

Termografia passiva no diagnóstico de patologias e desempenho térmico em fachadas de edifícios através de câmara térmica instalada em drone. Abordagem preliminar em Coimbra (Portugal)

Passive thermography in the diagnosis of pathologies and thermal performance on building facades through a thermal camera installed on a drone. Preliminary approach in Coimbra (Portugal)

Ana Sofia Ferreira Coimbra e Almeida

Arquiteta e Mestre em Geografia Física, Ambiente e Ordenamento do Território. Universidade de Coimbra
anasofia.coimbra_879@hotmail.com
<https://orcid.org/0000-0002-8335-7210>

Alexandre Ornelas

Geógrafo e Mestre em Geografia Física, Ambiente e Ordenamento do Território. Universidade de Coimbra
Centro de Estudos Interdisciplinares do Século XX da Universidade de Coimbra - CEIS20
alexandre.ornelas@uc.pt
<https://orcid.org/0000-0001-7707-5738>

António M. Rochette Cordeiro

Universidade de Coimbra - Centro de Estudos Interdisciplinares do Século XX (CEIS20) Departamento de Geografia e Turismo
rochettecordeiro@fl.uc.pt
<https://orcid.org/0000-0002-8648-3204>

Artigo recebido a 6 de abril de 2020 e aprovado a 29 de dezembro de 2020

Resumo

A termografia, ao se assumir como uma técnica não intrusiva e não destrutiva, permite o visualizar da radiação infravermelha através de imagens térmicas visíveis e facilita a sua realização a distâncias significativas das superfícies em análise, podendo considerar-se como bastante vantajosa em termos da sustentabilidade, quer em termos a reabilitação urbana, quer mesmo no âmbito da escolha dos materiais a utilizar.

O desenvolvimento do estudo exploratório constante do presente artigo destacou-se, em oposição ao que usualmente se desenvolve em laboratório, pela execução da técnica sobre terreno, com a recolha e interpretação de situações reais de espaço urbano de imagens através de uma câmara térmica equipada com um sensor Uncooled VOx Microbolometer acoplada a um drone, permitindo, através das imagens recolhidas, encontrar possíveis justificações sobre os dados térmicos registados em diversos edifícios e apontar novos caminhos exploratórios na reabilitação do edificado de setores da cidade. As medições dependem de diferentes parâmetros que podem influenciar os resultados, como a emissividade, a distância da câmara à superfície em análise, o ângulo de observação, a textura da superfície, a refletividade e a cor. Independentemente das diferentes condições presentes em dias diferentes, foi possível identificar os materiais constituintes e registar os diferentes padrões de temperatura, como a transição térmica entre os mesmos materiais ao longo das horas, orientação, exposição e cores diferentes, e ainda as perdas de ar quente (e frio) do interior dos edifícios ou fontes de calor. Este trabalho deve ser entendido como uma base de estudo de implementação de medidas para maior eficiência no edificado e no desenho urbano.

Palavras-chave: sustentabilidade urbana, termografia, edifícios, elementos construtivos, eficiência energética.

Abstract

Thermography is a non-destructive technique that allows the visualization of infrared radiation through visible thermal images. It may take place at great distances from the surfaces under analysis and it may be quite advantageous in sustainability issues of urban rehabilitation. This technique allows, based on the results obtained, the development of new efficient solutions, such as more durable coatings and/or greater insulation capacity, allowing the identification of pathologies that can hardly be detected by other methods. This also allows maintenance to be done timely, without the risk of deterioration.

This measurement depends on different parameters that can influence its results, such as emissivity, the

camera-surface distance, the observation angle, reflectivity and color. In this case, for building facades, it is also added to the above-mentioned parameters some environmental conditions, as solar radiation and wind predominate.

The development of this exploratory study stands out fundamentally for its practice, from the collection, interpretation and justification of the thermal buildings data. Regardless of the different conditions present on different days, it was possible to identify the constituent materials and record the different temperature patterns, such as the thermal transition between the same materials over the hours, orientation, exposure and different colors, as well as the passage of masses of hot and cold air from inside of buildings to its exterior. This work is relevant to a study of implementing measures for greater urban efficiency in the existent building portfolio and, consequently, achieving greater urban sustainability.

Keywords: urban sustainability, thermography, buildings, building elements, energy efficiency.

1. Introdução

Com o crescimento da utilização de técnicas não destrutivas e o seu benefício na análise e diagnóstico de anomalias em estruturas de alvenaria, a termografia tem ganho cada vez mais destaque (Fox, Coley, Goodhew, & De Wilde, 2014). Este deve-se à sua facilidade de execução, velocidade, obtenção de resultados e também à facilidade de os interpretar (Chrzanowski, 2001; Maldague, 2000). A termografia de infravermelho traz assim várias vantagens na observação, tanto na facilidade de inspeção como na potencialidade de uso das informações obtidas nas imagens termográficas (Bauer, Castro, Oliveira Filho, & Pavón, 2014).

As normas britânicas implementaram mesmo, no ano de 2002, esta técnica como meio de identificação de falhas no isolamento térmico em edifícios não residenciais (Clark, McCann, & Forde, 2003).

Os materiais que constituem o sistema construtivo, muitas vezes são selecionados com base nos custos, região e estética. No entanto, em conjunto, estes são fundamentais no desempenho térmico do edifício, uma vez que refletem a radiação solar, proporcionam sombreamento e arrefecimento por evaporação, oferecem isolamento térmico, inércia térmica e aquecimento passivo (Gonçalves & Duarte, 2006). Caso não seja considerado o desempenho térmico dos materiais, provavelmente será necessário recorrer a climatização artificial, o que implica custos suplementares à posteriori. Com isto, o equacionar inicial dos elementos físicos de um edifício torna-se indispensável, sendo que considerando todas as características necessárias para obtenção de conforto térmico e sustentabilidade, permite obter uma construção eficiente (Lamberts, Dutra, & Pereira, 2014; Schiffer & Frota, 2007). Deve também ser referido que as perdas de energia pela envolvente de um edifício ocorrem em 40% através

da cobertura, 25% pelas paredes, 10% pelo solo e 15% pelos vãos envidraçados. Também as perdas por passagens de ar por portas e janelas são de 10% (Sousa, 2010).

A conjugação da análise qualitativa com a termografia passiva tem-se assumido como bastante eficiente na identificação de defeitos em fachadas de edifícios revestidos a azulejos devido à infiltração de água e ar, no controlo e avaliação de sistemas de drenagem de água em edifícios históricos, na análise da performance térmica, na avaliação do desempenho da envolvente de edifícios através da análise exterior e na deteção de infiltrações e perdas de ar (Grinzato, Bison, & Marinetti, 2002; Suonketo, Korpi, & Aaltonen, 2009; Tavukcuoglu, Duzgunes, Demirci, & Caner-Saltik, 2007). Adicionando outras técnicas não destrutivas, torna-se possível alcançar resultados com significativo sucesso na avaliação do nível de isolamento térmico de edifícios históricos (Binda & Saisi, 2009; Haralambopoulos & Paparsenos, 1998).

Não obstante, a maioria dos trabalhos realizados sobre a temática tem-se debruçado no estudo em protótipos em laboratório, projetados e construídos na forma de placas e nos quais são previamente introduzidas deficiências. A dificuldade na avaliação e quantificação de anomalias em fachadas reside, entre outros aspetos, na dificuldade de inspeção em particular em edifícios de grande altura. A termografia de infravermelho passiva através de uma câmara térmica instalada num veículo aéreo não tripulado (VANT) oferece vantagens, não só na perceção da visão térmica do ambiente urbano (Foto 1) como na facilidade de inspeção de patologias ou no isolamento térmico do próprio edificado (Foto 2), com uma potencialidade de uso das informações obtidas nos termogramas pouco usual nestas temáticas.

O principal objetivo deste trabalho consiste na apresentação de uma metodologia exploratória sobre o levantamento termográfico no terreno, de fachadas

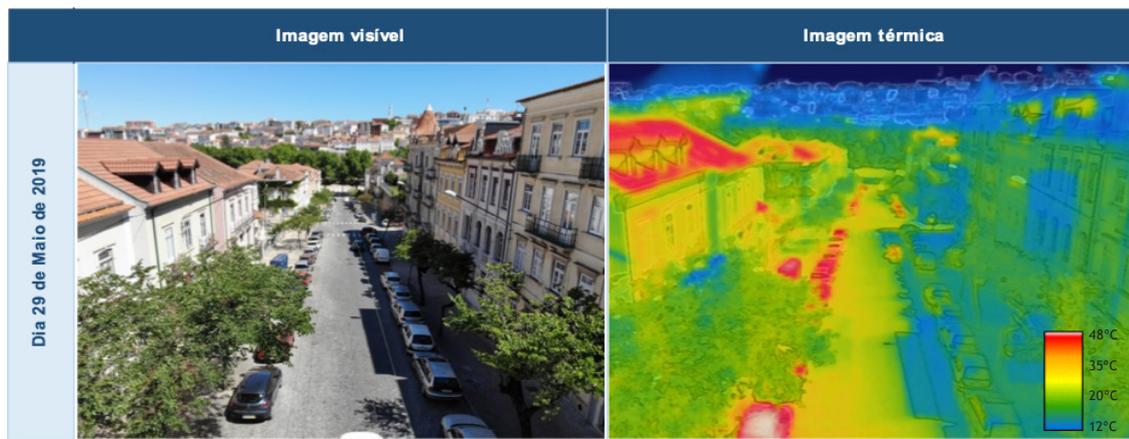


Foto 1
A rua Alexandre Herculano numa vista sul-norte, às 11.30 horas do dia 29 de maio de 2019: a) imagem no visível; b) imagem térmica.



Foto 2
Visualização da transferência de ar através de um portão de garagem. O ar frio, mais pesado, no setor inferior e o ar mais quente no setor mais elevado.

de edifícios com materiais de revestimento, caixilharia e de diferentes estados de conservação, bem como de exposições solares diferenciadas, de modo a poder ser analisada a radiação infravermelha e o desempenho térmico dos materiais. Estes poderão apresentar valores diferenciados em função, não só da dissipação de calor dos próprios materiais, como também da sua cor, exposição solar e condições climáticas, ao contrário do que é habitualmente desenvolvido em laboratório. O levantamento dos dados foi assim efetuado através de uma câmara termográfica integrando um VANT (drone), de modo a tornar-se possível a realização de uma análise tão precisa e abrangente quanto necessário em espaço

urbano, possibilitando assim uma acessibilidade e alcance a alturas mais elevadas¹.

2. Contextualização da termografia no âmbito do edificado

A termografia de infravermelhos assume-se como uma técnica de captação de imagens térmicas, invisível ao olho humano, que permite determinar

¹ A inspeção de fachadas é habitualmente uma atividade com logística complexa, uma vez que a altura dos edifícios, as difíceis condições de acesso, a necessidade de efetuar avaliações com os edifícios em utilização, são alguns dos aspetos que se evidenciam como complexas na obtenção dos dados de um levantamento, por exemplo, das patologias das fachadas dos edifícios (Bauer et al., 2014). A inspeção das fachadas, através de elevadores ou de técnicas de rapel, apresenta custos elevados e apresentam-se como intervenções pouco operacionais, pelo que a solução da utilização do drone com câmara térmica acoplada, parece ser uma solução muito interessante a ser utilizada.

se existem irregularidades ou patologias, de acordo com a distribuição térmica emitida pela superfície em análise (Bernardino, 2018). A radiação infravermelha é um tipo de energia eletromagnética deslocada à velocidade da luz, onde todos os objetos com temperaturas acima do zero absoluto (-273°C) a emitem e a absorvem. Quanto maior a radiação emitida, maior a temperatura da superfície (Silva, 2016), encontrando-se no espectro eletromagnético entre a luz visível e as ondas radio, podendo os seus comprimentos de onda variar entre os 0.75 e os 1000 µm (Bernardino, 2018).

Verificam-se ainda três métodos de termografia: a qualitativa, a quantitativa e a analítica. São diferenciadas pelo processo do qual provêm as informações obtidas, ou seja, a termografia qualitativa consiste na análise de diferenças de padrões de distribuição térmica, a quantitativa provêm da medição direta das temperaturas observadas nos padrões de distribuição térmica, e por fim, a analítica que consiste na melhoria dos métodos de trabalho em inspeções e na obtenção de valores térmicos a nível económico e de aumento de qualidade (Pedra, 2011).

Aquando da análise da termografia de infravermelhos torna-se necessário ter em consideração a capacidade de reflexão da superfície (emissividade); a cor da superfície (cores mais escuras absorvem maiores quantidades de radiação); as condições meteorológicas e a distância entre a câmara e a superfície, devendo destacar-se que deve sempre ser efetuada a calibração da câmara para que os valores obtidos sejam mais precisos (Bernardino, 2018). A câmara permite adaptar o campo de visão à área em análise, verificando-se assim, em manchas tonais a radiação infravermelha emitida pela superfície. Esta, ao ser digital, permite a ligação a computadores facilitando a análise e o diagnóstico da informação (Sales, 2008).

A utilização de uma termografia passiva, que é aquela que é utilizada neste trabalho, deve-se à emissão de radiação infravermelha suficiente por uma superfície, de modo a que não seja necessário o uso de qualquer fonte de calor artificial, considerando-se como fonte natural a irradiação solar (Silva,

2016)². A termografia permite assim a identificação de diferentes camadas, alterações derivadas da degradação natural dos materiais (possível identificar a dimensão, a posição e a origem da anomalia), tratamentos especiais nas superfícies e condições ambientais adversas, o que destaca esta técnica com eficácia na caracterização de materiais e estudos para restauração e manutenção (Meola, Carlomagno, & Giorleo, 2004). Assim, podemos afirmar esta técnica como sendo económica e um ótimo instrumento a considerar na análise e diagnóstico da preservação de património, na análise de edifícios antigos a serem restaurados e no estudo dos seus materiais e elementos que os compõem (Cortizo, 2007).

Com isto, e para que haja uma análise do comportamento térmico pretendido nos edifícios, poder-se-á recorrer à termografia, de forma a medir os fluxos de calor, para determinar qual a resistência térmica (Silva, 2016). As pontes térmicas podem ser planas (partes descontínuas ou singulares do isolamento térmico) ou lineares (zonas de ligação de dois componentes diferentes na composição e resistência térmica), as quais proporcionam maior rapidez na passagem de calor para as fachadas que por sua vez originam infiltrações e a formação de fungos no interior do edifício. Ou seja, as pontes térmicas transmitem a radiação térmica de forma diferente, podendo ser facilmente identificadas através de imagens termográficas.

A técnica permite também observar as perdas de calor pelas frestas das janelas e das portas (cfr. Foto 2), sendo de realçar que estas, no âmbito da eficiência energética, assumem-se como responsáveis pelo arrefecimento de determinados espaços, em especial no inverno (Silva, 2016). A análise do desempenho térmico é relevante para o alcance de melhor qualidade de vida e, como referido, pela maior eficiência energética, pois com a crescente urbanização, o ser humano ao intervir no seu meio biofísico, altera o balanço radioativo e energético do espaço urbano. Inclusive o aumento substancial das temperaturas da atmosfera urbana e das superfícies, piora a qualidade do ar e altera os padrões de vento (Escourrou, 1991; Oke, 2006; Oke, Mills,

² Na termografia passiva as diferenças de temperatura que identificam as prováveis anomalias têm origem nos fluxos de calor observados nos materiais do edificado. A presença de defeitos reduz a taxa de transporte de calor no material, a qual pode ser detetada na superfície. Assim, defeitos ou anomalias podem ser identificados por comparação com as regiões próximas ou circunvizinhas, e as quais não se apresentam estáticos nem constantes ao longo do dia (Bauer et al., 2014).

Christen, & Voogt, 2017). Com isto, face à vulnerabilidade a que o espaço urbano está sujeito, para que se possa alcançar uma melhoria da qualidade de vida e para que haja maior eficiência energética, devem ser efetuados e implementados estudos ambientais no planeamento e ordenamento do território (Marques, Ganho, & Cordeiro, 2008).

Neste contexto, e no âmbito de um estudo mais vasto sobre topoclima na cidade de Coimbra, muito na sequência dos desenvolvidos anteriormente (Ganho, 1998; Marques et al., 2008), foram realizados levantamentos em dois dias distintos, com estados de tempo de céu limpo, para que em função dos resultados obtidos fosse possível iniciar uma etapa preliminar referente ao desempenho térmico de fachadas dos edifícios da cidade de Coimbra, em particular no casco urbano da 1ª metade do século passado, e que apresentam orientações, materialidades e cores diferenciadas.

3. Metodologia utilizada

O estudo consiste no levantamento infravermelho de fachadas de edifícios, pela utilização da termografia passiva, ou seja, o Sol como fonte de calor e de luz, apresentando-se esta técnica de ensaio como não intrusiva e de grande aplicabilidade. Mede o campo de temperatura de uma superfície a partir da imagem gerada pela radiação térmica. Este método apresenta-se bastante eficiente e benéfico, já que através dele se pode também observar anomalias no interior do sistema construtivo, sem que para tal seja necessário qualquer tipo de intervenção intrusiva (como a demolição de algum elemento), observando-se assim que locais do edifício devem vir a ser intervencionados.

Para a concretização deste trabalho foi equacionado um edificado que apresenta materialidades e elementos construtivos idênticos associado ao crescimento urbano de Coimbra da primeira metade do século XX, mas que apresentam orientação, exposição, revestimentos e cores diferenciadas - cinco prédios, três deles no cruzamento das ruas Alexandre Herculano e Venâncio Rodrigues. A recolha das imagens efetuou-se com o auxílio de um veículo aéreo não tripulado (VANT) que transporta uma câmara térmica equipada com um sensor da *Uncooled VOx Microbolometer* e que oferece uma resolução de 640x480 (4:3) e um tamanho de pixel 8-14 µm. Esta

câmara permitiu o registo das temperaturas emitidas pelos materiais, bem como a temperatura atmosférica e todos os fatores condicionantes às suas alterações³. O planeamento de voo obedeceu a uma metodologia uniforme, trabalhada previamente em gabinete com a análise de cada elemento que iria ser examinado. A altura e a distância foram ajustadas para cada edifício, muito por força das restrições físicas de cada um dos objetos de estudo ou da necessidade de análise de pormenor de determinados setores das fachadas previamente identificadas, razão pela qual nem sempre foi possível uniformizar um valor médio da altura do solo e da distância a cada edifício. A escolha dos dias de amostragem pretendeu refletir situações de estado de tempo de céu limpo e quente, e em momentos próximos da exposição máxima solar (fim da manhã)⁴.

Na generalidade, as temperaturas identificadas nas fachadas, coberturas e restantes objetos sofrem alterações por diversos fatores. Um dos fatores encontra-se associado às diferenças das temperaturas verificadas nos dias em que foram feitos os levantamentos, isto é, as máximas e as mínimas são diferentes nos dias de análise. Também pode ser examinado o fator que advém da influência observada no posicionamento e orientação dos diferentes edifícios, como é o caso das áreas de sombra das edificações urbanas que interferem na incidência da radiação direta, radiação difusa e na radiação refletida (cfr. Foto 1). Um outro fator que limita os registos de temperaturas são a sua área de amostra definido um retângulo que restringe valores que se apresentam fora do objeto/fachada que se pretende analisar. Para tal é definida, para todos os edifícios, uma área limitada, e reforçada pelo “*field of view*” do sensor da câmara térmica, permitindo a captação e focagem da radiação eletromagnética apenas da área que fez parte do objeto de estudo (os valores que ficam fora do retângulo de análise são ignorados para clarificação e objetividade dos materiais e objetos escolhidos). Um outro fator vai estar associado à análise

³ Para normalizar a análise, em todos os casos foi feito uma calibração, através da imobilização do VANT para focar o objeto de estudo antes de ser feito o registo de dados com a câmara térmica.

⁴ Para a análise deste artigo foi necessário que estivessem reunidas condições de estado de tempo específicas nomeadamente a presença de uma situação em atmosfera estável (anticiclone) que proporcionassem que no primeiro levantamento - dia 29 de maio de 2019 -, se tenham observado resultados que se apresentaram bastante homogêneos, muito por força deste ter sido realizado próximo da hora de maior exposição. Já no ano de 2020, a 21 de fevereiro, foi realizado uma nova recolha de imagens, de modo a fazer uma comparação do comportamento térmico face a estações do ano distintas.

dos registos obtidos pela câmara térmica, devendo aqui ser realçado o facto de se observar que a recolha das imagens térmicas pode apresentar diferentes cores para temperaturas iguais (e vice versa), obrigando a um trabalho posterior de análise em gabinete⁵.

4. Área de estudo e contextualização dos dias de registo

Este estudo exploratório desenvolveu-se, num primeiro momento de análise, num espaço bem determinado do casco urbano de Coimbra (Figura 1). A cidade de Coimbra localiza-se na região centro de Portugal com um macroclima de predominância mediterrânea e a um mesoclima atlântico (Ganho, 1998), e onde o assentamento urbano, com uma morfologia com colinas e cumeadas de topo aplanado que dominam pequenos valeiros, oferecem um topoclima muito particular (Marques et al., 2008).

A rua Alexandre Herculano funcionou como ponto central da análise desta campanha, na qual se pretendeu demonstrar a influência e o comportamento dos diferentes materiais das fachadas, assim como a identificação de patologias no edificado que dificilmente são detetadas através de técnicas de visualização direta. Assim, a presente amostra teve como objeto de estudo edifícios localizados nesta rua, em particular três edifícios no cruzamento com a rua Venâncio Rodrigues e dois edifícios localizados no setor superior e dos lados opostos da rua em análise (Foto 3 e Figura 2).

5. Condições locais nos dias dos levantamentos

Neste artigo foram utilizadas as imagens e os dados recolhidos em duas campanhas: a primeira, realizada em 29 de maio de 2019 e, a segunda, em 21 de fevereiro de 2020. O primeiro levantamento decorreu num dia que se apresentava com céu limpo,

dia esse bastante quente para a época, e em que à hora do levantamento a temperatura do ar registava 25.4 ° C, e com vento moderado de 11.3 km/h (Weather Underground - UC.POLO I@ALTA - ICOIMBRA41). O mês de maio do ano de 2019, de acordo com o IPMA, foi o 7º mais quente desde 1931 e o 4º mais quente desde 2000, observando-se também que relativamente à precipitação, este foi um mês bastante seco, com valores reduzidos da precipitação - 13.3 mm. Também os valores de temperatura mínima foram bastante elevados, mesmo superiores em 35% dos anos, isto desde 1931 (IPMA, 2019). Constatou-se também que entre os dias 21 e 31, ou seja, o período que abrange a data do levantamento, os valores da temperatura estiveram sempre acima do valor normal para a época, em particular nos 3 últimos dias (inclui o dia do levantamento) com registos de temperatura máxima do ar superiores aos 30°C (Instituto Geofísico da Universidade de Coimbra - IGUC).

Por seu turno, a segunda campanha decorreu num dia de céu limpo - 21 de fevereiro de 2020 - com a temperatura na hora do primeiro momento de recolha a situar-se nos 18.9° C e com vento a ser fraco, com uma velocidade de 3.2 km/h (Weather Underground - UC.POLO I@ALTA - ICOIMBRA41). O mês de fevereiro de 2020 apresentou-se, no todo do Portugal Continental, como bastante quente e seco, tendo sido referido como o mais quente desde 1931 (IPMA, 2020). Salienta-se ainda que neste mês de fevereiro se observaram temperaturas médias diárias sempre superiores ao valor médio mensal (exceto dia 18) onde os dias quentes, em particular no período compreendido entre os dias 18 e 24 de fevereiro, nas horas dos levantamentos registavam-se temperaturas de 18.8°C, às 12 horas e 10 minutos e 21.6°C, às 15 horas (Weather Underground - UC.POLO I@ALTA - ICOIMBRA41).

6. Análise e discussão dos resultados

Numa primeira abordagem, e tendo como análise o levantamento de 29 de maio relativamente aos edifícios A e D, algumas abordagens preliminares podem ser realizadas. A fachada voltada a oriente do edifício A (Figura 2A e Foto 4) apresenta-se toda ela em alvenaria, rebocada, com pintura amarela,

⁵ A chamada de atenção desta questão deve-se à possibilidade de que a simples observação das imagens pode induzir em erro algumas das análises. Mais concretamente, nas imagens térmicas de uma mesma fachada em análise, nem sempre se observa que a mesma cor (vermelha, para superfícies quentes, amarelo e verde para superfícies com temperaturas intermédias ou azul para superfícies mais frias) venha a refletir as mesmas patologias identificadas. As temperaturas dos objetos analisados diferem de edifícios e dos locais que estão inseridos, possibilitando uma amplitude térmica diferente e com isso uma coloração que pode ser variável.

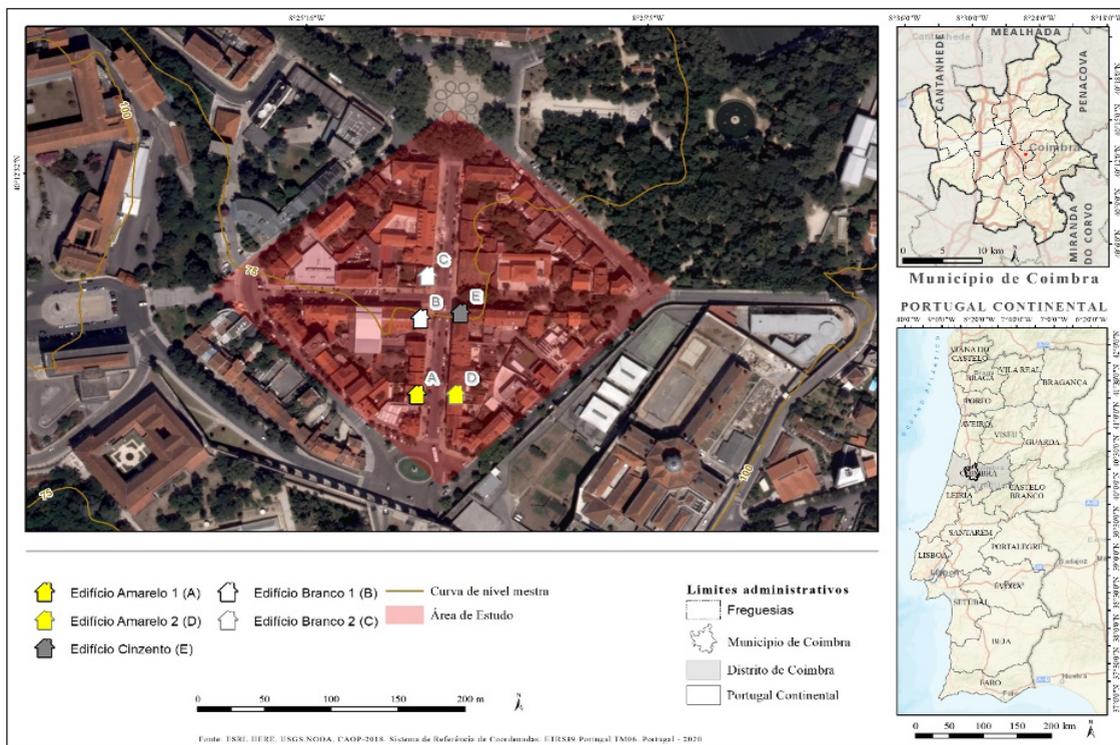


Figura 1
Localização dos edifícios para análise do desempenho térmico.

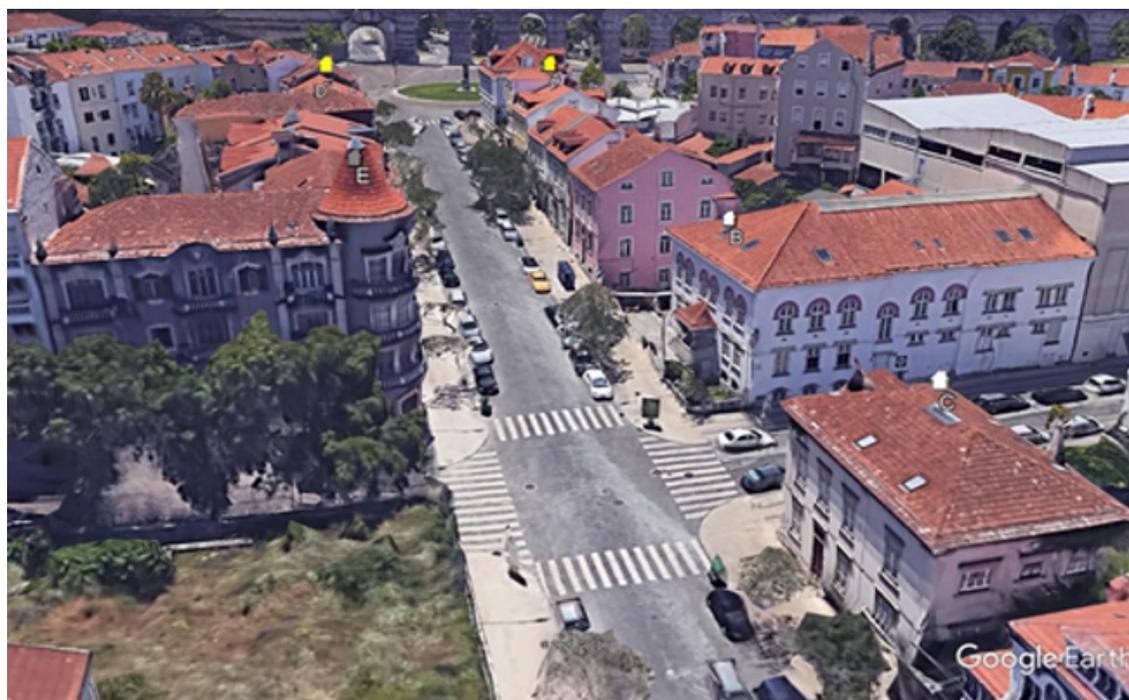


Foto 3
Representação dos edifícios analisados esquematizados em 3D.
Fonte: Google Earth.

Edifício	Fotografia	Localização
A. Edifício Amarelo 1		Rua Alexandre Herculano (fachada Este)
B. Edifício Branco 1		Rua Alexandre Herculano (fachada Este)
C. Edifício Branco 2		Rua Alexandre Herculano (fachadas Este e Sul)
D. Edifício Amarelo 2		Rua Alexandre Herculano (fachada Oeste)
E. Edifício Cinzento		Rua Alexandre Herculano (fachadas Norte e Oeste)

Figura 2
Identificação dos edifícios em análise.

de molduras em pedra calcária⁶ em torno de todos os vãos presentes na fachada, cobertura de telha cerâmica, caixilhos em madeira branca e com mansardas onde os caixilhos se apresentam revestidos a madeira de cor vermelha escura.

Neste contexto, a imagem térmica mostra uma fachada com temperaturas homogéneas, constatando-se que, no que refere aos caixilhos de madeira⁷,

⁶ Num contexto de condutividade térmica, e tomando em atenção os materiais predominantes no edificado da área-amostra, deve ser referido que a pedra calcária se apresenta como de grande inércia térmica, bom isolante sonoro e de durabilidade bastante elevada, sendo que é, e à semelhança dos metais, um bom condutor de calor. Caso a difusividade térmica apresente valores elevados, a pedra dará uma resposta mais rápida face às variações térmicas, enquanto se apresentar valores menores, a resposta será mais lenta, levando mais tempo a alcançar o equilíbrio térmico (Spínola, 2015).

⁷ A madeira apresenta boas condições naturais de isolamento térmico e acústico, embora seja vulnerável a fatores externos e a durabilidade apresenta-se como limitada quando não há manutenção (Mendes, 2011). Se a sua densidade for alta, traduz-se num isolamento elevado, o que por sua vez reduz a dissipação de calor e chega a alcançar temperaturas de superfície muito elevadas. A espessura é um fator importante, sendo que se o material for fino, ao contrário de um mais espesso, vai alcançar rapidamente temperaturas muito elevadas, sem que haja um aquecimento progressivo. Normalmente, a madeira utilizada na construção é mais espessa, de forma a ser eficiente a nível de isolamento térmico e de maior resistência a incêndios (Gomes, 2014).

enquanto no piso superior da fachada os voltados a norte apresentam as temperaturas mais baixas (mancha azul - valores inferiores aos 14°C), já nos caixilhos da própria fachada as temperaturas apresentam-se mais homogéneas, verificando-se, contudo, alguns pontos de calor nas juntas do caixilho com o vidro, demonstrando a importância das anomalias provocadas pelos diversos materiais⁸.

No caso do edifício D, observa-se uma fachada voltada a ocidente (pelo que na hora do levantamento ainda não tinha obtido qualquer minuto de radiação direta), também ela em alvenaria, revestida a reboco de cor amarela, as molduras dos vãos em pedra calcária, caixilhos em madeira branca e verde, o portão da garagem e a porta da entrada principal em alumínio e ainda, na cobertura, telha cerâmica (Figura 2D). A imagem térmica deste edifício

⁸ Relativamente ao vidro, quando transparente e simples transmite para o interior do ambiente 87% do calor que recebe, enquanto que dos restantes, 13% são absorvidos pelo próprio material, pelo que este é considerado como um mau condutor térmico (Marinoski, 2016). Já o vidro transparente duplo, transmite para o ambiente interior 83% da radiação que recebe, razão pela qual se apresenta como uma melhor opção construtiva, dado o seu aumento da resistência térmica e a pouca redução da transmissão de luz (Marinoski, 2016).

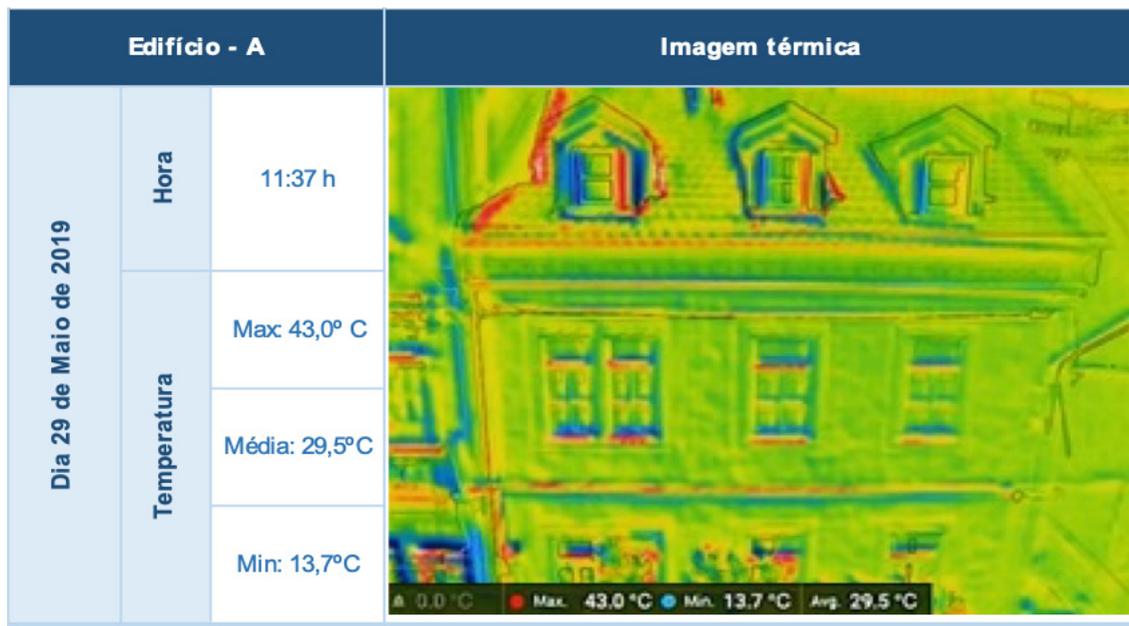


Foto 4
Temperaturas do edifício A.

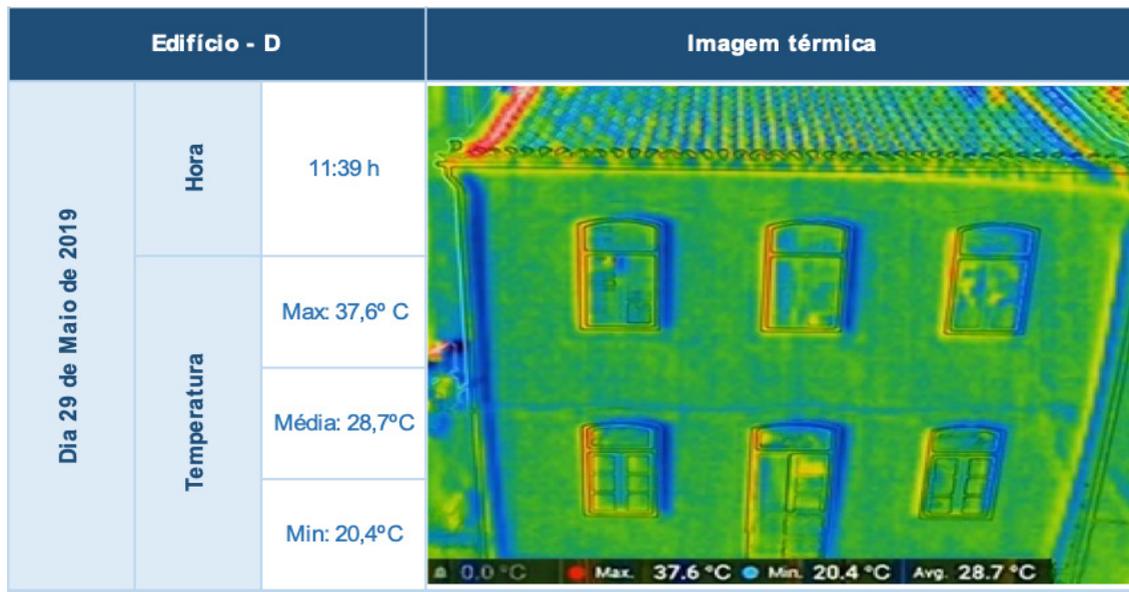


Foto 5
Temperaturas identificadas no edifício D.

(Foto 5) apresenta a fachada com temperaturas homogéneas, verificando-se apenas anomalias relacionadas com a cabeleagem que atravessa o entre pisos, a qual reflete uma temperatura mais fria, o mesmo se observando na lateral esquerda da fachada com uma faixa vertical mais fria que reflete o tubo de queda em PVC, uma vez que este material se apresen-

ta como bom isolante térmico⁹. Também, na cobertura se pode observar à esquerda (junto do referido tubo em PVC), e por força do seu posicionamento e logo da sua maior exposição solar a sul, o material

⁹ O alumínio apresenta-se como um material de elevada condutibilidade térmica, boa resistência aos fatores atmosféricos e elevada capacidade de refletir, enquanto que o PVC se assume como um bom isolante térmico e acústico (Mendes, 2011).

Edifício		Edifício B	Edifício C	Edifício E
Dia 29 de Maio de 2019	Hora	11:48 h	11:46 h	11:47 h
	Temp.	Max: 38.8° C Min: 19.6° C Média: 30.4° C	Max: 38.3° C Min: 20.1° C Média: 29.3° C	Max: 32° C Min: 28.4° C Média: 30.4° C
	Foto			
Dia 21 de Fevereiro de 2020	Hora	12:14 h	12:13 h	15:53 h
	Temp.	Max: 39.2° C Min: 13.0° C Média: 22.1° C	Max: 29.1° C Min: 15.7° C Média: 23° C	Max: 41.2° C Min: 11.8° C Média: 27° C
	Foto			

Figura 3
Temperaturas identificadas nos vários edifícios.

das telhas cerâmicas acaba por refletir o seu maior aquecimento, devido à sua irradiação. A pedra calcária em torno dos vãos apresenta uma mancha homogénea tal como a da restante fachada, os caixilhos de madeira verde no piso superior são os que mais se destacam, ao contrário da madeira branca que apresenta uma mancha relativamente homogénea juntamente com a mancha do vidro. Os caixilhos em madeira de cor verde apresentam, como seria exetável, temperaturas mais elevadas nas paredes voltadas a Sul (faixa vermelha) e mais baixas nas voltadas a norte (faixa azul).

Numa abordagem mais global, e tomando como referência os edifícios identificados na Figura 2, a

análise centra-se nos três edifícios que definem o cruzamento das ruas Alexandre Herculano e Venâncio Rodrigues (a quarta esquina é constituída por um muro homogéneo), os quais apresentam características muito particulares e diferenciadas entre eles, o que se reflete também nas imagens térmicas obtidas em cada um deles (Figura 3).

A análise do edifício E (algo que vai estar na origem de manchas facilmente visíveis na fachada) é um dos enfoques principais da análise exploratória à identificação de patologias aqui apresentada (apresenta vestígios de degradação no piso superior). De alvenaria, revestido com reboco e pintura cinzenta, a sua fachada principal encontra-se orientada a oeste



Foto 6
Identificação de patologias - edifício E.

(rua Alexandre Herculano)¹⁰, enquanto que a fachada da rua Venâncio Rodrigues, se encontra exposta a norte. Porém, por se apresentar como significativo para um dos objetivos anteriormente definidos, torna-se possível observar nas superfícies homogêneas diferenças térmicas, que na realidade traduzem algumas patologias identificadas por manchas azuis na fachada, destacando-se assim na homogeneidade que se pode observar em toda ela (Foto 6). Estas patologias são identificadas por temperaturas mais baixas (azul) devido à sua exposição solar (embora curta), o que permitiu de forma progressiva aumentar a temperatura da fachada e iniciar o processo de evaporação da água das infiltrações identificadas (Takeda & Mazer, 2018)¹¹. Porém, também, é visível a diferença de temperatura das colunas em pedra com o reboco cinzento da fachada, apresentando a pedra calcária manchas mais frias (azul). Na imagem térmica do dia 29 de maio constatam-se temperaturas mais homogêneas (cor maioritariamente azul), com valores de aproximadamente de 30°C, podendo observar-se, não só algumas patologias que provocam

manchas na fachada (Foto 6). As patologias refletem temperaturas mais elevadas, uma vez que a fachada não teve exposição direta por tempo suficiente no momento do levantamento, ou seja, constata-se ainda a humidade noturna presente na fachada. Quanto menor a exposição térmica, maior a temperatura no setor da infiltração, enquanto que, e como se observou no dia 21 de fevereiro de 2020, com o aumento da temperatura incidente na fachada e absorção de calor, as infiltrações apresentam-se com temperaturas inferiores devido à sua evaporação (Takeda & Mazer, 2018)¹². Também é visível na guarda do varandim as diferenças térmicas na pedra que se encontra mais escura a amarelo (mais quente) e a mais clara a azul (menos quente), ou seja, quanto mais escura a cor, mais calor absorve.

Por seu turno, a fachada Este do edifício B é constituída por estrutura em alvenaria, com reboco branco, soleira dos vãos em pedra e moldura superior em barro, caixilhos em madeira branca (à exceção das pequenas janelas que se encontram na parte inferior da fachada, com gradeamento, e que apresentaram o caixilho em alumínio branco) e ainda, uma entrada principal que é efetuada através de um pequeno pórtico em pedra e telhas em cerâmica. A

¹⁰ A fachada voltada a oeste observa a existência de alguns pormenores construtivos salientes em calcário, razão pela qual não se realiza neste artigo uma análise global desta fachada.

¹¹ A presença de uma patologia pode encontrar-se na origem da redução da taxa de transporte de calor no material, sendo assim detetada na superfície. Assim defeitos ou anomalias podem ser identificados por comparação nos setores próximos ou circunvizinhos de uma fachada (Bauer et al., 2014).

¹² De acordo com Maldaque (2001), em termos gerais, um Delta-T de 2° C já identifica possíveis anomalias, enquanto um Delta-T de 4° C já é uma forte evidência de um comportamento anormal, algo que se observa na fachada do edifício E.

título de exemplo no dia 29 de maio, as temperaturas da fachada deste edifício apresentam-se bastante homogêneas (Figura 3), tanto que esta se apresenta como uma mancha verde, quase uniforme. Observam-se temperaturas mais baixas no setor voltado a norte, tanto nas águas da cobertura que, devido ao seu declive, não permite uma incidência direta da luz solar, como nos contornos da pedra e do barro que se encontram a circundar os vãos, pois, sendo estes salientes, provocam pequenas bolsas de ar menos quente onde a luz solar não incide diretamente (a azul). Já o lado oposto, voltado a sul é o que apresenta nessas mesmas saliências, a temperatura mais elevada (amarelo e vermelho), observando-se que o caixilho de madeira branca se apresenta ligeiramente mais frio que o próprio vidro, resultado de o facto de a madeira ser um material com inércia térmica fraca, podendo esta facilmente oscilar as suas temperaturas, ao contrário do vidro. Na cobertura, podem observar-se duas pequenas claraboias em vidro, que apresentam, e isto em função da orientação e o ângulo da sua exposição solar, uma área mais quente e outra mais fria.

Já o edifício C, em alvenaria, rebocado e com pintura branca, permite-nos observar a suas fachadas orientadas a este - na rua Alexandre Herculano - e, a sul - na rua Venâncio Rodrigues (Figura 3), apresentando esta última um extenso revestimento vegetal (hera). Nesta fachada lateral, e mesmo tendo em consideração que se encontra exposta a sul, observam-se, no dia 29 de maio, significativas manchas verdes e azuis que se devem à presença da vegetação, já que esta proporciona elevada irradiação, apresentando-se assim as temperaturas mais baixas. Também os caixilhos em madeira branca apresentam uma temperatura inferior à do vidro, o que faz com que este seja facilmente perceptível na imagem, bem como a pequena guarda metálica em todos os vãos, que mostra pontos mais quentes na sua junção com a pedra.

Na difícil tentativa de sintetizar muita da informação recolhida, pode, porém, retirar-se algumas indicações que foram sendo referidas na abordagem preliminar na análise dos registos obtidos, e onde se pode constatar que, e à exceção do edifício C, as temperaturas máximas registadas são superiores no momento em que teoricamente deveria ser mais frio - 21 de fevereiro -, facto que parece refletir uma reação direta das temperaturas das fachadas à radiação recebida no momento. O edifício B, continua

a apresentar uma fachada térmica homogênea e também a sua mancha se mantém quase uniforme (Figura 3 - 21/02/2020). Verifica-se a mesma tendência da campanha anterior, com temperaturas mais baixas nas águas da cobertura e nos contornos da pedra e do barro. Por seu turno, constata-se no portão da garagem, a vincada passagem de ar frio (azul) na parte inferior, o qual se deve ao ar mais frio vindo do interior do edifício (cfr. Foto 2). Na lateral esquerda do portão do edifício D, onde se observa uma régua em alumínio branco é assinalada a vermelho na imagem térmica, verificando-se uma temperatura mais elevada do que na lateral direita do portão, devido à sua exposição e incidência solar de Sul e à referida condutividade do alumínio.

Na generalidade, os aumentos de temperatura observados, dever-se-ão à hora de levantamento, (observava-se já uma exposição solar com cerca de 3 horas e, mesmo tendo em consideração que estávamos no inverno, este dia apresentava-se relativamente quente para a época do ano (21°C) e com céu limpo (IPMA, 2020). Porém, também deve ser considerada a inércia térmica dos materiais aquando da análise do levantamento, uma vez que existem materiais com elevada inércia, como a alvenaria que constitui as paredes e a pedra calcária por norma presente nas molduras de vãos e, por isso, diminuem a dissipação de calor. No entanto, o edifício C, sendo o único a apresentar um decréscimo bastante relevante na temperatura máxima, com menos 9.2°C, e uma vez que os edifícios de exposição Este (B e C) não apresentaram uma diferença significativa nas temperaturas máximas, deve deduzir-se que, ou o sistema de construção das paredes existentes não apresenta capacidade para reter com tanta eficácia a temperatura, ou então que a hera da fachada identificada no levantamento de dia 29 de Maio (esta encontrava-se seca à data do último levantamento - 21 de Fevereiro), parece definir-se como o principal fator diferenciador.

Quanto às diferenças mínimas, pode verificar-se a existência de uma discrepância relativamente às temperaturas máximas do levantamento de Inverno, bem como a diferença entre ambos os levantamentos, também apresenta diferenças elevadas, isto é, no edifício B verifica-se um decréscimo de 6.6°C da primavera para o inverno, no edifício C a diferença é de 4.4°C, e por fim, o edifício E com menos 16.6°C no inverno. Estas descidas podem justificar-se com a observação de temperaturas mínimas de inverno

serem baixas (10°C de temperatura mínima para o dia 21/02/2020) e o período de calor ser relativamente curto. Assim, os materiais que se encontram com maior sombreamento, poderão facilmente manter temperaturas mais baixas, independentemente de serem verificadas numa hora de calor mais elevado.

No entanto, uma das funções mais importantes que a termografia passiva acoplada a um drone pode vir a apresentar, e que foi um dos objetivos desta campanha exploratória, passa pela inspeção de fachadas e sistemas de revestimento em edifícios com altura elevada com difíceis condições de acesso relativamente ao levantamento de patologias do edificado. No caso particular do edifício E, e tendo em consideração que algumas patologias são observáveis sem necessidade de inspeção física ou radiométrica, o objetivo passou por identificar-se outros setores com patologias. Os termogramas obtidos pela câmara do drone, permitiu identificar outros setores (não visíveis da rua) onde o Delta-T era superior a 2°C, permitindo assim identificar rapidamente possíveis anomalias, observando-se outros setores que devem ter uma exploração posterior mais aprofundada.

7. Algumas reflexões

Sendo a termografia passiva uma técnica não intrusiva que permite visualizar a radiação infravermelha através de imagens térmicas visíveis e o facto de poder ser realizada a grandes distâncias das superfícies em análise, pode considerar-se bastante vantajosa na avaliação, não só do comportamento térmico dos materiais, cores e exposições das fachadas, mas também na identificação de patologias no edificado.

Na maioria das situações esta técnica tem sido desenvolvida em laboratório, em condições de análise bem definidas e por vezes em situações que podem mesmo ser consideradas “artificiais”. Assim, e no contexto de um projeto mais amplo sobre sustentabilidade urbana e na procura de novas abordagens interdisciplinares à reabilitação do edificado, e mesmo do próprio desenho urbano, desenvolveram-se duas campanhas de registo de imagens de termografia passiva sobre terreno, com a recolha e interpretação de situações reais em edificado de um setor da Coimbra da 1ª metade do século XX. Este estudo exploratório, que se destaca pela execução da técnica

em espaço urbano, obteve imagens através de uma câmara térmica equipada com um sensor Uncooled VOx Microbolometer acoplada a um drone, tendo sido realizadas duas campanhas que forneceram imagens que podem permitir, a baixo custo, apontar diferentes caminhos na reabilitação do edificado dos diferentes setores da cidade.

Com condições de temperaturas diferenciadas nos dias de campanha, tornou-se possível identificar os materiais constituintes e registar os diferentes padrões de temperatura e transição térmica entre eles, importância da orientação, exposição e cores diferentes, e ainda a passagem de massas de ar quente (e frio) do interior dos edifícios para o exterior, bem como de fontes de calor. Porém, e como um dos pontos fulcrais desta campanha, constatou-se que esta técnica permite a identificação de patologias que dificilmente são detetadas em edifícios altos com outro método (inspeção das fachadas através de elevadores ou mesmo através de operações de rapel, apresentam custos elevados e como pouco operacionais), o que torna o uso das câmaras de infravermelhos acopladas a drones, como uma das mais interessantes técnicas na localização de problemas estruturais nas fachadas, possibilitando uma manutenção atempada do edificado.

Algumas sondagens exploratórias sobre o funcionamento da termografia de infravermelhos relativamente aos materiais de construção, cor, tipo de revestimento, à variabilidade horária ou de exposições, foram efetuadas da melhor forma possível, mas, esperando que a muito curto prazo, possa ser efetivado um salto qualitativo nesta metodologia de análise. Este trabalho deve ser assim assumido numa lógica exploratória, com o desejo de se vir a concretizar uma base de estudo capaz de vir a sustentar no futuro de medidas de implementação de uma maior eficiência energética com o objetivo de procura do alcançar uma maior sustentabilidade urbana.

Bibliografia

- Bauer, E., Castro, E. K., Oliveira Filho, A. H., & Pavón, E. A. (2014). Critérios para aplicação da termografia de infravermelho passiva como técnica auxiliar ao diagnóstico de patologias em fachadas de edifícios. *Atas do 1º Encontro Luso-Brasileiro de Degradação em Estruturas de Concreto Armado* (pp. 266-277). S. Salvador da Bahia, Brasil.

- Bernardino, A. A. N. (2018). *Desempenho Térmico de Revestimentos de Cobertura Utilizando a Técnica da Termografia Thermal Performance of Roof Claddings using the Infrared Thermography* (Dissertação de Mestrado Integrado em Engenharia Civil, na área de Especialização em Construções). FCTUC, Coimbra.
- Binda, L., & Saisi, A. (2009). Application of NDTs to the diagnosis of Historic Structures. *Non-Destructive Testing in Civil Engineering*. Retrieved from c:%5CUser-%5CUuario%5CDesktop%5CPhD%5CPapers%5CBinda L., Saisi A. - Application of NDTs to the diagnosis of Historic Structures.pdf
- Castro, A. P. D. A. S. (2006). *Desempenho térmico de vidros utilizados na construção civil: estudo em células-teste* (Tese de Doutorado). Universidade Estadual de Campinas, Faculdade de Engenharia Civil, Arquitetura e Urbanismo, Campinas. Disponível em <http://www.bibliotecadigital.unicamp.br/>
- Chrzanowski, K. (2001). Evaluation of thermal cameras in quality systems according to ISO 9000 or EN45000 standards. *Thermosense XXIII*, 4360, 387-401. <https://doi.org/10.1117/12.421015>
- Clark, M. R., McCann, D. M., & Forde, M. C. (2003). Application of infrared thermography to the non-destructive testing of concrete and masonry bridges. *NDT and E International*, 36(4), 265-275. [https://doi.org/10.1016/S0963-8695\(02\)00060-9](https://doi.org/10.1016/S0963-8695(02)00060-9)
- Cortizo, E. C. (2007). *Avaliação da Técnica de Termografia Infravermelha para Identificação de Estruturas Ocultas e Diagnóstico de Anomalias em Edificações: Ênfase em Edificações do Patrimônio Histórico* (Dissertação). Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte.
- Escourrou, G. (1991). *Le Climat et la ville*. Paris: Nathan.
- Fox, M., Coley, D., Goodhew, S., & De Wilde, P. (2014). Thermography methodologies for detecting energy related building defects. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 40, 296-310. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2014.07.188>
- Ganho, N. (1998). *O clima urbano de Coimbra - Estudo de Climatologia local aplicada ao ordenamento urbano* (Tese de Doutoramento em Geografia Física). Instituto de Estudos Geográficos, Faculdade de Letras, Universidade de Coimbra, Coimbra.
- Gomes, J. (2014). *Estudo da inflamabilidade de madeiras para construção usadas na envolvente de edifícios* (Dissertação de Mestrado em Engenharia Mecânica na Especialidade de Produção e Projeto). Departamento de Engenharia Mecânica, Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade de Coimbra, Coimbra.
- Gonçalves, J. C. S., & Duarte, D. H. S. (2006). Arquitetura sustentável: uma integração entre ambiente, projeto e tecnologia em experiências de pesquisa, prática e ensino. *Ambiente Construído*, 6(4), 51-81.
- Grinzato, E., Bison, P. G., & Marinetti, S. (2002). Monitoring of ancient buildings by the thermal method. *Journal of Cultural Heritage*, 3(1), 21-29. [https://doi.org/10.1016/S1296-2074\(02\)01159-7](https://doi.org/10.1016/S1296-2074(02)01159-7)
- Haralambopoulos, D. A., & Paparsenos, G. F. (1998). Assessing the thermal insulation of old buildings - The need for in situ spot measurements of thermal resistance and planar infrared thermography. *Energy Conversion and Management*, 39(1-2), 65-79. [https://doi.org/10.1016/S0196-8904\(96\)00176-8](https://doi.org/10.1016/S0196-8904(96)00176-8)
- IPMA. (2019). *Boletim Climatológico Maio 2019 - Portugal Continental*. 1-13.
- IPMA. (2020). *Resumo Climatológico Fevereiro de 2020*. 1-6.
- Lamberts, R. (2016). *Disciplina: ECV 5161 - Desempenho térmico de edificações (7ª ed.)*. Florianópolis: Universidade Federal de Santa Catarina.
- Lamberts, R., Dutra, L., & Pereira, F. O. R. (2014). *Eficiência Energética na Arquitetura*. Rio de Janeiro: Eletronbrás/ Procel.
- Maldague, X. (2000). Applications of Infrared Thermography in Nondestructive Evaluation. in P. Rastogi (Ed.), *Trends in Optical Non-Destructive Testing and Inspection* (pp. 591-633). Elsevier.
- Maldague, X. (2001). *Theory and practice of infrared technology for nondestructive testing*. New York: John Wiley & Sons.
- Marinoski, D. L. (2016). Desempenho Térmico de edificações. In R. Lamberts, *Disciplina: ECV 5161 - Desempenho térmico de edificações (7ª ed., s.p.)*. Florianópolis: Universidade Federal de Santa Catarina.
- Marques, D., Ganho, N., & Cordeiro, A. . M. . R. (2008). Clima local e ordenamento urbano: o exemplo de Coimbra. *Cadernos de Geografia*, 26/27, 313-323.
- Mendes, V. G. P. (2011). *Quantificação do Coeficiente de Transmissão Térmica de Vãos Envidraçados. Modelo de Cálculo* (Dissertação). Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Porto.
- Meola, C., Carlomagno, G. M., & Giorleo, L. (2004). The use of infrared thermography for materials characterization. *Journal of Materials Processing Technology*, 155-156(1-3), 1132-1137. <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2004.04.268>
- Oke, T. R. (2006). Towards better scientific communication in urban climate. *Theor. Appl. Climatol.*, 84, 179-190.
- Oke, T. R., Mills, G., Christen, A., & Voogt, J. A. (2017). *Urban Climates*. Cambridge: University Press.
- Pedra, S. A. (2011). *Potencialidades da Termografia Infravermelha Aplicada ao Design do Conforto Térmico de Alvenaria Estrutural* (Dissertação de Mestrado). Escola de Design, Programa de Pós-Graduação em Design da Universidade do Estado de Minas Gerais, Belo Horizonte.
- Sales, R. do B. C. (2008). *Estudo de Compostos de Cimento Portland Utilizando o Ensaio de Frequência Ressonância*

- te Forçada e Termografia* (Tese). Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte.
- Schiffer, S. R., & Frota, A. B. (2007). *Manual de Conforto Térmico*. São Paulo: Studio Nobel.
- Silva, F. A. M. da. (2016). *Diagnóstico da envolvente de um edifício escolar com recurso a análise termográfica* (Dissertação de Mestrado). Escola Superior de Tecnologia e Gestão, Instituto Politécnico de Viana do Castelo.
- Sousa, L. F. R. de. (2010). *Aplicação de Termografia no Estudo do Isolamento Térmico de Edifícios* (Dissertação). Universidade de Aveiro, Aveiro.
- Spínola, S. (2015). *Caracterização Térmica de Pedras Naturais* (Dissertação para a obtenção do grau de Doutor em Geociências). Universidade de Aveiro, Aveiro.
- Suonketo, J., Korpi, M., & Aaltonen, A. (2009). *Detecting point of unintentional ventilation*. 7th International Symposium on Nondestructive Testing in Civil Engineering. Nantes, France.
- Takeda, O. T., & Mazer, W. (2018). Potencial da análise termográfica para avaliar manifestações patológicas em sistemas de revestimentos de fachadas. *Revista ALCONPAT*, 8(1), 38-50. <https://doi.org/10.21041/ra.v8i1.181>
- Tavukcuoglu, A., Duzgunes, A., Demirci, S., & Caner-Saltik, E. N. (2007). The assessment of a roof drainage system for an historical building. *Building and Environment*, 42(7), 2699-2709. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2006.07.012>
- Weather Underground. (2020). UC.POLO I@ALTA - ICOIMBRA41. Retrieved from <https://www.wunderground.com/dashboard/pws/ICOIMBRA41>

