é adquirida pela visão e a informação “térmica”. Na imagem da gama do visível identifica-se, na saída da descarga de fundo, uma zona de turbulência na água, apresentando-se esta com coloração branca que se destaca da cor escura das águas mais calmas. A imagem térmica da zona apresenta uma grande uniformidade cromática, indicativa que a água com turbulência não está nem mais quente nem mais fria que a água que escorre a jusante desta zona.

A última imagem foi apresentada por constituir um alerta do que poderá ser a dificuldade em localizar uma imagem térmica. Para realizar a conjugação de imagens de forma a criar uma imagem panorâmica é necessário que nas diferentes imagens se encontrem elementos comuns, que visualmente se destaquem, de forma a conseguir ligar as diferentes imagens. Se a superfície estiver a uma temperatura homogénea os elementos que se destacam visualmente podem não ser visíveis nas imagens de infravermelho, o que pode impedir a ligação entre imagens. No caso específico da barragem do Alto Ceira este problema não se colocou pois existe grande variabilidade cromática em todas as imagens (tubos, as diferentes áreas com repasses e manchas na superfície de betão).

Os problemas resultantes das expansões do betão da barragem do Alto Ceira levaram a que esta tenha sido alvo de inspeções visuais muito pormenorizadas, realizadas em 1986, 1994 e 2001. Para a inspeção de 1986 foram montados andaimes nas margens, o que permitiu o levantamento dos blocos laterais. Este foi complementado com uma inspeção visual dos blocos centrais realizada a partir das margens, utilizando binóculos e máquina fotográfica com uma objetiva zoom. A inspeção de 1994, realizada depois da instalação do passadiço, incidiu unicamente na zona acessível a partir desta estrutura, uma faixa horizontal com cerca de 2,5 m de altura. Para a inspeção de 2001 foi montado um bailéu (ver Figura 4.35 e Figura 4.36), tendo o levantamento incidido nos blocos centrais. Este último incluiu também um levantamento com ultrasons. Os levantamentos de 1986 e 2001 demoraram, cada, um mês, sendo que este incluiu o tempo utilizado para montar as estruturas de acesso (andaimes ou bailéu).



Figura 4.35 – Inspeção do paramento de jusante da barragem do Alto Ceira utilizando um bailéu.



Figura 4.36 – Estrutura de suporte do bailéu instalada no coroamento.

Em 2005 foi realizado um levantamento com um *laser scanner*, o qual foi complementado com um levantamento fotográfico realizado em simultâneo (a câmara fotográfica digital estava instalada sobre o *laser scanner*). Este levantamento possibilitou a obtenção da geometria (forma) da barragem com rigor de alguns centímetros, sendo que a fusão da nuvem de pontos (criada do levantamento com o *laser scanner*) com as imagens fotográficas permitiu atribuir a cada ponto uma “cor”. O levantamento e o processamento dos dados (que incluiu a criação de uma ortoimagem) demorou um total de seis dias. Sobre a imagem, e com base na informação recolhida das inspeções, foi posteriormente desenhada a localização de diversas ocorrências (Figura 4.37, de Oliveira et al., 2009) utilizando um programa de CAD, sendo que se desconhece o tempo gasto na transposição da informação. Desta imagem foram extraídas as ocorrências que foram sobrepostas na imagem térmica corrigida (Figura 4.38). Para facilitar a visualização, algumas das cores utilizadas para assinalar as ocorrências foram modificadas.

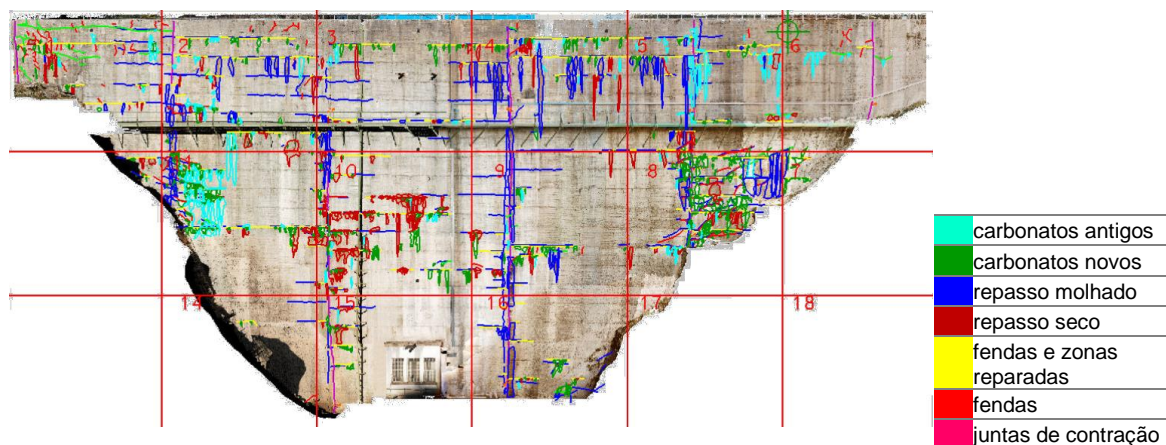


Figura 4.37 – Marcação das ocorrências com base no levantamento de 2001.

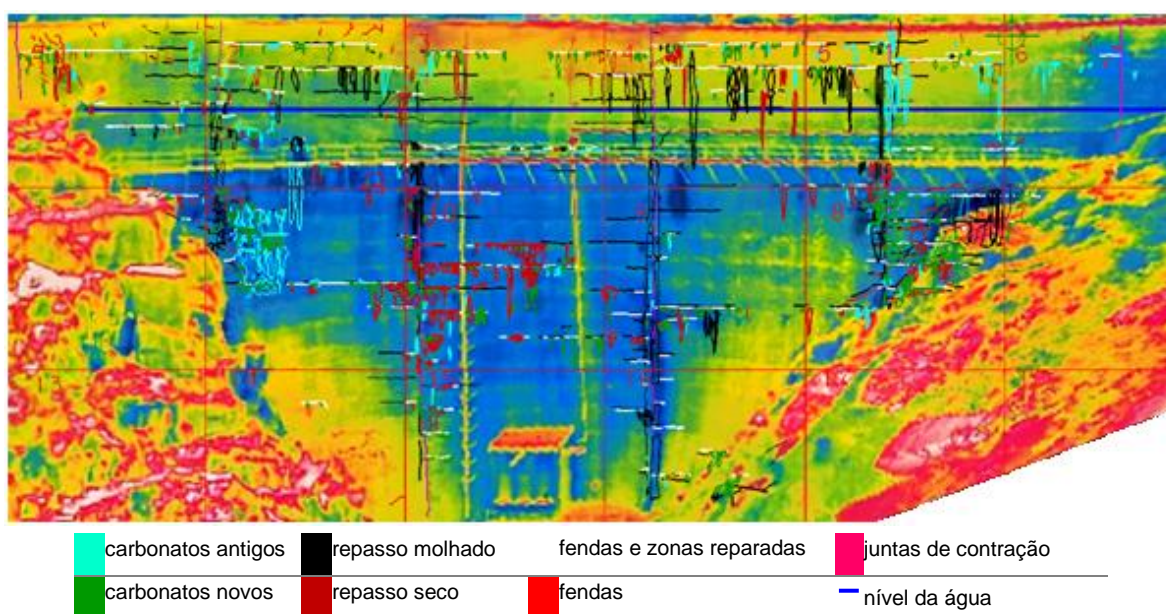


Figura 4.38 – Sobreposição de ocorrências na imagem térmica de Alto Ceira.

De forma a minorar a deformação geométrica introduzida pelo facto das imagens terem sido obtidas lateralmente à barragem, a imagem térmica panorâmica foi corrigida aplicando a metodologia referida na subsecção anterior (a imagem resultante é a base da Figura 4.38). Os resultados desta correção foram comparativamente piores devido à posição da câmara relativamente à barragem.

Centrando a atenção na imagem térmica verifica-se que muitas das zonas onde tinham sido identificados repasses molhados estão assinaladas na imagem térmica como zonas mais frias (zonas azul escuro na Figura 4.38). Não há zonas com temperaturas “baixas” na zona superior do paramento pois a 4 de junho de 2013, dia em que foi realizado o levantamento térmico, o nível da água na albufeira encontrava-se cerca de 4 m abaixo da cota máxima (os levantamentos anteriores tinham sido realizados com o nível da albufeira próximo do máximo). Por outro lado existem na imagem térmica áreas onde a temperatura superficial é mais baixa e que não correspondem a nenhuma ocorrência assinalada anteriormente. De modo a realçar as zonas mais frias da imagem térmica foi aplicada uma “posterização” (redução do número de cores, neste caso a duas) e uma conversão para tons de cinzento (Figura 4.39).

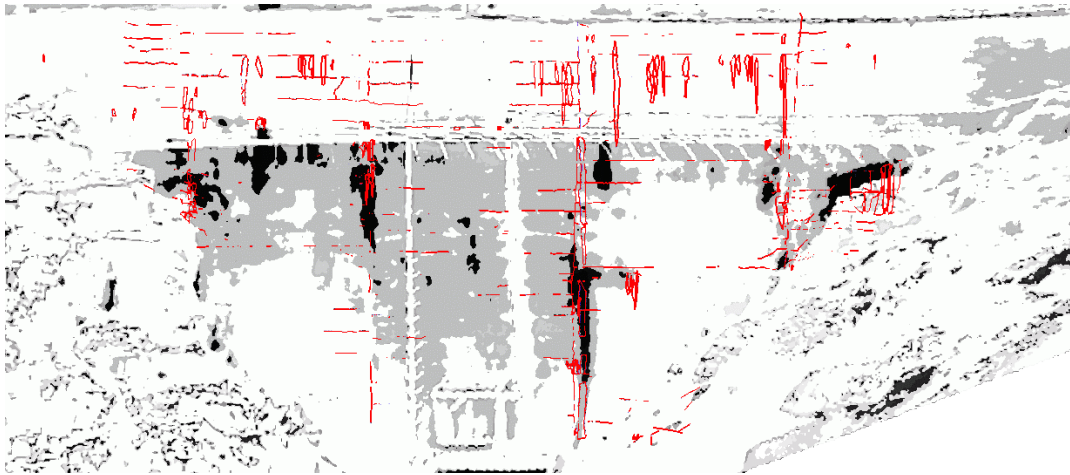


Figura 4.39 – “Repases molhados” (linhas vermelhas), levantados em 2001, assinalados sobre a imagem térmica de 2013.

Ao contrário do betão que, quando molhado, fica mais escuro, o carbonato de cálcio molhado mantém a cor branca, o que impossibilita, nestas áreas, a deteção de zonas de repasse por inspeção visual à distância. É de referir que, por vezes, os carbonatos colmatam as fendas pelo que uma zona com carbonato não indica que seja uma zona onde atualmente esteja a escorrer água proveniente de um repasse mas indica seguramente que esse repasse ocorreu no passado, já que a deposição de carbonatos é um processo lento. Na Figura 4.40 a na Figura 4.43 apresentam-se, respetivamente, um pormenor do paramento da barragem, a imagem térmica da mesma área, o resultado da extração das zonas mais escuras e a sobreposição destas na imagem inicial. Vê-se assim que algumas das zonas onde se depositou/deposita carbonato estão mais frias enquanto outras estão à mesma temperatura que o betão envolvente, o que sugere que nestas últimas as fendas estão já colmatadas.



Figura 4.40 – Imagem do paramento com aplicação de realce da cor.

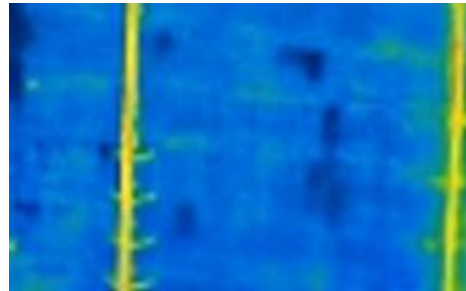


Figura 4.41 – Imagem térmica do paramento.

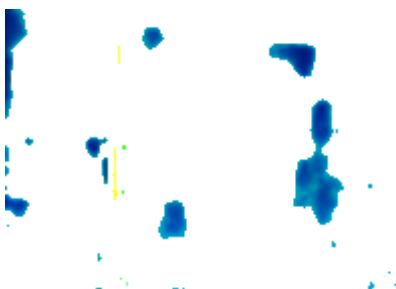


Figura 4.42 – Zonas mais frias

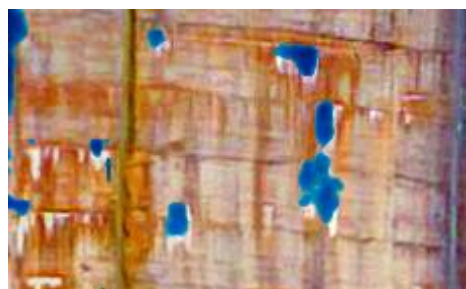


Figura 4.43 – Sobreposição de duas imagens (Figura 4.40 e Figura 4.42).

4.4 Barragem do Cabril

A barragem do Cabril (Figura 4.44 e Figura 4.45) é uma abóbada de betão que apresenta particularidades de comportamento estrutural, responsáveis pelo aparecimento de alguma fendilhação no paramento de jusante. Na imagem da gama do visível deste paramento são identificáveis (Figura 4.44): i) os dois passadiços, situados a uma altura elevada; ii) as linhas verticais, que são as faixas ao longo das quais escorrem águas; e iii) uma extensa mancha escura que se encontra na zona inferior da barragem, que se desenvolve de forma quase paralela à fundação.



Figura 4.44 – Fotografia da barragem do Cabril tirada no mesmo período e no mesmo local de onde foi realizado o levantamento térmico.

O levantamento termográfico foi realizado a partir da margem esquerda, junto ao pilar do sistema de observação geodésica PE2 situado sensivelmente à cota do coroamento, a cerca de 340 m do eixo da barragem (Figura 4.45). O nível de água na albufeira encontrava-se bastante elevado, cerca de 4 m abaixo do nível de pleno armazenamento, ou seja, a cerca de um metro acima do passadiço superior. No período em que foi realizado o levantamento metade do paramento estava ao sol (Figura 4.44).

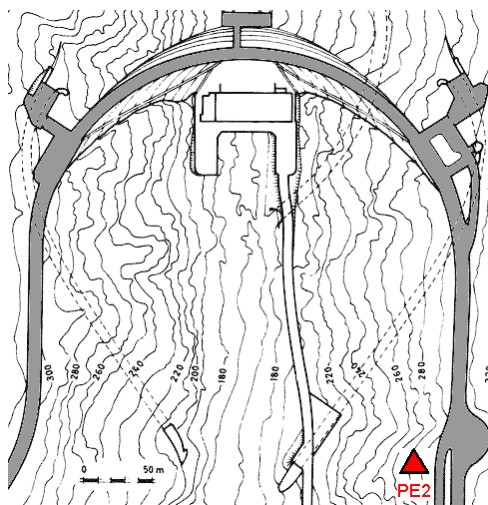


Figura 4.45 – Localização aproximada da câmara relativamente à barragem.

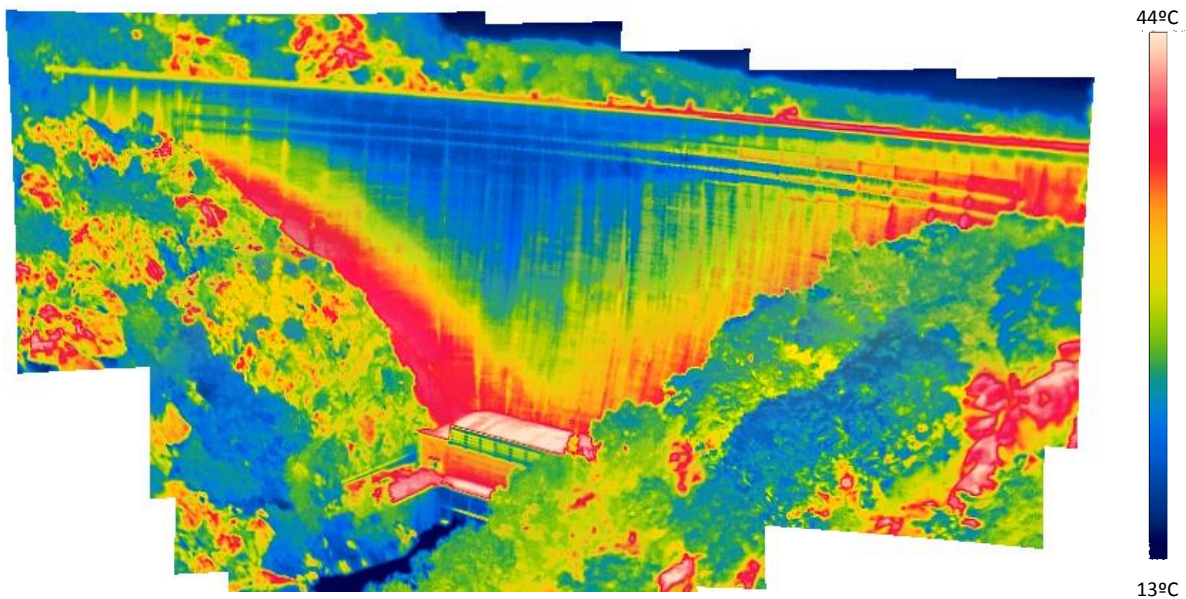


Figura 4.46 – Imagem térmica panorâmica da barragem do Cabril.

O levantamento térmico foi realizado em quatro minutos e constou de 17 imagens. Estas foram posteriormente homogeneizadas e reunidas numa imagem panorâmica (Figura 4.46). Na imagem térmica verifica-se que os aspetos antes referidos em ii) e iii) têm uma importante influência nas temperaturas superficiais do paramento da barragem. Com efeito, as zonas mais escuras situadas próximo da fundação, são também as mais quentes, sendo que a temperatura desta zona permanece mais elevada bastante tempo depois da radiação solar deixar de incidir diretamente sobre ela. Para além desta zona mais próxima da fundação existe uma segunda zona, com temperaturas intermédias, que a delimita a uma cota superior (zona amarela na Figura 4.47). Estas zonas estão fortemente correlacionadas com duas zonas que apresentam uma coloração diferente do betão limpo: a primeira mais escura, já anteriormente referida, outra mais clara, com tons ligeiramente castanho/amarelado. Estas zonas foram realçadas na imagem da banda do visível por manipulação cromática (Figura 4.48).

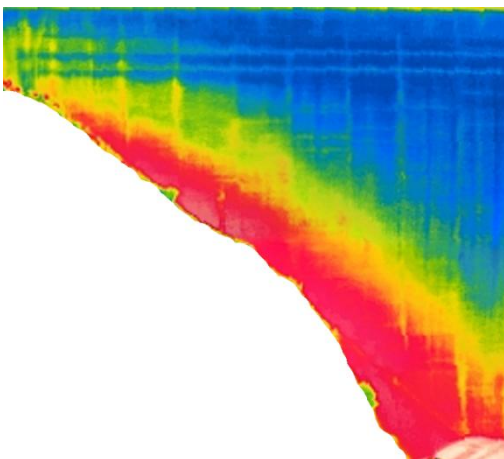


Figura 4.47 – Imagem térmica da barragem do lado de poente.

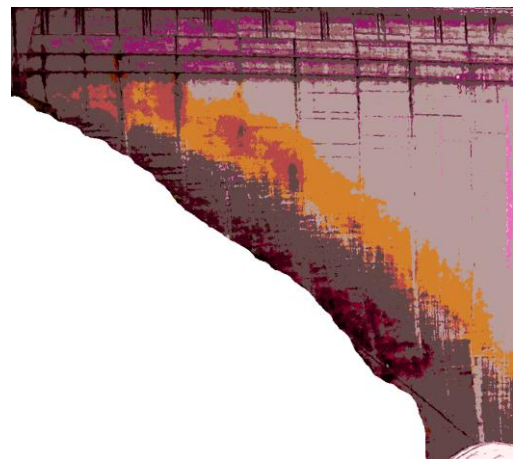


Figura 4.48 – Imagem da banda do visível cromaticamente transformada.

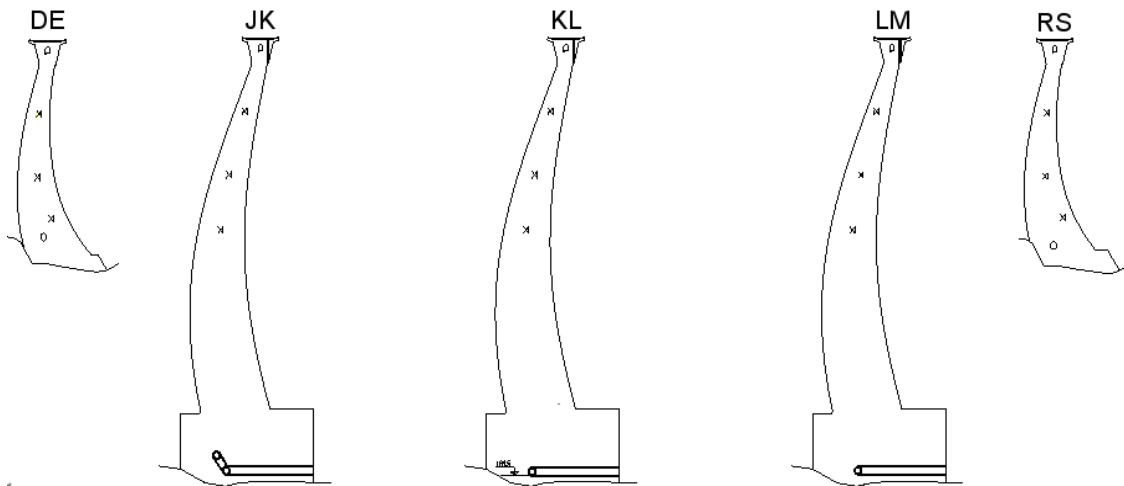


Figura 4.49 – Cortes da barragem ao longo dos eixos verticais de cinco blocos.

A barragem do Cabril apresenta uma curvatura vertical acentuada (ver Figura 4.49) o que permite uma elevada incidência da radiação na zona inferior da barragem, junto ao soco. Comparativamente com a barragem de Alto Ceira II, onde a zona inferior do bloco central apresenta uma inclinação de 98° com o plano horizontal, na barragem do Cabril o bloco central (KL) apresenta uma inclinação de 105° e os blocos laterais (DE e RS) uma inclinação de 123° . A inclinação menos acentuada dos blocos no lado de jusante e a orientação da barragem resulta que na zona inferior da barragem do Cabril incida mais radiação do que na zona correspondente da barragem de Alto Ceira II. Tendo em consideração a orientação do sol ao meio dia solar, verifica-se que a zona da barragem onde a radiação incide com maior intensidade é na base dos blocos situados próximo da margem direita.

Estabelecendo uma relação de dimensão entre o perfil do bloco DE e a imagem da Figura 4.48 foram marcadas no perfil as duas faixas de coloração diferente. O resultado apresenta-se na Figura 4.50, sendo que se pode verificar que estas faixas surgem no paramento de jusante na zona que apresenta inclinação superior a 90° .



Figura 4.50 – Desenvolvimento das faixas cromáticas no perfil do bloco DE

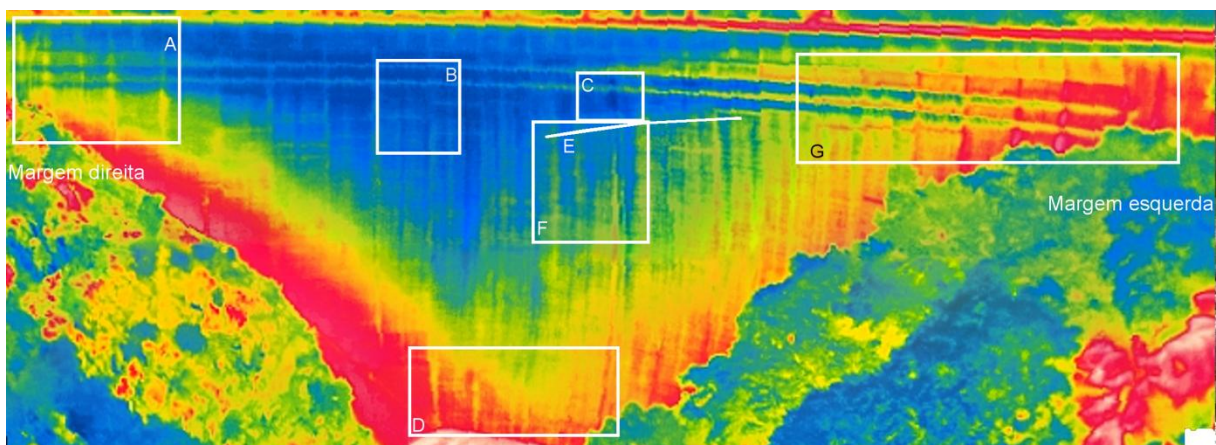


Figura 4.51 – Zonas do paramento da barragem do Cabril apresentadas em pormenor nas figuras seguintes.

À semelhança do realizado nas anteriores barragens destacam-se seguidamente, de acordo com Figura 4.51, alguns pormenores da imagem térmica do paramento de jusante. Os pormenores foram alvo de processamentos, realizados nos programas QGIS e GIMP, para reduzir a deformação e para realçar algumas cores.

A zona assinalada com a letra A na Figura 4.51 está registada numa fotografia de elevada qualidade obtida há alguns anos (Figura 4.52). Nesta imagem vê-se em pormenor a distribuição dos segmentos escuros, quase negros, que se destacam do paramento. Alguns destes segmentos que se apresentam em grupos, frequentemente de três, estão relacionados com as saídas para escoamento de águas pluviais do coroamento. Outros estão associados às juntas de contração A a E identificadas também na Figura 4.52. As juntas formam pequenas cavidades verticais e nelas ocorre mais facilmente a acumulação de águas pluviais, o que propicia o crescimento de micro-organismos. Estes desenvolvem-se especialmente na parte superior da barragem, zona onde há menor incidência da radiação solar.

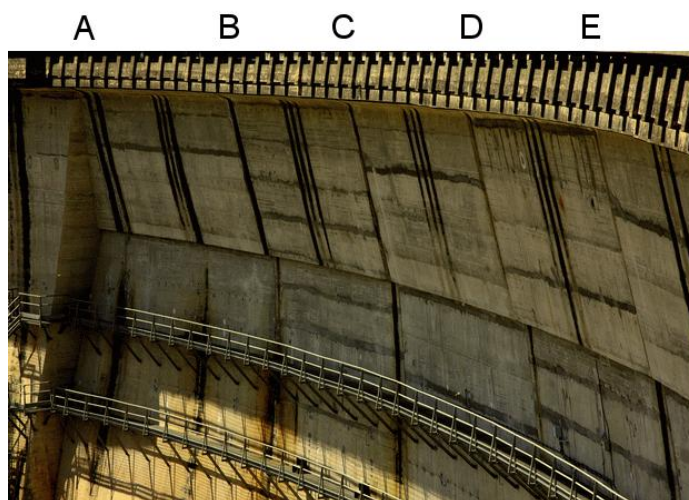


Figura 4.52 – Paramento da barragem junto ao encontro da margem direita.

No primeiro conjunto de imagens (Figura 4.53) há a realçar:

A – as zonas onde existe maior acumulação de matéria orgânica são zonas mais escuras e comparativamente mais quentes.

B – para além dos passadiços identificam-se também as fendas horizontais que foram cobertas com argamassa de cimento durante as reparações da barragem. Uma destas, no bloco GH, identifica-se facilmente nas imagens térmicas e na banda do visível. Os escorrimentos que ocorrem ao longo do paramento têm alterado o betão. Decorrem à face do paramento e não ocorrem com suficiente frequência para originar desenvolvimento de matéria orgânica, como acontece com a ocorrência C.

C – no centro das imagens está o bloco KL, sendo que são visíveis nas imagens térmicas duas manchas mais frias, sendo a de maior extensão a que se encontra sob o passadiço inferior. A imagem térmica da esquerda é a original, a da direita foi manipulada tendo-se reduzido o número de cores para 5. Na imagem da banda do visível verifica-se que nesta zona surge uma mancha escura, com origem na escorrência de água. Estas zonas mais frias correspondem às faixas mais fendilhadas e com maiores repasses de água.

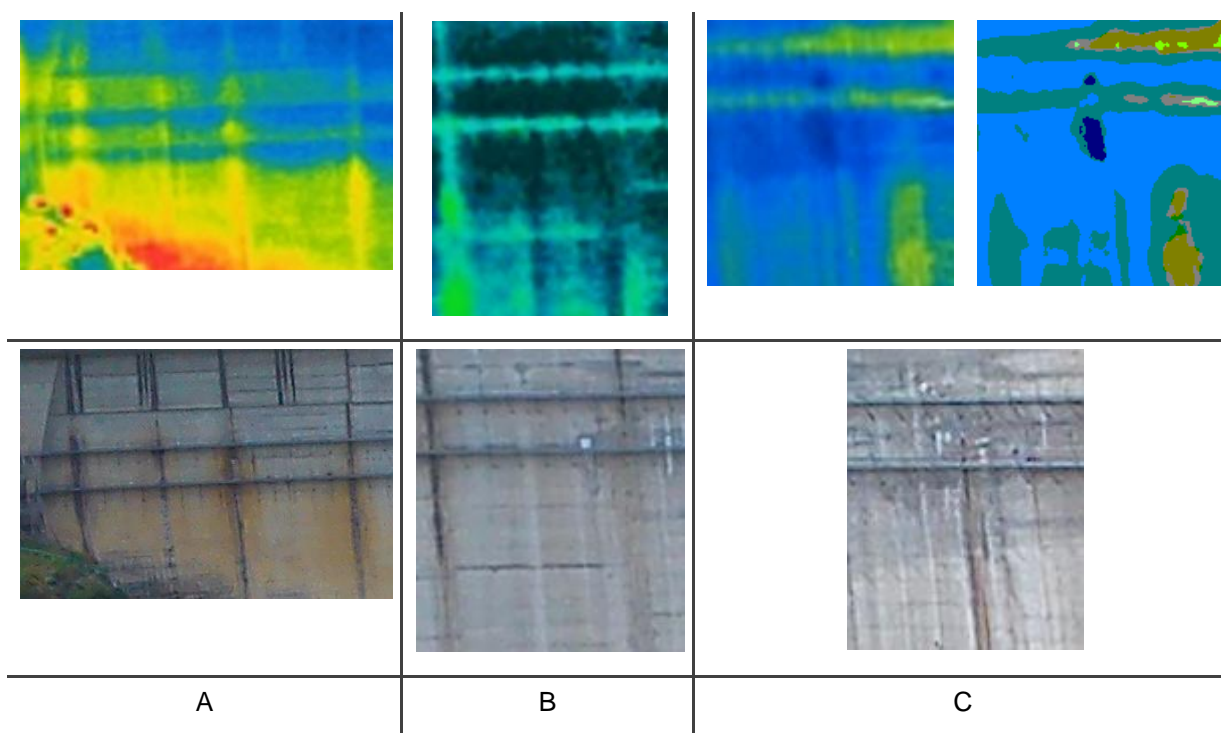


Figura 4.53 – Zonas da barragem com aspetos relevantes (zonas A a C)

No segundo conjunto de imagens (Figura 4.54) há a realçar:

D – acompanhando a fundação há uma faixa onde a matéria orgânica tem uma cor escura, e onde simultaneamente as temperaturas superficiais do paramento são mais elevadas. As zonas de escorrência, que se apresentam com faixas de cor mais clara na imagem da banda

do visível, estão a uma temperatura inferior pois a água quando escorre à superfície lava a superfície do paramento.

E – os passadiços fazem sombra no paramento sendo estas zonas mais frias. As duas zonas a azul mais escuro na imagem térmica são zonas mais frias sendo que a da direita se situa no bloco KL, tendo sido já referida anteriormente (pormenor C).

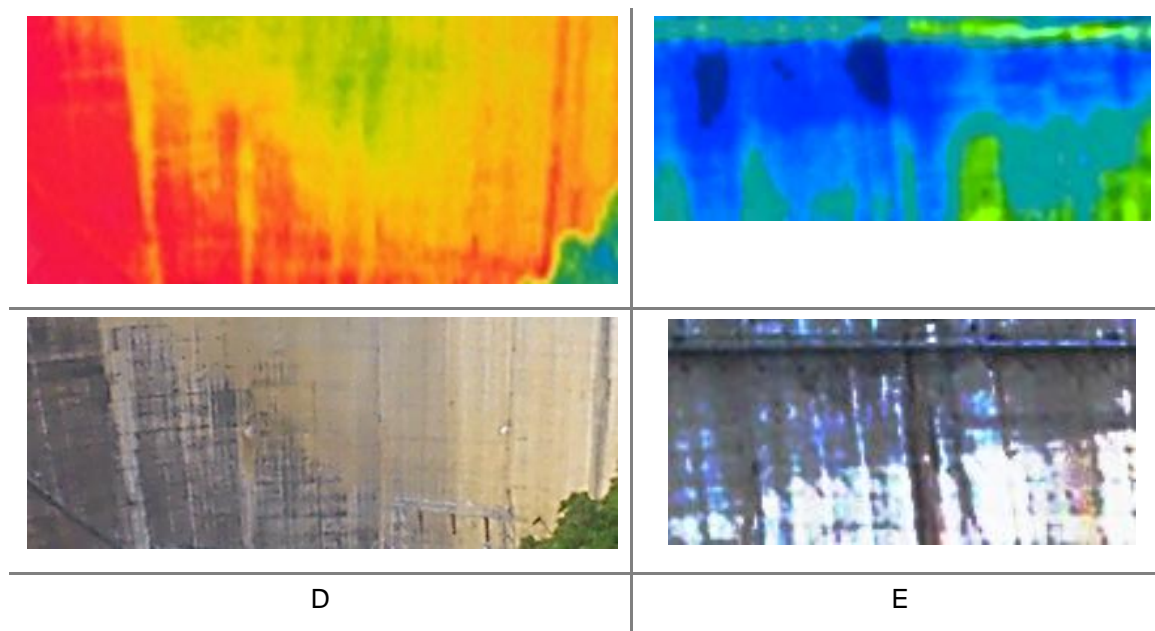


Figura 4.54 – Zonas da barragem com aspetos relevantes (zonas D e E).

No terceiro conjunto de imagens (Figura 4.55) há a realçar:

F – ao longo do bloco KL existe uma área onde o escoamento é maior pois tem origem numa zona de repasse primordialmente alimentada pela subida de água no tubo de arejamento das turbinas. Este escoamento acontece com uma frequência suficiente para que ocorram condições para o aparecimento de matéria orgânica. À direita desta existe uma zona onde ocorre lavagem do paramento, sendo que na imagem da banda do visível se apresenta com uma cor ligeiramente mais clara enquanto na imagem térmica esta está bem mais perceptível, por apresentar maior contraste cromático com as zonas limítrofes;

G – na imagem térmica estão claramente realçadas: as fendas horizontais que foram cobertas com calda de cimento; as zonas onde ocorre lavagem; as zonas onde ocorre o desenvolvimento de matéria orgânica; e as zonas à sombra dos passadiços e do coroamento.

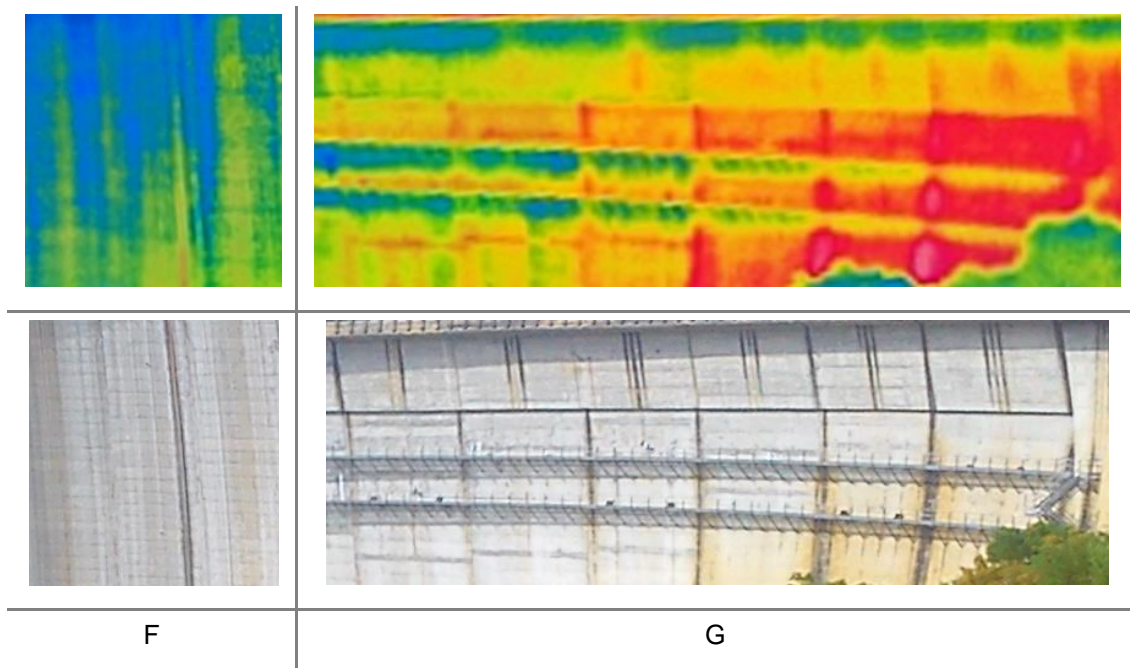


Figura 4.55 – Zonas da barragem com aspetos relevantes (zonas F e G)

O paramento do encontro da margem esquerda encontrava-se, na altura em que foi realizado o levantamento térmico, a uma temperatura bastante superior à restante barragem, sendo que tal se deve à combinação da direção do paramento com a direção dos raios solares no período em que foram obtidas as imagens térmicas (pelas 16h45min). Na Figura 4.56 apresenta-se uma ortofoto da barragem do Cabril (DGT) onde foi sobreposta uma imagem representando a direção do sol em vários instantes do dia 4 de junho de 2013. Nesta figura foi também indicada, com um segmento amarelo, a direção do sol às 16h45min. Comparando o azimute da face de jusante de cada bloco com a direção do sol à hora indicada verifica-se que, nessa altura do dia, a radiação solar incidia com maior intensidade sobre os blocos situados na zona do encontro da margem esquerda, blocos cuja face se encontrava mais próxima do plano perpendicular à direção de propagação dos raios solares.



Figura 4.56 – Direção do sol em diferentes instantes do dia 4 de junho de 2013.

5 | Considerações finais

A avaliação da aplicabilidade da termografia à deteção de zonas de repasses (zonas onde há passagens de água) foi realizada em três barragens de betão (os casos de estudo incluídos no presente relatório). O estudo permitiu verificar que, com câmaras termográficas existentes no mercado e em condições normais de observação, este método possibilita uma observação suficientemente rigorosa para detetar esses repasses, que estão associados, em regra, à existência de fendas. Apresenta ainda outra vantagem, que é a obtenção de resultados em pouco tempo, pois não só o levantamento realizado em campo é uma operação rápida, como o posterior processamento é realizado num intervalo de tempo bastante reduzido, da ordem de uma hora, quando realizado por um técnico com experiência.

Duas barragens, Cabril e Alto Ceira, estavam, na data em que foi realizado o levantamento térmico, em regime de exploração normal, com níveis de água nas albufeiras próximo do pleno armazenamento. Nestas duas barragens os levantamentos, efetuados em poucos minutos, a distâncias significativas (cerca 340 m na primeira e 100 m na segunda) permitiram detetar, de forma inequívoca, zonas dos paramentos de jusante com temperaturas inferiores. Estas ocorrências, num dia com temperatura elevada, só podem ser explicadas pela existência de repasses.

Na terceira barragem, Alto Ceira II, que se encontrava na fase final da construção, realizou-se uma confrontação entre valores de temperatura superficiais, obtidos das imagens térmicas, e valores de temperatura medidos por termómetros embebidos no betão instalados junto ao paramento de jusante. Em alguns pontos as temperaturas são muito semelhantes, mas em outros diferem em vários graus, sendo que estas diferenças foram interpretadas e justificadas.

Numa perspetiva de monitorização a longo prazo, os levantamentos efetuados nas três barragens permitiram ainda tirar alguns ensinamentos. Assim:

- i. para realizar uma análise multitemporal, é importante obter imagens a partir dos mesmos pontos utilizando-se uma câmara regulada com as mesmas distâncias focais, *zoom* e orientação.
- ii. sempre que possível deverão ser obtidas imagens de posições frontais ao paramento, de forma a permitir uma melhor correção geométrica das imagens e assim obter uma melhor integração com desenhos da barragem (nomeadamente alçados) ou com informação georreferenciada obtida por outras metodologias;
- iii. devem também ser obtidas imagens de posições laterais de forma a melhorar a cobertura dos paramentos e permitir uma análise mais detalhada de pormenores;
- iv. relativamente às condições de observação, as imagens devem ser obtidas quando o paramento estiver seco, com todo ele ao sol ou à sombra;
- v. no que respeita a ajustamentos da câmara térmica deverá ser considerada a possibilidade de limitar a escala de temperaturas. Em vez desta ser automática, estabelecida pelo

equipamento em função das temperaturas máxima e mínima registadas em cada imagem, devem ser impostos limites, máximo e mínimo, para as temperaturas registadas, mais consentâneos com as temperaturas superficiais do betão. Este procedimento é especialmente importante quando a imagem inclui zonas que não pertencem à estrutura e que estejam a temperaturas muito diferentes, caso do céu.

Para além da deteção de repasses de água em paramentos de barragens de betão, a medição de temperaturas superficiais poderá ser testada como técnica de deteção de anomalias em membranas impermeabilizantes dos paramentos de montante de barragens. A descida da água na albufeira, realizada para verificar a ocorrência de anomalias, permitirá a realização de levantamentos de temperatura da superfície da membrana para avaliar se esta técnica pode também ser aplicada a este tipo de superfícies para a deteção de passagens de água.

Referências Bibliográficas

- CAMELO, Armando; CUNHA, João G.; MATOS, Domingos S. (2007) – **Different approaches to face AAR concrete ageing. Pracana and Alto Ceira Dams**. Workshop Chemical Reactions in Concrete Dams Granada, 2007.
<http://civil.colorado.edu/~saouma/AAR/Library/Granada-2007/5-4.pdf>
- DIREÇÃO GERAL DO TERRITÓRIO. **M@pas on line**. <http://mapas.igeo.pt/>
- FLIR (sem data) – **Thermal imaging guidebook for building and renewable energy applications**. USA, FLIR.
http://www.flirmedia.com/MMC/THG/Brochures/T820325/T820325_EN.pdf
- FLIR (2009) – **FLIR T335 Specifications**. USA, FLIR.
- FLIR (2010) – **User's Manual: Flir B series Flir T series**. FLIR. USA, FLIR.
- LEITÃO, Noemi (2012) – **Análise térmica de barragens de betão - Ações térmicas ambientais**. Lisboa, LNEC, Relatório 185/2012.
- MATIAS, L. (2004) – **Aplicação da análise termográfica em edifícios antigos na Amieira do Tejo e em Viana do Alentejo (Projeto n.º POCTI/ECM/46323/2002)**. Lisboa, LNEC. Relatório n.º 270/2004-NRI.
- MATIAS, L. (2006) – **Aplicação da análise termográfica em edifícios antigos em Viana do Alentejo (Projeto n.º POCTI/ECM/46323/2002). 2ª campanha experimental**. Lisboa, LNEC. Relatório n.º 74/2006-NRI.
- MATIAS, L. (2012) – **Testing techniques for structures inspection. Thermography**. DuratiNet Course book, Lisboa, LNEC.
- OLIVEIRA, João; OLIVEIRA, Adriano; BOAVIDA, João; ARAÚJO, Bruno; PEREIRA, João; JOAQUIM, Jorge (2009) – **Value added 3D modelling of laser scanned and photogrammetric data**. Actas do 17º Encontro Português de Computação Gráfica, Covilhã.
http://www.it.ubi.pt/17epcg/Actas/artigos/17epcg_submission_35.pdf
- PINA DOS SANTOS, C.; MATIAS, L.; VEIGA, M. R.; MAGALHÃES, A. C. (2003). – **Application of thermography and ultrasounds for wall anomalies diagnosis. A laboratory research study**. International Symposium Non-Destructive Testing in Civil Engineering (NDT-CE). Berlim.
- RST Instruments (sem data) – **Carlson Resistance Thermometer**. Canadá, RST Instruments.
<http://www.rstinstruments.com/PDFs/Carlson%20Resistance%20Thermometer%20CAB0007E.pdf>
- SILVEIRA, António Ferreira (1958) – **O comportamento térmico das barragens de betão**. Lisboa, LNEC, Memória n.º 125.
- TAVARES DE CASTRO, António (2012) – **Controlo de segurança de barragens de betão**. Lisboa, LNEC Jornadas de Investigação e Inovação.
http://jornadas2012.lnec.pt/pdfs/23Marco_TavaresCastro.pdf

Lisboa, LNEC, dezembro de 2013

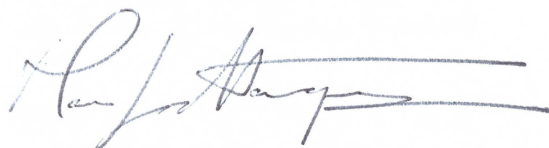
VISTOS

O Chefe do Núcleo de Geodesia Aplicada



Eng.º João M. Martins Casaca

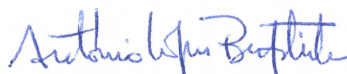
AUTORIA



Maria João Henriques

Eng.ª Geógrafa, Investigadora Principal

O Diretor do Departamento de Barragens de
Betão



Eng.º António Lopes Batista

