

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



Maria João Henriques

Investigador Principal
LNEC
Lisboa
mjoao@lnec.pt



Pedro Ramos

Técnico de Termografia
Municípia
Oeiras
info@municipia.pt

SUMÁRIO

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 tenha reflexos na temperatura superficial da estrutura. No caso das barragens de betão, um levantamento térmico do paramento, que pode ser realizado em poucos minutos e sem exigências especiais, permite detetar variações da temperatura superficial do betão o que possibilita a deteção de zonas de repasses de água, em geral associadas à existência de fendas. 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. Na presente comunicação apresenta-se o resultado da avaliação da aplicabilidade deste método na deteção de repasses em barragens de betão com base nos levantamentos térmicos do paramento de jusante de três barragens.

Palavras-chave: Barragem de Betão, Termografia, Câmara Térmica, Monitorização.

1. INTRODUÇÃO

Em Engenharia Civil as câmaras térmicas são especialmente utilizadas em inspeções, para identificar falhas de isolamento ou zonas de infiltração de água (Figura 1). As câmaras térmicas apresentam uma imagem da temperatura superficial do objeto o que permite identificar, de forma instantânea, variações da temperatura superficial da estrutura. Em geral estas variações estão associadas a anomalias de construção ou a patologias pelo que, nestas situações, a identificação da sua ocorrência pode ser realizada de forma muito rápida e também bastante precisa.

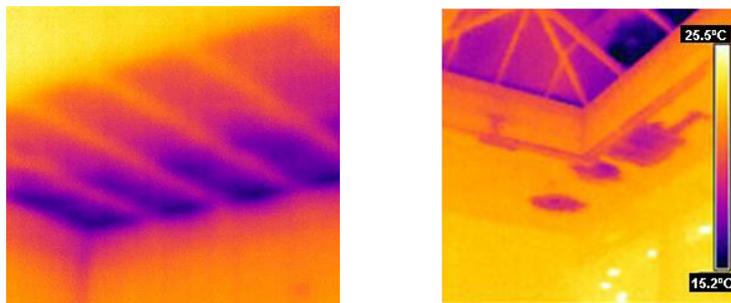


Figura 1. Imagens térmicas do interior de edifícios, respetivamente com mau isolamento térmico e com infiltrações.

Em barragens de betão a variação da temperatura superficial entre zonas contíguas pode indiciar a existência de repasses de águas pelo que a análise de uma imagem térmica pode dar informação sobre a localização da anomalia e a sua extensão. Este tipo de monitorização, se realizado de forma sistemática, com alguns cuidados na forma como as imagens são obtidas, poderá ser utilizado para determinar, com bastante exatidão, a evolução de zonas afetadas por infiltrações. E 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.

Os exemplos de aplicação à engenharia civil, que se encontram referidos nos mais variados artigos, apresentam imagens obtidas a distâncias curtas: ou porque foram obtidas no interior de construções (caso das imagens da Figura 1) ou porque são obtidas muito próximo das fachadas dos edifícios. Os locais onde muitas barragens estão construídas – em vales apertados – leva a que, por vezes, as imagens só possam ser obtidas de distâncias elevadas. Sabendo a influência que o meio envolvente e a atmosfera podem exercer numa imagem térmica, importava assim avaliar se das imagens térmicas e em condições normais de observação, poderia ser obtida informação sobre a existência deste tipo de patologia. Assim, de modo a avaliar a aplicabilidade deste método na deteção de repasses em barragens, foram efetuados levantamentos térmicos dos paramentos de jusante de três barragens portuguesas: Alto Ceira, Alto Ceira II e Cabril. No presente trabalho são apresentados os resultados parciais sendo que, primeiramente, se apresentam alguns princípios básicos necessários para melhor compreender o modo como as câmaras efetuam a medição de temperaturas.

2. MEDIÇÃO DE TEMPERATURA POR CÂMARAS TÉRMICAS

O aumento da temperatura superficial de um objeto leva a um aumento da intensidade da radiação infravermelha emitida por este. As câmaras térmicas são capazes de medir esta intensidade o que permite, por aplicação de princípios da termodinâmica, estimar a temperatura superficial dos objetos emissores da radiação. As câmaras térmicas captam a intensidade da radiação infravermelha na zona do infravermelho afastado (intervalo de 7,5 μm a 14 μm) e convertem-na em informação visível, sob a forma de números ou de imagens (neste último caso utilizando falsa cor). A realização desta transformação é realizada em duas etapas: primeiro é realizada a conversão da intensidade da radiação infravermelha incidente num sinal elétrico (efetuada em microbolómetros) a qual é seguida da transformação, por um processador matemático, da intensidade - registada sob a forma de uma voltagem - em cores do espetro visível ou em números.

Durante a realização de um levantamento na câmara incide radiação que é: i) emitida pela superfície do objeto; ii) refletida pelo objeto, e que é proveniente do meio envolvente; iii) emitida pela massa de ar que se situa entre o objeto e a câmara. Durante a transmissão através da atmosfera, quer a radiação emitida quer a radiação refletida pelo objeto são também influenciadas pela atmosfera.

Por causa de todos os efeitos referidos, a medição rigorosa da temperatura superficial do objeto requer o conhecimento de diversos dados [1]: i) emissividade do objeto; ii) humidade relativa da atmosfera; iii) temperatura da atmosfera; iv) distância da câmara ao objeto; e v) temperatura superficial do meio envolvente. Estes dados podem ser introduzidos na câmara antes da realização do levantamento de modo a melhorar a qualidade dos resultados obtidos. No entanto, por vezes, é difícil obter valores para as cinco grandezas ou é pouco prático estar a modificá-los durante a realização do levantamento. Felizmente, para a maior parte dos estudos, é suficiente a deteção de variações na temperatura superficial do objeto não havendo a necessidade de as quantificar com rigor pelo que em muitas aplicações podem ser utilizados valores constantes, que poderão até nem representar valores reais.

Na medição da temperatura são utilizados, como referido, alguns princípios da termodinâmica, os quais são fundamentais para que se consiga estabelecer uma interligação entre a temperatura superficial (que se pretende calcular) e a radiação térmica emitida. Estes princípios são aplicados considerando algumas simplificações, que incluem o de se considerar que os três elementos (objeto, meio envolvente e atmosfera) estão, cada um, a uma temperatura uniforme e se comportam como corpos negros, pressuposto que permite relacionar a voltagem (medida pela câmara) com a temperatura do objeto.

3. LEVANTAMENTO TÉRMICO DO PARAMENTO DE JUSANTE DE BARRAGENS DE BETÃO

No dia 4 de junho de 2013 foi realizado o levantamento térmico dos paramentos de jusante de três barragens de betão - Alto Ceira, Alto Ceira II e Cabril – pela da empresa Municípiã, a qual também realizou o posterior processamento de homogeneização das imagens, etapa fundamental para que criasse as imagens térmicas panorâmicas das três barragens, imagens estas apresentadas nas Figuras 3, 13 e 19. Estas imagens constam de um relatório do LNEC [2], relatório este que inclui todos os resultados obtidos.

As barragens de Alto Ceira e do Cabril encontravam-se em regime de exploração normal, com níveis de água na albufeira próximo do pleno armazenamento, sendo que no caso do levantamento térmico do Alto Ceira houve possibilidade de comparar a informação recolhida com elementos obtidos em inspeções visuais realizadas há alguns anos. Já relativamente à barragem de Alto Ceira II, que se encontrava na fase final da construção, e ainda vazia, os valores obtidos das imagens térmicas foram utilizados para validar este método de medição, o que foi realizado através de uma comparação com valores de temperatura medidos por termómetros embebidos no betão, instalados junto ao paramento.

Nos levantamentos foi utilizada a câmara termográfica FLIR T335 (Figura 2) da empresa Municípiã, um equipamento de dimensões médias e relativamente leve (880g), que integra dois tipos de sensores independentes: um sensível à radiação infravermelha afastada (para obter as imagens térmicas), outro sensível à radiação visível (para obter imagens convencionais). Na imagem térmica obtida, o pixel tem as seguintes dimensões: objeto a 20 m de distância: 2,8 cm; objeto a 100 m de distância: 14,0 cm.



Figura 2. Câmara térmica FLIR T335

3.1 Barragem do Alto Ceira

A barragem do Alto Ceira foi uma barragem abóbada que há muito apresentava problemas estruturais em resultado de reações expansivas graves, os quais ditaram a necessidade da sua demolição. Esta iniciou-se na segunda quinzena de junho, alguns dias depois de realizado o levantamento térmico.

A câmara foi instalada num tripé, na margem esquerda, a cerca de 100 m de distância. No levantamento térmico, realizado em sete minutos, foram registadas 26 imagens. Estas imagens foram reunidas criando uma imagem panorâmica (Figura 3), procedimento que demorou menos de uma hora.

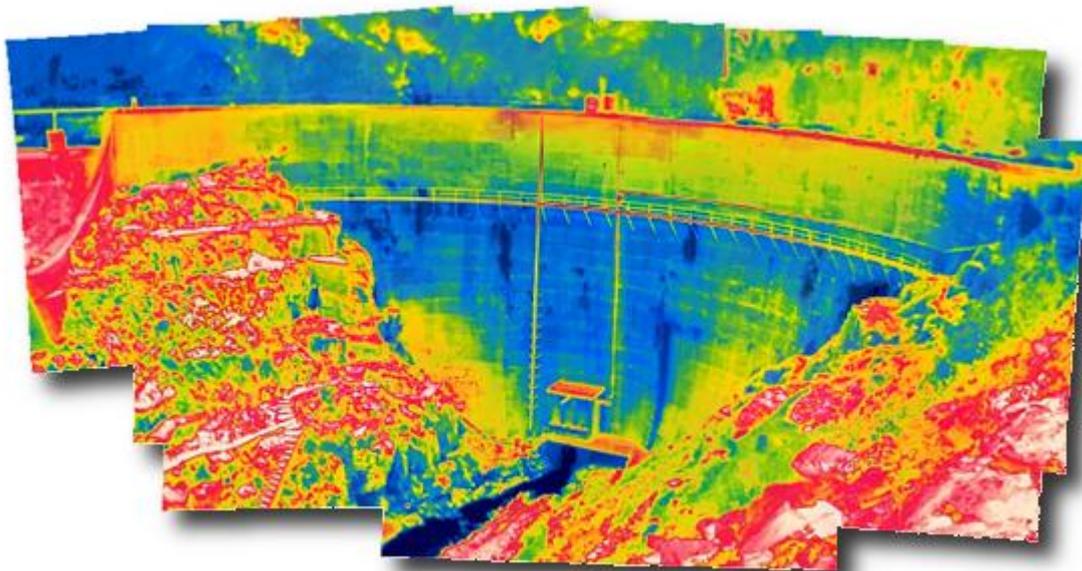


Figura 3. Imagem térmica panorâmica da barragem do Alto Ceira.

No paramento são identificadas, devido à coloração azul escura, várias zonas onde o betão se encontrava a uma temperatura inferior. Identificam-se também zonas a uma temperatura elevada, caso do passadiço e de duas tubagens verticais. As temperaturas mais elevadas (a branco) encontram-se nas margens, mais concretamente nos afloramentos rochosos e nas passagens e escadas em betão.

Em 2001 foi realizada, pelo LNEC, uma inspeção bastante pormenorizada do paramento de jusante, a qual incluiu um levantamento com ultrassons. O levantamento, para o qual foi utilizado um bailéu, demorou um mês, sendo que este incluiu o tempo utilizado para instalar o material de suporte para a inspeção. A informação recolhida (que incluiu o levantamento das áreas cobertas por carbonatos, zonas húmidas e a localização de fendas) foi posteriormente integrada numa imagem, tendo sido realizado um relacionamento da informação obtida nesse levantamento de 2001 com dados recolhidos em levantamentos anteriores, realizados em 1986 e 1994. Esta imagem foi sobreposta à imagem panorâmica térmica, esta última corrigida de deformações geométricas relacionadas com a aquisição das imagens. A Figura 4

apresenta a imagem térmica corrigida onde foram sobrepostas as linhas extraídas da imagem das ocorrências, linhas estas que delimitavam áreas (por exemplo, as zonas onde se encontravam carbonatos) ou identificavam fenómenos com expressão linear (fendas, por exemplo).

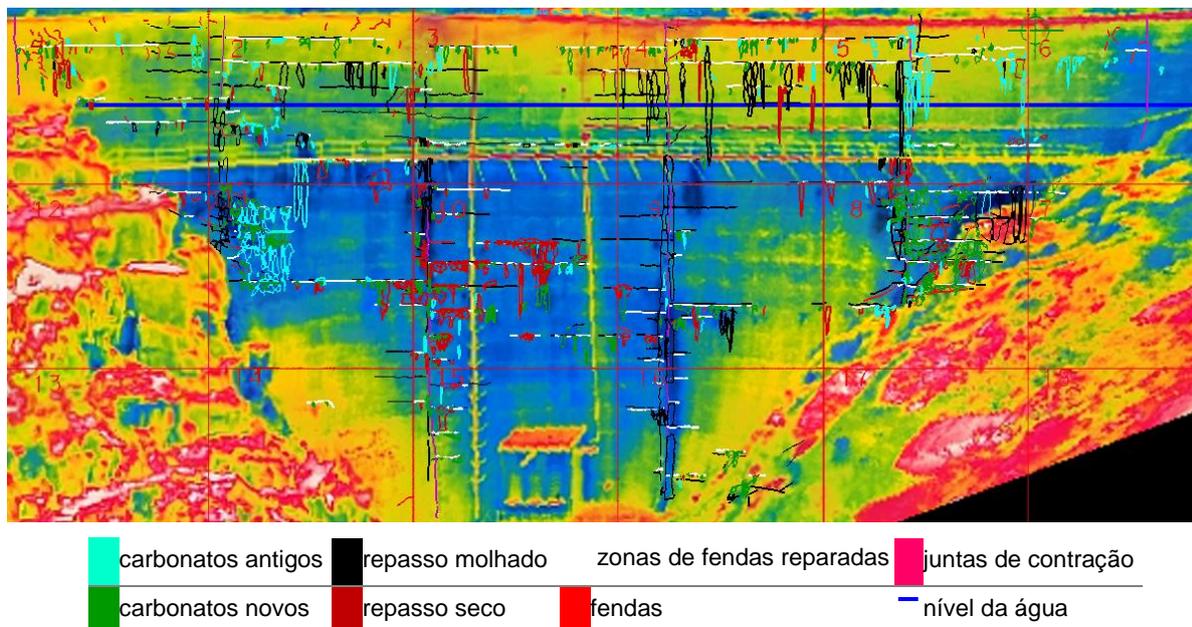


Figura 4. Sobreposição de ocorrências (de 2001) na imagem térmica de Alto Ceira.

Centrando a atenção nas ocorrências verifica-se que muitas das zonas onde tinha sido identificada a existência de repasses molhados estão assinaladas, na imagem térmica, como zonas mais frias. Não há zonas com temperaturas “baixas” na parte superior do paramento pois no dia em que foi realizado o levantamento térmico o nível da água na albufeira encontrava-se cerca de 4 m abaixo da cota máxima (o levantamento de 2001 tinha sido realizado 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.

Nas ocorrências estão assinaladas diversas zonas onde ocorreu deposição de carbonatos. Numa imagem normal (da banda do visível) estes apresentam uma cor branca, sendo por isso facilmente identificáveis pois destacam-se no cinzento do betão (Figura 5). No entanto é impossível, à distância, avaliar se ainda ocorre o repasse que originou a deposição de carbonato dado que, ao contrário do betão que, quando molhado, fica mais escuro, o carbonato molhado mantém a cor branca o que impossibilita a deteção de zonas de repasse. 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 mas indica seguramente que esse repasse ocorreu no passado, já que a deposição de carbonatos é um processo lento. Nas Figuras 5 a 8 apresenta-se, respetivamente: i) um pormenor do paramento da barragem, ii) a

imagem térmica da mesma área, iii) o resultado da extração das zonas mais escuras e iv) a sobreposição destas na imagem inicial. Vemos 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 5. Imagem do paramento com aplicação de realce da cor.

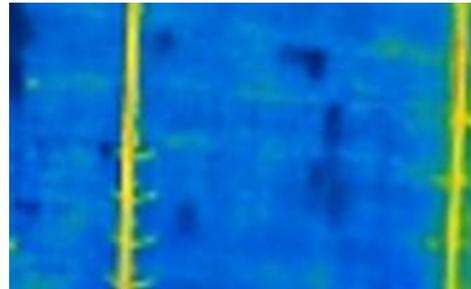


Figura 6. Imagem térmica do paramento.

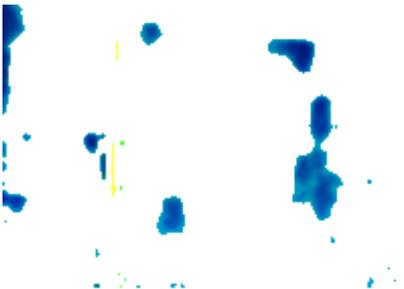


Figura 7. Zonas mais frias

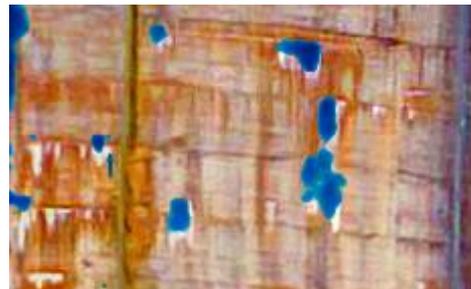


Figura 8. Sobreposição das imagens das Figuras 5 e 7.

3.2 Barragem do Alto Ceira II

A barragem do Alto Ceira II encontrava-se na fase final da construção, a pouco dias do início do primeiro enchimento. Na barragem estão colocados um total de 29 termómetros de resistência eléctrica, embebidos no betão a diferentes profundidades; nove destes (ver Figura 9) situam-se a poucos centímetros do paramento de jusante. No dia em que foi realizado o levantamento das temperaturas superficiais deste paramento foram efetuadas várias campanhas de leituras dos termómetros por técnicos da EDP.

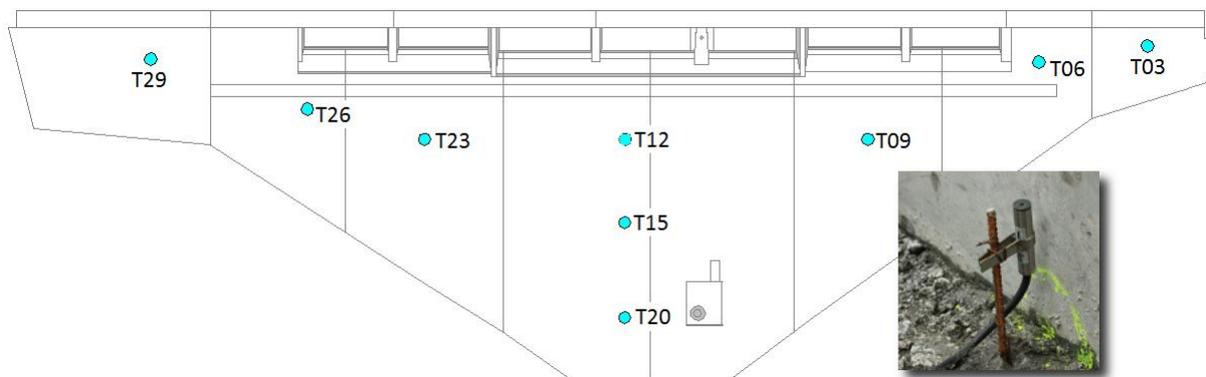


Figura 9. Barragem de Alto Ceira II: localização dos termómetros junto ao paramento de jusante e pormenor da instalação de um dos termómetros.

Foram realizados três levantamentos térmicos do paramento de jusante: a partir da margem esquerda, da margem direita e do centro do vale. Neste último levantamento a câmara (Figuras 10 e 11) foi estacionada no centro do vale, no lado de jusante, numa estrada temporária que ligava as duas margens (encontrava-se aproximadamente à cota do termómetro T20). Os resultados apresentados na comunicação são referentes a este último levantamento. Este foi iniciado às 12h51min e cobriu todo o paramento e parte do vale. Demorou um total de 27 minutos a ser realizado, tendo sido registadas 185 imagens. Nas Figuras 12 e 13 apresentam-se duas imagens da mesma área: a primeira a imagem térmica, a segunda a convencional.



Figura 10. Técnico da Município a realizar o levantamento térmico.



Figura 11. Câmara térmica.



Figura 12. Imagem na banda da radiação infravermelha afastada. Na imagem está incluída a escala cromática.



Figura 13. Imagem da mesma zona na banda da radiação visível.

As imagens obtidas foram analisadas por um software, instalado num computador, que permitiu obter informação da temperatura em cada pixel da imagem de forma a permitir relacionar a temperatura obtida pela câmara com a medida nos termómetros. Independentemente foi criada uma imagem panorâmica da barragem (Figura 14), obtida por ligação das imagens homogeneizadas.

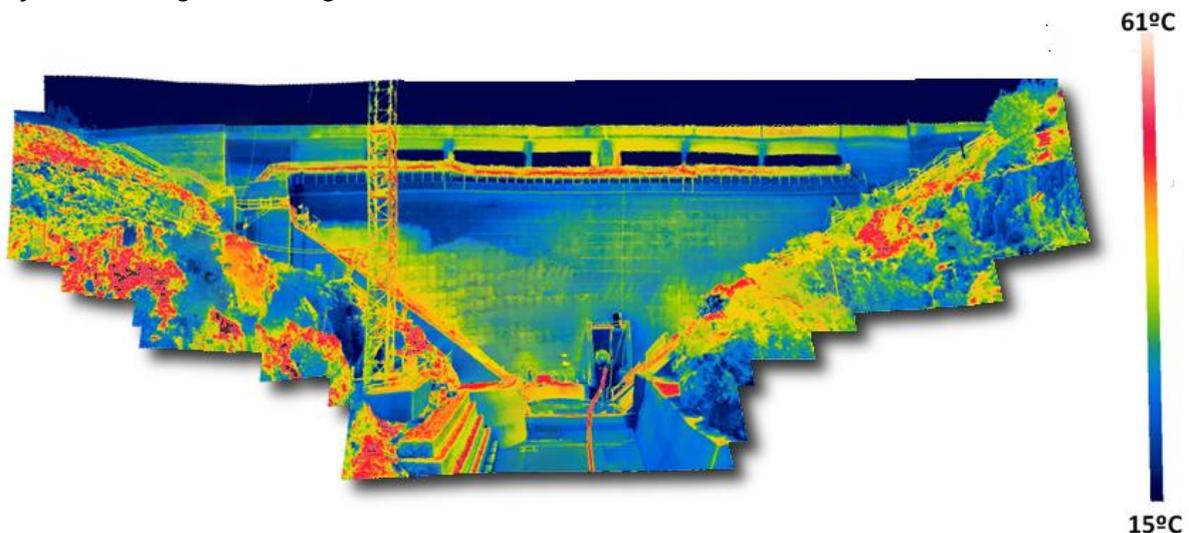


Figura 13. Imagem térmica panorâmica

É necessário realizar a homogeneização pois cada imagem tinha uma escala cromática diferente, função dos valores máximo e mínimo registados nessa imagem (ver Figuras 14 e 15). A imagem panorâmica foi por fim transformada de modo a reduzir as deformações resultantes da geometria da aquisição das imagens.



Figura 14. Uma das imagens do paramento (imagem original). Escala cromática com amplitude de 78.8°C.



Figura 15. Imagem anterior homogeneizada. Escala cromática com amplitude de 31.1°C.

As temperaturas obtidas através das imagens térmicas foram comparadas com as medidas pelos termómetros superficiais (Figura 16). Refira-se que estes se situam a alguns centímetros de profundidade e que apresentam um tempo de resposta algo elevado, em parte devido à baixa velocidade de transferência da temperatura envolvente ao termómetro para o elemento de deteção, integrado neste. Estes dois fatores resultam que alterações da temperatura do betão, como as que ocorrem à superfície quando os raios solares incidem no paramento, só venham a ter repercussões nos valores medidos pelos termómetros algum tempo depois do betão superficial aquecer.

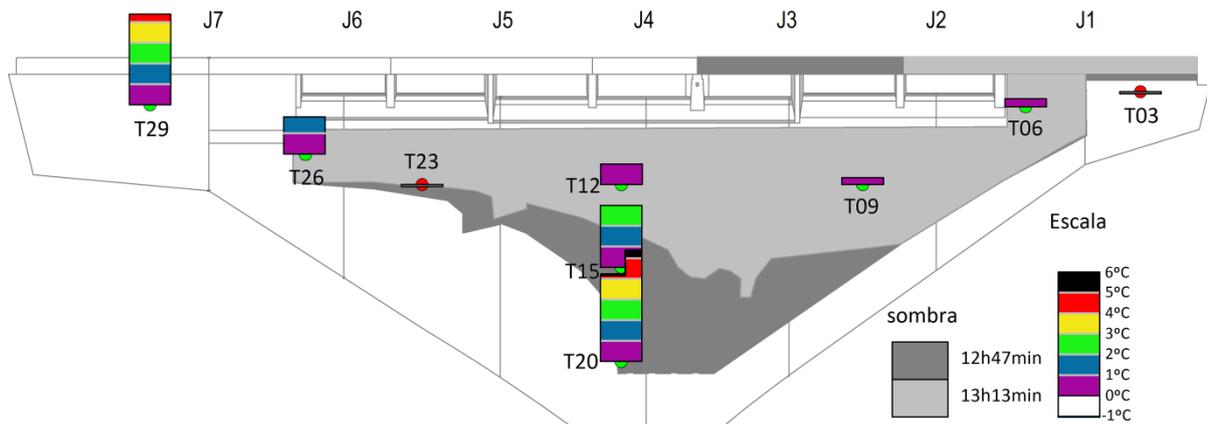


Figura 16. Diferença entre a temperatura superficial obtida pela câmara térmica e a temperatura medida pelos termómetros superficiais embebidos no betão.

As maiores diferenças de temperatura ocorrem em zonas onde incidia radiação solar direta. A exceção é o termómetro T03 que, apesar de se encontrar numa zona já exposta ao sol na altura do levantamento, apresenta uma diferença de temperatura muito reduzida. Devido à orientação dos diferentes elementos da barragem, os raios solares só começaram a incidir na superfície da barragem na zona do T03, cerca de 20 minutos antes do período de obtenção das imagens sendo que o ângulo de incidência da radiação era muito rasante. Contrariamente, nas zonas dos

termómetros T15, T20 e T29, a incidência era quase ortogonal, situação que leva a um maior aquecimento da superfície. Este aquecimento leva algum tempo até ter repercussão na temperatura registada pelos termómetros embebidos pelo que se justifica a diferença entre a temperatura obtida pela câmara térmica e a registada pelos termómetros.

Na zona do paramento que se encontrava à sombra, onde se encontram os termómetros T06, T09, T12, T23 e T26, as diferenças são muito reduzidas. A exceção é o termómetro T26. Uma análise das imagens térmicas mostrou que esta diferença pode ser explicada pelo facto de, sobre essa zona da barragem, existir escorrência de água fria que provoca um arrefecimento do betão, visível através das manchas mais escuras nas imagens térmicas da zona (uma das imagens térmicas é apresentada na Figura 17). A temperatura do betão registada pelo termómetro T26 é cerca de 2°C inferior à registada pelo T23. Por sua vez os pontos das imagens térmicas onde foi obtida a informação acerca a recolha da temperatura superficial da barragem não se situavam nas zonas arrefecidas (embora se situassem próximo).

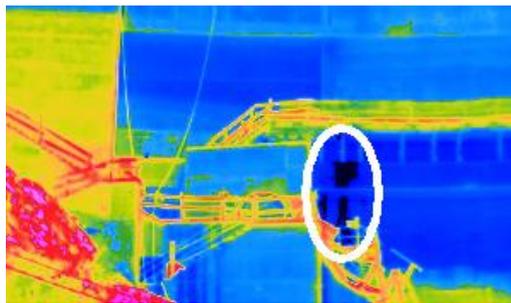


Figura 17 – Imagem térmica relativa às escorrências na zona do termómetro T26.

3.3 Barragem do Cabril

A barragem do Cabril é uma abóbada de betão que apresenta particularidades de comportamento estrutural, responsável pelo aparecimento de alguma fendilhação no paramento de jusante. Na imagem da gama do visível deste paramento são identificáveis (Figura 18): i) os dois passadiços, situados a uma altura elevada; ii) as linhas verticais, que são as faixas ao longo das quais escorrem águas; iii) uma extensa mancha escura que se encontra na zona inferior da barragem, que se desenvolve de forma quase paralela à fundação; iv) uma faixa alaranjada, que acompanha esta mancha a uma cota ligeiramente superior.



Figura 18. 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, próximo da cota do coroamento, a cerca de 340 m do eixo da barragem. 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, realizado em quatro minutos e que constou de 17 imagens, metade do paramento estava ao sol (Figura 18). As imagens térmicas foram posteriormente homogeneizadas e reunidas numa imagem panorâmica (Figura 19). Na imagem térmica verifica-se que os aspetos antes referidos em ii), iii) e iv), todos relacionados com material que se encontra sobre o betão, têm uma importante influência nas temperaturas superficiais do paramento da barragem: as zonas mais escuras, situadas próximo da fundação, são também as mais quentes (Figuras 20 e 21), 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 que a delimita a uma cota superior (zona iv), citada anteriormente), com temperaturas intermédias.

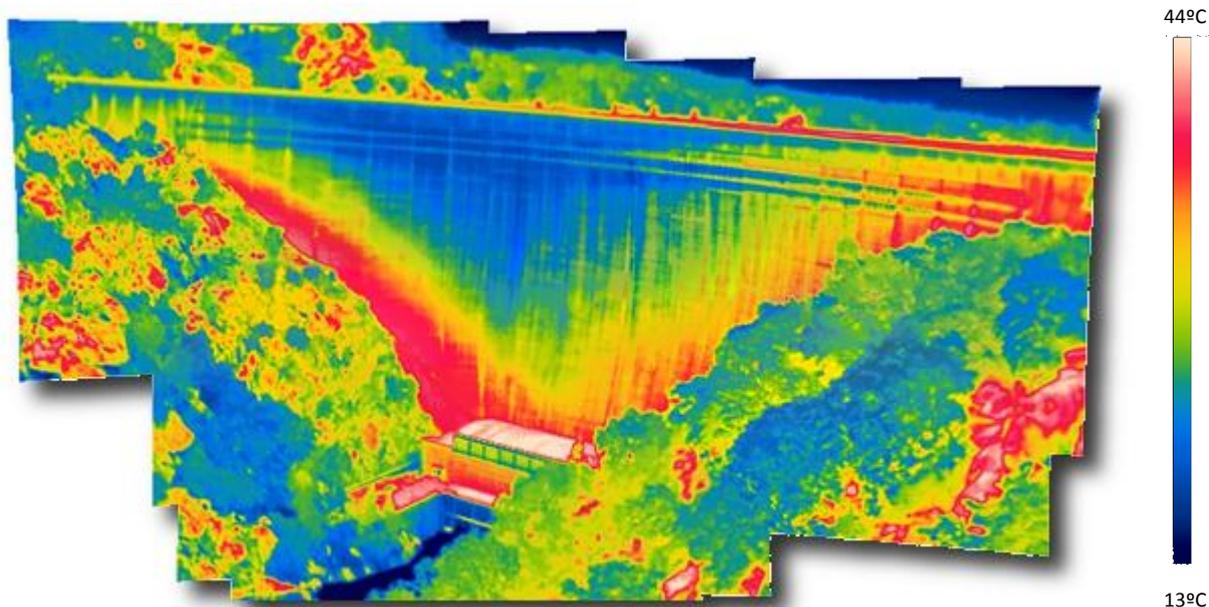


Figura 19. Imagem térmica panorâmica da barragem do Cabril.

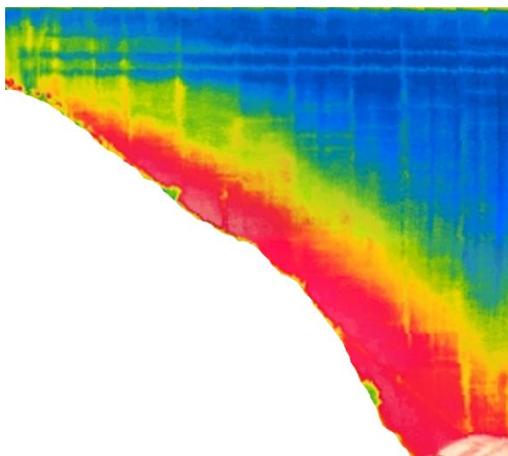


Figura 20. Imagem térmica da barragem do lado de poente.

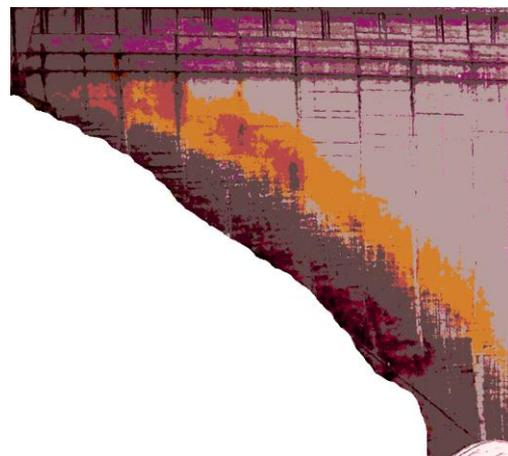


Figura 21. Imagem da banda do visível cromaticamente transformada.

Seguidamente, na Figura 22, 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 considerados mais relevantes.

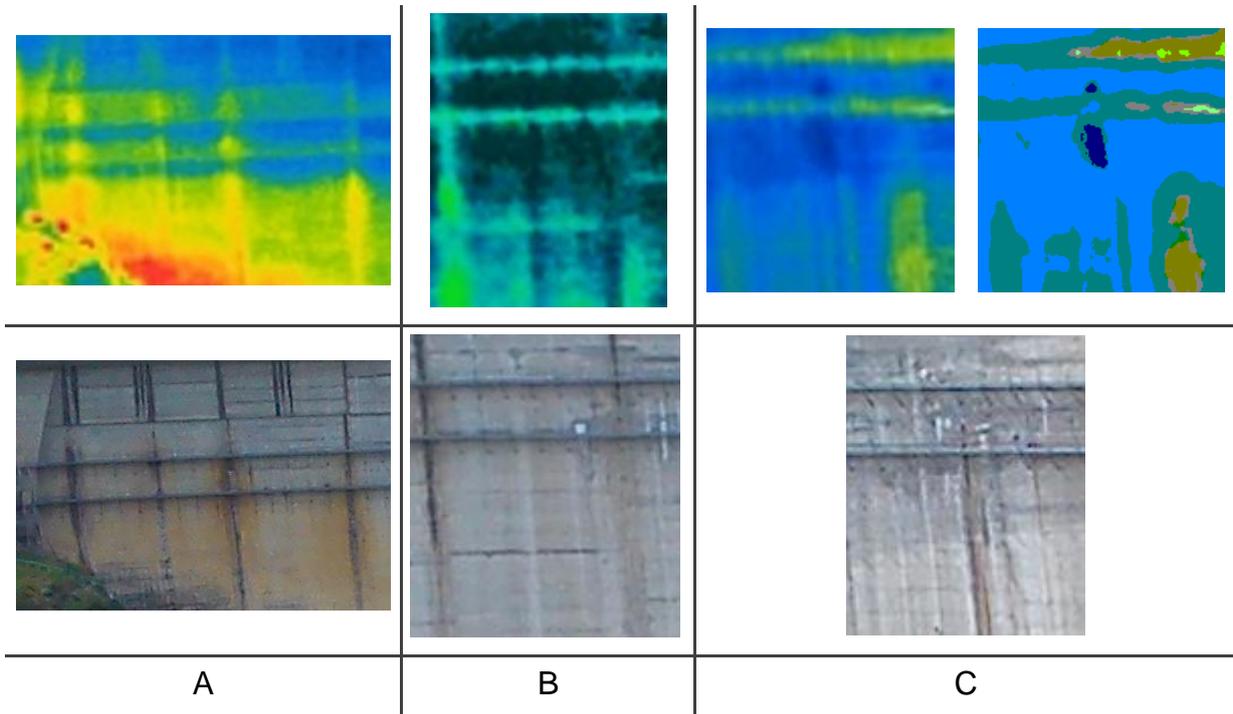


Figura 22. Zonas do paramento com alguns aspetos relevantes

Neste conjunto de imagens há a realçar:

A – as zonas onde existe maior acumulação de matéria orgânica são zonas mais escuras (na imagem convencional) e comparativamente mais quentes (de acordo com as imagens térmicas).

B – para além dos passadiços identificam-se também nas imagens térmicas as fendas horizontais que foram cobertas com calda de betão durante as reparações da barragem. Uma destas, no bloco GH, identifica-se facilmente nas imagens térmica e da banda do visível.

C – no centro das imagens está o bloco KL sendo que é visível nas imagens térmicas duas manchas mais frias, sendo que a de maior extensão 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 cinco. 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.

4. CONSIDERAÇÕES FINAIS

O estudo permitiu verificar que as câmaras termográficas existentes no mercado a operar em condições normais de observação, a distâncias de poucas centenas de metros, podem realizar uma observação suficientemente rigorosa para detetar repasses anomalias que estão, em regra, associados à existência de fendas. Para além do rigor as câmaras térmicas

apresentam 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, ocorrências estas que, num dia com temperatura elevada, só podem ser explicadas pela existência de repasses.

Dada a facilidade, rapidez, pormenor e rigor com que, num levantamento térmico, são obtidos os resultados é possível, ainda em obra, verificar o estado dos paramentos e, se necessário, analisar com mais pormenor e durante o levantamento, as anomalias detetadas.

REFERÊNCIAS

- [1] FLIR – “Thermal imaging guidebook for building and renewable energy applications”, USA, FLIR. http://www.flirmedia.com/MMC/THG/Brochures/T820325/T820325_EN.pdf.
- [2] LNEC – “Levantamento térmico de paramentos de barragens de betão para apoio ao acompanhamento da evolução de patologias”, Relatório n.º 425/2013 DBB/NGA, LNEC.