



UNIVERSIDADE D
COIMBRA

Fernando Guilherme Castanheira Cerveira

**INSPEÇÃO DE FACHADAS COM RECURSO À
TERMOGRAFIA DE INFRAVERMELHOS
CASO DE ESTUDO EM VISEU**

**Dissertação no âmbito do Mestrado Integrado em Engenharia Civil, no perfil de
Construções, orientada pelo Professor Doutor Raimundo Mendes da Silva e pelo
Professor Doutor Ricardo Almeida e apresentada ao Departamento de
Engenharia Civil da Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade de
Coimbra.**

Novembro de 2020

Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade de Coimbra
Departamento de Engenharia Civil

Fernando Guilherme Castanheira Cerveira

INSPEÇÃO DE FACHADAS COM RECURSO À TERMOGRAFIA DE INFRAVERMELHOS

CASO DE ESTUDO EM VISEU

FAÇADE INSPECTION USING INFRARED THERMOGRAPHY

CASE STUDY IN VISEU

Dissertação de Mestrado Integrado em Engenharia Civil / Ambiente, na área de Especialização em Construções,
orientada pelo Professor Doutor Raimundo Mendes da Silva e pelo Professor Doutor Ricardo Almeida

Esta Dissertação é da exclusiva responsabilidade do seu autor. O Departamento de Engenharia Civil da FCTUC
declina qualquer responsabilidade, legal ou outra, em relação a erros ou omissões que possa conter.

Novembro de 2020



UNIVERSIDADE D
COIMBRA

AGRADECIMENTOS

A vida é feita de aprendizagem e experimentação contínuas, pelo que a conclusão desta etapa coincidirá com o início de outra. Todavia, face à importância da formação académica que tive o gosto e o privilégio de poder usufruir, não poderia deixar de agradecer, ainda que simbolicamente, a quem tomou parte desta viagem, sendo certo que pecarei sempre por defeito neste ato.

Ao Professor Doutor Raimundo Mendes da Silva, por ser uma fonte inspiração para mim muito antes de o conhecer pessoalmente, por ser quem é, pelo seu imensurável conhecimento e contributo para a Engenharia e por ser um verdadeiro exemplo de docência e paixão pelo ensino.

Ao Professor Doutor Ricardo Almeida, pela disponibilidade e paciência demonstradas ao longo da realização deste trabalho, pela vasta contribuição para o mesmo quer em termos de ideias, quer em termos de materiais e equipamentos e pela atenção dedicada ao mais ínfimo detalhe, tendo sido verdadeiramente incansável na sua ajuda.

A todos os meus amigos, sem exceção. Em especial ao Andrei, ao Bernardo, ao Diogo, ao Luís e ao Zé pelo companheirismo no dia-a-dia e pelas longas horas passadas entre estudo e trabalhos. À Rita, pelas conversas, trocas de ideias e por estar sempre presente ao longo da realização desta dissertação. Sem vocês seria tudo mais difícil.

À minha família, por nunca terem deixado de acreditar em mim ao longo do meu percurso. À minha avó Luísa, ao meu avô Fernando e às minhas tias Rosa e Lúcia. Foram o meu suporte.

Por último, mas garantidamente não menos importante, aos meus pais. Sem vocês nada, com vocês tudo.

A todos vós, o meu mais profundo e sincero obrigado!

RESUMO

Ao longo das últimas décadas, a reabilitação de edifícios tem-se assumido como uma ramificação cada mais importante da construção civil e obras públicas, apresentando-se como um verdadeiro desafio à engenharia civil. O aumento populacional, aliado à melhoria das condições de acessibilidade e maior oferta de emprego no setor terciário, tem levado a uma concentração da população nos grandes núcleos urbanos. Nestes, o espaço é cada vez mais limitado e valioso, pelo que a reabilitação do edificado existente tornou-se inevitável. Para tal, antes de poder intervir nos edifícios existentes e adequá-los aos padrões de exigência atuais por parte dos consumidores, é importante recorrer a técnicas de inspeção e análise apropriadas.

Apresenta-se, assim, a termografia de infravermelhos como uma técnica capaz de corresponder a todos estes requisitos, sendo uma ferramenta de grande utilidade na identificação de elementos construtivos e no diagnóstico de patologias em edifícios, tais como as pontes térmicas. Tendo em conta os requisitos energéticos cada vez mais exigentes impostos pelas diretivas europeias, a identificação e estudo de pontes térmicas em edifícios assume uma natural importância.

Pretende-se com este trabalho identificar e analisar uma zona de ponte térmica, em torno de uma caixa de estore, na fachada de um edifício residencial da década de 60, em Viseu, recorrendo às valências da termografia de infravermelhos e ao uso de sensores de humidade e temperatura. Para tal, foram recolhidos vários termogramas no interior e exterior da habitação, servindo de base a uma posterior análise quantitativa.

A análise efetuada permitiu atestar a mais valia da termografia de infravermelhos como técnica não invasiva de inspeção de fachadas, em particular destaque para a identificação de pontes térmicas não visíveis à vista desarmada.

PALAVRAS CHAVE – Termografia de Infravermelhos; Inspeção de Fachadas; Reabilitação de Edifícios; Pontes Térmicas; Termografia Passiva; Análise Quantitativa.

ABSTRACT

Throughout the last decades, the rehabilitation of buildings has grown so far as to becoming one of the paramount branches of construction, presenting itself as a real challenge to civil engineering. Population growth, alongside with the ever-improving accessibility conditions and the greater white-collar job offer in cities, has led scores of people into the large urban centers. In these, space is a valuable and limited resource, as room for new buildings gets more and more scarce. Thus, rehabilitating existent buildings has become an inevitability, which vouches for the importance of choosing proper analysis and inspection techniques: in order to properly intervene on and upgrade a preexistent building, one firstly has to study it thoroughly.

Therefore, infrared thermography stands out as a suitable technique of great usefulness for both identifying constructive elements and for diagnosing building pathologies, such as thermal bridges. Regarding the increasingly demanding European energy efficiency directives, the capability to properly assess and act on thermal bridges is crucial.

This thesis is meant to explore the capabilities of infrared thermography by identifying and analyzing a thermal bridge area surrounding a shutter box, in a residential building from the '60s located in the city of Viseu, Portugal. Moreover, temperature and relative humidity sensors were also used as complementary auxiliary devices, making it possible to collect all necessary additional data for the further quantitative analysis.

The results obtained and the subsequent undertaken analytic approach made it possible indeed to attest infrared thermography as a valuable non-invasive façade inspection technique, in particular for identifying thermal bridges otherwise impossible to perceive by the naked eye.

KEY WORDS – Infrared Thermography; Façade Inspection; Rehabilitation of Buildings; Thermal Bridges; Passive Thermography; Quantitative Analysis.

ÍNDICE

1	INTRODUÇÃO	1
1.1	Enquadramento do Tema	1
1.2	Objetivos do Trabalho	3
1.3	Organização do Texto	4
2	TERMOGRAFIA DE INFRAVERMELHOS	5
2.1	Enquadramento Histórico	5
2.2	A Radiação Infravermelha no Espectro Eletromagnético.....	8
2.3	Formas de Transferência de Calor	9
2.4	Esquemas de Análise: Análise Quantitativa e Análise Qualitativa	13
2.5	Metodologias de Medição: Termografia Ativa e Termografia Passiva	14
2.6	Leitura Termográfica: Emissividade e Refletividade dos Materiais.....	15
2.7	Outros Fatores Influenciadores na Medição Termográfica	20
2.8	Termografia de Infravermelhos: Pontos Fortes vs Pontos Fracos	22
3	APLICAÇÕES DA TERMOGRAFIA DE INFRAVERMELHOS EM EDIFÍCIOS	24
3.1	Identificação de Elementos Construtivos	24
3.2	Pontes Térmicas e de Quebras em Isolamentos e Impermeabilizações.....	26
3.3	Humidade e Fissuração	32
3.4	Descolamento de Cerâmicos em Fachadas	35
3.5	Fugas em Pavimentos Radiantes e Canalizações.....	37
3.6	Inspeção de Estruturas em Betão Armado	38

4	METODOLOGIA	41
4.1	Caso de Estudo.....	41
4.2	Procedimento do Ensaio	44
4.3	Materiais e Equipamentos.....	49
4.3.1	Câmara Termográfica.....	49
4.3.2	Sensores de Humidade Relativa e Temperatura.....	50
4.3.3	Diversos.....	51
4.4	Plano de Ensaios	53
5	DISCUSSÃO DOS RESULTADOS.....	56
5.1	Fases de Análise.....	56
5.1.1	Fase 1	56
5.1.2	Fase 2.....	64
5.1.3	Fase 3.....	71
6	CONCLUSÕES E DESENVOLVIMENTOS FUTUROS	75
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	78
	ANEXO A – TERMOGRAMAS DO ENSAIO PELO INTERIOR	A-1
	ANEXO B – TERMOGRAMAS DO ENSAIO PELO EXTERIOR	B-1

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2.1 - Pirómetro ótico de Morse (Patente de Morse, 1899).	7
Figura 2.2 - Espectro eletromagnético (Wilson Teixeira Moutinho, 2006).	8
Figura 2.3 - Transferência de energia por condução, convecção e radiação (adaptado de DeWitt et al., 2011).	10
Figura 2.4 - Transferência de energia unidimensional por condução (adaptado de DeWitt et al., 2011).	10
Figura 2.5 - Variação da emissividade com a temperatura, em alguns metais: (1) níquel, (2) tungsténio, (3) platina (adaptado de Gaussorgues, 1999).	16
Figura 2.6 - Variação da emissividade de um metal com a influência do seu nível de oxidação: (1) cobre muito oxidado, (2) cobre ligeiramente oxidado, (3) cobre polido (adaptado de Gaussorgues, 1999).	17
Figura 2.7 - Variação da emissividade de alguns materiais com o comprimento de onda: a) metais: (1) cobre, (2) ferro, (3) alumínio, (4) prata; b) não-metais: (1) água, (2) terra, (3) plástico (adaptado de Gaussorgues, 1999).	18
Figura 2.8 - Variação da emissividade de um material com o ângulo de observação (adaptado de Meola, 2012).	18
Figura 2.9 - Imagem térmica do campus da Universidade de Plymouth (Fox et al., 2014).	22
Figura 3.1 - Termograma de um teto, evidenciando a estrutura com uma laje de vigotas (Altoé & Filho, 2012).	25
Figura 3.2 - Termograma evidenciando a tipologia de uma parede (Mendonça et al., 2013). ..	25
Figura 3.3 - Pormenor de uma imagem térmica de uma janela de uma habitação (a) antes do seu aquecimento e (b) após o seu aquecimento (Taylor et al., 2013).	27
Figura 3.4 - Edifício protótipo utilizado para a demonstração experimental do cálculo do fator de incidência de pontes térmicas, Itb (adaptado de Bianchi et al., 2014).	28

Figura 3.5 - Imagem de termografia de infravermelhos da ponte térmica existente na esquina de ligação parede-teto, com a esquematização 3D da mesma sobreposta (Bianchi et al., 2014).	29
Figura 3.6 - Vista de um edifício em Winterthur, Suíça, e respetivo termograma durante a estação de aquecimento, evidenciando (a verde) as quebras de isolamento na fachada (adaptado de Lehman et al., 2013).	30
Figura 3.7 - Zonas de quebra de isolamento num junta parede-teto (Taylor et al., 2014).	31
Figura 3.8 - Termograma de um provete de ensaio, com deteção de empolamentos no período de aquecimento (imagem da esquerda) e deteção de água no período de arrefecimento (imagem da direita) (Melrinho et al., 2015).....	32
Figura 3.9 - Deteção de uma infiltração não visível numa parede divisória de um apartamento de habitação, evidenciada pela mancha azulada do termograma (Mendonça et al., 2013).	33
Figura 3.10 - Avaliação de situações de humidade, evidenciada pelas manchas amarelas, em parede de alvenaria no Castelo de Stenico, Itália (Grinzato et al., 2010).....	34
Figura 3.11 - Termograma evidenciando os danos de fissuração causados pelo terramoto em L'aquila, Itália (2009), na Igreja de Santa Maira de Roio, em particular no canto superior esquerdo da fachada frontal (adaptado de Bisegna et al., 2014).	35
Figura 3.12 - Termogramas na fase de aquecimento (fila superior) e de arrefecimento (fila inferior), com a indicação da temperatura na zona de destacamento, evidenciada por uma mancha (adaptado de Freitas et al., 2014).	36
Figura 3.13 - Inspeção termográfica da fachada principal de um edifício residencial em Águas Claras – DF, Brasil, com algumas manchas evidenciando destacamento incipiente de material (dos Santos, 2018).	36
Figura 3.14 - Visualização do traçado da rede de um pavimento radiante, num termograma (Mendonça et al., 2013).....	37
Figura 3.15 - Visualização das tubagens da rede de água quente (Mendonça et al., 2013).	37
Figura 3.16 - Análise de uma situação de infiltração numa laje de vigotas de betão (Mendonça et al., 2013).....	38
Figura 3.17 - Termogramas de provetes de betão de alta resistência a) sem adição de fibras de polipropileno, b) com adição de fibras de polipropileno (Du et al., 2015).	39

Figura 4.1 - Planta do apartamento onde se encontra a zona em estudo, destacada a laranja. .	41
Figura 4.2 - (a) fotografia do caso de estudo, correspondente à área em torno da janela à direita; (b) esquematização do caso de estudo e dimensões relevantes.	42
Figura 4.3 - Corte transversal da zona superior da janela, caixa de estore e início do piso superior (viga + laje em betão armado), referenciando dimensões relevantes (em centímetros).....	43
Figura 4.4 - Representação esquemática da composição da parede em estudo.....	44
Figura 4.5 - Colocação da folha de papel de alumínio (a) na parede interior da habitação (b) na parede exterior.	46
Figura 4.6 - (a) Câmara termográfica FLIR ThermaCAM E300; (b) <i>software</i> FLIR Tools. ...	49
Figura 4.7 - Sensores portáteis de temperatura ambiente e de humidade relativa, <i>Sensirion SHT31</i>	50
Figura 4.8 - Sensores portáteis de temperatura ambiente e humidade relativa, <i>HOBO U12-012</i>	51
Figura 4.9 - Materiais diversos utilizados: (a) escadote; (b) fita métrica; (c) folha de alumínio.	52
Figura 4.10 - Linha temporal do ensaio, desde o seu início (I_0) até ao seu término (I_{16}).....	53
Figura 4.11 - Esquema de posições de captura dos termogramas com indicação de distâncias relevantes (Horizontais – afastamentos em relação ao elemento medido; Vertical – cota de medição).	54
Figura 4.12 - a) Posição de captura de termogramas pelo interior; b) Esquematização da área em estudo captada pela câmara termográfica.	55
Figura 4.13 - a) Posição de captura de termogramas pelo exterior; b) Esquematização da área em estudo captada pela câmara termográfica.	55
Figura 5.1 - Evolução das temperaturas interior e exterior ao longo do ensaio, bem como da diferença entre as mesmas.	58
Figura 5.2 - a) Termograma da folha de alumínio; b) Exemplo de <i>input</i> de parametrização no <i>software FLIR Tools</i>	59
Figura 5.3 - Exemplificação (instante I_8) da abordagem de análise geométrica dos termogramas, pelo interior, com diagramas de ponto (Sp_1), linha (Li_1) e caixa (Bx_1).....	59

Figura 5.4 - Exemplificação (instante I_8) da abordagem de análise geométrica dos termogramas, pelo exterior, com diagramas de ponto (Sp_1), linha (Li_1) e caixa (Bx_1).....	60
Figura 5.5 - Comparação da evolução temporal de temperaturas superficiais (T_{sup}) das diversas geometrias na zona de ponte térmica com o ponto na zona corrente, no interior.	62
Figura 5.6 - Comparação da evolução temporal de temperaturas superficiais (T_{sup}) das diversas geometrias na zona de ponte térmica com o ponto na zona corrente, no exterior.....	63
Figura 5.7 - Esquematização dos três diagramas de caixa utilizados para a análise na fase 2.	64
Figura 5.8 - Evolução temporal da T_{sup} na zona corrente ($\square Z.C.$) e na zona de ponte térmica ($\square P.T.$).	66
Figura 5.9 - Dispersão de temperaturas superficiais na zona de ponte térmica exterior e interior em função da diferença de temperatura ambiente e respetivos coeficientes de determinação (R^2).	68
Figura 5.10 - Dispersão das diferenças entre as temperaturas ambiente (interior e exterior) em função das diferenças de temperatura superficial na interface da ponte térmica (interior e exterior) e respetivo coeficiente de determinação (R^2).	69
Figura 5.11 - Dispersão das diferenças de temperatura superficial da ponte térmica em relação à zona corrente no interior ($\square P.T.int - \square Z.C.int$) em função das diferenças de temperatura superficial da ponte térmica em relação à zona corrente no exterior ($\square P.T.ext - \square Z.C.ext$).	70
Figura 5.12 - Dispersão das temperaturas superficiais da interface de ponte térmica no exterior ($\square P.T.ext$) em função temperatura superficial da interface da ponte térmica no interior ($\square P.T.int$).	71
Figura 5.13 - Linhas utilizadas, no software <i>FLIR Tools</i> , para traçar os perfis longitudinal (Li_1) e transversal (Li_2) da temperatura superficial para (a) exterior e (b) interior, no instante I_8	72

ÍNDICE DE QUADROS

Quadro 4.1 - Caracterização das fases de análise dos termogramas recolhidos.....	48
Quadro 5.1 - Valores de temperatura e humidade relativa recolhidos no interior e exterior da habitação, ao longo do ensaio.....	57
Quadro 5.2 - Temperaturas superficiais registadas nas formas geométricas para análise na 1ª fase.....	60
Quadro 5.3 - Temperaturas superficiais registadas nos diagramas geométricos de caixa para análise na 2ª fase.....	65
Quadro 5.4 - Variação de temperaturas superficiais (ΔT_{sup}) entre diagramas de caixa.....	67
Quadro 5.5 - Perfis transversais e longitudinais de dispersão da temperatura superficial ao longo da zona da caixa de estore, pelo interior e pelo exterior.....	73

1 INTRODUÇÃO

1.1 Enquadramento do Tema

Desde os primórdios da sua existência, o Homem sempre teve necessidade de procurar refúgio de forma a que pudesse resguardar-se da *intemperi* e outros possíveis perigos e ameaças. Estes refúgios, inicialmente temporâneos e voláteis, evoluíram para um conceito gradualmente mais fixo e permanente, acompanhando a par e passo a evolução das necessidades da espécie. Naturalmente, as noções crescentes de conforto, segurança, bem-estar e salubridade foram criando desafios constantes à arte de pensar, projetar e construir: a engenharia civil.

Se, por um lado, a criação de novos edifícios tem sido uma constante, não é menos verdade que a preocupação para com o edificado existente é já uma temática secular. É também inegável que no centro dessa preocupação estava o património histórico. Assim, nas últimas décadas, o incessante investimento na indústria da construção nova despoletou o surgimento de pertinentes questões face a um fenómeno que ia aparecendo um pouco por todo o planeta: a necessidade de repensar o edificado existente, face às mutações de densidade populacional observadas. Efetivamente, a pressão demográfica, impulsionada pelo crescimento populacional, tem registado um aumento praticamente transversal a nível territorial, globalmente falando, embora com especial ênfase em torno dos grandes centros urbanos. Contudo, em contracorrente, a procura de habitação na periferia das cidades, a um custo reduzido e não raras vezes oferecendo melhores condições de habitabilidade, tem afastado as pessoas dos centros históricos das cidades, desertificando-os. Deste modo, os edifícios em estado de degradação, abandono e até devolutos foram proliferando um pouco por toda a parte, atestando a necessidade de repensar o edificado existente.

Lançado o mote, a Reabilitação de Edifícios tem vindo a verificar uma franca expansão em termos de conhecimento adquirido e experiência acumulada, com o contributo de vários profissionais de todo o mundo. Assim, procura-se aprimorar materiais e técnicas que permitam corresponder às exigências incrementais a nível estrutural, térmico, acústico e de conforto e segurança em geral. As dificuldades são muitas: um variado leque de estilos arquitetónicos existente, o recurso a materiais bastante díspares de edifício para edifício e de região para região, e ainda a exigência do domínio de diferentes técnicas por parte da mão-de-obra.

De forma a guiar o importante processo de estudo e análise do edificado e património existentes, urge criar e aprimorar o uso de técnicas que o permitam fazer de uma forma eficaz. É perceptível, portanto, a relevância da termografia de infravermelhos aplicada à inspeção de fachadas. Com efeito, o facto de esta ser uma técnica expedita não invasiva, nem destrutiva, e de relativamente fácil aplicação, torna-a numa importante ferramenta passível de ser utilizada na Reabilitação de Edifícios.

A termografia de infravermelhos é usada em variadas áreas da ciência. A possibilidade de se efetuar uma distinção entre os vários materiais, consoante a radiação refletida pelos mesmos, potencia o uso desta técnica tanto para identificação dos elementos e técnicas construtivas presentes, como para a identificação de patologias visíveis, ou não, a olho nu. Assim, poderá ser utilizada como um importante auxiliar em estudos de reabilitação, conferindo por um lado maior clarividência na fase de estudo e diagnóstico, e por outro maior assertividade e sustentação documental e gráfica numa posterior fase de apresentação de uma proposta de reabilitação. Para além disso, estar-se-ão também a cumprir as metas energéticas estabelecidas pela União Europeia, na medida em que é otimizado o estudo de patologias em edifícios, possibilitando o seu melhoramento a nível de desempenho térmico, sendo um reforço concreto na luta pelo alcance da meta estabelecida de balanço energético quase nulo.

1.2 Objetivos do Trabalho

A necessidade crescente de conhecer, inspecionar e controlar o edificado tem levado ao surgimento de diversas técnicas que o permitam. Adicionalmente, há um natural interesse em que estas sejam o menos intrusivas possível, contornando assim eventuais situações de danificação estética e/ou estrutural dos edifícios. Assim sendo, a termografia de infravermelhos aplicada à inspeção de edifícios surge como uma técnica apelativa e versátil.

A presente dissertação pretende avaliar a aplicabilidade da termografia de infravermelhos à inspeção de fachadas de modo a identificar elementos construtivos e pontes térmicas. Assim, sustentado numa abrangente revisão bibliográfica do estado da arte, surge o caso de estudo selecionado, correspondente a um edifício residencial da década de 60 situado na cidade de Viseu. Neste edifício, foi analisada uma das suas fachadas ao longo de um período de 17 horas, recorrendo a uma câmara de infravermelhos, uma vez que esta técnica permite avaliar a distribuição de temperaturas ao longo da superfície do elemento construtivo em estudo.

De forma a atingir o objetivo final do trabalho proposto, seguiram-se um conjunto de etapas, sendo elas:

- Revisão bibliográfica do estado da arte, partindo do surgimento da termografia de infravermelhos, passando pela sua caracterização pormenorizada e condicionantes, terminando na contraposição dos seus pontos fortes e fracos;
- Exemplificação de diversos casos práticos de aplicação da termografia de infravermelhos em edifícios, atestando a utilidade e versatilidade da técnica;
- Caso Prático: recolha dos termogramas *in situ* da caixa de estore em estudo, pelo interior e exterior, recorrendo a uma câmara termográfica *FLIR*, e das flutuações de temperatura e humidade relativa, recorrendo a sensores com capacidade de *data logger*;

- Tratamento e análise dos termogramas cruzados com os valores de temperatura e humidade relativa, no interior e exterior da habitação, recorrendo a diferentes correlações lineares e abordagens geométricas à zona da ponte térmica em estudo;

1.3 Organização do Texto

A presente dissertação encontra-se estruturada em 5 capítulos, sendo o primeiro deles um capítulo introdutório, no qual se insere o presente subcapítulo, onde se procedeu ao enquadramento do tema e exposição dos objetivos aos quais este documento se propõe.

O capítulo 2 foi dedicado ao estado da arte da termografia de infravermelhos. Começou-se por contextualizar histórica e fisicamente o tema, passando para uma abordagem às metodologias e condicionantes paramétricas a ter em consideração aquando do uso da técnica de termografia de infravermelhos, terminando numa contraposição dos pontos fortes e fracos da mesma.

O capítulo 3, no seguimento do seu anterior, explorou uma multiplicidade de aplicações da termografia de infravermelhos em edifícios, tentando abranger uma variedade generosa de utilidades diferentes, sempre baseada em alguns trabalhos previamente realizados sobre o tema.

No capítulo 4, de forma a por em prática parte do que se expôs nos anteriores capítulos, fez-se a apresentação do caso de estudo, bem como a descrição pormenorizada da metodologia experimental utilizada.

No capítulo 5 foi explanada a análise trifásica à qual foram sujeitos os termogramas capturados durante o ensaio, numa tentativa de ilustrar a linha de raciocínio tida para o tratamento dos resultados obtidos.

Por último, no capítulo 6, foram descritas as ilações a retirar da realização desta dissertação, bem como as propostas de trabalhos futuros.

2 TERMOGRAFIA DE INFRAVERMELHOS

2.1 Enquadramento Histórico

A termografia de infravermelhos (TIV) é uma técnica de ensaio não destrutiva, na qual se recorre à captação de imagens térmicas, os termogramas, através de uma câmara termográfica. Genericamente, converte a radiação emitida ou refletida por um dado(s) corpo(s) num gradiente de temperaturas superficiais desse(s) mesmo corpo(s). Assim, é possível ver para além da capacidade natural do olho humano, pelo que é uma ferramenta de vasta aplicabilidade em diversas áreas da ciência.

Historicamente, a génese da termografia poderá datar do séc. IV a.C. Foi nesta época que Hipócrates, por muitos considerado o pai da Medicina, analisou o processo de secagem de uma cobertura de lama de forma a poder perceber qual a zona onde esta endureceria em primeiro lugar sendo, portanto, a área mais quente da cobertura (Afonso, 2010). Embora não constitua uma aplicação cabal da técnica de termografia em si, estavam lançadas as bases para uma investigação futura.

Num contexto bem mais recente, no ano de 1800, o astrónomo e compositor alemão Sir Frederic William Herschel, numa das suas diversas observações da luz solar, percebeu que se aplicasse filtros de diferentes cores a essa luz, também a quantidade de energia transmitida sob a forma de calor variaria, baseando-se na experiência de Isaac Newton. Ora, na tentativa de quantificar essa energia, Herschel recorreu a um prisma vítreo e a três termómetros. Primeiramente, o prisma de vidro refratava a luz solar incidente, convertendo-a num leque colorido, entre o vermelho e o violeta. De seguida, colocava-se um dos termómetros na zona atravessada pela cor em teste, ao passo que os outros dois eram posicionados fora da abrangência do espectro, de forma a poderem ser utilizados como controle. Foram feitas várias leituras e Herschel

concluiu que, à medida que ia percorrendo o espectro desde a cor violeta até à vermelha, a temperatura aumentava. Todavia, o aumento não se esgotava no espectro visível: a zona mais quente encontrava-se para lá do vermelho.

Assim, por entre outras conclusões, Sir William Herschel percebeu que nesta zona incidiam o que chamou de ‘raios caloríficos’, que mais tarde se viriam a designar por radiação infravermelha. Toda a experimentação, resultados e conclusões foram apresentadas por Herschel num artigo escrito para a *Royal Astronomical Society* (Ring, 2000).

Em 1880, o astrónomo e físico norte-americano Samuel Langley inventou o bolómetro, um instrumento que permite a medição da radiação eletromagnética incidente pelo aquecimento de um material cuja resistência elétrica depende da variação de temperatura, sendo sensível a variações muito pequenas da mesma. Graças a esta invenção, o grau de precisão na deteção e medição de radiação infravermelha foi significativamente melhorado (Santos, 2006).

Cerca de 4 anos mais tarde, em 1884, o renomado físico austríaco Ludwig Boltzmann, baseando-se nas leis da termodinâmica e da eletrodinâmica de James Maxwell e no trabalho experimental de Jožef Stefan, desenvolveu aquela que mais tarde viria a ser conhecida por Lei de Stefan-Boltzmann, postulando que a potência irradiada por um corpo negro (P) será proporcional à quarta potência da sua temperatura absoluta (T) multiplicada por um fator de proporcionalidade (σ):

$$P = \sigma T^4 \quad (2.1)$$

Desta forma, Boltzmann ficou conhecido para a posteridade como o pai da termografia infravermelha (Wellons, 2007). Mais tarde, em 1899, dezanove anos após a invenção do bolómetro, Harmon Northrup Morse registou a primeira patente de um pirómetro ótico, com desaparecimento de filamento, um instrumento de medição de temperatura (Figura 2.1). Dois anos mais tarde, em 1901, aparentemente sem conhecimento desta ocorrência, Holborn e Kurlbaum desenvolveram um aparelho bastante similar.

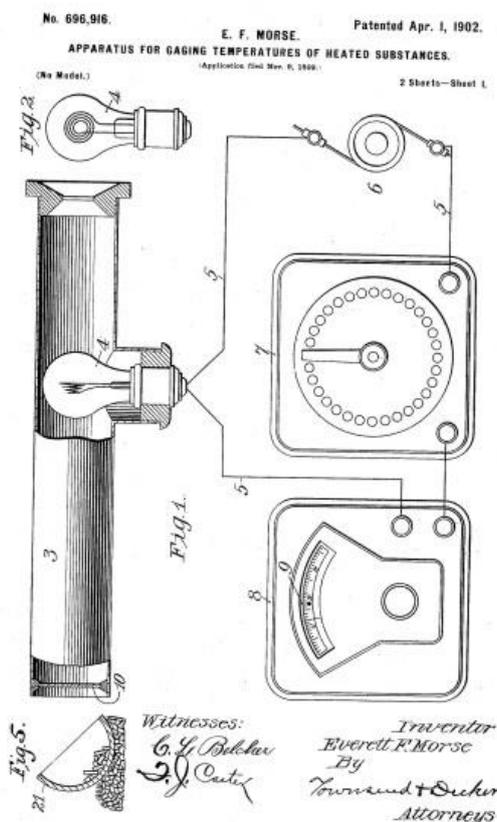


Figura 2.1 - Pirómetro ótico de Morse (Patente de Morse, 1899).

Em 1913, de forma a que se pudesse criar um método de identificação de icebergs, L. Bellingham patenteou um termómetro de infravermelhos significativamente melhor do que os anteriores pirómetros, uma vez que permitia a deteção de temperaturas bastante inferiores à temperatura ambiente (Afonso, 2010).

Durante as décadas seguintes, o progresso relativamente aos instrumentos de deteção de temperaturas não parou. A Segunda Grande Guerra trouxe avanços relativamente à visão noturna, sendo que posteriormente, em meados da década de 60, era já possível obter termogramas em tempo real, com a leitura em simultâneo da temperatura em diversos pontos (Aldeias, 2003).

Caminhando para a atualidade, os equipamentos de obtenção de imagens térmicas de elevado porte foram dando lugar a versões portáteis progressivamente mais leves, a sensibilidade térmica dos aparelhos foi aprimorada e a gama de dispositivos foi-se diversificando. Atualmente, encontram-se disponíveis no mercado variados tipos de instrumentos: pirômetros de infravermelhos, câmaras termográficas digitais passíveis de serem ligadas a computadores e scanners de linha que permitem traçar um perfil de temperaturas ao longo do tempo (Santos, 2006).

2.2 A Radiação Infravermelha no Espectro Eletromagnético

Para além da radiação perceptível naturalmente pelo olho humano, a luz visível, há uma vasta gama de outras ondas, com diferentes comprimentos, que compreendem o espectro eletromagnético. O espectro visível é limitado inferiormente pela radiação vermelha e superiormente pela radiação violeta. Abaixo da radiação vermelha, localizam-se a radiação infravermelha, as micro-ondas e as ondas rádio, ao passo que acima da radiação violeta, encontram-se a radiação ultravioleta, os raios-X e os raios gama (Figura 2.2).

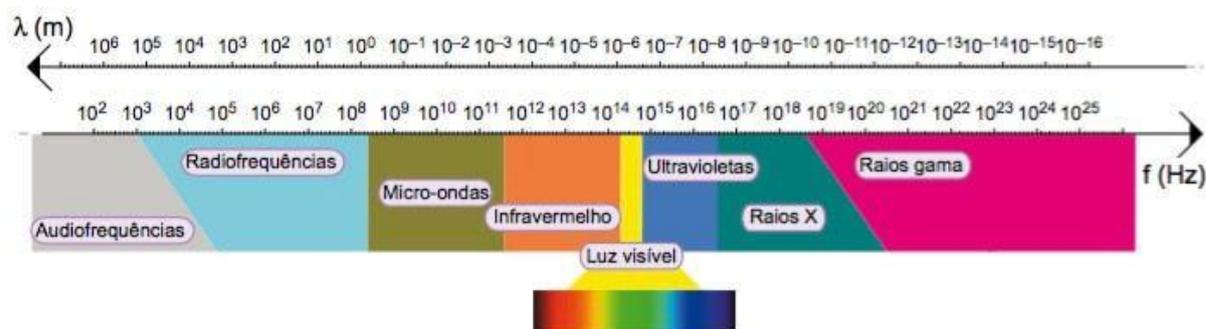


Figura 2.2 - Espectro eletromagnético (Wilson Teixeira Moutinho, 2006).

Relativamente ao caso particular da radiação infravermelha (radiação IV), esta é emitida por qualquer corpo com temperatura superior ao zero absoluto Kelvin, isto é, $-273,15$ °C. Relativamente ao comprimento de onda, a radiação infravermelha poderá ser seccionada em

três partes: próxima (0,75 a 1,5 μm), média (1,5 a 20 μm) e extrema (20 a 1000 μm) (Clark et al, 2003).

Sendo verdade que qualquer corpo com temperatura superior ao zero absoluto emite radiação infravermelha, há um tipo de corpo cuja emissividade supera a de qualquer outro, à mesma temperatura: são os corpos negros. Deste modo, quando em equilíbrio térmico, para além de um emissor ideal, é também um bom absorvedor para qualquer tipo de radiação incidente, não refletindo parte alguma desta.

Num corpo não negro, também designado por corpo real, a radiação incidente no mesmo poderá tripartir-se em: radiação absorvida (α), radiação refletida (ρ) e radiação transmitida (τ). Estas três parcelas dependem do comprimento de onda da radiação incidente e o somatório das mesmas é sempre igual à radiação incidente (Antunes, 2012).

2.3 Formas de Transferência de Calor

A transferência de energia sob a forma de calor pode dar-se de diferentes formas. No contexto da construção, o estudo dessas formas de transferência tem ganho cada vez mais importância, acompanhando o aumento das exigências térmicas dos edifícios, que se encontram materializadas nos regulamentos em vigor.

De uma forma geral, dá-se uma transferência de energia sob a forma de calor entre dois corpos sempre que se verifique, entre eles, uma diferença de temperaturas. Essa transferência de energia dar-se-á no sentido do corpo que se encontra a uma temperatura superior, para o corpo que se encontra a uma temperatura inferior, podendo ocorrer de três formas: condução, radiação e convecção (Figura 2.3).

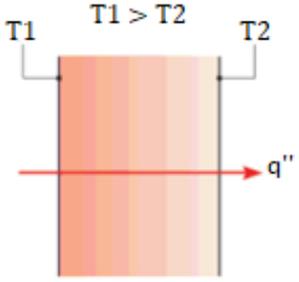
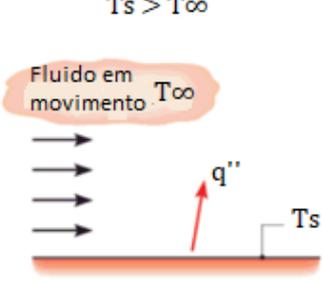
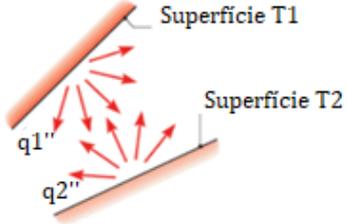
<p>Condução através de um sólido ou de um fluido estacionário</p>	<p>Convecção de uma superfície para um fluido em movimento</p>	<p>Radiação trocada entre duas superfícies afastadas entre si</p>
		

Figura 2.3 - Transferência de energia por condução, convecção e radiação (adaptado de DeWitt et al., 2011).

Relativamente ao primeiro processo, a condução, esta dá-se por contacto entre duas superfícies a diferentes temperaturas, ocorrendo uma transferência de energia das partículas mais energéticas (corpo a maior temperatura) para as partículas menos energéticas (corpo a menor temperatura), sem que se verifiquem trocas radiativas ou convectivas (Figura 2.4).

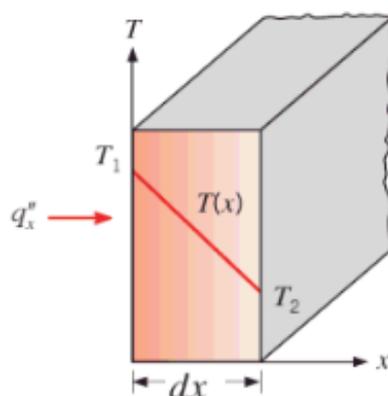


Figura 2.4 - Transferência de energia unidimensional por condução (adaptado de DeWitt et al., 2011).

Os processos de transferência de calor podem ser quantificados e formulados matematicamente. No caso da transferência por condução, a sua formulação consiste na Lei de Fourier, postulando que para o caso de uma transferência unidimensional, para uma distribuição de temperaturas $T(x)=\theta(x)$ e uma condutibilidade térmica λ [$W/m \cdot ^\circ C$] o fluxo de calor é dado por:

$$q(x) = -\lambda \frac{d\theta}{dx} \quad (2.2)$$

Nesta expressão, o sinal negativo traduz o sentido do fluxo de calor. Para além disso, a transmissão de calor (q_x) consiste no fluxo de calor (Q_x) por unidade de área (A), definida pela zona de contacto entre as duas superfícies:

$$q_x = \frac{Q_x}{A} \quad (2.3)$$

Por outro lado, todo e qualquer corpo que se encontre a uma temperatura superior ao zero absoluto emite energia sob a forma de radiação. Esta libertação de energia deve-se a mudanças nas configurações eletrónicas dos átomos e moléculas que compõem cada material, sendo essa energia transportada sob a forma de ondas eletromagnéticas, podendo ocorrer no vácuo. Estas radiações podem diferir entre si em comprimento de onda e intensidade, consoante a temperatura absoluta do corpo e o estado da superfície do mesmo.

A transferência de energia por radiação pode ser quantificada recorrendo à já referida Lei de Stefan-Boltzmann. Esta postula um limite superior para o poder emissivo E_b [W/m^2] de um dado corpo negro, que absorve toda a radiação que nele incide e emite-a com igual intensidade em todas as direções, a uma dada temperatura absoluta T e dependente de uma constante de proporcionalidade σ , a constante de Stefan-Boltzmann ($\sigma=5.67 \times 10^{-8} W/m^2 \cdot K^4$):

$$E_b = \sigma T^4 \quad (2.4)$$

Para um corpo real, o poder emissivo é menor do que o de um corpo negro correspondente, à mesma temperatura. Assim, recorre-se a um fator de acerto ε , que é a emissividade do material, sendo $0 < \varepsilon \leq 1$:

$$E_b = \varepsilon \sigma T^4 \quad (2.5)$$

Por último, a transferência de energia pode dar-se, também, por convecção. Neste caso, a energia transfere-se, macroscopicamente, por movimentação de um fluido, que se traduz por uma propagação de múltiplas conduções intermoleculares a nível microscópico. De uma forma bastante generalista, a transferência de calor por convecção dá-se por transporte de energia pelas partículas mais energeticamente excitadas do fluido em movimento. É um fenómeno perceptível, por exemplo, nos aparelhos de ar condicionado comuns (DeWitt et al., 2011).

Conhecendo as diferentes formas sob a as quais poderão ocorrer transferências de energia na forma de calor, importa entender de que forma será possível calcular um determinado fluxo de calor. Assim, tendo em conta os mais diversos casos com que nos possamos deparar no dia-a-dia no que toca a elementos e soluções construtivas, é possível associar-lhes um coeficiente que, com o conhecimento adicional da diferença de temperatura entre os pontos em estudo, nos permite o cálculo do respetivo fluxo térmico. Este coeficiente, U , denomina-se de coeficiente de transmissão térmica, aglutinando os efeitos de transmissão de calor por condução, radiação e convecção (Rodrigues et al., 2009). Deste modo, o fluxo de calor Q [$W/m^2 \cdot ^\circ C$] pode ser calculado da seguinte forma:

$$Q = UA(\theta_i - \theta_e) \quad (2.6)$$

Ou, em alternativa, recorrendo ao conceito de resistência térmica, R_t [$m^2 \cdot ^\circ C/W$]:

$$Q = \frac{1}{R_t} A(\theta_i - \theta_e) \quad (2.7)$$

2.4 Esquemas de Análise: Análise Quantitativa e Análise Qualitativa

De forma a poder definir o objetivo e natureza de um estudo aquando da análise dos registos termográficos, é importante definir se a opção recairá sobre uma análise quantitativa, ou uma análise qualitativa. Sendo abordagens díspares, importa fazer a distinção entre as mesmas.

Uma análise quantitativa consiste numa avaliação das condições de um dado corpo, como por exemplo a fachada de um edifício, através da comparação de temperaturas superficiais aparentes entre elementos semelhantes ou valores de referência. Assim, é possível estudar as variações de temperatura superficial, tendo em consideração diversos parâmetros tais como a temperatura ambiente, a humidade relativa, a emissividade ou a distância à superfície.

É um método bastante utilizado para a determinação de pontes térmicas e transmissibilidade de superfícies, tendo já registo da validez da sua aplicação para o cálculo de valores de coeficiente de transmissibilidade térmica (U) (Asdrubali et al., 2012). É, assim, aconselhável para situações em que é desejável ter resultados fiáveis e precisos, como por exemplo, para a reabilitação de edifícios cuja finalidade será uma melhoria no desempenho energético dos mesmos.

Todavia, as mais valias de uma análise quantitativa acarretam a necessidade de um trabalho mais minucioso e detalhado, de forma a que os resultados não sejam deturpados. Assim, a calibração do equipamento de medição e recolha de imagem deve ser efetuada conforme as normas aplicáveis, de forma a que a informação possa ser tratada *a posteriori* em computador, uma vez que, neste tipo de análise, a informação não é tratada *in situ* (Kirimtat et al., 2018).

Uma análise qualitativa, por sua vez, consiste numa abordagem mais simples e rápida da TIV, uma vez que é descartada a necessidade de conhecer o valor exato das temperaturas superficiais. Ao invés disso, é suficiente uma leitura visual *in situ* dos padrões coloridos fornecidos num dado termograma. A interpretação é rápida e é possível estabelecer, no imediato, quais as irregularidades presentes face aos padrões coloridos apresentados. Graças à sua boa relação

custo-benefício, é um método bastante utilizado quer em estudos de edifícios correntes, quer em edifícios históricos (Kirimtat et al., 2018).

2.5 Metodologias de Medição: Termografia Ativa e Termografia Passiva

A aplicação da técnica de TIV pode ser efetuada de duas formas diferentes: termografia ativa e termografia passiva.

No caso da termografia ativa, também conhecida como termografia dinâmica, recorre-se a uma fonte de energia externa que irá atuar na superfície de um dado corpo em estudo de forma a criar um contraste térmico entre materiais que, a uma dada temperatura ambiente, se encontram em equilíbrio térmico, pelo que o contraste entre ambos é bastante fraco. É uma técnica muito aplicada em edifícios antigos, uma vez que permite identificar, com relativa facilidade, pontes térmicas, humidades, infiltrações ou outras patologias (Mendonça et al., 2013). A aplicação da técnica é bastante flexível, podendo sofrer diversos ajustes em variadas situações, sendo um método bastante adequado quando a aplicação de métodos passivos não se revelar suficiente para resolver corretamente a situação (Kirimtat et al., 2018).

Relativamente à termografia passiva, esta é aplicada quando a temperatura ambiente permite a deteção de um contraste de temperaturas entre elementos, sem intervenção de uma fonte externa. Torna-se evidente que apresenta uma importante vantagem face à termografia ativa: a desnecessidade de recorrer a qualquer equipamento para além de uma câmara termográfica (Mollmann et al., 2010). É uma técnica de mais valia comprovada, por exemplo, na identificação de elementos em blocos de cerâmica, sendo facilmente visíveis os contornos dos mesmos, podendo ser também utilizada para elementos de alvenaria ou de cantaria de pedra (Edis et al., 2015).

Todavia, é de realçar a importância da seleção da altura apropriada do dia para a realização dos ensaios, sendo este um fator influenciador na qualidade dos resultados obtidos.

2.6 Leitura Termográfica: Emissividade e Refletividade dos Materiais

Tal como qualquer outro método, apesar das suas inegáveis vantagens, a termografia de infravermelhos tem, também, algumas condicionantes. Estas devem ser tidas em conta de forma a que possam ser devidamente acauteladas, não se traduzindo, posteriormente, em valores de medição erróneos e, em última análise, em interpretações incorretas e propostas de intervenção inadequadas à situação real.

Primeiramente, atente-se no funcionamento da própria câmara termográfica. Esta capta a radiação emitida por um dado corpo, mas é inevitável que seja captada, também, radiação proveniente de outros corpos refletida nesse e radiação difundida pela própria atmosfera. A contribuição desta radiação difusa para a leitura final não é de fácil quantificação, mas poderá ser considerada desprezável na maior parte dos casos.

Todavia, há fatores que não poderão ser facilmente desprezados. A energia radiada por um dado corpo depende, essencialmente, da temperatura a que este se encontra. Após isso, no trajeto definido entre esse dado corpo e a câmara termográfica, fatores como a distância entre os mesmos, a humidade e a temperatura do ar irão definir uma maior ou menor absorção energética por parte da atmosfera envolvente. Assim, as propriedades emissivas e óticas de um dado corpo e da sua vizinhança têm de ser tidas em consideração (Asdrubali et al., 2012).

Relativamente à emissividade (ϵ) de um material, como já foi visto anteriormente, esta pode ser definida como a capacidade de emissão de energia de um dado corpo, através da sua superfície, por radiação infravermelha, quando comparada com um corpo negro que se encontra à mesma temperatura. Visto que todos os corpos que se encontrem a uma temperatura superior a zero Kelvin emitem energia ($\epsilon > 0$) e que, num corpo negro, a emissividade é máxima ($\epsilon = 1$), então pode dizer-se que, num corpo real:

$$0 < \epsilon \leq 1 \quad (2.8)$$

A emissividade varia com a temperatura, com o comprimento de onda, com o tipo de superfície e geometria do corpo e com o ângulo de observação/medição.

No que diz respeito à influência da temperatura, de forma a que não haja uma adulteração dos resultados de medição da emissividade, a temperatura ambiente deverá ser o mais constante possível. A variação térmica ambiente tem influências diferentes consoante a natureza do material em estudo (Gaussorgues, 1999). Se, por um lado, a vasta maioria dos materiais apresenta uma redução gradual da sua emissividade com o aumento da temperatura, por outro lado, materiais metálicos, por exemplo, comportam-se de forma contrária, pois a sua emissividade, por si só geralmente baixa, aumenta com o aumento da temperatura (Figura 2.5).

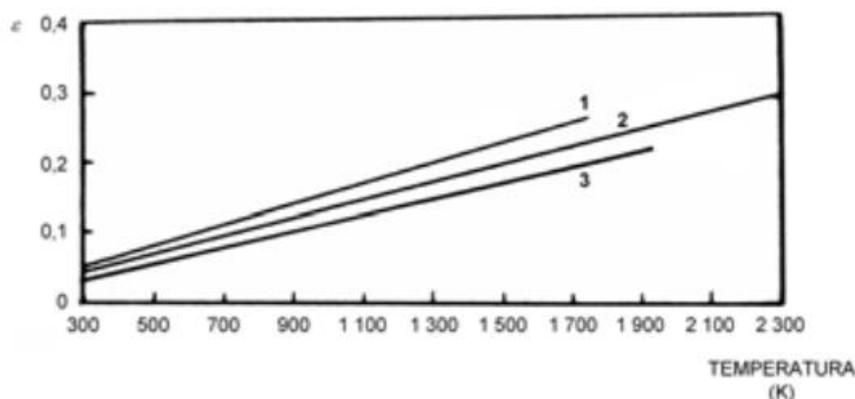


Figura 2.5 - Variação da emissividade com a temperatura, em alguns metais: (1) níquel, (2) tungsténio, (3) platina (adaptado de Gaussorgues, 1999).

Relativamente à influência do tipo de superfície do corpo, esta poderá ser analisada a par da sua condição. Assim, por norma, num dado material, se este apresentar uma superfície mais áspera ou rugosa, a sua emissividade será mais elevada do que se a sua superfície for lisa, polida, brilhante ou reflexiva. Deste modo, depreende-se que em materiais de baixa emissividade, como os metálicos, maior será a radiação infravermelha refletida, pelo que as dificuldades inerentes ao processo de medição experimental serão acrescidas.

Para além do tipo de superfície, a geometria do corpo também é relevante. Por um lado, formas convexas levam a uma diminuição do valor da emissividade, ao passo que formas côncavas levam ao seu aumento. Adicionalmente, ter-se-á de considerar a influência do estado de conservação do objeto. Num objeto metálico, por exemplo, à medida que o seu nível de oxidação aumenta, aumentará também a sua emissividade, ao passo que se o objeto se encontrar fracamente oxidado, a sua emissividade será mais baixa (Figura 2.6).

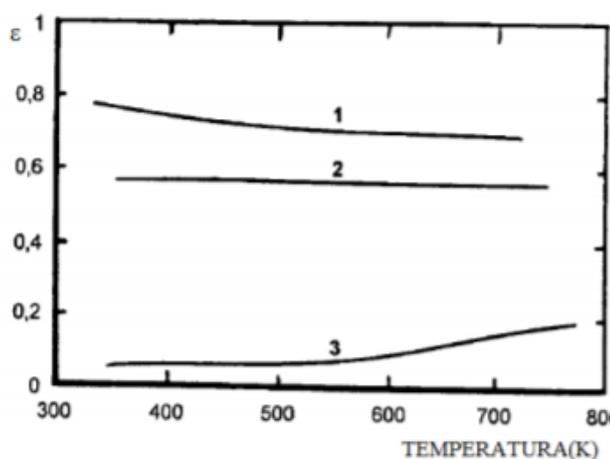


Figura 2.6 - Variação da emissividade de um metal com a influência do seu nível de oxidação: (1) cobre muito oxidado, (2) cobre ligeiramente oxidado, (3) cobre polido (adaptado de Gaussorgues, 1999).

No que toca à influência do comprimento de onda na variação da emissividade, esta está intrinsecamente associada ao estado físico em que se encontra o material em análise. Materiais no estado sólido apresentam uma variação lenta, ao passo que materiais no estado líquido ou gasoso apresentam oscilações mais súbitas (Barreira, 2004). Assim, em materiais metálicos, ao aumento do comprimento de onda corresponde uma diminuição da emissividade, sendo que o oposto acontece para materiais não-metálicos (Figura 2.7).

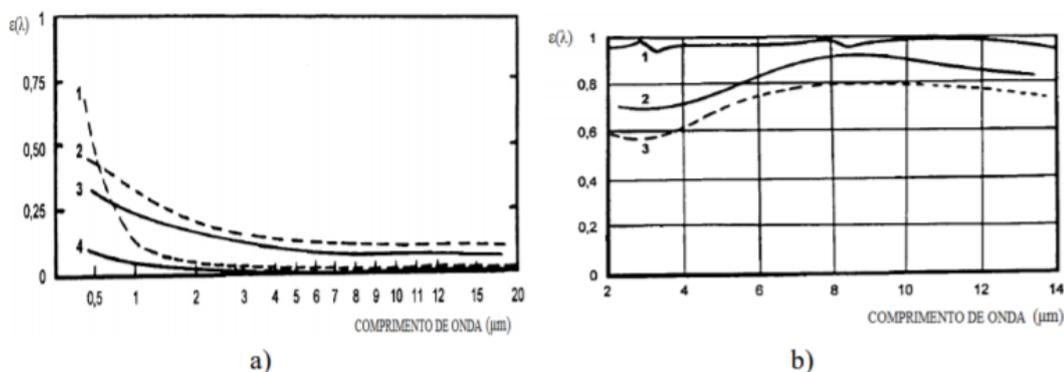


Figura 2.7 - Variação da emissividade de alguns materiais com o comprimento de onda: a) metais: (1) cobre, (2) ferro, (3) alumínio, (4) prata; b) não-metais: (1) água, (2) terra, (3) plástico (adaptado de Gaussorgues, 1999).

Em relação ao ângulo de observação, este pode distorcer a leitura do valor da emissividade de várias formas e considerando situações distintas (Figura 2.8). Caso se trate de uma superfície não-plana de um dado material, surge o fenómeno da emissividade aparente, uma vez que a leitura dos valores de emissividade varia de ponto para ponto em função do ângulo segundo o qual é efetuada a observação.

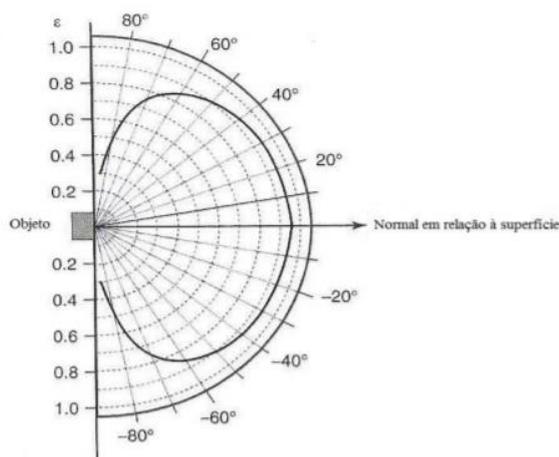


Figura 2.8 - Variação da emissividade de um material com o ângulo de observação (adaptado de Meola, 2012).

Materiais metálicos, cujos valores de emissividade são geralmente baixos, não apresentam uma grande variação do valor medido para ângulos compreendidos entre os 0° e os 40° em relação à normal à superfície, mas sofrem um aumento acentuado para ângulos superiores a esse valor. Materiais não-metálicos permitem uma leitura de valores bastante estável para ângulos compreendidos entre 0° e 60° em relação à normal à superfície, com uma variação praticamente inexistente na leitura de valores, embora tal não se verifique para ângulos superiores a 70°. Aí, observa-se uma descida brusca dos valores, tendendo para 0 (Barreira, 2004).

Importa também relevar a importância da refletividade dos materiais na aquisição e posterior análise de imagens termográficas. Como já foi referido anteriormente, as medições termográficas podem sofrer deturpações de várias espécies, sendo que uma delas advém da radiação refletida pela vizinhança do corpo em análise. Surge, assim, a necessidade de acautelar um parâmetro corretivo para as situações nas quais a influência desta radiação refletida não possa ser desprezada.

Com efeito, os materiais cujo valor de emissividade seja reduzido são propensos a serem bons refletores. Assim, e tendo em conta a análise da emissividade dos diferentes materiais feita anteriormente, depreende-se que os metais, especialmente aqueles dotados de uma superfície brilhante, são muito bons refletores. Em situações de medição termográfica, na presença de tais materiais ou noutros cenários em que se considere relevante, é importante o recurso ao conceito de valor da temperatura aparente refletida. De uma forma expedita, é colocado um material bastante refletor, como uma folha de alumínio, na superfície do elemento em estudo. Este deverá ser colocado em frente e paralelo à superfície em estudo. Ao apontar a câmara termográfica para a folha, é assumido o valor de emissividade igual à unidade ($\epsilon=1$) e recorre-se à função ponto ou área para efetuar a medição. Este termograma permitirá obter o valor da temperatura aparente refletida, parâmetro que será posteriormente utilizado para correção dos valores de temperatura superficial no termograma correspondente do elemento em estudo.

2.7 Outros Fatores Influenciadores na Medição Termográfica

Para além de todos os fatores óticos que poderão afetar uma medição termográfica, como referido no capítulo anterior, há também outros fatores que deverão ser tidos em consideração de forma a minimizar o erro introduzido nas medições, como é o caso dos fatores climáticos e dos atmosféricos.

A incidência de luz solar, a chuva, o vento ou turbulências e os gradientes térmicos são bons exemplos de fatores que podem levar a deturpações nos termogramas obtidos, pois influenciam o índice de refração do ar. Contudo, a maior fonte de erro nas medições termográficas é a atenuação atmosférica. Esta, estando invariavelmente presente em qualquer medição, depende das condições meteorológicas, da distância de observação e da gama espectral utilizada, levando à necessidade de correção de toda e qualquer medição que seja efetuada a uma distância do objeto superior a dez metros (Barreira, 2004).

Os gases constituintes da atmosfera, consoante a temperatura local, absorvem radiação, bem como algumas outras partículas que se possam encontrar em suspensão, deturpando, assim, a informação captada pela câmara termográfica.

Se por um lado, como foi referido, a influência do meio de transmissão da radiação não pode ser desprezada, por outro lado, não é menos importante a análise do próprio corpo em estudo. Num estudo termográfico, a diferença de temperatura entre o interior e o meio envolvente exterior é determinante para o fluxo de calor que irá atravessar um dado elemento construtivo, evidenciando, de uma forma mais ou menos clara, possíveis traços construtivos e patologias. Logo à partida, a temperatura ambiente afeta a leitura efetuada pela câmara termográfica, sendo que quer temperaturas demasiado altas, quer as demasiado baixas, instabilizam os sensores do equipamento de medição. Neste aspeto, o efeito de chaminé, o do vento e as correntes de ar são relevantes.

O efeito de chaminé leva ao aquecimento dos pisos superiores e ao arrefecimento dos pisos inferiores, devido às infiltrações provocadas nos primeiros e às exfiltrações provocadas nos últimos.

O vento provoca variações de pressão ao longo das fachadas: pressões positivas nas fachadas nas quais o vento incide e pressões negativas, também conhecidas como sucções, nas demais fachadas. As pressões positivas levam a infiltrações, ao passo que as pressões negativas levam a exfiltrações. Assim, este fluxo de ar gerado na superfície exterior da fachada leva a uma redução da sua resistência térmica superficial, conduzindo ao seu arrefecimento. As correntes de ar devidas, por exemplo, a grelhas de ventilação ou a janelas abertas, devem ser evitadas em situações de ensaio realizado no interior do edifício, em especial se a corrente de ar gerada incidir na zona em estudo.

Um outro fator a ter em conta é a humidade criada por condensações superficiais que, com o aumento da temperatura, pode levar ao posterior arrefecimento evaporativo, especialmente em zonas de ponte térmica, de alguma fissuração ou de isolamento deficiente, deturpando os resultados de medição (Mollman, 2010).

As condições meteorológicas do dia de medição são também um importante fator a ter em conta. Uma maior ou menor incidência solar, proporcionada por um dia mais ou menos nublado, afeta os resultados das transferências de calor através da envolvente do edifício. Deste modo, por norma, os ensaios exteriores são realizados durante o período noturno, ao passo que os ensaios interiores são realizados durante o período diurno.

Por último, as condições de sombreamento e existência, ou não, de fontes de calor externas devem também ser acauteladas. Por um lado, um edifício pode encontrar-se de tal forma sombreado que os valores de temperatura lidos na superfície da fachada encontram-se deturpados por fenómenos de transferência de calor gerados na mesma. Por outro, uma fonte de calor externa também pode desvirtuar a análise, especialmente se essa fonte tiver poder

radiativo suficiente, como por exemplo: máquinas que libertem calor no seu funcionamento, radiadores ou até lâmpadas. É conveniente que todos estes aparelhos sejam desligados antes do ensaio (Barreira, 2004).

2.8 Termografia de Infravermelhos: Pontos Fortes vs Pontos Fracos

Tendo em conta toda a exposição já feita da base científica, do funcionamento, da utilidade e de algumas particularidades relativas à TIV, afigura-se como pertinente contrapor alguns pontos fortes com pontos fracos desta técnica. Em qualquer ensaio experimental ou trabalho de campo, é tão importante perceber quais as vantagens do domínio e uso de determinado método, como as suas limitações e contra-indicações.

Logo à partida, a termografia apresenta-se como sendo uma técnica não destrutiva, não exigindo um contacto direto entre a câmara e a superfície do elemento em estudo. Permite, assim, efetuar uma análise não invasiva, com recurso a uma câmara portátil, não colidindo com o normal funcionamento do elemento em estudo. Para além disso, a câmara termográfica permite que essa análise seja feita em tempo real, com obtenção de informação e imagens de uma forma rápida, fácil e bastante segura (Figura 2.9). Esta análise permite identificar, de uma forma simples, mas bastante eficaz, diversos tipos de patologias. Todavia, o equipamento em questão implica, por norma, um investimento considerável, para além de exigir algum domínio na obtenção e interpretação de dados, especialmente caso se pretenda fazer uma análise quantitativa.



Figura 2.9 - Imagem térmica do campus da Universidade de Plymouth (Fox et al., 2014).

É importante referir, não obstante, que têm surgido novas opções de mercado mais acessíveis no que toca a equipamento de medição por infravermelhos, essencialmente devido aos incentivos globais na área da construção, pautados pela sustentabilidade e otimização do consumo energético, bem como devido aos avanços tecnológicos e redução de custos de produção. No entanto, atualmente, as técnicas de contacto continuam a ser mais fiáveis do que a TIV, uma vez que esta exige um conhecimento prévio da emissividade e da temperatura aparente refletida, para calibração, como já foi descrito anteriormente.

Mais ainda, o meio envolvente é uma constante preocupação numa análise que recorra à TIV. As condições climatéricas influenciam os fenómenos de transferência de calor de uma dada superfície e a presença de outros corpos na vizinhança poderá deturpar os resultados obtidos (Kylili et al., 2014).

Por último, a TIV permite obter uma grande quantidade de dados e com grande precisão em termos de flutuações de temperatura, o que é bastante útil, por exemplo, em situações de deteção de patologias em edifícios, possibilitando a deteção destas ocorrências numa fase incipiente das mesmas, podendo ser ainda passíveis de uma eventual correção. Todavia, a câmara termográfica não permite aferir a profundidade nem a espessura de uma dada anomalia. Além disso, uma análise rigorosa torna-se virtualmente impraticável caso se queira estudar uma superfície de maior dimensão, dadas as dificuldades inerentes ao aquecimento/arrefecimento uniforme da mesma (Taylor et al., 2013).

3 APLICAÇÕES DA TERMOGRAFIA DE INFRAVERMELHOS EM EDIFÍCIOS

Face a tudo o que foi exposto em relação ao método da TIV, quer em termos conceptuais, quer em termos práticos, torna-se interessante aferir qual o grau de extensão da aplicabilidade desta técnica no ramo da construção.

Desde o seu aparecimento, tem-se assistido a uma expansão global do uso da TIV no estudo de edifícios. Para além da aquisição do equipamento que permita uma análise termográfica, é necessário que o seu manuseador seja uma pessoa qualificada e experiente, de forma a que os resultados obtidos e a sua interpretação sejam uma verdadeira mais-valia. Assim, à medida que mais equipamentos foram desenvolvidos e profissionais qualificados foram sendo formados, mais exemplos de aplicação foram surgindo ao longo dos últimos anos.

3.1 Identificação de Elementos Construtivos

A termografia de infravermelhos está invariavelmente associada à possibilidade imediata de ver para além do humanamente possível. Assim, com a capacidade de examinar o ‘esqueleto’ de um determinado edifício, ficam expostas as suas características construtivas e arquitetónicas, facilitando de sobremaneira o trabalho de interpretação e esquematização do seu funcionamento estrutural e construtivo.

Quer a recolha de imagens seja feita pelo interior, quer o seja pelo exterior, a informação daí retirada pode revelar-se valiosa. Focando no exemplo de um teto do interior de uma divisão que, à primeira vista, não ofereceria informação relevante do que está para além do revestimento, é possível obter mais conhecimento do mesmo recorrendo a uma câmara termográfica de infravermelhos.

Assim, poder-se-ão obter mais informações relativamente ao tipo de laje aí construída ou quanto à natureza de outros materiais no interior (Figura 3.1).

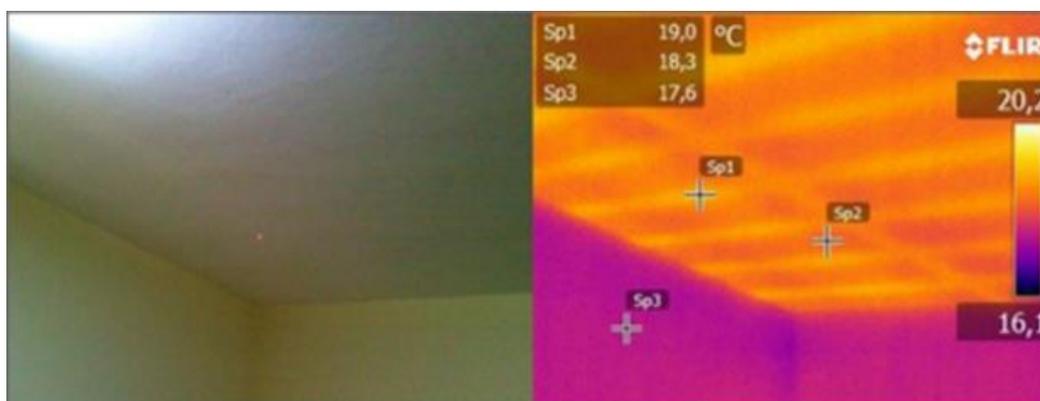


Figura 3.1 - Termograma de um teto, evidenciando a estrutura com uma laje de vigotas (Altoé & Filho, 2012).

Os resultados obtidos poderão ser igualmente interessantes e uma mais-valia para, por exemplo, a fase de diagnóstico e estudo de um edifício numa ação de reabilitação, especialmente no caso de edifícios mais antigos dos quais há pouca ou nenhuma documentação existente quanto a projetos de estruturas e/ou de arquitetura. Assim, um termograma pode ser uma solução simples e eficaz para, por exemplo, desvendar a tipologia estrutural treliçada de uma parede divisória (Figura 3.2).

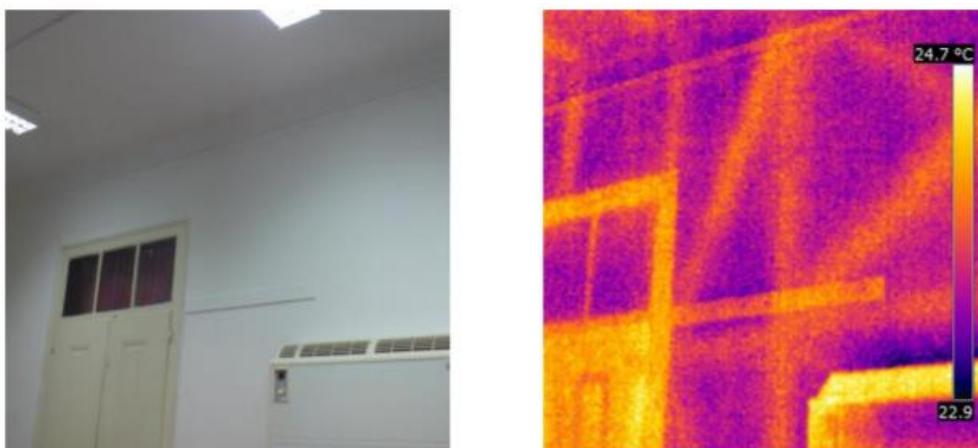


Figura 3.2 - Termograma evidenciando a tipologia de uma parede (Mendonça et al., 2013).

3.2 Pontes Térmicas e de Quebras em Isolamentos e Impermeabilizações

Uma das mais correntes aplicações da TIV prende-se com a possibilidade de quer pelo exterior, quer pelo interior, detetar diferentes tipos de anomalias funcionais a nível do comportamento energético. Por um lado, há, desde logo, a possibilidade de identificar zonas de ponte térmica. Por outro, são também detetáveis anomalias no isolamento térmico, por este não ter sido colocado em obra, pela sua deficiente colocação ou por degradação do mesmo por ação dos agentes atmosféricos e/ou bioquímicos.

A nível Europeu, as necessidades de aquecimento têm vindo a decrescer ao longo dos últimos anos, muito graças às diretivas que vêm sendo criadas no sentido de melhorar o desempenho energético da envolvente dos edifícios (Fox et al., 2014). Todavia, continua a ser comum o aparecimento de pontes térmicas.

No Inverno, as perdas de energia pela fachada podem sofrer um incremento de até 30% face ao que seria espectável numa situação de funcionamento regular, devido à existência de pontes térmicas (Theodosiou & Papadopoulos, 2008). Para além disso, o aparecimento destes pontos mais frágeis leva a que surjam, em torno dos mesmos, zonas diferencialmente arrefecidas, propiciando, por vezes, o desenvolvimento de colonizações biológicas. Estas, quando se encontram no interior de edifícios e estando sujeitas à natural circulação do ar, irão degradar as condições de salubridade do mesmo, podendo até levar a complicações respiratórias dos utilizadores (Ascione et al., 2013).

Exemplificando, em edifícios industriais ou agrícolas, o controlo rigoroso da temperatura ambiente é, não raras vezes, uma absoluta necessidade para poder cumprir quer a legislação em vigor e normas aconselháveis para a atividade, quer as metas de produção impostas. Simultaneamente, dado o elevado consumo energético usualmente registado neste tipo de edifícios, a procura por ferramentas que possam auxiliar nesse sentido, mitigando pontes térmicas, tem crescido.

Uma abordagem qualitativa da TIV pode ser mais do que suficiente para atestar o bom ou mau desempenho de determinados elementos. Por exemplo, é comum denotarem-se perdas energéticas elevadas ao nível dos caixilhos de portas e janelas, especialmente se estes forem metálicos sem nenhum isolamento complementar (Figura 3.3).

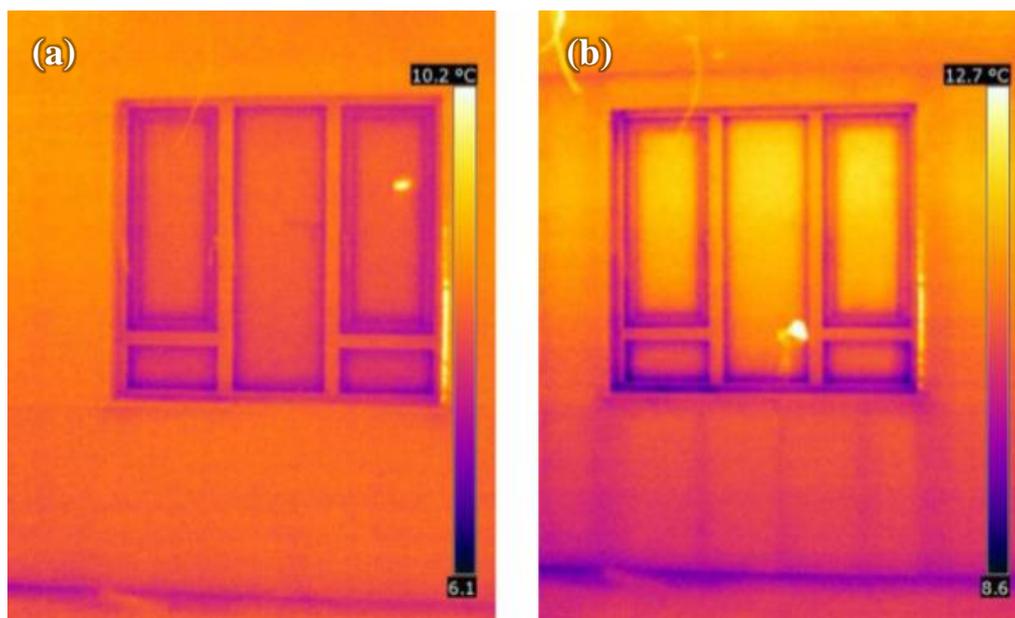


Figura 3.3 - Pormenor de uma imagem térmica de uma janela de uma habitação (a) antes do seu aquecimento e (b) após o seu aquecimento (Taylor et al., 2013).

Para além de possibilitar este tipo de análise mais imediata e expedita de pontes térmicas, há também propostas de abordagem mais robustas e, até, de tipificação de resultados. Assim, numa tentativa de quantificar o efeito das pontes térmicas num edifício, foi criado o fator de incidência de pontes térmicas (Bianchi et al., 2014).

Aproveitando muito do conhecimento acumulado de análises quantitativas passadas, foi proposta uma abordagem de aferição do fluxo que ocorre numa determinada área de ponte térmica, resultando no cálculo do fator de incidência de pontes térmicas, I_{tb} . Para tal, carecem

de medição vários parâmetros, tais como a temperatura do ar no interior e os fluxos de calor localizados nas zonas da envolvente afastados das pontes térmicas (Bianchi et al., 2014).

Numa exemplificação real, foi testada a abordagem num edifício protótipo perfeitamente controlado e monitorizado em condições inverniais, tendo sido feita a recolha permanente de condições climatéricas, comportamento microclimático e consumo energético para aquecimento (Figura 3.4).



Figura 3.4 - Edifício protótipo utilizado para a demonstração experimental do cálculo do fator de incidência de pontes térmicas, I_{tb} (adaptado de Bianchi et al., 2014).

Assim, a análise efetuada consistiu na conjugação de vários processos: recolha de uma multiplicidade de imagens térmicas, monitorização contínua das condições do interior e exterior, pós-processamento de dados e análise quantitativa final.

A observação das imagens térmicas recolhidas possibilitou a identificação de vários tipos de pontes térmicas existentes, como no caso de uma ligação entre parede e teto (Figura 3.5).

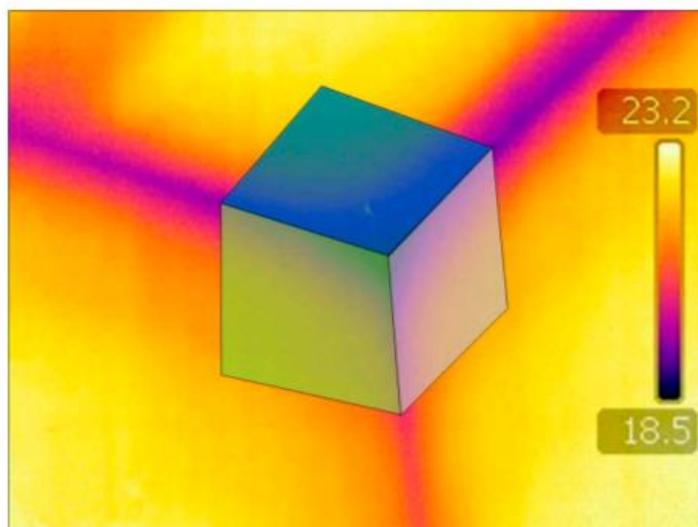


Figura 3.5 - Imagem de termografia de infravermelhos da ponte térmica existente na esquina de ligação parede-teto, com a esquematização 3D da mesma sobreposta (Bianchi et al., 2014).

Posteriormente, para cada tipo de ponte térmica identificado foi calculado o respetivo índice de incidência, que descreve o rácio entre as perdas térmicas calculadas a partir da temperatura medida pela câmara de termografia e as perdas térmicas hipotéticas da mesma área de parede, quando calculadas sem considerar os efeitos das pontes térmicas. Como uma imagem térmica está associada a um simples vetor ou matriz de dados de temperatura, esta pode ser facilmente exportada para uma folha de cálculo automático, encontrando de uma forma simples e eficaz o valor de I_{tb} . A cada valor do índice correspondente a um tipo de ponte térmica, foi associada uma determinada área de influência de forma a poder, assim, calcular as perdas energéticas correspondentes. Estes valores foram, por fim, comparados com o consumo energético da bomba de calor que aqueceu o edifício protótipo durante toda a experiência. Os resultados revelaram-se fiéis à realidade, sendo esta uma abordagem com um elevado potencial de ser aplicada em avaliações de pontes térmicas *in situ*.

Em relação a situações de quebras no isolamento térmico, estas podem ocorrer, como já foi referido, por vários motivos, tais como deficiente colocação do isolamento aquando da

construção do edifício, degradação do material ao longo do tempo ou pura e simplesmente por este não ter sido colocado de todo.

O recurso à termografia de infravermelhos pode possibilitar a deteção rápida, simples e eficaz deste tipo de situações. Durante a estação de aquecimento, por exemplo, a inexistência de isolamento em secções de uma fachada de um edifício é facilmente detetável, uma vez que será perdida mais energia sob a forma de calor através destas, resultando numa mancha colorida contrastante com o restante termograma (Figura 3.6).



Figura 3.6 - Vista de um edifício em Winterthur, Suíça, e respetivo termograma durante a estação de aquecimento, evidenciando (a verde) as quebras de isolamento na fachada (adaptado de Lehman et al., 2013).

Com a devida parametrização da situação, com o estabelecimento de adequadas condições de fronteira da envolvente e dos parâmetros físicos dos materiais em questão, é possível estudar situações potencialmente complexas de quebras de isolamento em fachadas, nas quais o fluxo térmico é multidimensional e de difícil interpretação inicial, como por exemplo em situações de ligação de parede-teto (Figura 3.7). Se a técnica de termografia for complementada por uma modelação matemática de transferência de calor, é possível abordar de forma muito eficaz e assertiva uma dada situação, quer na fase de diagnóstico, quer numa fase posterior de inspeção (Taylor et al., 2014).

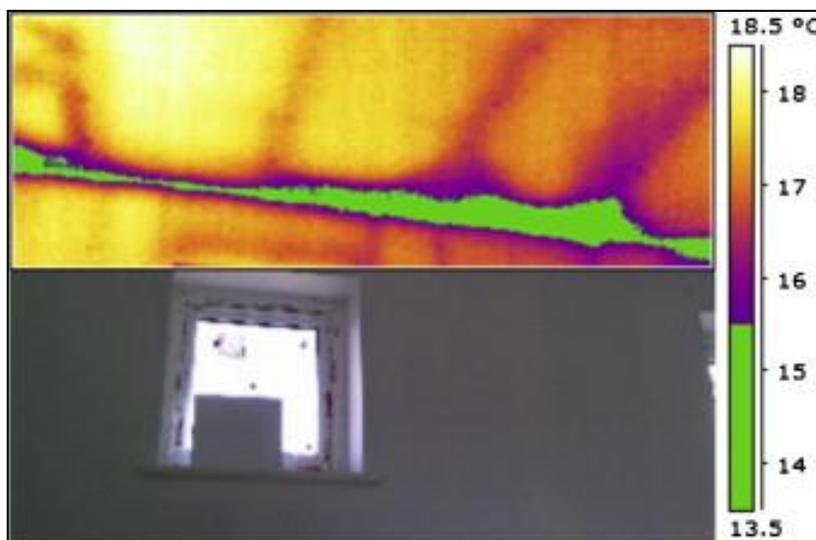


Figura 3.7 - Zonas de quebra de isolamento num junta parede-teto (Taylor et al., 2014).

Analogamente, tem sido cada vez mais recorrente o uso da termografia como uma importante ferramenta na localização de falhas na impermeabilização de coberturas em terraço.

Utilizando a termografia de infravermelhos, é possível detetar a presença de água e/ou ar entre o suporte e a impermeabilização (Figura 3.8). Foi comprovado, em laboratório, que a fiabilidade da deteção deste tipo de anomalias requer, no entanto, a imposição de um fluxo térmico nas superfícies em estudo. Em contexto laboratorial, tal consiste na utilização de um dispositivo artificial de aquecimento. Em contexto real, *in situ*, esse aquecimento pode dar-se por ação da radiação solar, estando dependente de condicionantes inerentes ao método da TIV anteriormente referidas, tais como a as condições de exposição solar e de sombreamento do local e o ângulo de observação.

Os empoamentos na camada impermeabilizante, formando bolsas de ar, são detetáveis por serem zonas de fraca inércia térmica, aquecendo e arrefecendo mais rapidamente do que a área envolvente. Por outro lado, as zonas húmidas também são facilmente detetáveis, mas pela razão

oposta. Estas têm uma inércia térmica elevada, aquecendo e arrefecendo mais lentamente do que a zona que as envolve (Melrinho et al., 2015).

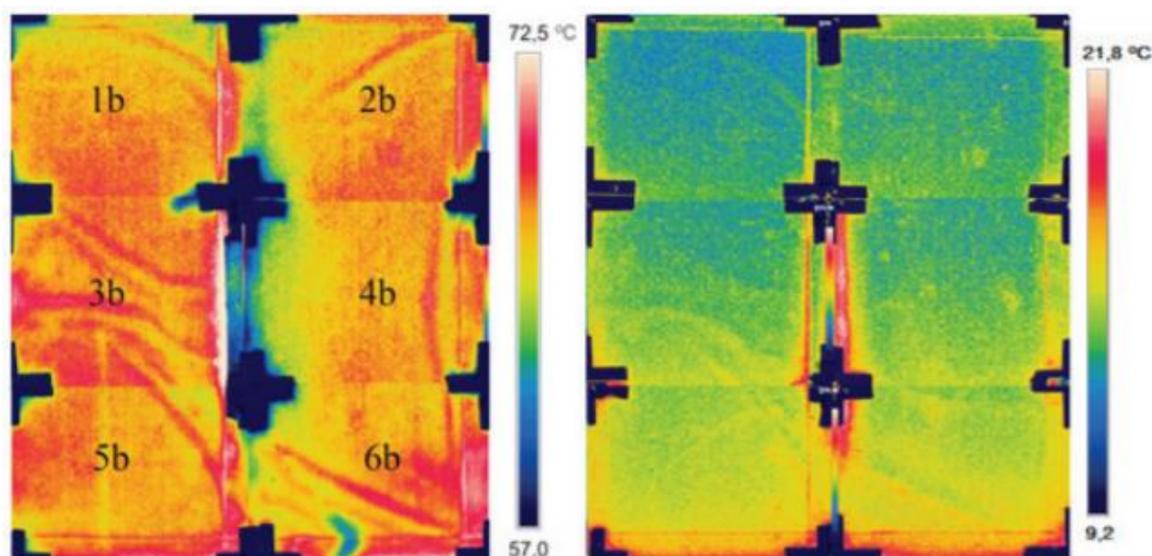


Figura 3.8 - Termograma de um provete de ensaio, com deteção de empolamentos no período de aquecimento (imagem da esquerda) e deteção de água no período de arrefecimento (imagem da direita) (Melrinho et al., 2015).

3.3 Humidade e Fissuração

Na inspeção de edifícios é comum deparar-se com situações de fissuração e de humidade, sendo que, não raras vezes, estas poderão ocorrer em simultâneo, uma vez que os fenómenos podem potenciar-se mutuamente.

Em situações de infiltrações de água da chuva, humidade ascensional ou outro tipo de patologias relacionadas com humidade, a sua deteção num termograma será evidenciada pelo aparecimento de manchas contrastantes com a sua envolvente (Figura 3.9). Geralmente, estas manchas apresentam uma temperatura mais baixa, frequentemente devido à maior

condutividade térmica da água em relação aos materiais usualmente usados na construção (Mendonça et al., 2013).

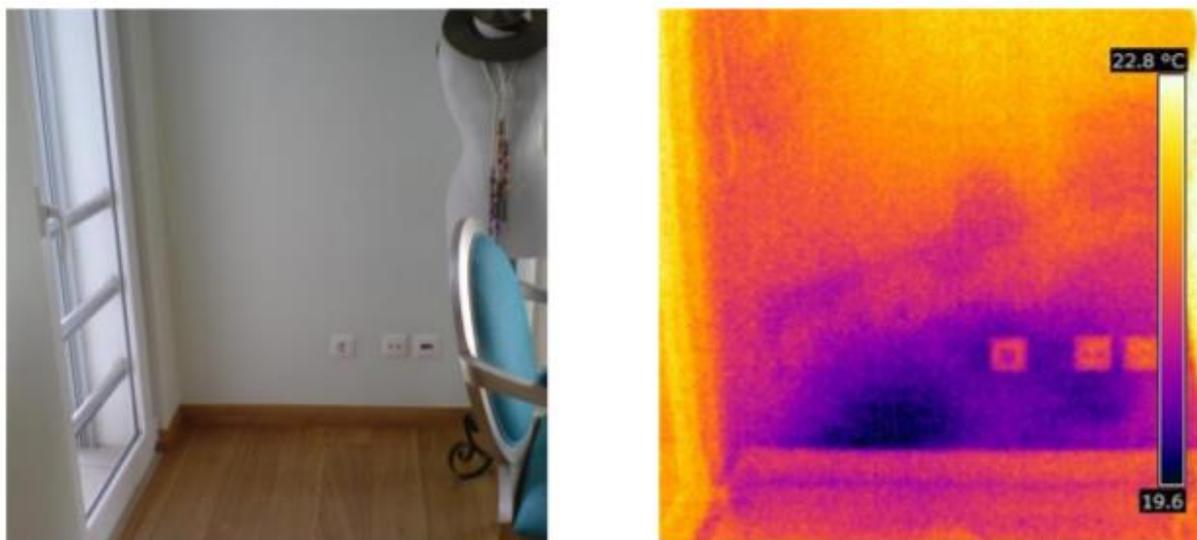


Figura 3.9 - Detecção de uma infiltração não visível numa parede divisória de um apartamento de habitação, evidenciada pela mancha azulada do termograma (Mendonça et al., 2013).

Em patologias relacionadas com humidade, a TIV é uma ferramenta cada vez mais utilizada, podendo ser complementada com o uso de um humidímetro portátil. Recorrendo a uma análise quantitativa, é possível localizar a evaporação numa dada superfície, o que permite estimar os níveis de humidade na mesma ou no seu interior e obter mapas coloridos das zonas húmidas (Figura 3.10). É possível dar uma resposta com precisão, sabendo que a temperatura à superfície dos locais afetados decresce e sabendo também qual o ritmo evaporativo, estando este intrinsecamente ligado à velocidade de mudança de temperatura. Tudo isto, conjugado com o facto de as situações de humidade apresentarem padrões bastantes característicos, quando observadas numa imagem térmica, permite caracterizar fielmente situações patológicas de humidade (Grinzato et al., 2010).

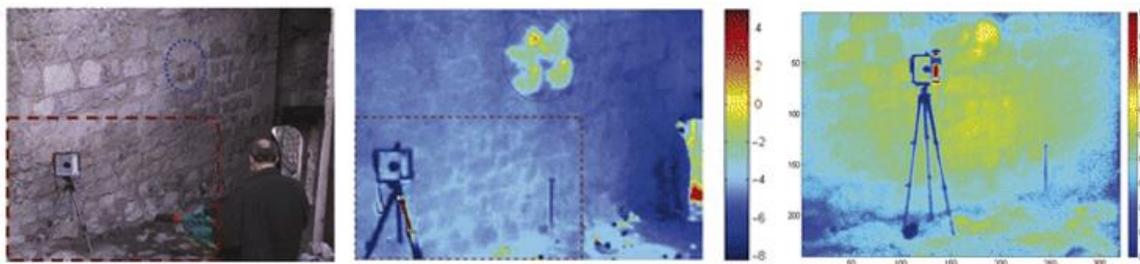


Figura 3.10 - Avaliação de situações de humidade, evidenciada pelas manchas amarelas, em parede de alvenaria no Castelo de Stenico, Itália (Grinzato et al., 2010).

Relativamente a casos de fissuração, o seu aparecimento, de uma forma geral, propicia a circulação desimpedida de ar, arrefecendo as zonas onde ocorre. As fissuras de maior dimensão são de fácil identificação visual, podendo ser analisadas quantitativamente. As fissuras ramificadas, microfissuras e outros tipos de fissuras de menores dimensões são também identificáveis visualmente num termograma, mas a sua análise em termos quantitativos apresenta um maior grau de dificuldade (Bauer et al., 2016).

Esta possibilidade é explorada, por exemplo, em contexto de inspeção de edifícios após a ocorrência de um terramoto, onde é necessário averiguar quais os danos causados à estrutura. Para tal, é preferível uma abordagem não destrutiva e que permita aferir o estado do edifício com o maior nível de detalhe e rigor possível. Tal acontece numa análise termográfica (Figura 3.11).

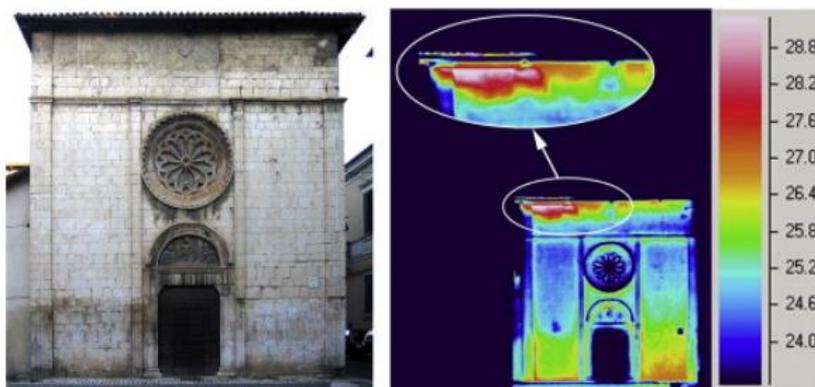


Figura 3.11 - Termograma evidenciando os danos de fissuração causados pelo terramoto em L'aquila, Itália (2009), na Igreja de Santa Maira de Roio, em particular no canto superior esquerdo da fachada frontal (adaptado de Bisegna et al., 2014).

3.4 Descolamento de Cerâmicos em Fachadas

A análise termográfica tem aplicação também no estudo de patologias e comportamento de fachadas de edifícios correntes. Destacamentos de material, mesmo que invisíveis a olho nu, podem ser identificáveis numa imagem térmica.

Numa parede de alvenaria rebocada, por exemplo, uma vez que se cria uma camada de ar entre os dois materiais aquando do destacamento do reboco, há um acréscimo de resistência térmica pontual nesse local, alterando o padrão de distribuição de temperaturas. Assim, de uma forma não destrutiva, uma simples análise qualitativa é geralmente eficaz para a deteção de descolamento de material. Este fenómeno é muito comum nas fachadas dos edifícios, tendo sido verificado, em laboratório, que a temperatura das zonas com destacamento é superior à envolvente quando sujeitas a aquecimento, e inferior em fases de arrefecimento (Freitas et al., 2014). Esta é uma importante evidência que sustenta a possibilidade de recorrer a termogramas para identificar zonas de destacamento que, de outra forma, seriam provavelmente impercetíveis à vista desarmada (Figura 3.12).

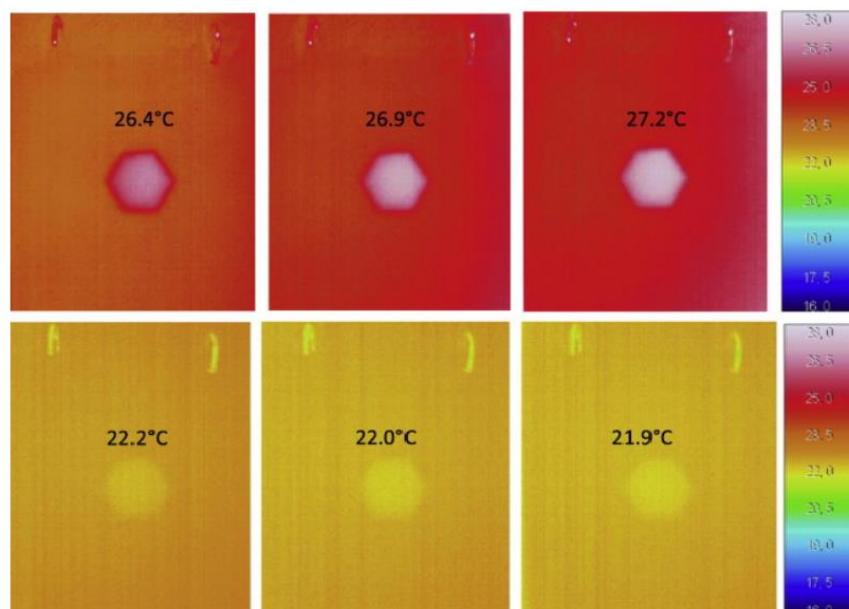


Figura 3.12 - Termogramas na fase de aquecimento (fila superior) e de arrefecimento (fila inferior), com a indicação da temperatura na zona de destacamento, evidenciada por uma mancha (adaptado de Freitas et al., 2014).

Em contexto real, este tipo de análise realizado *in situ* revela-se, conforme seria expectável, bastante útil, podendo optar-se por uma abordagem a uma escala considerável (Figura 3.13).

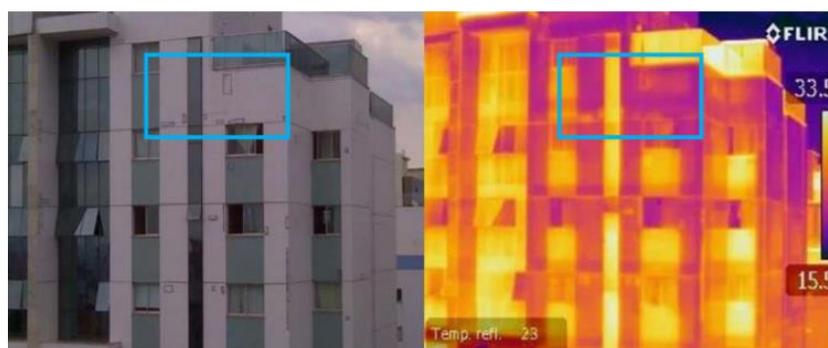


Figura 3.13 - Inspeção termográfica da totalidade da fachada principal de um edifício residencial em Águas Claras – DF, Brasil, com algumas manchas evidenciando destacamento incipiente de material (dos Santos, 2018).

3.5 Fugas em Pavimentos Radiantes e Canalizações

O recurso à termografia permite visualizar, com boa precisão, o traçado completo da rede de um pavimento radiante (Figura 3.14). Para além disso, possibilita também a deteção de fugas na rede, permitindo uma intervenção assertiva e localizada para a resolução do problema. Assim, evita-se uma abordagem demasiado intrusiva, com eventuais danos de grau e extensão desnecessários.



Figura 3.14 - Visualização do traçado da rede de um pavimento radiante, num termograma (Mendonça et al., 2013).

Analogamente, a deteção de ramais de canalizações e de potenciais fugas nas mesmas, em particular nas tubagens de água quente, é facilitada recorrendo a um termograma. O contraste da temperatura da água circulante, em comparação com a parede envolvente, facilita uma interpretação clara do traçado da rede (Figura 3.15).

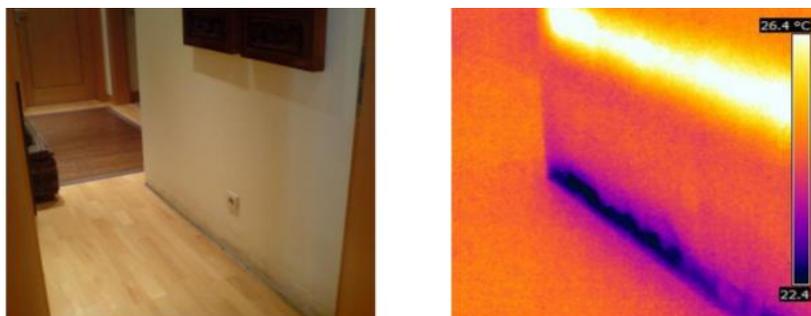


Figura 3.15 - Visualização das tubagens da rede de água quente (Mendonça et al., 2013).

3.6 Inspeção de Estruturas em Betão Armado

O betão e as argamassas são materiais utilizados na construção há milhares de anos, tendo a sua utilização sido amplamente explorada pela civilização Romana. Em Portugal, as obras em betão armado estendem-se desde edifícios residenciais e de escritórios a pontes e barragens, um pouco por todo o país, sendo o método mais correntemente aplicado na construção (Appleton, 2005).

Uma estrutura em betão armado corretamente executada apresenta um período de vida útil expectável de, por norma, 50 anos, sem que haja patologias relevantes a observar. Todavia, a partir do momento em que estas comecem a aparecer, a sua evolução pode progredir a um ritmo elevado, pelo que será prudente a realização de atividades periódicas de inspeção e manutenção. O recurso ao método da TIV para inspeção de estruturas em betão armado já data de há mais de 30 anos, sendo amplamente utilizado na América do Norte, tendo atestado a sua proficiência como método não destrutivo mais adequado para deteção de patologias estruturais ou de outro tipo (Figura 3.16). No entanto, esta técnica mede apenas as temperaturas superficiais, pelo que é preciso ter em conta que a temperatura superficial de um corpo em betão depende da sua configuração interna, das condições da superfície e do meio ambiente (Mendonça, 2005).

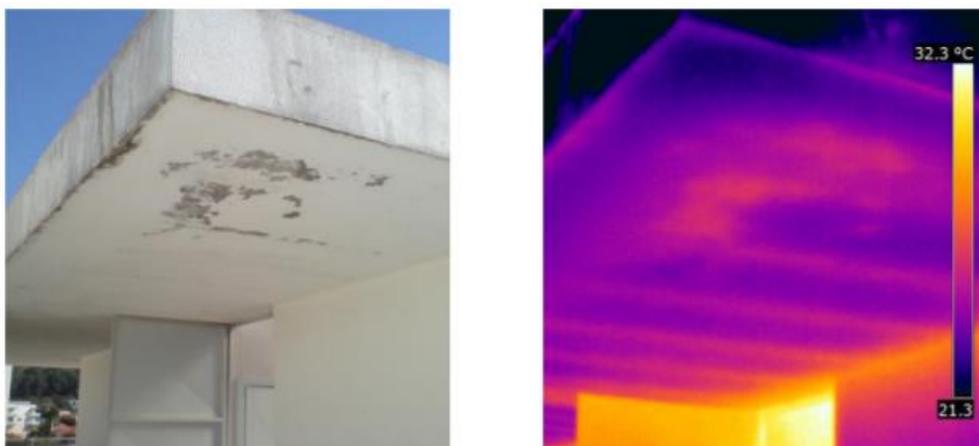


Figura 3.16 - Análise de uma situação de infiltração numa laje de vigotas de betão (Mendonça et al., 2013).

De forma a poder aferir a profundidade de certas patologias, podendo assim caracterizá-las com maior exatidão, podem ser associados ensaios de medição por radar nessas zonas específicas, complementando o método da TIV.

O recurso à termografia de infravermelhos para inspeção de elementos em betão armado tem vindo a ser investigado através de ensaios laboratoriais, permitindo tirar ilações quanto à sua adequação. É também possível ensaiar novos compostos e quantificar a melhoria no desempenho térmico, por exemplo, que estes conferem à solução final. Em contexto laboratorial, sujeitam-se amostras a condições de temperatura extremas, tornando ainda mais evidente a mais valia técnica da TIV de forma a atestar os níveis de desempenho das soluções ensaiadas. Por exemplo, é possível realizar ensaios comparativos entre elementos de betão de alta resistência com e sem adição de fibras de polipropileno (Figura 3.17).

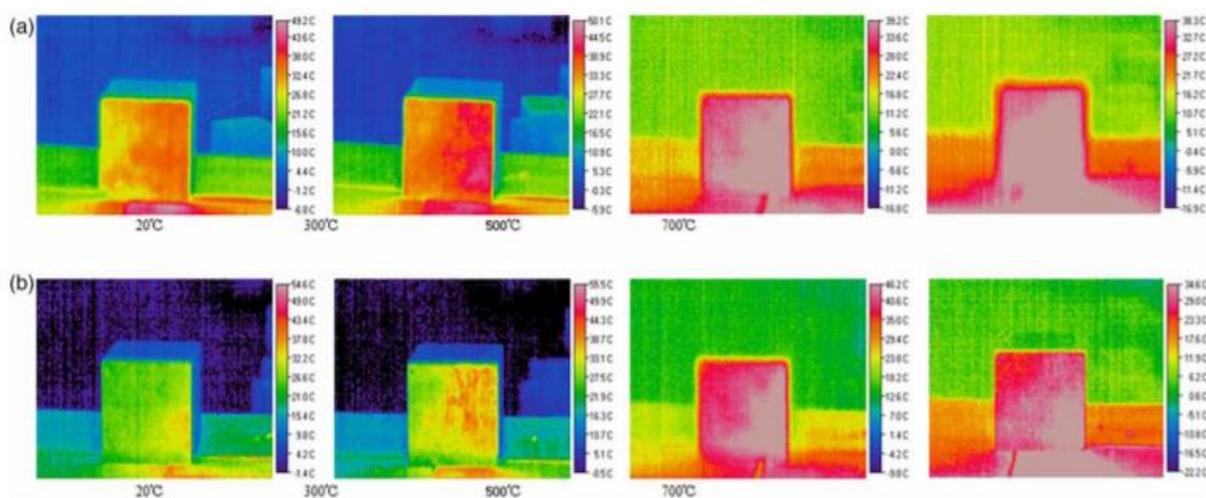


Figura 3.17 - Termogramas de provetes de betão de alta resistência a) sem adição de fibras de polipropileno, b) com adição de fibras de polipropileno (Du et al., 2015).

As imagens térmicas à temperatura ambiente (20° C) ou à temperatura de 300°C são significativamente diferentes das registadas a temperaturas mais elevadas (500-700°C). Isto deve-se ao aparecimento de fendilhação no betão por dilatação dos seus componentes, resultando numa acumulação de energia sob a forma de calor nessas zonas. Esta acumulação

acaba por se generalizar mais facilmente no provete de betão sem adição de fibras de polipropileno (Figura 3.16 a) do que no provete de betão com adição de fibras de polipropileno (Figura 3.16 b). Tal é facilmente concluído analisando os termogramas obtidos, através de uma simples comparação do padrão colorido resultante: a cor mais branca na face do provete sem aditivos sugere uma maior acumulação de energia sob a forma de calor e, portanto, um pior desempenho térmico (Du et al., 2015). Assim, comprova-se a aplicabilidade e utilidade do método da termografia de infravermelhos como ferramenta de aferição de desempenho de elementos em betão.

4 METODOLOGIA

4.1 Caso de Estudo

Na componente experimental deste trabalho utilizou-se a termografia de infravermelhos no estudo do comportamento térmico de uma fachada de um edifício residencial, construído *circa* 1960, em Viseu, Portugal. Em particular, analisou-se uma zona de janela voltada a Este (Figura 4.1), com ênfase dado à sua caixa de estore. Foi tida especial atenção para com as áreas limítrofes com a zona corrente da fachada, de forma a poder averiguar e compreender as pontes térmicas aí existentes.

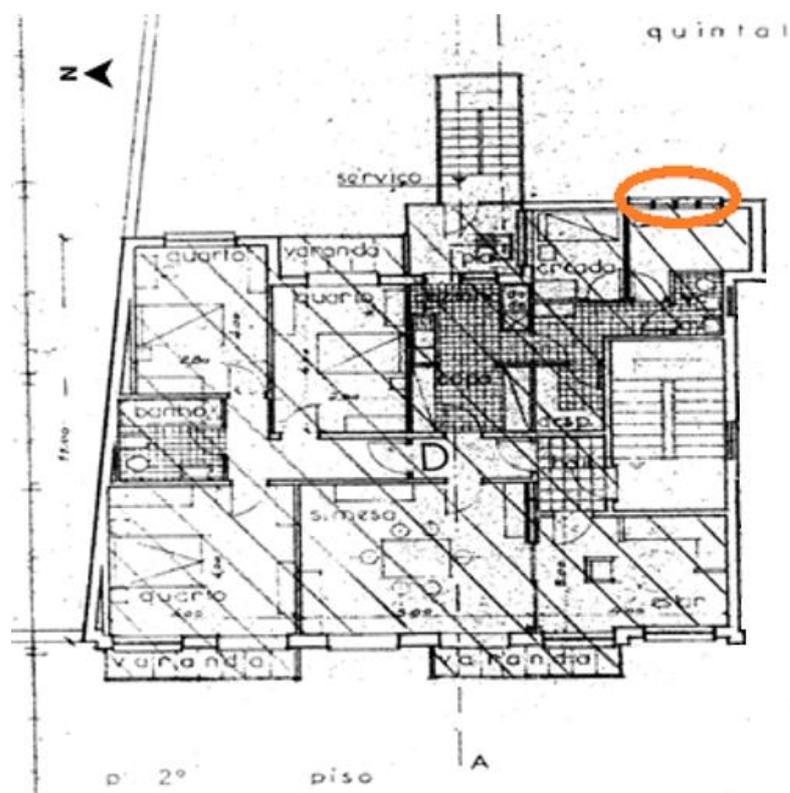


Figura 4.1 - Planta do apartamento onde se encontra a zona em estudo, destacada a laranja.

A zona em análise corresponde a uma janela de um escritório. É uma janela de dupla portada de correr, com vidro simples e caixilharia em madeira maciça de mogno (Figura 4.2).



Figura 4.2 - (a) fotografia do caso de estudo, correspondente à área em torno da janela à direita; (b) esquematização do caso de estudo e dimensões relevantes.

Acoplado a esta janela, de dimensões 1200 mm x 1180 mm, encontra-se um estore branco de rolo tradicional, em PVC, com caixa de estore embutida na parede, situada acima da janela, a toda a extensão da mesma, de secção 250 mm x 250 mm. A Figura 4.3 mostra um corte esquemático cotado da zona da janela e caixa de estore. O peitoril da janela é em pedra

mármore, com saliência de 2 cm da face da parede quer para o interior, quer para o exterior, não apresentando pingadeira.

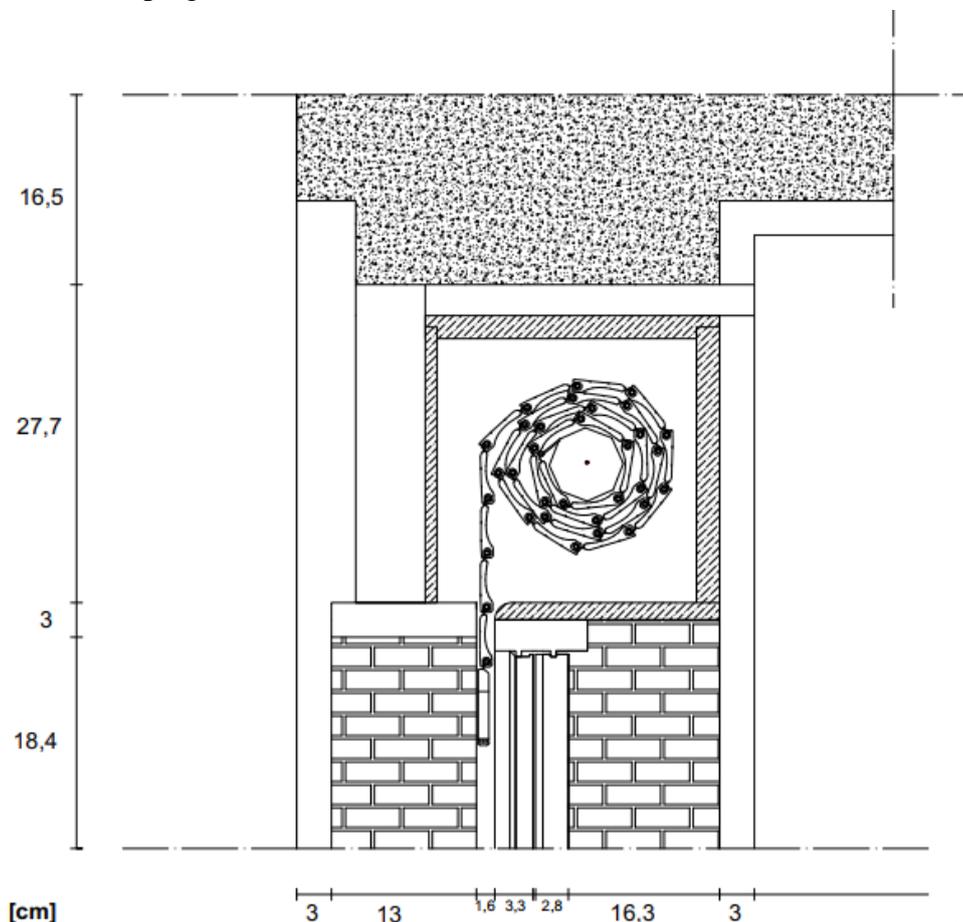


Figura 4.3 - Corte transversal da zona superior da janela, caixa de estore e início do piso superior (viga + laje em betão armado), referenciando dimensões relevantes (em centímetros).

A parede da zona em estudo apresenta uma composição pesada, típica da construção em Portugal na década de 60, com fiadas de tijolo cerâmico de 20 cm no exterior e de 11 cm no interior, separadas por uma camada de 6 cm de caixa de ar não preenchida. Quer a face interior, quer a face exterior apresentam uma camada de 3 cm de reboco cimentício (Figura 4.4).

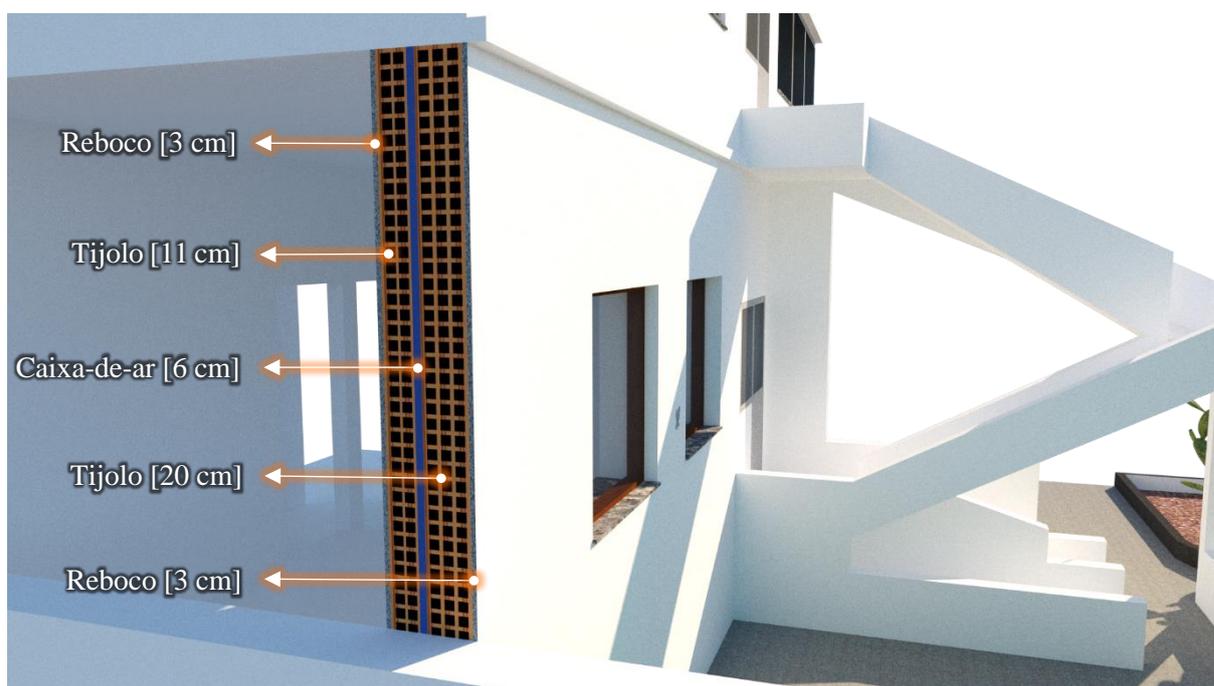


Figura 4.4 - Representação esquemática da composição da parede em estudo.

4.2 Procedimento do Ensaio

De forma a poder estudar as variações de temperatura superficial, o recurso a uma análise termográfica quantitativa afigura-se como uma abordagem eficaz, uma vez que esta técnica pode ser utilizada para diversos fins, entre eles a análise de pontes térmicas numa fachada de um edifício.

Todavia, uma análise quantitativa carece de alguns cuidados adicionais de forma a legitimar os resultados obtidos. Assim, a calibração do equipamento de medição e recolha de imagem deve ser efetuada conforme as normas aplicáveis, de forma a que a informação possa ser tratada *a posteriori* em computador, uma vez que, neste tipo de análise, a informação não é tratada *in situ* (Kirimtat et al., 2018).

De forma a produzir melhores resultados, a diferença de temperaturas entre o interior e o exterior deveria ser não inferior a 7 °C (Tejedor et al., 2018). Todavia, tendo em conta a incontabilidade climática, as particularidades construtivas da fachada em análise e o facto de se recorrer a uma abordagem passiva, tal diferença de temperaturas pode não ser sempre possível de garantir.

Em primeira instância, de forma a preparar os ensaios a realizar, procedeu-se à definição dos pontos exatos nos quais se faria a recolha dos termogramas, quer no interior da habitação em estudo, quer no seu exterior, de forma a captar toda a área pretendida. Foram também aí colocados sensores portáteis de humidade e temperatura, devidamente programados para um registo minuto a minuto. Foram colocados dois sensores no interior e um no exterior, de modelos diferentes, mas ambos com capacidade de armazenamento de dados (*data logger*). Todos os sensores foram previamente testados em conjunto, no mesmo ambiente, para comprovar a fiabilidade das suas leituras.

Posteriormente, de forma a poder calcular a temperatura refletida no momento de captura do termograma, recorreu-se a duas folhas de papel de alumínio: uma a ser colocada no interior (Figura 4.5 a), outra no exterior, numa posição diametralmente oposta (Figura 4.5 b). Estas foram sucessivamente amarrotadas e esticadas, de forma a criar uma superfície o mais dispersiva possível. Após o processo, as folhas foram colocadas na parede, numa zona próxima do local em análise, mas que fosse termicamente plana, isto é, uma zona onde não se encontrassem heterogeneidades térmicas relevantes (zona corrente). A fixação das folhas de alumínio foi feita utilizando fita isolante, que para o efeito funcionará como um corpo negro, aguardando-se pelo menos 10 minutos para que os dois materiais atinjam o equilíbrio térmico. Este procedimento permite calcular a temperatura refletida, parâmetro a utilizar posteriormente na análise dos termogramas.

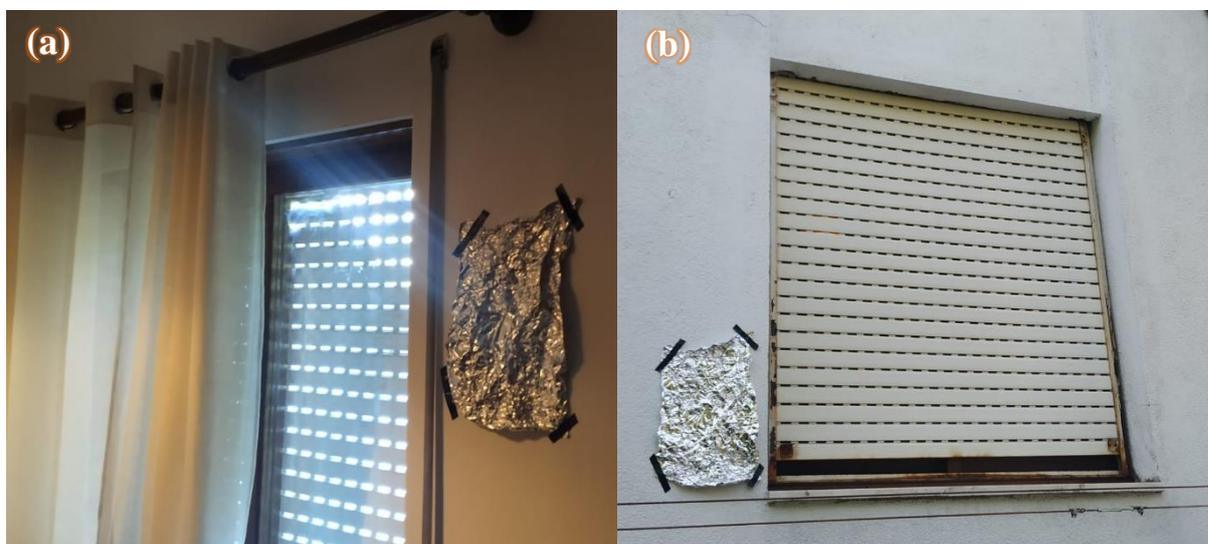


Figura 4.5 - Colocação da folha de papel de alumínio (a) na parede interior da habitação (b) na parede exterior.

A câmara foi fixa sempre na mesma posição ao longo do ensaio, sendo esta marcada no pavimento com um pedaço de fita isolante, a 1,5 m da parede. Depois de concluída a preparação, procedeu-se ao registo termográfico horário ao longo de 17 horas, repetindo-se a seguinte sequência de 4 registos:

- Termograma da folha de alumínio no interior;
- Termograma da janela + caixa de estore + zona corrente (s/ folha de alumínio) no interior;
- Termograma da folha de alumínio no exterior;
- Termograma da janela + caixa de estore + zona corrente (s/ folha de alumínio) no exterior.

Finalizada esta fase de recolha de dados *in situ*, procedeu-se ao tratamento numérico dos termogramas. Assim, primeiramente, foram transferidos os dados de temperatura e humidade relativa provenientes dos dois sensores colocados no interior recorrendo à aplicação de telemóvel *MyAmbience* da *Sensirion*. Esta permitiu uma exportação rápida e fácil dos dados recolhidos, através de um ficheiro em formato EDF, passível de ser convertido para formato CSV. Os dados recolhidos pelo sensor colocado no exterior foram transferidos por cabo para o computador, ligado diretamente ao aparelho, e lidos através do software *HOBOWare Pro* da *Onset*. Todos os valores recolhidos foram exportados para *Excel* de forma a poderem ser organizados e analisados.

Seguidamente, foram transferidos para o computador os termogramas capturados, procedendo-se ao tratamento dos mesmos recorrendo ao software *FLIR Tools* da *FLIR*. Para cada um dos termogramas recolhidos, foi necessário introduzir a parametrização adequada: valores de temperatura e humidade relativa ambiente (lidos pelos sensores) e distância da câmara termográfica ao elemento alvo.

No *FLIR Tools*, começou-se por analisar os termogramas das folhas de papel de alumínio. Nestes termogramas, foi introduzido um valor de emissividade igual a 1,0 (emissividade total) e a área correspondente ao papel foi delimitada por um retângulo, recorrendo às ferramentas de desenho do software. Deste modo, o valor de temperatura lido nesta área será a temperatura refletida, parâmetro que se utilizará como *input* no termograma correspondente ao mesmo instante temporal da área em estudo (janela + caixa de estore + zona corrente).

Posteriormente, analisaram-se os termogramas obtidos ao longo de todo o ensaio. Esta análise foi subdividida em três fases (Quadro 4.1), sendo que as duas primeiras estavam estabelecidas previamente ao início dos trabalhos e a terceira decorreu da natureza dos resultados encontrados, afigurando-se como apropriada e justificada a sua realização.

Quadro 4.1 - Caracterização das fases de análise dos termogramas recolhidos.

FASE	TAREFAS A REALIZAR
FASE 1	<ul style="list-style-type: none"> • desenho de um gráfico com as temperaturas interior ambiente e exterior ambiente, bem como a diferença entre elas ao longo do ensaio; • interpretação do comportamento térmico da zona da caixa de estore ao longo do ensaio, representado pela sua temperatura superficial média, recorrendo a esquemas geométricos em formato de caixa (retangular), linha e ponto, pelo interior e pelo exterior;
FASE 2	<ul style="list-style-type: none"> • construção de gráficos com os valores de temperatura superficial média, obtidos com formato de caixa, na zona de ponte térmica e na zona corrente, no exterior e no interior; • construção de gráficos de dispersão e respetiva correlação linear entre a diferença das temperaturas ambiente exterior e interior vs temperatura superficial média registada na zona de ponte térmica; • desenho de um gráfico de dispersão e respetiva correlação linear entre as diferenças de temperatura ambiente exterior e interior vs diferenças de temperatura na zona de ponte térmica exterior e interior; • desenho de um gráfico de dispersão e respetiva correlação linear entre as diferenças de temperatura da zona de ponte térmica e a zona corrente interior vs as diferenças de temperatura entre a ponte térmica e a zona corrente exterior; • desenho de um gráfico de dispersão e respetiva correlação linear entre a temperatura superficial média na zona de ponte térmica interior e a temperatura superficial média na zona de ponte térmica exterior;
FASE 3	<ul style="list-style-type: none"> • análise da variação da temperatura superficial média interior e exterior, na zona da caixa de estore, ao longo de um corte longitudinal e de um corte transversal da mesma, para um instante representativo do ensaio (instante I₈);

Após realizada esta análise e desenhados todos os gráficos e imagens de suporte pretendidos, procedeu-se à interpretação dos mesmos à luz do tipo de construção em causa, das amplitudes térmicas ao longo do ensaio, do tipo de janela e caixilho e das diversas condicionantes experimentais que serão mais detalhadas adiante.

4.3 Materiais e Equipamentos

4.3.1 Câmara Termográfica

A câmara termográfica utilizada para a captura dos termogramas durante os ensaios foi uma ThermaCAM E300 da *FLIR Systems* (Figura 4.6 a), que permite a recolha de termogramas com uma definição de 320 x 240 pixels, fazendo leituras de temperatura com uma precisão de ± 2 °C (FLIR ThermaCAM E300 User's Manual, 2006).

Numa fase posterior, a catalogação, tratamento e análise dos termogramas recolhidos foram feitas recorrendo ao software *FLIR Tools* (Figura 4.6 b), possibilitando a recolha de todos os dados necessários à elaboração dos gráficos pretendidos, em *Excel*.

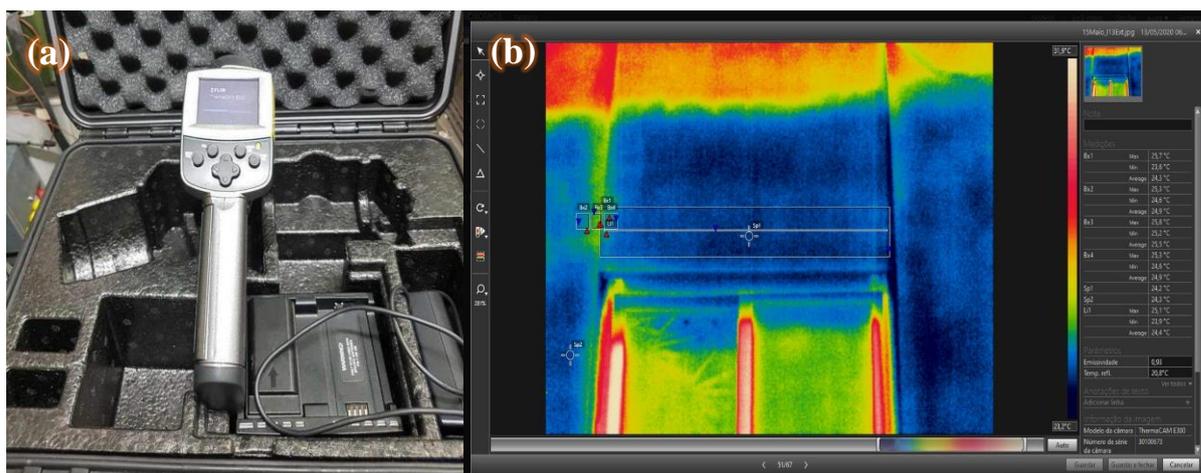


Figura 4.6 - (a) Câmara termográfica FLIR ThermaCAM E300; (b) *software* FLIR Tools.

4.3.2 Sensores de Humidade Relativa e Temperatura

De forma a poder medir os valores de temperatura ambiente e humidade relativa no interior da habitação, foram utilizados dois sensores portáteis SHT31 da Sensirion (Figura 4.7). Posteriormente, foi utilizada a média dos resultados obtidos pelos dois sensores em funcionamento simultâneo, para cada um dos dezassete instantes do ensaio.

Relativamente ao funcionamento destes sensores, estes possibilitam a medição dos valores de temperatura ambiente com uma precisão de $\pm 0.3^{\circ}\text{C}$ e dos valores de humidade relativa do ar com uma precisão de $\pm 2\%$. São capazes de medir, também, o valor do ponto de orvalho, mas tal potencialidade não foi explorada no presente trabalho (Sensirion SHT31 User Guide, 2015).

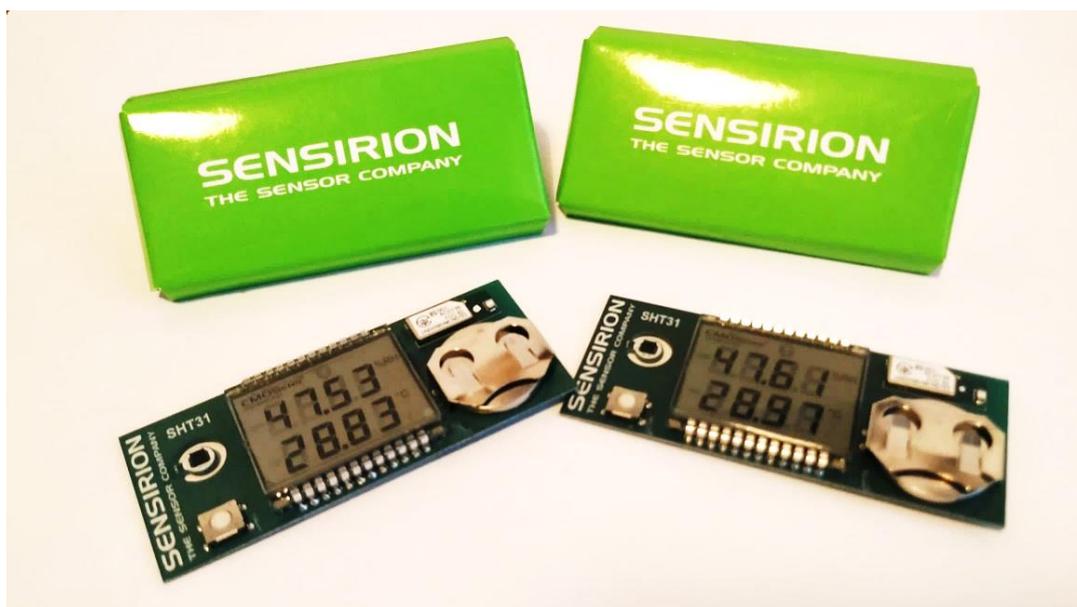


Figura 4.7 - Sensores portáteis de temperatura ambiente e de humidade relativa, *Sensirion SHT31*.

De forma a poder medir os valores de temperatura ambiente e humidade relativa no exterior da habitação, foi utilizado um sensor *HOBO U12-012* da *Onset* (Figura 4.8).

Este equipamento possibilita a medição dos valores de temperatura com uma precisão de $\pm 0.35^\circ \text{C}$ e dos valores de humidade relativa do ar com uma precisão de $\pm 2.5\%$ (*HOBO U12-012 User's Manual*).



Figura 4.8 - Sensores portáteis de temperatura ambiente e humidade relativa, *HOBO U12-012*.

4.3.3 Diversos

Durante a realização do ensaio, foram também utilizados outros materiais indispensáveis ao mesmo (Figura 4.9), listados em seguida:

- Escadote, de forma a permitir uma posição da câmara termográfica no exterior ao mesmo nível da sua posição no interior da habitação (Figura 4.9 a);

- Fita métrica, de forma a poder medir a distância entre a câmara e a parede, a altura da câmara ao solo no interior e exterior e medir todas as dimensões relevantes para a descrição do caso em estudo, como por exemplo pormenores do caixilho em madeira da janela (Figura 4.9 b);
- Folhas de alumínio, de forma a funcionarem como refletores e possibilitarem o cálculo da temperatura refletida (Figura 4.9 c);



Figura 4.9 - Materiais diversos utilizados: (a) escadote; (b) fita métrica; (c) folha de alumínio.

4.4 Plano de Ensaios

Para o estudo do comportamento térmico da janela e da caixa de estore, foi planeada a captura de termogramas quer pelo interior, quer pelo exterior, de hora a hora. O início da recolha de imagens foi programado para as 21:45h do dia 14 de maio de 2020 (instante I_0), sendo o seu término às 13:45h do dia 15 de maio de 2020 (instante I_{16}), perfazendo dezassete instantes de leitura (Figura 4.10). Em paralelo, os sensores colocados no interior e no exterior recolheriam os dados referentes à temperatura e humidade relativa necessários para uma posterior análise dos termogramas.

Segundo os dados de previsão meteorológica disponíveis, o pôr-do-sol dar-se-ia às 20:41h do dia 14, voltando a nascer às 06:13h do dia seguinte. Tendo em conta que não se perspetivava o alcance de amplitudes térmicas superiores ou iguais a 7°C entre o interior e o exterior da habitação, considerou-se pertinente ter esta informação em consideração aquando da análise dos períodos mais gravosos e, portanto, com maiores diferenças de temperatura na zona da ponte térmica (caixa de estore).



Figura 4.10 - Linha temporal do ensaio, desde o seu início (I_0) até ao seu término (I_{16}).

Estando definida a linha temporal do ensaio, com registos hora a hora, foram estabelecidos os pontos de captura das imagens térmicas quer no interior, quer no exterior. Dado o desnível existente entre o piso interior e o pavimento exterior, aliado à inexistência de um tripé adequado, foi necessário recorrer a um escadote, no exterior, numa tentativa de equilibrar os pontos de medição. Adicionalmente, foi possível constatar que o ângulo de abrangência captado pela câmara térmica da área em estudo seria ligeiramente superior no exterior, devido à

compartimentação existente no interior da habitação. Tendo em conta todas estas condicionantes, foi possível planear um esquema de posições de captura de termogramas para as duas posições pretendidas, no interior e no exterior da habitação (Figura 4.11).

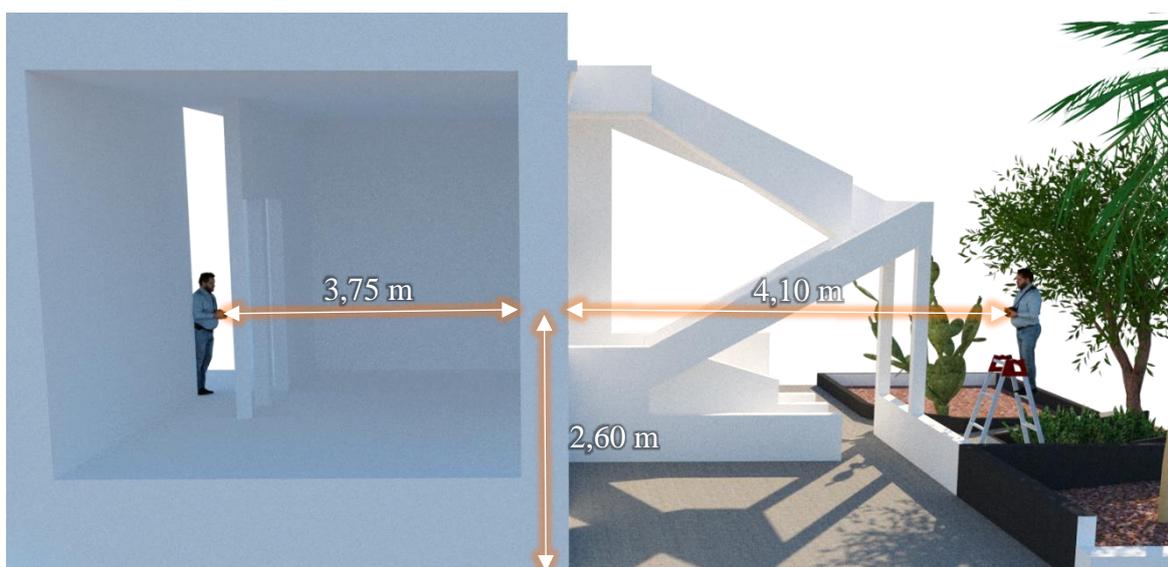


Figura 4.11 - Esquema de posições de captura dos termogramas com indicação de distâncias relevantes (Horizontais – afastamentos em relação à superfície do elemento medido; Vertical – cota à qual se efetuou a medição).

Pelo interior, a captação de termogramas afigurava-se como francamente mais dificultada, estando o ângulo de captura dos mesmos bastante limitado pelas condicionantes construtivas da habitação (Figura 4.12). Como tal, a captura conjunta da zona da caixa de estore e da zona corrente foi, não raras vezes, visualmente não muito esclarecedora. Adicionalmente, o contraste geralmente criado na zona de transição da caixa de estore para a zona corrente, por ser uma zona de ponte térmica, não foi visível ao longo da maioria do ensaio, ao contrário do que ocorreu nos termogramas captados no exterior.

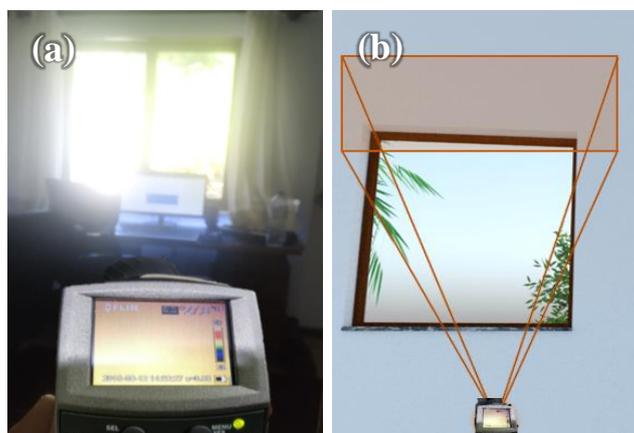


Figura 4.12 - a) Posição de captura de termogramas pelo interior; b) Esquemática da área em estudo captada pela câmara termográfica.

Relativamente ao exterior, como já foi referido, a captura dos termogramas foi facilitada pela razoável amplitude proporcionada pelo local e pelo facto de haver uma área totalmente desimpedida de obstáculos entre o elemento em estudo e o ponto de captura dos termogramas, pese embora a vegetação circundante (Figura 4.13).



Figura 4.13 - a) Posição de captura de termogramas pelo exterior; b) Esquemática da área em estudo captada pela câmara termográfica.

5 DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

Tal como foi anteriormente evidenciado, o tratamento e análise dos termogramas recolhidos durante o ensaio (ver Anexo A e Anexo B) fez-se ao longo de três fases, estando as duas primeiras pré-definidas e a última decorrendo da natureza dos resultados entretanto obtidos. Assim, respeitando o encadeamento de raciocínio e a sequenciação lógica de processos pela qual se pautou a análise dos resultados, os mesmos serão apresentados neste subcapítulo subdivididos nas três fases suprarreferidas.

5.1 Fases de Análise

5.1.1 Fase 1

Nesta primeira fase de análise dos resultados, começou-se por avaliar os dados referentes à evolução da temperatura e da humidade relativa ao longo do ensaio. Assim, foram registados num quadro (Quadro 5.1) os valores da temperatura exterior (T_{ext}) e da humidade relativa exterior (HR_{ext}), relativos a cada instante de recolha de imagens. Na mesma tabela, foram também registados os valores da temperatura interior (T_{int}) e humidade relativa interior (HR_{int}), medidos pelos dois sensores colocados no interior da habitação. Uma vez que no interior da habitação foram utilizados dois sensores do mesmo modelo, calcularam-se os valores finais a considerar para os parâmetros através da média dos valores obtidos por ambos.

No mesmo quadro (Quadro 5.1), foi também inserida uma coluna referente às diferenças entre as temperaturas interior e exterior, para cada instante ($T_{int} - T_{ext}$). Tal deve-se à possibilidade de interpretar, mais adiante, a correlação entre estes valores e um acentuar, ou não, do efeito da ponte térmica na zona em estudo. Ressalve-se também, como já foi previamente apontado, que as diferenças de temperatura entre o interior da habitação e o exterior foram reduzidas, variando entre 1,6 °C e 2,9 °C, longe do valor mínimo recomendado pela literatura de 7 °C.

Quadro 5.1 - Valores de temperatura e humidade relativa recolhidos no interior e exterior da habitação, ao longo do ensaio.

Instante	Hora [hh:mm]	HR _{int} [%]	HR _{ext} [%]	T _{int} [°C]	T _{ext} [°C]	T _{int} - T _{ext} [°C]
I ₀	21:25	66.0	55.1	16.88	15.25	1.63
I ₁	22:45	64.9	63.9	16.68	14.58	2.10
I ₂	23:45	66.0	68.0	16.50	13.91	2.59
I ₃	00:45	69.6	71.4	16.28	13.50	2.78
I ₄	01:45	71.4	73.8	16.23	13.35	2.88
I ₅	02:45	71.4	74.1	16.14	13.43	2.71
I ₆	03:45	70.3	74.2	16.01	13.26	2.75
I ₇	04:45	72.2	74.1	15.96	13.04	2.92
I ₈	05:45	70.9	74.1	15.85	12.73	3.12
I ₉	06:45	69.9	76.1	15.74	12.61	3.13
I ₁₀	07:45	70.9	75.3	15.91	13.38	2.53
I ₁₁	08:45	71.7	64.1	16.57	17.53	-0.96
I ₁₂	09:45	66.0	60.7	18.08	18.08	0.00
I ₁₃	10:45	51.5	54.7	21.76	19.41	2.35
I ₁₄	11:45	59.0	56.7	19.21	18.41	0.79
I ₁₅	12:45	57.4	47.6	21.48	20.94	0.54
I ₁₆	13:45	59.9	46.9	19.81	20.65	-0.84

Depois de organizados estes valores, os mesmos foram dispostos num gráfico para facilitar a sua interpretação (Figura 5.1). Esta figura mostra uma relativa constância da temperatura interior entre os instantes I₀ e I₁₀, isto é, entre as 21:25h e as 07:45h, acompanhado de um decréscimo gradual da temperatura exterior.

Do instante I₁₀ para o instante I₁₁, a temperatura exterior sofreu um aumento superior a 4°C, continuando a aumentar até ao instante I₁₅, acompanhado pelo aumento da temperatura interior. Do instante I₁₅ para I₁₆, a temperatura exterior sofreu uma ligeira redução.

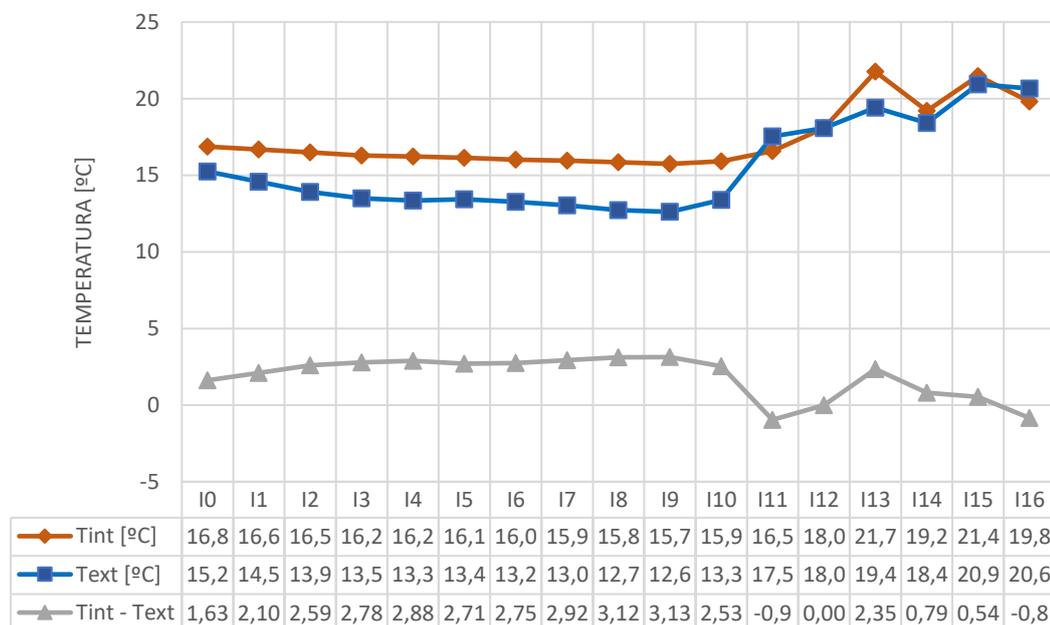


Figura 5.1 - Evolução das temperaturas interior e exterior ao longo do ensaio, bem como da diferença entre as mesmas.

Organizados estes dados, procedeu-se à análise dos termogramas. Para cada instante, foram capturados quatro termogramas: dois no interior e dois no exterior. Em cada um desses pares, um termograma refere-se à folha de alumínio, enquanto que o outro se refere à zona em estudo (janela + caixa de estore + zona corrente).

A análise dos termogramas referentes às folhas de alumínio (exemplificado na Figura 5.2 a), análoga quer para o interior quer para o exterior, permitiu calcular a temperatura refletida, em cada instante, recorrendo ao software *FLIR Tools*, através de um processo explanado anteriormente, no subcapítulo 4.2. Este valor, bem como o da humidade relativa, foram, posteriormente, inseridos nos parâmetros do respetivo termograma da zona em estudo (exemplificado na Figura 5.2 b). Adicionalmente, para cada um dos termogramas referentes à zona em estudo, foi considerado um valor de emissividade $\epsilon = 0.93$, correspondente à emissividade tabelada do material da superfície da parede (Novo et al, 2014), o reboco com

argamassa, para valores de temperatura em torno daqueles que foram registados ao longo do ensaio, adequando-se à análise da zona pretendida.

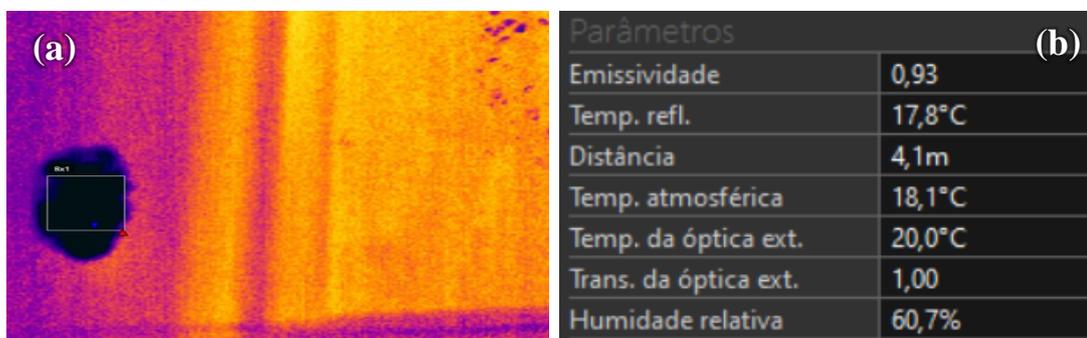


Figura 5.2 - a) Termograma da folha de alumínio; b) Exemplo de *input* de parametrização no software *FLIR Tools*.

Em cada termograma, exterior e interior, da zona em estudo, foram desenhadas três formas geométricas, de grau crescente de abrangência: ponto, linha e retângulo/caixa. As dimensões e posições relativas destas formas foram mantidas em todos os termogramas. Esta estratégia foi adotada de forma a tentar compreender a dispersão espacial da temperatura, possibilitando inferir quanto à sua maior ou menor heterogeneidade, quer pelo interior (Figura 5.3), quer pelo exterior (Figura 5.4).

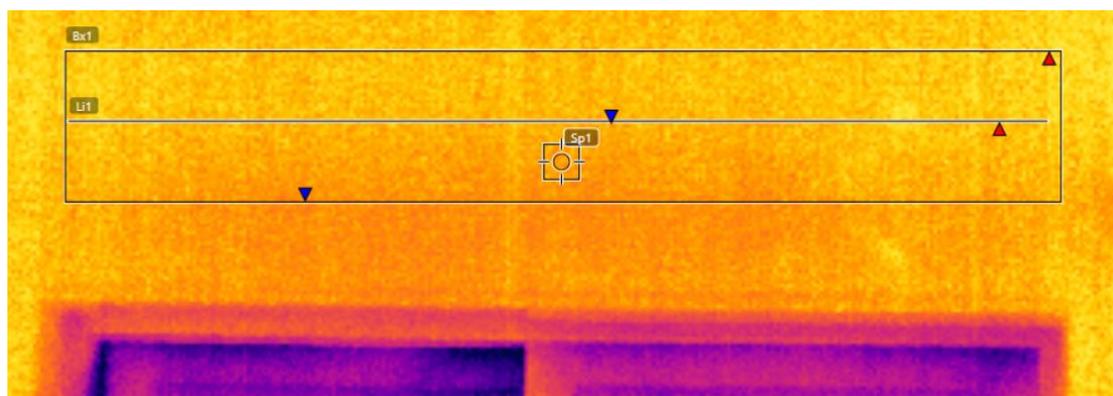


Figura 5.3 - Exemplificação (instante I_8) da abordagem de análise geométrica dos termogramas, pelo interior, com diagramas de ponto (Sp_1), linha (Li_1) e caixa (Bx_1).

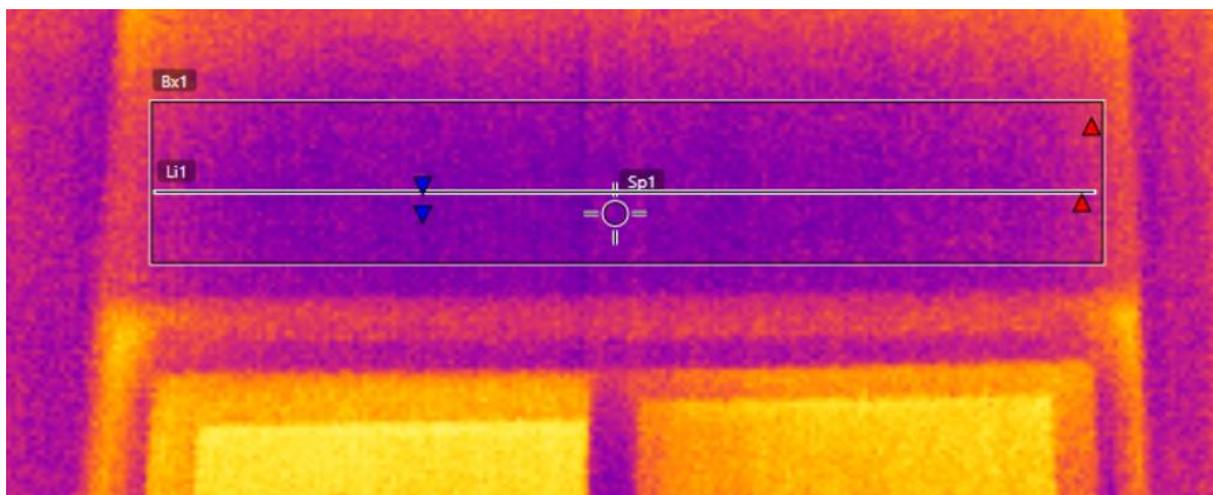


Figura 5.4 - Exemplificação (instante I₈) da abordagem de análise geométrica dos termogramas, pelo exterior, com diagramas de ponto (Sp₁), linha (Li₁) e caixa (Bx₁).

Estas formas foram desenhadas na zona da caixa de estore, sendo esta a mais relevante por ser a zona de ponte térmica em estudo. Adicionalmente, foi incluído um ponto de controlo na zona corrente da parede, de forma a poder avaliar a evolução dessa temperatura pontual ao longo do ensaio, comparando-a com a zona de ponte térmica da caixa de estore.

O valor médio da temperatura correspondente a cada forma foi lido diretamente no software *FLIR Tools*. Do registo destes, resultou o Quadro 5.2.

Quadro 5.2 - Temperaturas superficiais registadas nas formas geométricas para análise na 1^a fase.

Instante	Interior				Exterior			
	□ P.T.	— P.T.	• P.T.	• Z.C.	□ P.T.	— P.T.	• P.T.	• Z.C.
I ₀	17.1	17.1	17.2	17.4	15.6	15.6	15.6	15.8
I ₁	16.9	16.6	16.7	16.7	13.9	13.9	13.8	13.8
I ₂	16.7	16.7	16.5	17.1	13.3	13.3	13.3	13.6
I ₃	16.7	16.7	16.6	16.8	12.8	12.7	12.7	12.9

I4	15.9	15.9	15.7	16.0	12.5	12.4	12.4	12.6
I5	16.0	16.0	15.8	16.4	19.1	19.1	19.0	19.2
I6	21.9	21.9	21.7	22.1	18.4	18.3	18.2	18.6
I7	21.9	21.9	21.8	22.0	18.9	18.8	18.6	19.3
I8	21.5	21.5	21.6	21.9	18.2	18.2	18.2	18.3
I9	21.3	21.2	21.1	21.7	18.0	17.9	17.9	18.0
I10	21.6	21.6	21.3	21.9	18.3	18.3	18.3	18.4
I11	21.1	21.1	21.0	21.4	19.8	19.8	19.5	19.8
I12	21.8	21.8	21.7	22.1	21.3	21.2	20.8	21.3
I13	22.7	22.7	22.7	22.6	24.3	24.4	24.2	24.3
I14	23.1	23.1	23.1	23.6	23.4	23.4	23.3	23.5
I15	23.2	23.1	23.1	23.3	24.7	24.7	24.5	24.7
I16	22.9	22.9	22.9	23.4	24.3	24.3	24.3	24.3

Legenda:

□ P.T.	caixa na zona de ponte térmica;
• P.T.	ponto na zona de ponte térmica;
— P.T.	linha na zona de ponte térmica;
• Z.C.	ponto na zona corrente;

Depois de organizados os registos de temperaturas superficiais médias (T_{sup}), foram desenhados os respetivos gráficos de forma a melhor interpretar a evolução temporal das mesmas. Assim, foi estabelecida quer para o interior (Figura 5.5), quer para o exterior (Figura 5.6) a comparação entre a evolução de temperaturas para as formas geométricas de ponto, linha e caixa, na zona ponte térmica, e o ponto de controlo colocado na zona corrente.

Saliente-se, previamente, o registo do aumento de temperatura abrupto no elemento em estudo do instante I₅ para o instante I₆, que não acompanha a evolução de temperatura ambiente registada pelos sensores. Não foi possível identificar a origem desta diferença.

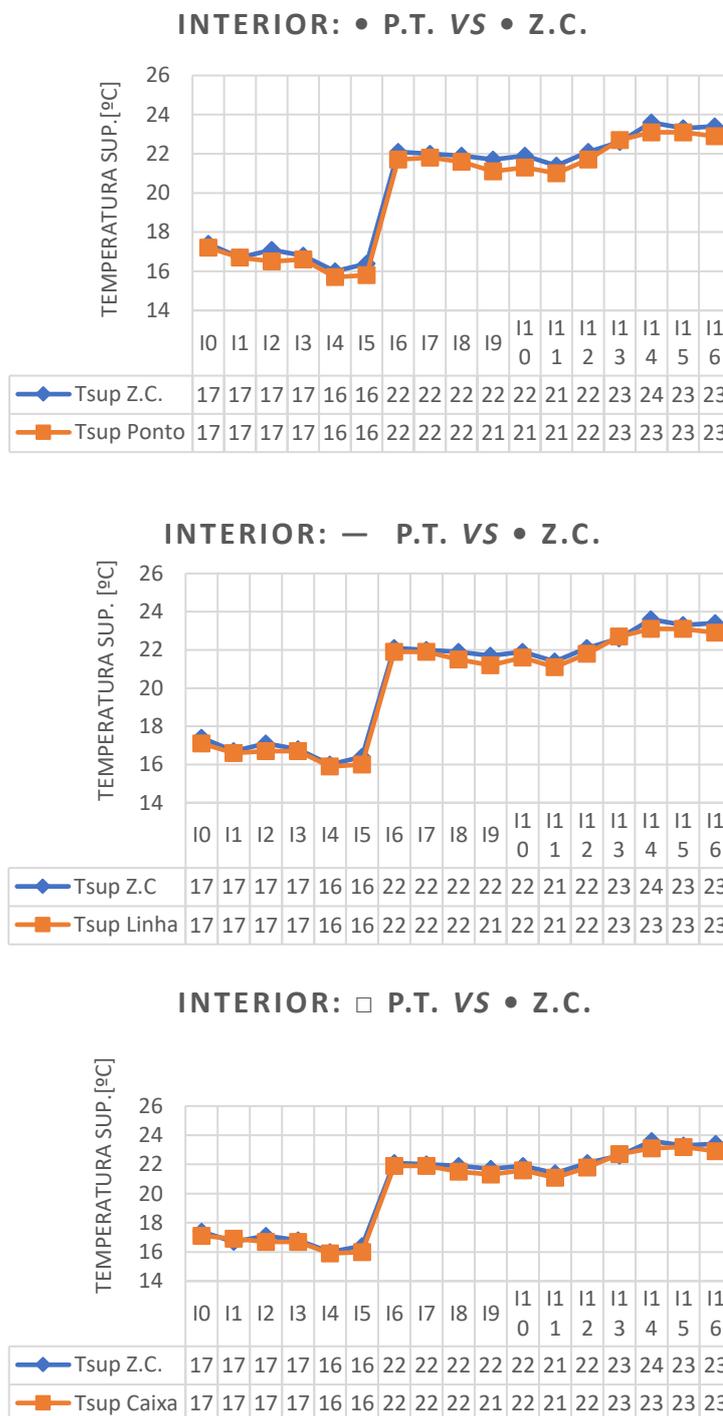


Figura 5.5 - Comparação da evolução temporal de temperaturas superficiais (T_{sup}) das diversas geometrias na zona de ponte térmica com o ponto na zona corrente, no interior.

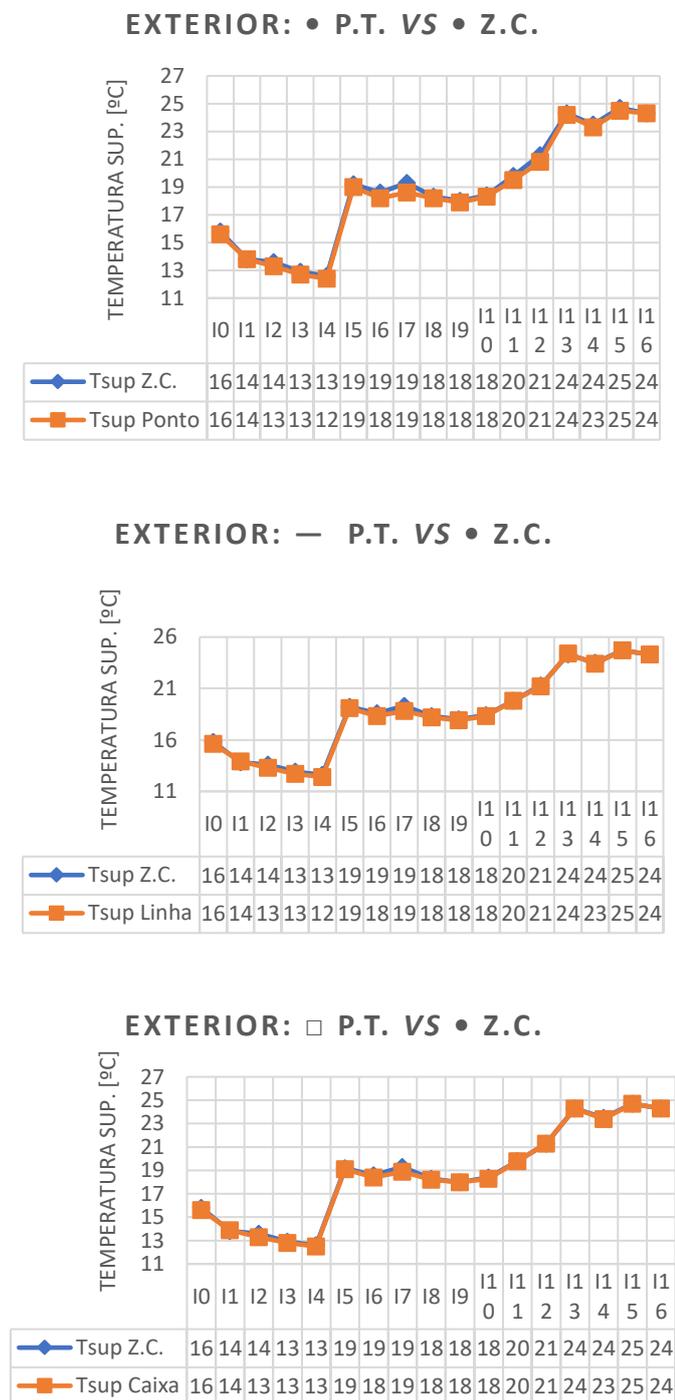


Figura 5.6 - Comparação da evolução temporal de temperaturas superficiais (T_{sup}) das diversas geometrias na zona de ponte térmica com o ponto na zona corrente, no exterior.

Da análise destes gráficos, foi possível concluir de imediato que a evolução temporal da temperatura superficial na zona de ponte térmica, independentemente da forma geométrica escolhida, fora praticamente indistinta da evolução da temperatura superficial na zona corrente. Como tal, procedeu-se a uma segunda fase de análise, de forma a tentar espelhar melhor o fenómeno em estudo.

5.1.2 Fase 2

Na segunda fase passou-se de uma análise mais abrangente para uma de maior pormenor. Para tal, na zona da caixa de estore onde visivelmente se destacavam zonas de fronteira de variação de temperatura superficial, foram criadas três pequenas formas geométricas do tipo ‘caixa’ (Figura 5.7). Desta forma, foi colocado um diagrama de caixa na zona de fronteira/interface da ponte térmica (caixa central, Bx_1), outro na zona corrente (mais à esquerda, Bx_2) e um último na zona interior da caixa de estore (mais à direita, Bx_3).

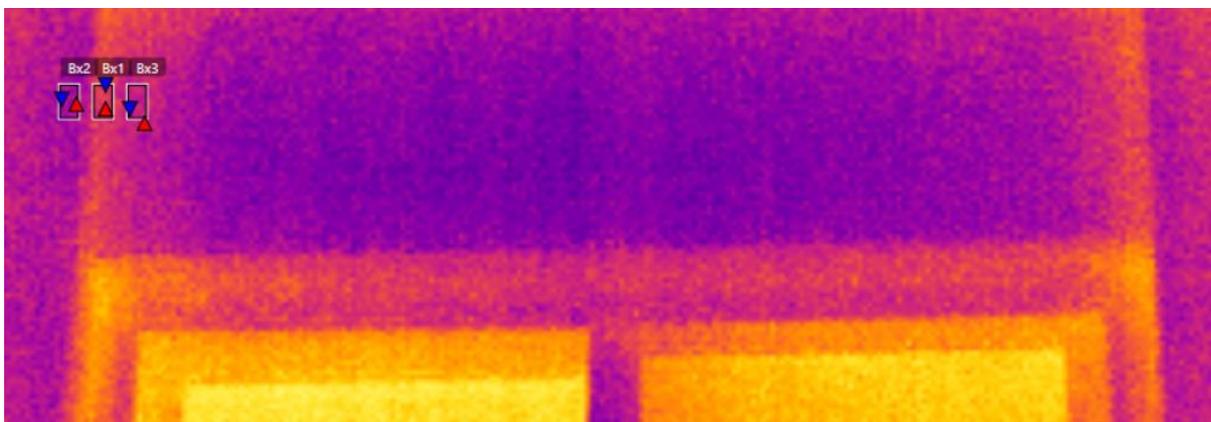


Figura 5.7 - Esquematização dos três diagramas de caixa utilizados para a análise na Fase 2.

O Quadro 5.3 mostra as temperaturas superficiais médias dos diagramas de caixa, lidas no *FLIR Tools*, quer no interior, quer no exterior.

Quadro 5.3 - Temperaturas superficiais registadas nos diagramas geométricos de caixa para análise na 2ª fase.

Instante	Interior			Exterior		
	□ Z.C.	□ P.T.	□ Cx Estore	□ Z.C.	□ P.T.	□ Cx Estore
I0	16.8	17.0	17.0	15.6	15.9	15.6
I1	16.5	16.6	16.6	14.0	14.2	13.9
I2	16.9	16.9	16.9	13.5	14.0	13.6
I3	16.8	16.8	16.8	12.7	13.2	13.0
I4	16.0	16.0	16.0	12.5	13.0	12.7
I5	16.3	16.2	16.2	19.2	19.4	19.3
I6	22.0	22.0	22.0	18.5	18.9	18.8
I7	22.1	22.0	22.1	19.1	19.4	19.3
I8	21.7	21.7	21.7	18.4	18.7	18.4
I9	21.5	21.4	21.5	18.0	18.5	18.3
I10	21.8	21.8	21.8	18.4	18.8	18.5
I11	21.1	21.1	21.1	20.3	20.6	20.2
I12	21.9	21.9	21.9	22.0	22.2	21.7
I13	22.7	22.7	22.7	24.9	25.5	24.9
I14	23.1	23.4	23.2	23.8	24.0	23.7
I15	23.3	23.6	23.1	24.8	25.1	24.7
I16	22.6	22.9	22.7	24.4	24.6	24.2

Legenda:	□ Z.C.	caixa na zona corrente (Bx ₂);
	□ P.T.	caixa na zona de interface da ponte térmica (Bx ₁);
	□ Cx Estore	caixa no interior da caixa de estore (Bx ₃);

A evolução temporal da temperatura superficial (T_{sup}) na zona de ponte térmica (□ P.T.) comparativamente à evolução da temperatura superficial na zona corrente (□ Z.C.), quer para o interior, quer para o exterior, está representada na Figura 5.8.

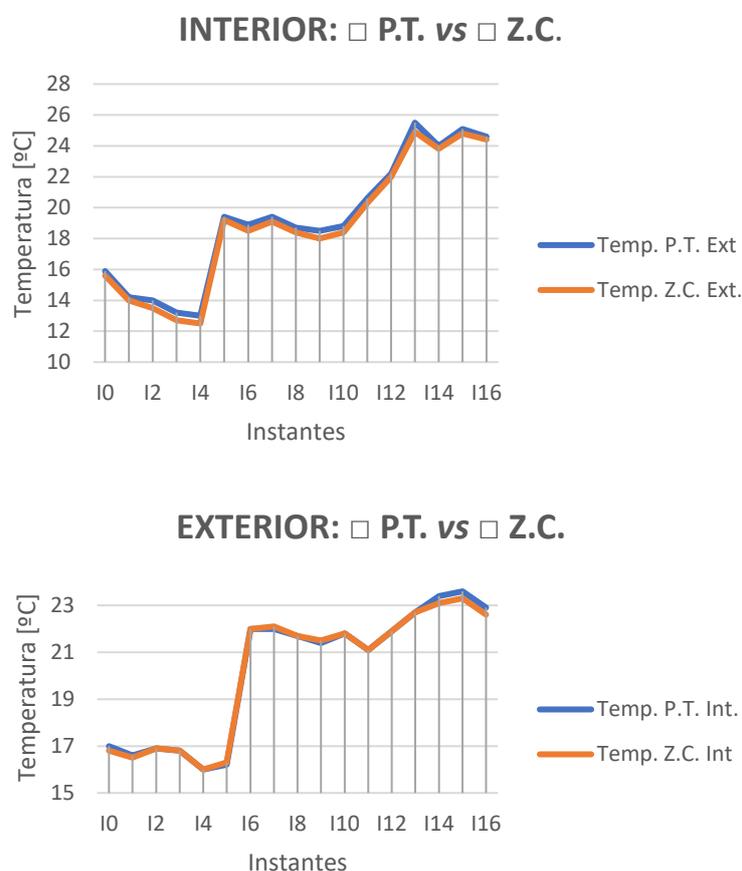


Figura 5.8 - Evolução temporal da T_{sup} na zona corrente (□ Z.C.) e na zona de ponte térmica (□ P.T.).

Depois de analisados os registos de temperaturas superficiais médias (T_{sup}) nas três caixas, foram hipotetizadas possíveis correlações com o ambiente interior, com o ambiente exterior e para uma situação de interior *versus* exterior. Assim, primeiramente, foram calculadas as diferenças de temperatura superficial (ΔT_{sup}) entre os diagramas de caixa utilizados, como mostra o Quadro 5.4.

Quadro 5.4 - Variação de temperaturas superficiais (ΔT_{sup}) entre diagramas de caixa.

Instante	ΔT_{sup}			
	EXT □ P.T. - □ Z.C.	INT □ P.T. - □ Z.C.	□ P.T. _{int} - □ P.T. _{ext}	$T_{int} - T_{ext}$
I0	0.3	0.2	1.1	1.63
I1	0.2	0.1	2.4	2.10
I2	0.5	0	2.9	2.59
I3	0.5	0	3.6	2.78
I4	0.5	0	3	2.88
I5	0.2	-0.1	-3.2	2.71
I6	0.4	0	3.1	2.75
I7	0.3	-0.1	2.6	2.92
I8	0.3	0	3	3.12
I9	0.5	-0.1	2.9	3.13
I10	0.4	0	3	2.53
I11	0.3	0	0.5	-0.96
I12	0.2	0	-0.3	0.00
I13	0.6	0	-2.8	2.35
I14	0.2	0.3	-0.6	0.79
I15	0.3	0.3	-1.5	0.54
I16	0.2	0.3	-1.7	-0.84

Legenda:	□ P.T.	caixa na zona corrente;
	□ P.T.	caixa na zona de interface da ponte térmica;
	□ Cx Estore	caixa no interior da caixa de estore;

De forma a tentar estabelecer uma possível relação entre a diferença de temperatura ambiente e o efeito de ponte térmica, foram criados gráficos de dispersão, bem como a respetiva reta de regressão linear. Estes foram feitos para a situação interior e exterior, permitindo uma análise do coeficiente de correlação linear (coeficiente de determinação) R^2 (Figura 5.9).

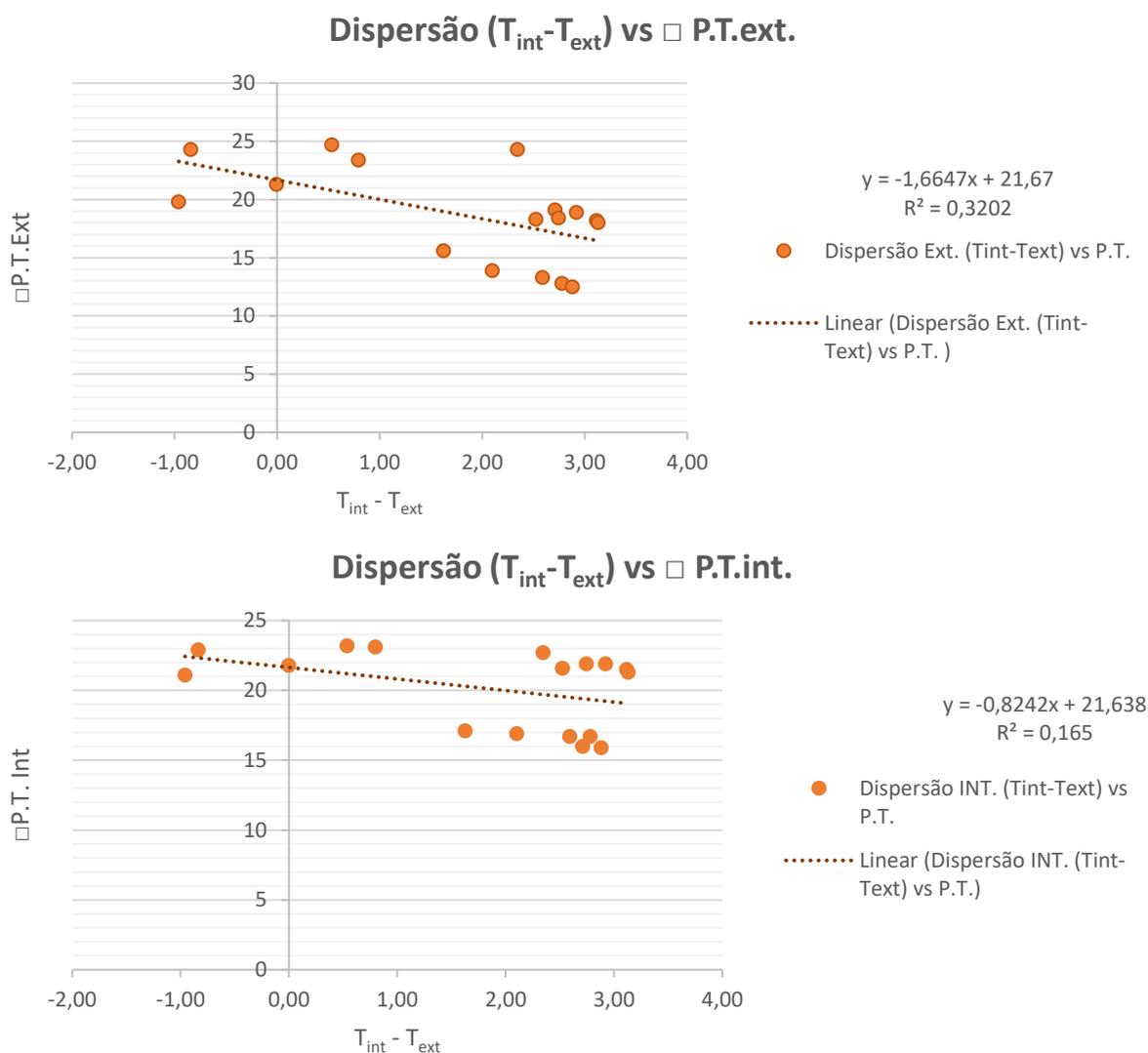


Figura 5.9 - Dispersão de temperaturas superficiais na zona de ponte térmica exterior e interior em função da diferença de temperatura ambiente e respetivos coeficientes de determinação (R^2).

Pela análise dos gráficos, verifica-se que os valores de R^2 são francamente baixos, pelo que não se deverá aqui inferir que existe uma relação linear entre um maior ou menor efeito de ponte térmica para uma maior ou menor diferença de temperatura entre ambiente interior e exterior.

Seguidamente, averiguou-se quanto a uma possível correlação entre a diferença de temperatura ambiente interior e exterior e a diferença entre a temperatura superficial interior na zona de

ponte térmica ($\square P.T_{int}$) e a sua correspondente exterior ($\square P.T_{ext}$), como se pode ver na Figura 5.10.

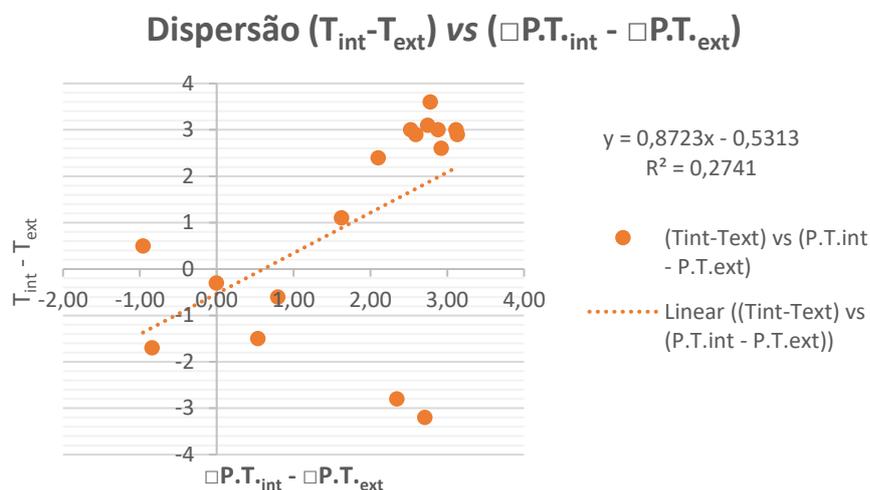


Figura 5.10 - Dispersão das diferenças entre as temperaturas ambiente (interior e exterior) em função das diferenças de temperatura superficial na interface da ponte térmica (interior e exterior) e respetivo coeficiente de determinação (R^2).

Verifica-se que, uma vez mais, o valor de R^2 é baixo. No entanto, como expectável, para valores superiores de diferenças de temperatura ambiente ($T_{int} - T_{ext}$), as diferenças de temperatura na zona de interface da ponte térmica ($\square P.T_{int} - \square P.T_{ext}$) evoluem de uma forma mais regular, havendo uma concentração dos pontos no gráfico. Tal verifica-se para valores de $T_{int} - T_{ext}$ superiores a 2 °C.

Analisaram-se ainda as diferenças de temperatura superficial da ponte térmica em relação à zona corrente no interior ($\square P.T_{int} - \square Z.C_{int}$) em função das diferenças de temperatura superficial da ponte térmica em relação à zona corrente no exterior ($\square P.T_{ext} - \square Z.C_{ext}$), como se mostra na Figura 5.11.

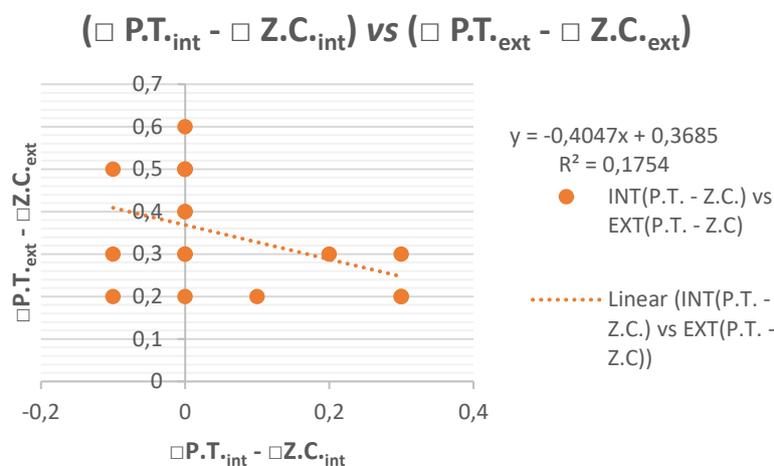


Figura 5.11 - Dispersão das diferenças de temperatura superficial da ponte térmica em relação à zona corrente no interior (\square P.T._{int} - \square Z.C._{int}) em função das diferenças de temperatura superficial da ponte térmica em relação à zona corrente no exterior (\square P.T._{ext} - \square Z.C._{ext}).

Desta análise, uma vez mais, concluiu-se que o valor de R^2 era francamente baixo, existindo bastante disparidade entre valores, pelo que não se encontrou uma relação de correlação linear entre os dois parâmetros, ao contrário do que seria expectável à partida.

Não obstante, uma vez que as diferenças de temperatura entre a zona de interface da ponte térmica e a zona corrente são relativamente baixas (inferiores a 1 °C), é entendível a disparidade de resultados obtidos.

Por último, nesta fase, optou-se por uma análise focada somente na zona de interface da ponte térmica. Assim, analisou-se neste ponto a relação entre a temperatura superficial da interface de ponte térmica no interior (\square P.T._{int}) e a temperatura superficial da interface de ponte térmica no exterior (\square P.T._{ext}), como se pode ver na Figura 5.12.

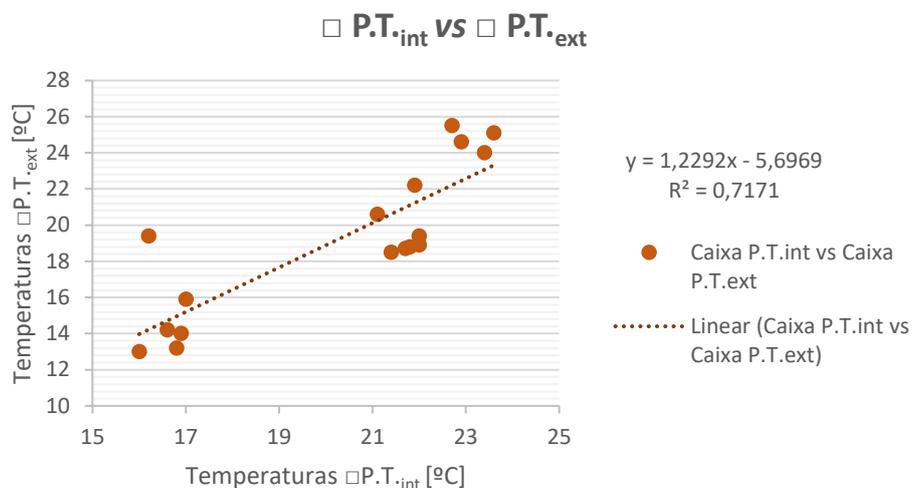


Figura 5.12 - Dispersão das temperaturas superficiais da interface de ponte térmica no exterior (□P.T._{ext}) em função temperatura superficial da interface da ponte térmica no interior (□P.T._{int}).

Através desta análise, verifica-se que, como seria de esperar, a evolução da temperatura superficial na zona de interface da ponte térmica pelo interior é acompanhada pela sua homóloga no exterior. Efetivamente, o valor de R^2 , nesta análise, é significativamente mais elevado do que o encontrado nas anteriores, traduzindo uma correlação linear mais forte entre as duas variáveis em estudo.

5.1.3 Fase 3

Após as diversas tentativas de correlação de valores nas fases de análise anteriores, optou-se por uma abordagem diferente nesta terceira e última fase de análise de resultados. No decorrer das duas primeiras fases, a demonstração do efeito de ponte térmica na zona da caixa de estore não foi considerada suficientemente perceptível, em boa parte devido à baixa amplitude térmica.

Assim, foram criados quatro perfis de temperaturas superficiais (dois longitudinais e dois transversais), dois deles para o interior e os outros dois para o exterior. Para tal, escolheu-se um

dos instantes de ensaio onde o fenómeno fora bem visível: o instante I_8 , correspondente às 05:45h do dia 15 de maio de 2020.

Recorrendo aos termogramas correspondentes ao instante I_8 , traçaram-se então duas linhas: uma longitudinal à caixa de estore (Li_1) e outra transversal a esta (Li_2). Este procedimento foi efetuado tanto no interior, como no exterior (Figura 5.13).

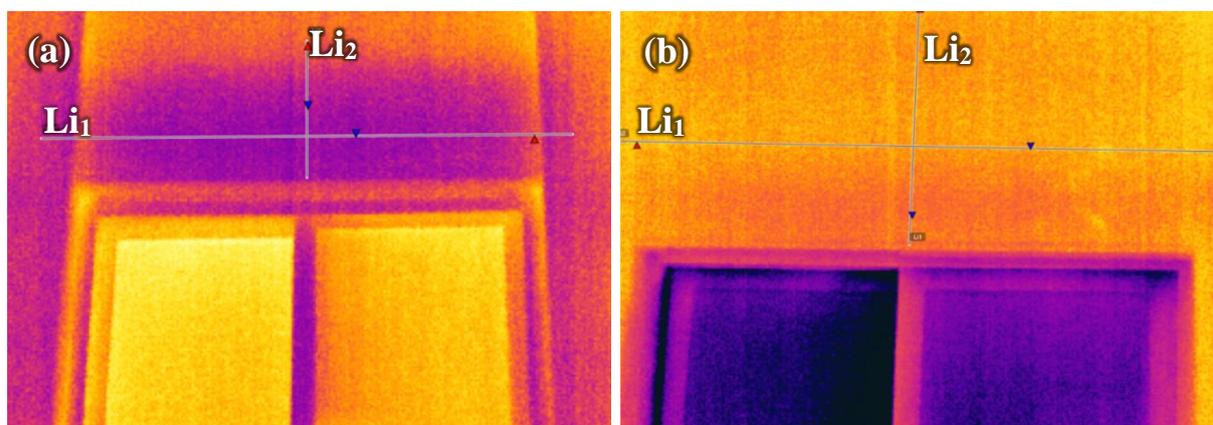
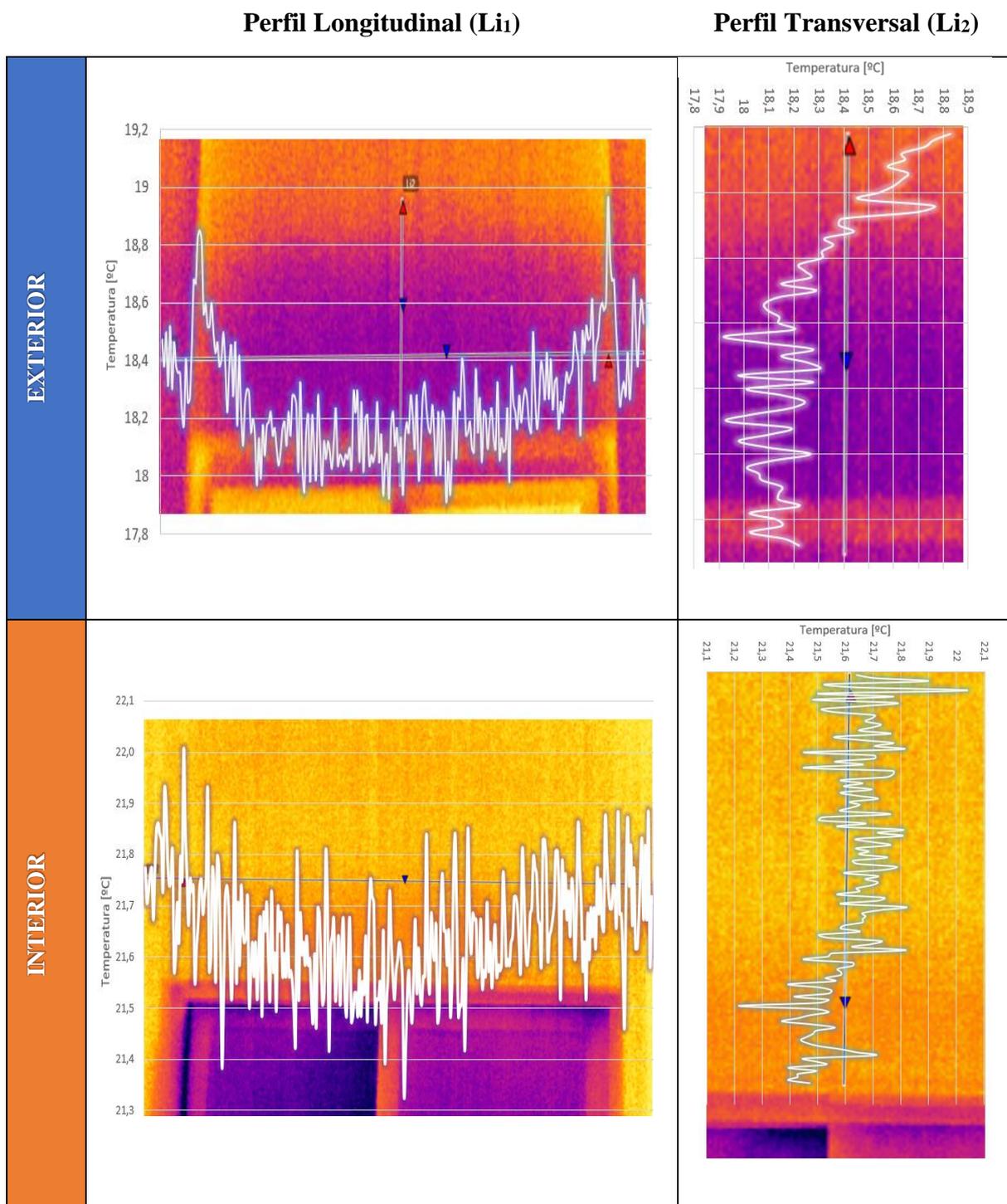


Figura 5.13 - Linhas utilizadas, no software *FLIR Tools*, para traçar os perfis longitudinal (Li_1) e transversal (Li_2) da temperatura superficial para (a) exterior e (b) interior, no instante I_8 .

Assim, foi possível obter a variação da temperatura superficial ao longo dessas linhas, traduzindo-a numa representação gráfica mais expressiva e inteligível, ilustrando de uma forma mais clara o fenómeno de ponte térmica em estudo (Quadro 5.5).

Quadro 5.5 - Perfis transversais e longitudinais de dispersão da temperatura superficial ao longo da zona da caixa de estore, pelo interior e pelo exterior.



Como se pode observar pela análise dos perfis longitudinais do Quadro 5.5, é notório o pico de temperaturas superficiais nos limites laterais da caixa de estore. Mais ainda, é visualmente perceptível que este pico se estende a cotas superiores do edifício, evidenciando um ponto fraco de isolamento térmico generalizado aí presente. Esta situação verifica-se tanto no exterior, como no interior, embora de uma forma substancialmente menos notória neste último.

É também importante referenciar a tendência decrescente dos valores de temperatura superficial quanto mais perto nos encontramos da zona central da caixa de estore. Com efeito, para o instante em análise, a diferença de temperaturas superficiais entre esta zona e as laterais atingiu valores sensivelmente superiores 1 °C.

Relativamente aos perfis transversais, verifica-se que os valores de temperatura superficial mais elevados correspondem à zona acima da caixa de estore, havendo um decréscimo de temperatura à medida que nos deslocamos para zonas mais interiores da caixa e mais próximas da caixilharia da janela. Atente-se, no entanto, no facto deste decréscimo ser mais repentino na zona exterior do que na zona interior.

6 CONCLUSÕES E DESENVOLVIMENTOS FUTUROS

Nos últimos anos, as crescentes exigências e rigor na construção têm levado ao aparecimento de novos métodos e ferramentas que tenham utilidade prática e viabilidade técnica e financeira. Quer numa perspetiva de reabilitação de edifícios, quer numa perspetiva de construção nova, tem havido um redescobrimto dos materiais e técnicas construtivas já há muito utilizadas, recorrendo a inovadoras técnicas de ensaio, permitindo quer atestar factualmente propriedades já referenciadas, quer identificar lacunas previamente desconhecidas.

Na perspetiva de fornecer informação visual e numérica relativamente a valores de temperatura superficial, a termografia de infravermelhos apresenta-se como uma técnica de grande utilidade e vasta aplicabilidade na construção. Como ficou patente nesta dissertação, o recurso a uma câmara termográfica, em paralelo com o uso de um *software* adequado de tratamento de dados, permite a obtenção de diversas informações quanto a uma dada solução construtiva.

Adicionalmente, a termografia de infravermelhos, sendo uma técnica não invasiva, expedita e bastante intuitiva, revelou-se como uma ferramenta de grande utilidade numa situação de diagnóstico/inspeção como a que foi levada a cabo na presente dissertação. A possibilidade de identificar facilmente elementos construtivos e zonas de ponte térmica sobressaiu como uma das conclusões mais importantes a retirar deste trabalho.

Todavia, quer a parte do ensaio em si, quer o posterior tratamento dos dados recolhidos, expuseram todas as condicionantes, obstáculos e cuidados a ter aquando da utilização da termografia de infravermelhos. Num contexto de avaliação quantitativa de pontes térmicas, esta técnica requereria, à partida, diferenças de temperatura de pelo menos 7 °C, de forma a poder produzir resultados mais claros e fidedignos. Dadas as condicionantes experimentais (de

disponibilidade do equipamento, prazos limite de realização do trabalho, problemas técnicos com a câmara termográfica no final do ensaio, inexperiência do utilizador com o equipamento, etc.) não foi possível capturar termogramas nestas condições ideais.

Mais ainda, a inexistência de isolamento térmico na fachada em estudo e o relativo estado de degradação da caixilharia em mogno, dada a sua idade, numa janela sem corte térmico, são também fatores que desfavorecem o alcance de um gradiente térmico mais elevado. Caso a solução construtiva da parede em estudo contivesse isolamento colocado pelo interior, por exemplo, e se a janela possuísse vidro duplo, com corte térmico, seria possível estabilizar a temperatura ambiente no interior da habitação, o que se traduziria em maiores diferenças de temperatura em relação ao seu exterior, ao longo do ensaio, favorecendo melhores resultados.

Por último, é importante referir uma condicionante que não foi explorada nem parametrizada no presente ensaio: as condições de exposição solar e sombreamento. A parede em estudo, voltada a Este, possui uma franca exposição solar. Todavia, esta não se verifica ao longo de toda a sua extensão. Com efeito, devido à caixa de escadas exterior, a radiação solar incide diretamente apenas numa parte da zona em estudo, precisamente onde se encontra a caixa de estore, sendo que outra porção é permanentemente sombreada. Deste modo, seria importante garantir, em situações análogas futuras, um controlo mais detalhado e exaustivo das variáveis de ensaio, possibilitando a existência de um gradiente térmico adequado e garantindo, assim, as condições necessárias de estabilidade para que se crie um fluxo de calor unidirecional.

Em retrospectiva, analisando os resultados e tratamento de dados nas Fases 1 e 2 do subcapítulo 4.5 Discussão dos Resultados, é bastante claro que houve algumas dificuldades em atestar pressupostos teóricos, essencialmente com o objetivo de comprovar, recorrendo ao software *FLIR Tools*, a existência de uma ponte térmica na zona da caixa de estores. Embora visualmente o recurso à TIV se tenha revelado mais do que suficiente, numericamente ficou bem patente a importância de salvaguardar a existência das várias condições experimentais necessárias.

Na Fase 3, por outro lado, deixando para trás as tentativas de análise mais localizadas, baseadas em diagramas de diferentes geometrias, optou-se por tentar traduzir o comportamento térmico ao longo de todo o elemento caixa de estore. Desta feita, a sobreposição da linha de variação de temperaturas superficiais ao termograma obtido permitiu uma visualização mais clara e assertiva do fenómeno que se pretendia demonstrar.

Assim, resumidamente, a presente Dissertação de Mestrado Integrado pretendeu explorar a técnica de termografia de infravermelhos aplicada ao estudo de um ponto crítico de uma fachada de um edifício antigo, de características construtivas bastante comuns em edifícios contemporâneos do mesmo, em Portugal. Com a revisão do estado da arte efetuada, complementada com o ensaio de campo, foi possível explorar as vantagens, desvantagens, particularidades e condicionantes associadas à termografia de infravermelhos e a uma análise quantitativa. Por exemplo, o ensaio realizado deveria ter sido complementado com um outro, no qual o estore da janela poderia ser fechado. Mais ainda, o dia escolhido para o ensaio não foi o mais adequado, pelo que, no futuro, o mesmo poder-se-ia repetir num dia no qual se registasse uma maior amplitude térmica diária.

No futuro, um ensaio similar poderia ser realizado em edifícios da zona circundante, uma vez que possuem, na sua maioria, desenhos construtivos idênticos, mas caixilharias de janela diferentes. Mais ainda, com a renovação de alguns apartamentos da vizinhança, foram substituídos os vidros simples originais por vidros duplos, pelo que seria interessante analisar o impacto dessa alteração no comportamento térmico da caixa de estore, podendo esta ser igual (original) ou diferente (alterada). Adicionalmente, entender a relevância das condições de exposição solar e sombreamento para os diferentes casos seria, também, algo com interesse, uma vez que as paredes dos edifícios circundantes, da década de 60, são idênticas.

Feito este estudo, poder-se-iam catalogar os resultados obtidos, podendo estabelecer uma estratégia global de intervenção de reabilitação futura, caso os resultados assim o justificassem.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Afonso, J. (2010). *Termografia: Teoria, Procedimentos e Vantagens*, Torre da Marinha, ITEaG, ed. ITEaG.

Disponível em: <https://pt.scribd.com/document/123765181/termografia> [Acedido em 23 de março, 2020, às 21:51h].

Aldeias, A.I. (2003). *Termografia Infravermelha – Métodos Experimentais em Energia e Ambiente*, Instituto Superior Técnico, Lisboa

Disponível em <https://pt.scribd.com/document/381926968/Termografica> [Acedido em 25 de março, 2020 às 00:42h]

Altoé, L. & Filho, D.O. (2012). *Termografia infravermelha aplicada à inspeção de edifícios*, Acta Tecnológica, Vol. 7, nº1, pp. 55-59

Antunes, L.C.S. (2012). *Radiação de corpo negro: lei de Stefan-Boltzmann, lei do deslocamento de Wien*, FC-DQ UBI, pp.11-12

Appleton, J. (2005). *Construções em betão – nota histórica sobre a sua evolução*, Journal Article, Instituto Superior Técnico, Lisboa

Ascione, F., Bianco, N., de Masi, R.F. & Vanoli, G.P. (2013). *Rehabilitation of the building envelope of hospitals: Achievable energy savings and microclimatic control on varying the HVAC systems in Mediterranean climates*, Energy Build, 60, pp. 125-138

Asdrubali, F., Baldinelli, G. & Bianchi, F. (2012). *A quantitative methodology to evaluate thermal bridges in buildings*, Applied Energy, 97, pp.365–373

Avdelidis, N.P. & Moropoulou, A. (2004). *Applications of infrared thermography for the investigation of historic structures*, Journal of Cultural Heritage, Vol. 5, pp. 119-127

Barreira, E. (2004). *Aplicação da termografia ao estudo do comportamento higrotérmico dos edifícios* (Dissertação de Mestrado), FEUP, Porto

-
- Bauer, E., Pavón, E. & Oliveira, E. (2016).** *Inspeção termográfica de fachadas – investigação da influência da fissuração*, Anais do Congresso Brasileiro de Patologia das Construções, CBPAT2016, ISSN 2448-1459
- Bianchi, F., Pisello, A.L., Baldinelli, G. & Asdrubali, F. (2014).** *Infrared Thermography Assessment of Thermal Bridges in Building Envelope: Experimental Validation in a Test Room Setup*, Journal Sustainability, 6, 7107-7120
- Bisegna, F., Ambrosini, D., Paoletti, D., Sfarra, S. & Gugliermetti, F. (2014).** *A qualitative method for combining thermal imprints to emerging weak points of ancient wall structures by passive infrared thermography – A case study*, Journal of Cultural Heritage, Vol. 15, Issue 2, pp. 199-202
- Clark, M., McCann, D. & Forde, M. (2003).** *Application of infrared thermography to the non-destructive testing of concrete and masonry bridges*, NDT & E International, 36(4), pp. 265–275
- DeWitt, D., Incropera, F.P., Lavine, A.S. & Bergman, T.L. (2011).** *Fundamentals of Heat and Mass Transfer*, Seventh Edition, John Wiley & Sons, pp. 3-12
- Dos Santos, G.J. (2018).** *Manifestações patológicas de revestimento cerâmico de fachada: análise de um edifício residencial de Águas Claras – DF*, TCC, UniCEUB, Brasília
- Du, H.X., Wu, H.P., Wang, F.J. & Yan, R.Z. (2015).** *The detection of high-strength concrete exposed to high temperatures using infrared thermal imaging technique*, Materials Research Innovations, 19:sup1, S1-162-S1-167
- FLIR (2006).** *ThermaCAM E300 User's Manual*, Revisão nº a156, Pub. nº 1558439
- Fox, M., Coley, D., Goodhew, S. & de Wilde, P. (2014).** *Thermography methodologies for detecting energy related building defects*, Renewable and Sustainable Energy Reviews, Vol. 40, pp. 296-310
- Freitas, S.S., Freitas, V.P. & Barreira, E. (2014).** *Detection of façade plaster detachments using infrared thermography – A nondestructive technique*, Construction and Building Materials, Vol. 70, pp. 80-87
-

-
- Gaussorgues, G. (1999).** *La thermographie infrarouge- Principes, Technologies, Application*, 4^a ed., Paris: Technique et Documentation Lavoisier.
- Grinzato, E., Cadelano, G. & Bison, P. (2010).** *Moisture map by IR thermography*, Journal of Modern Optics, 57:18, 1770-1778
- HOBO.** *HOBO U12 Temp/RH/Light/External Data Logger User's Manual*, EUA
- Kirimtat, A., Krejcar O. (2018).** *A review of infrared thermography for the investigation of building envelopes: Advances and prospects*, Energy and Buildings, Vol. 176, pp. 390-406
- Kylili, A., Fokaides, P.A., Christou, P., & Kalogirou, S.A. (2014).** *Infrared thermography (IRT) applications for building diagnostics: A review*, Applied Energy, Vol. 134, pp. 531-549
- Melrinho, A., Matias, L. & Faria, P. (2015).** *Deteção de anomalias em impermeabilizações de coberturas em terraço através da termografia de infravermelhos*, Tech ITT, Revista Internacional, nº 37, vol. 13, ISSN 1645-5576
- Mendonça, L.V. (2005).** *Termografia por Infravermelhos Inspeção de Betão*, Engenharia & Vida, nº16, pp. 53-57
- Mendonça, L.V., do Amaral, M.M. & Catarino, P. S. (2013).** *A termografia por infravermelhos como ferramenta para auxílio à inspeção e manutenção dos edifícios*, Jornadas de Engenharia de Manutenção, ISEL, Lisboa
- Meola, C. (2012).** *Infrared thermography recent advances and future trends*, Bentham Science Publishers, Universidade de Nápoles Federico II, Itália
- Mollmann, K-P., Volmer, M. (2010).** *Infrared Thermal Imaging*, Wiley-VCH, Second Edition, pp. 31-61 | 84 | 327 | 342-369
- Novo, M.M.M., Bitencourt, C.S., Tiba, P.R.T., Silva, D.G.M & Pandolfelli, V.C. (2014).** *Fundamentals on emissivity and its correlation with the refractory materials, energy saving and the environment*, Cerâmica, vol. 60, no. 253, São Paulo

-
- Rodrigues, A.M., Canha da Piedade, A. & Braga, A.M. (2009).** *Térmica de Edifícios*, Edições Orion
- Ring, E.F.J. (2000).** *The discovery of infrared radiation in 1800*, The Imaging Science Journal, 48:1, 1-8
- Santos, L. (2006).** *Termografia infravermelha em subestações de alta tensão desabrigadas*, Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Itajubá, Itajubá
- Sensirion (2015).** *SHT31 Smart Gadget User Guide*, Suíça
- Taylor, T., Counsell, J. & Gill, S. (2013).** *Energy efficiency is more than skin deep: Improving construction quality control in new-build housing using thermography*, Energy and Buildings, Vol. 66, pp. 222-231
- Taylor, T., Counsell, J. & Gill, S. (2014).** *Combining thermography and computer simulation to identify and assess insulation defects in the construction of building façades*, Energy and Buildings, Vol. 76, pp.130-142
- Tejedor, B., Casals, M. & Gangoells, M. (2018).** *Assessing the influence of operating conditions and thermophysical properties on the accuracy of in-situ measured U-values using quantitative internal infrared thermography*, Energy and Building, Vol. 171, pp. 64-75
- Theodosiou, T.G. & Papadopoulos, A.M. (2008).** *The impact of thermal bridges on the energy demand of buildings with double brick wall constructions*, Energy Build, pp. 2083-2089
- Wellons, M. (2007).** *The Stefan-Boltzmann Law*, Physics Department, The College of Wooster, Wooster, Ohio 44691, USA
- Young, H.D. & Sears, F.W. (1992).** *University Physics*, 8ª Ed., Addison-Wesley Pub. Co.

ANEXO A – TERMOGRAMAS DO ENSAIO PELO INTERIOR

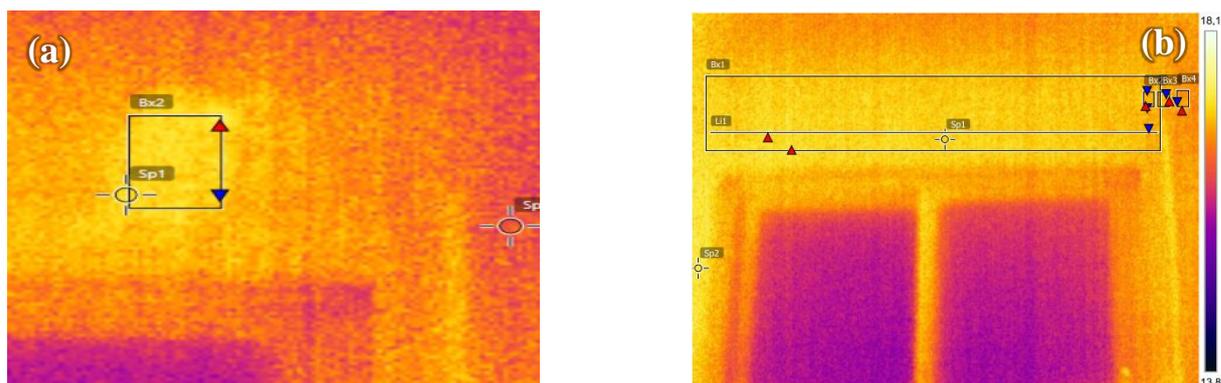


Figura A-0 – Termogramas no interior da habitação correspondentes ao instante I_0 : (a) termograma da folha de papel de alumínio; (b) termograma da zona em estudo.

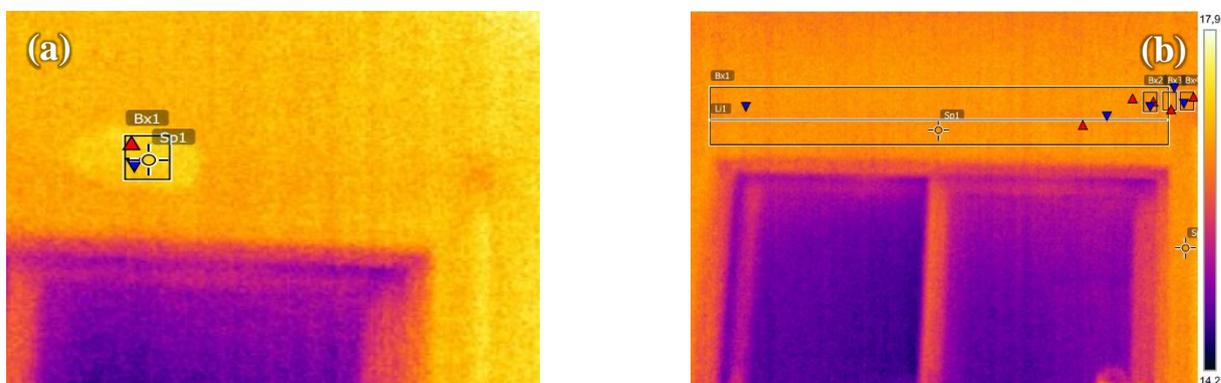


Figura A-1 – Termogramas no interior da habitação correspondentes ao instante I_1 : (a) termograma da folha de papel de alumínio; (b) termograma da zona em estudo.

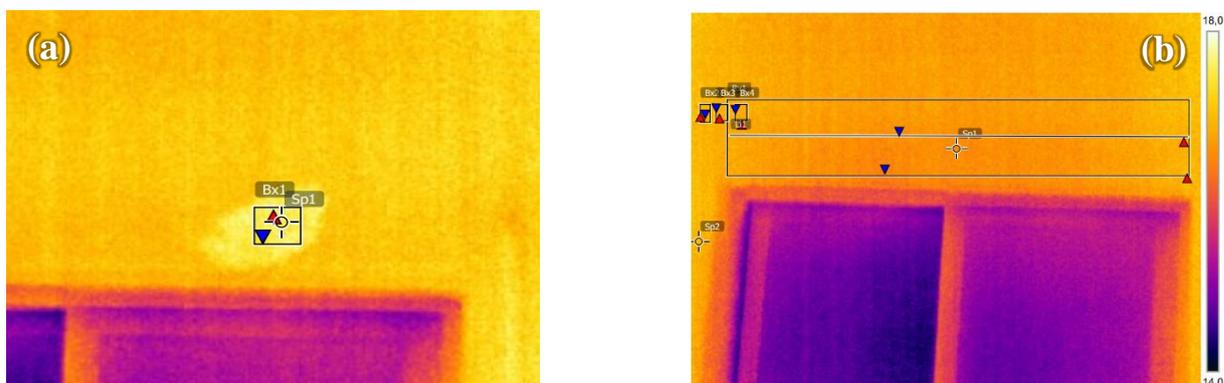


Figura A-2 – Termogramas no interior da habitação correspondentes ao instante I₂: (a) termograma da folha de papel de alumínio; (b) termograma da zona em estudo.

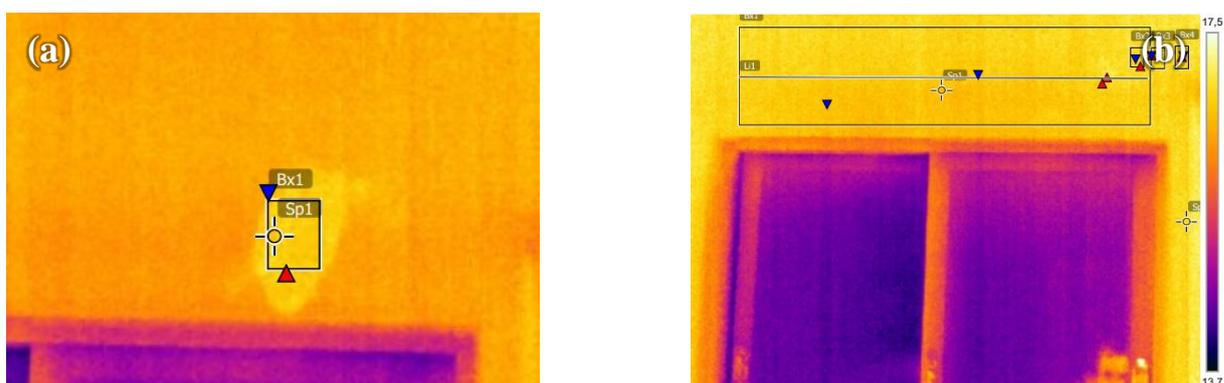


Figura A-3 – Termogramas no interior da habitação correspondentes ao instante I₃: (a) termograma da folha de papel de alumínio; (b) termograma da zona em estudo.

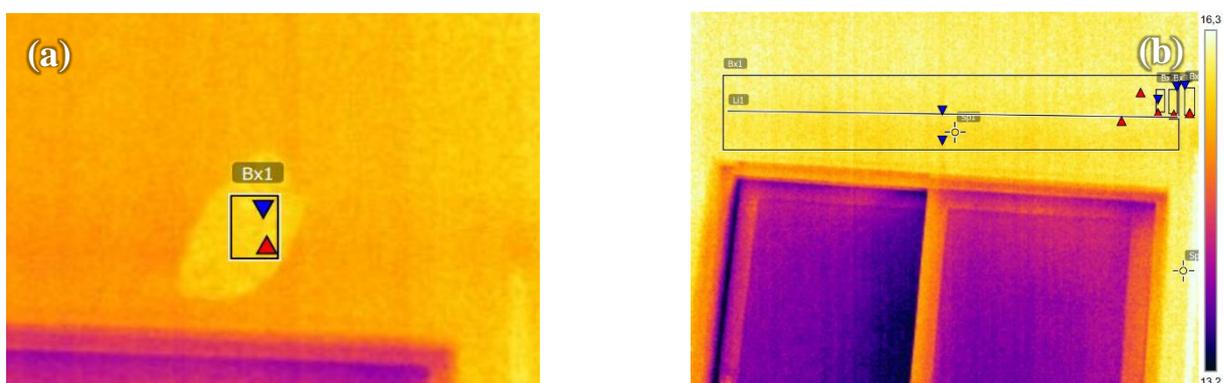


Figura A-4 – Termogramas no interior da habitação correspondentes ao instante I₄: (a) termograma da folha de papel de alumínio; (b) termograma da zona em estud

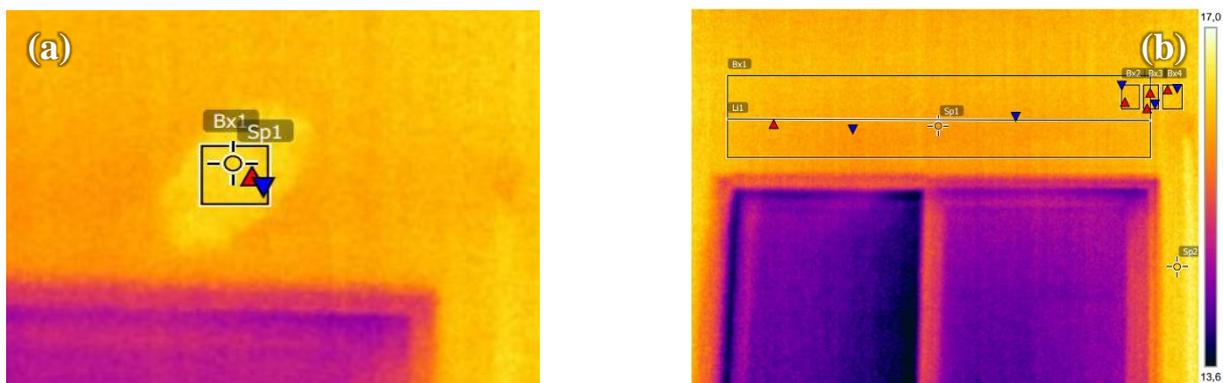


Figura A-5 – Termogramas no interior da habitação correspondentes ao instante I₅: (a) termograma da folha de papel de alumínio; (b) termograma da zona em estudo.

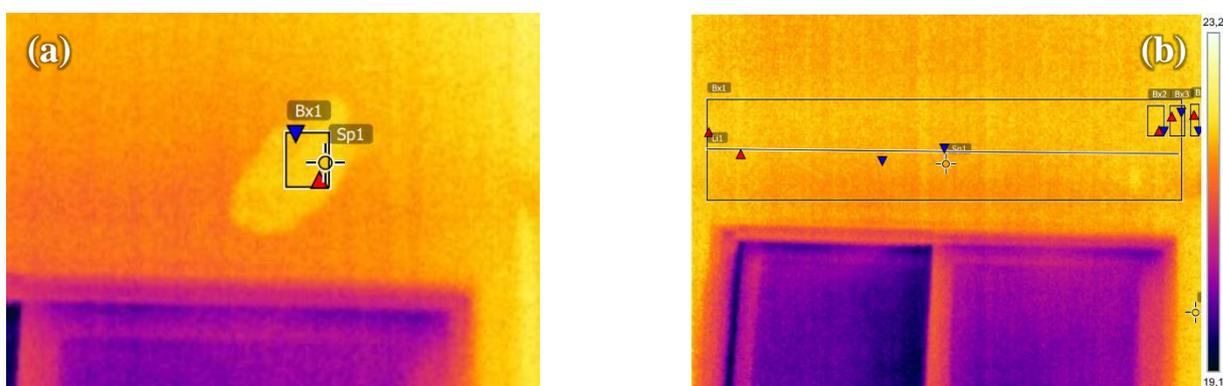


Figura A-6 – Termogramas no interior da habitação correspondentes ao instante I₆: (a) termograma da folha de papel de alumínio; (b) termograma da zona em estudo.

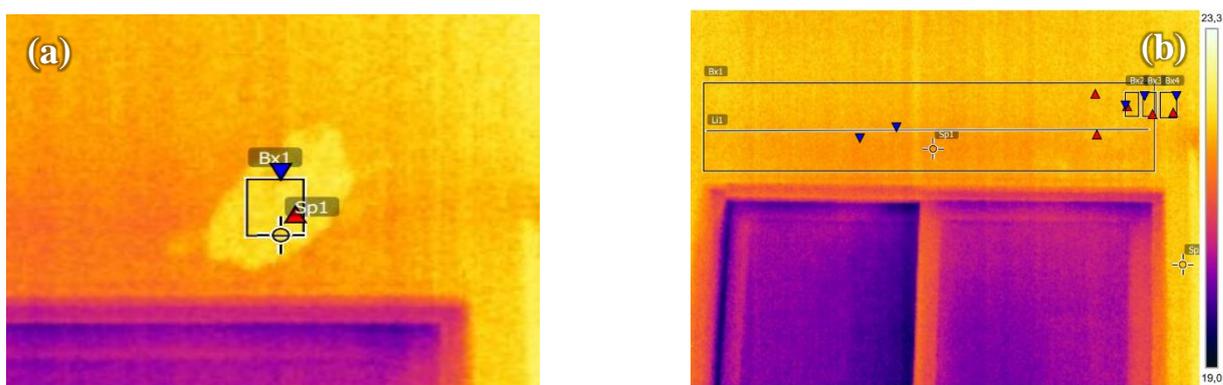


Figura A-7 – Termogramas no interior da habitação correspondentes ao instante I₇: (a) termograma da folha de papel de alumínio; (b) termograma da zona em estudo.

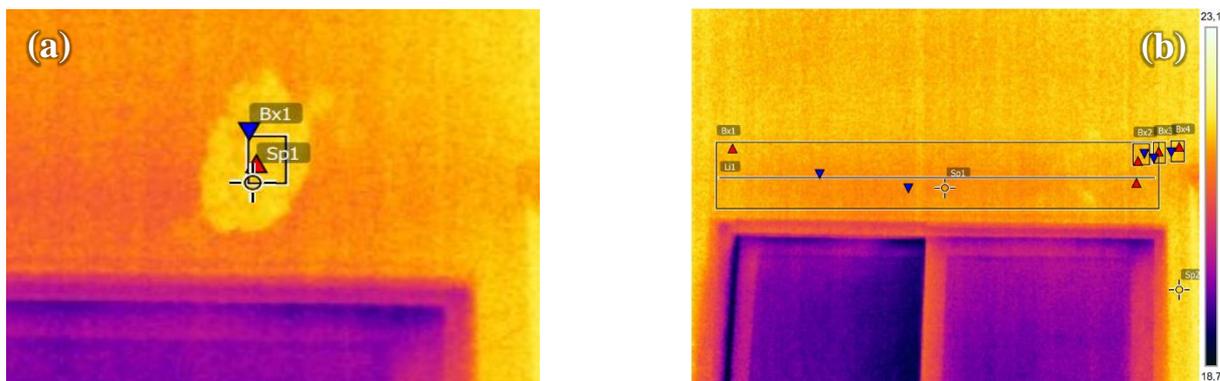


Figura A-8 – Termogramas no interior da habitação correspondentes ao instante I₈: (a) termograma da folha de papel de alumínio; (b) termograma da zona em estudo.

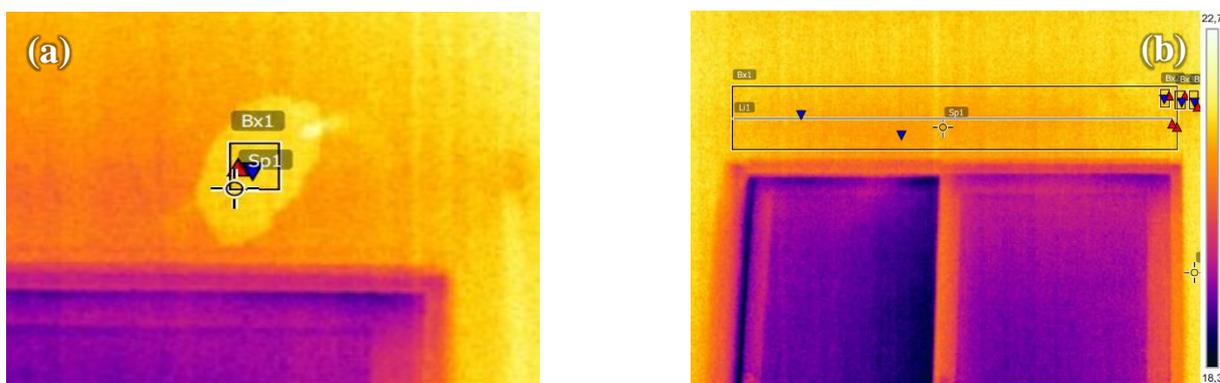


Figura A-9 – Termogramas no interior da habitação correspondentes ao instante I₉: (a) termograma da folha de papel de alumínio; (b) termograma da zona em estudo.

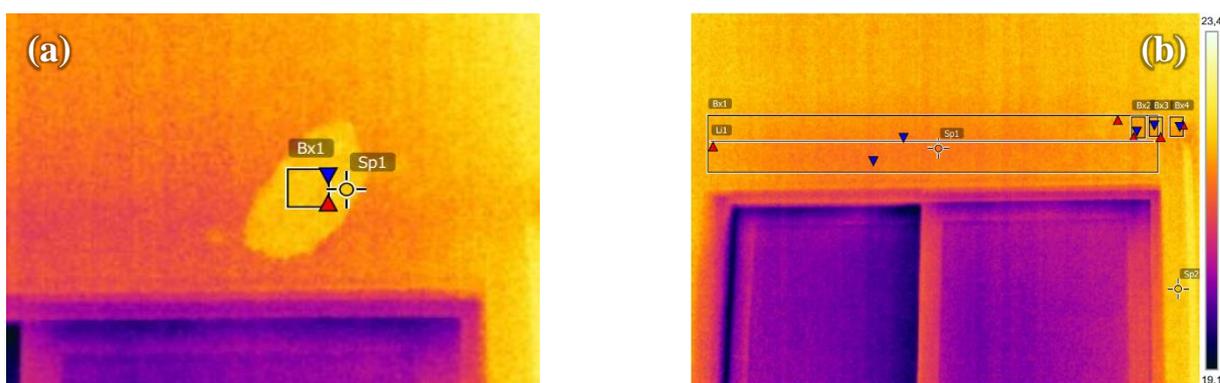


Figura A-10 – Termogramas no interior da habitação correspondentes ao instante I₁₀: (a) termograma da folha de papel de alumínio; (b) termograma da zona em estudo

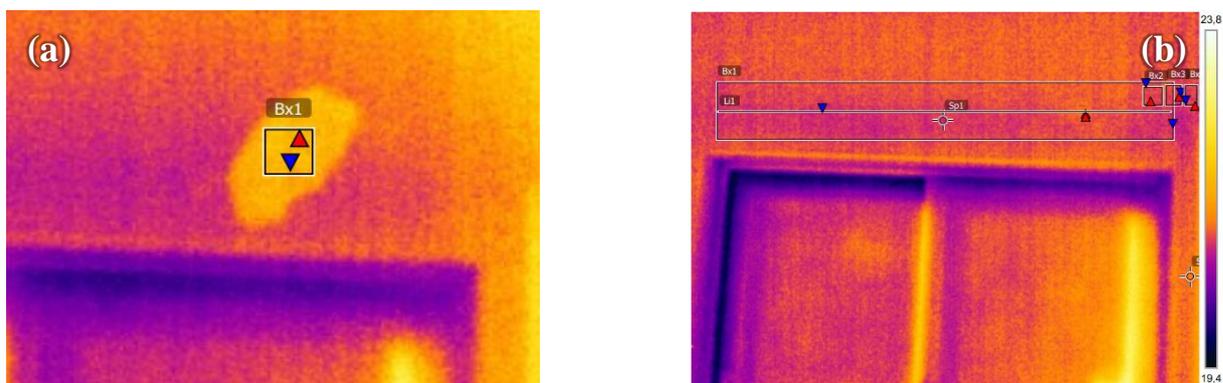


Figura A-11 – Termogramas no interior da habitação correspondentes ao instante I_{11} : (a) termograma da folha de papel de alumínio; (b) termograma da zona em estudo.

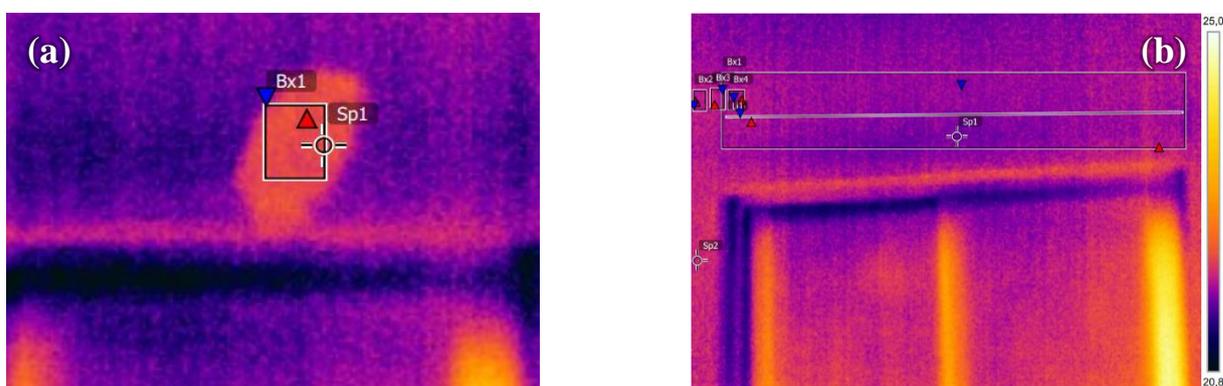


Figura A-12 – Termogramas no interior da habitação correspondentes ao instante I_{12} : (a) termograma da folha de papel de alumínio; (b) termograma da zona em estudo.

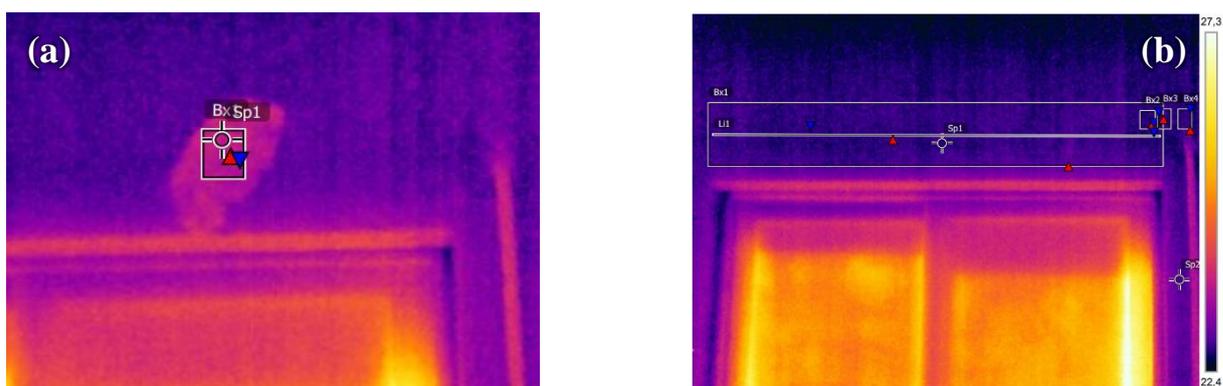


Figura A-13 – Termogramas no interior da habitação correspondentes ao instante I_{13} : (a) termograma da folha de papel de alumínio; (b) termograma da zona em estudo

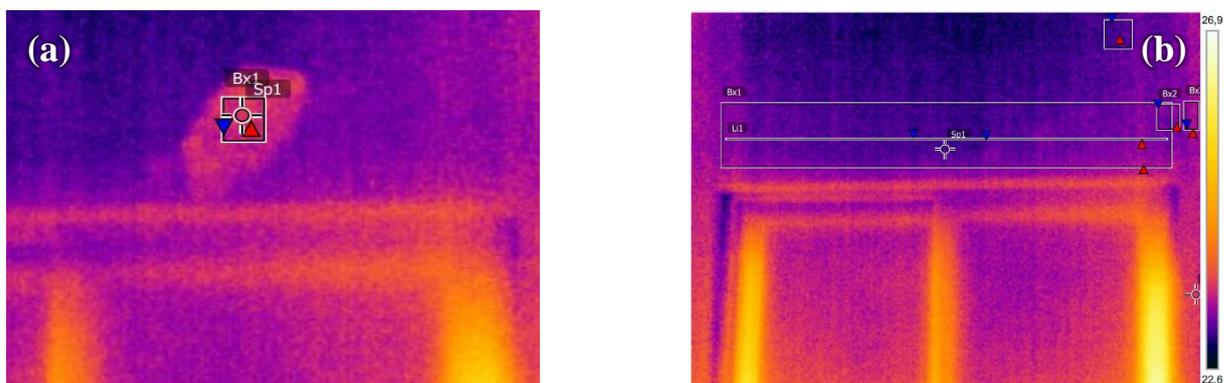


Figura A-14 – Termogramas no interior da habitação correspondentes ao instante I_{14} : (a) termograma da folha de papel de alumínio; (b) termograma da zona em estudo.

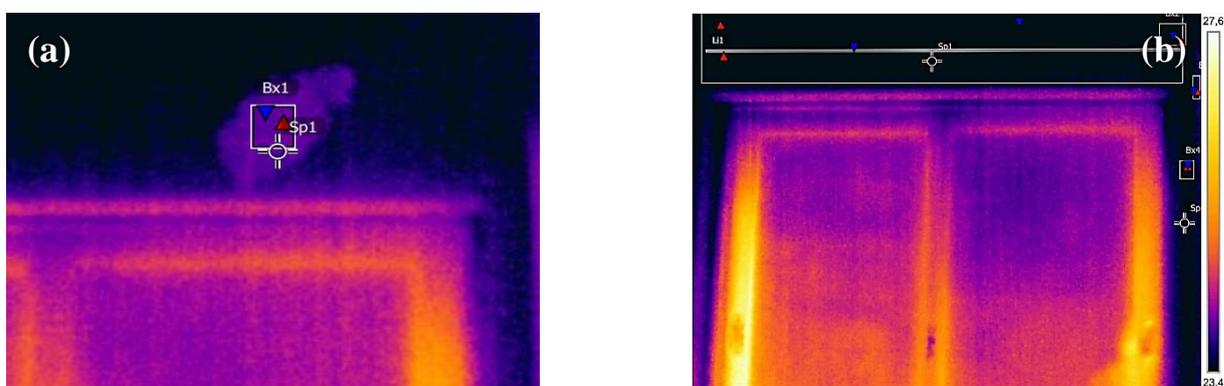


Figura A-15 – Termogramas no interior da habitação correspondentes ao instante I_{15} : (a) termograma da folha de papel de alumínio; (b) termograma da zona em estudo.

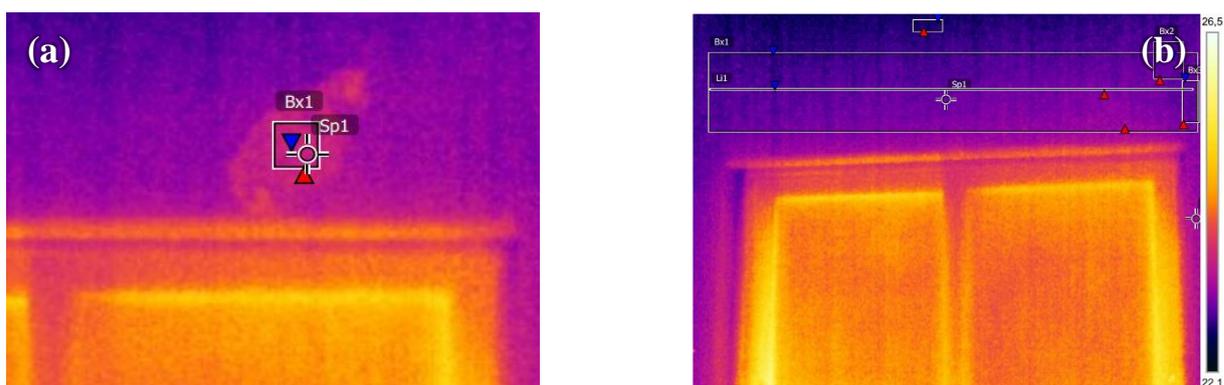


Figura A-16 – Termogramas no interior da habitação correspondentes ao instante I_{16} : (a) termograma da folha de papel de alumínio; (b) termograma da zona em estudo.

ANEXO B – TERMOGRAMAS DO ENSAIO PELO EXTERIOR

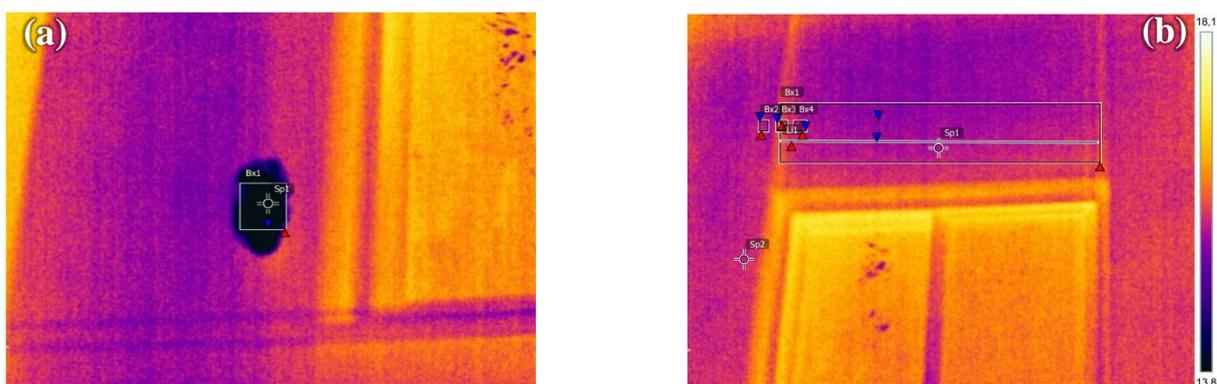


Figura B-0 – Termogramas no exterior da habitação correspondentes ao instante I_0 : (a) termograma da folha de papel de alumínio; (b) termograma da zona em estudo.

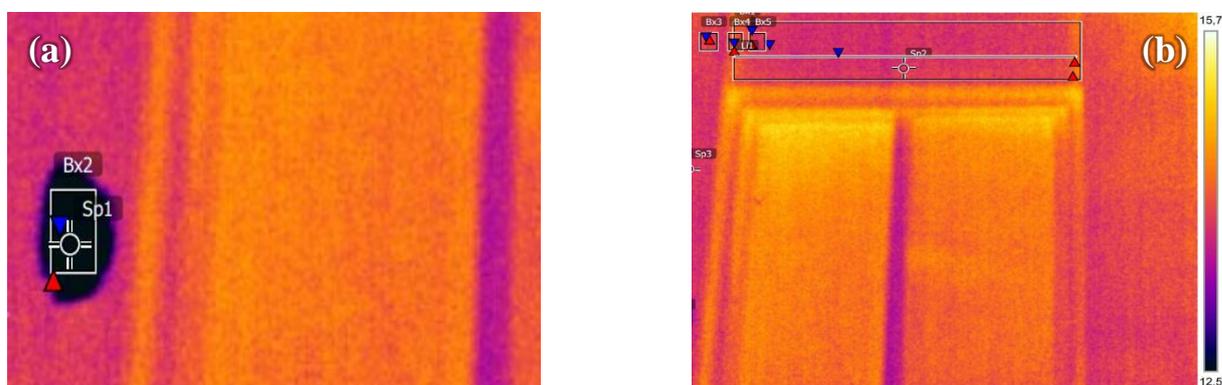


Figura B-1 – Termogramas no exterior da habitação correspondentes ao instante I_1 : (a) termograma da folha de papel de alumínio; (b) termograma da zona em estudo.

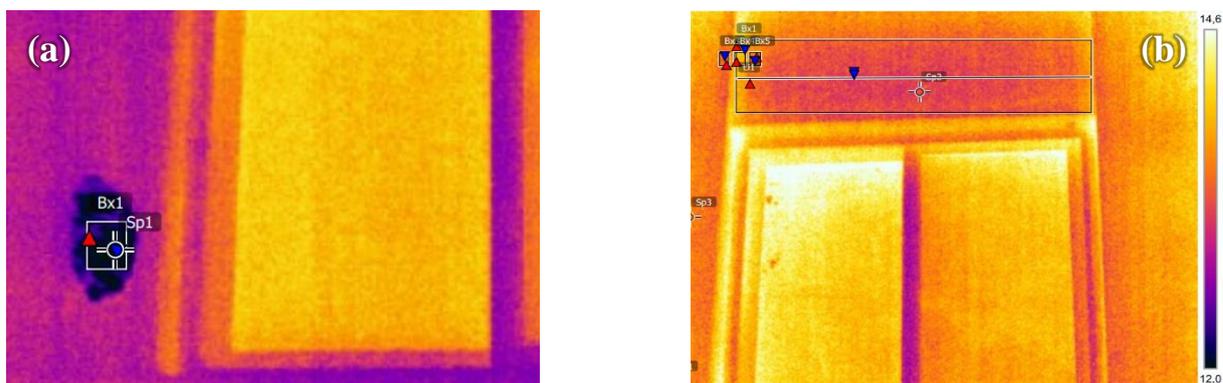


Figura B-2 – Termogramas no exterior da habitação correspondentes ao instante I_2 : (a) termograma da folha de papel de alumínio; (b) termograma da zona em estudo.

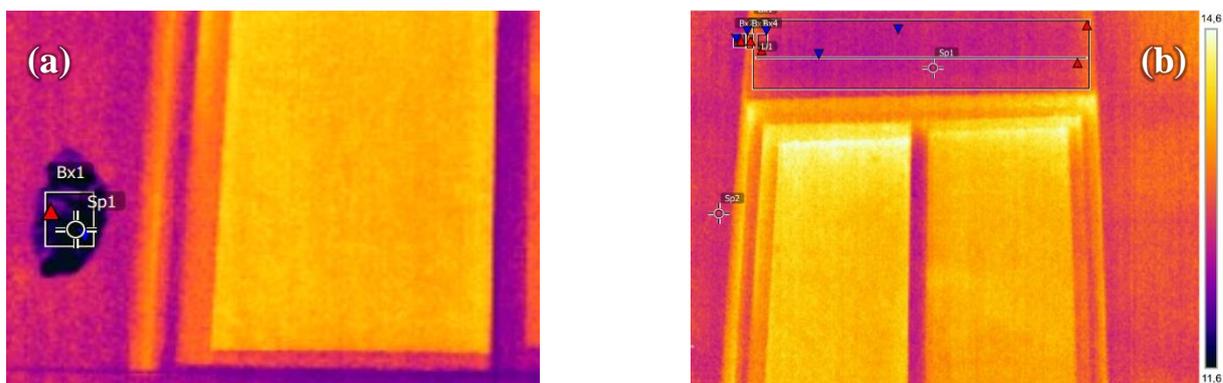


Figura B-3 – Termogramas no exterior da habitação correspondentes ao instante I_3 : (a) termograma da folha de papel de alumínio; (b) termograma da zona em estudo.

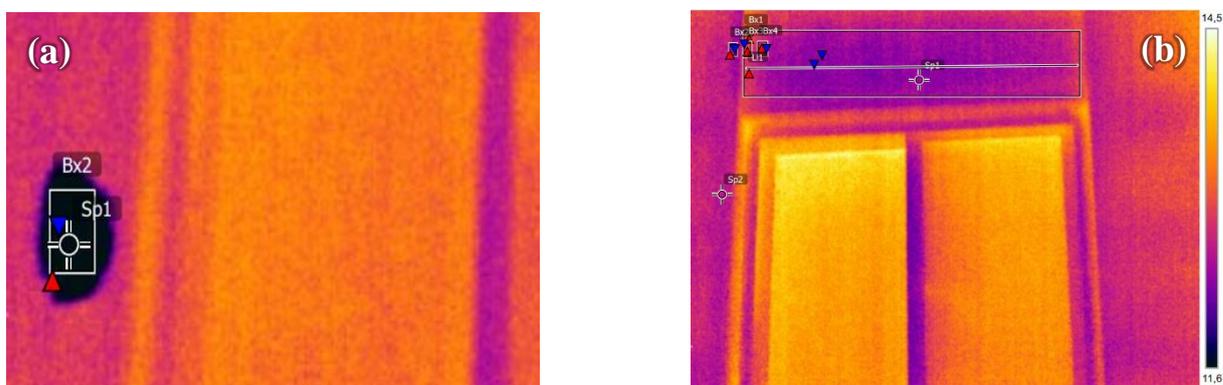


Figura B-4 – Termogramas no exterior da habitação correspondentes ao instante I_4 : (a) termograma da folha de papel de alumínio; (b) termograma da zona em estudo.

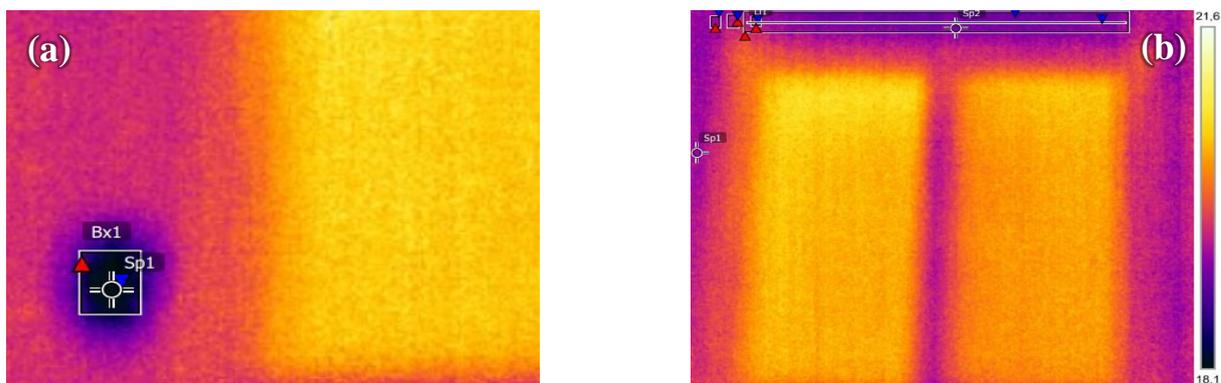


Figura B-5 – Termogramas no exterior da habitação correspondentes ao instante I₅: (a) termograma da folha de papel de alumínio; (b) termograma da zona em estudo.

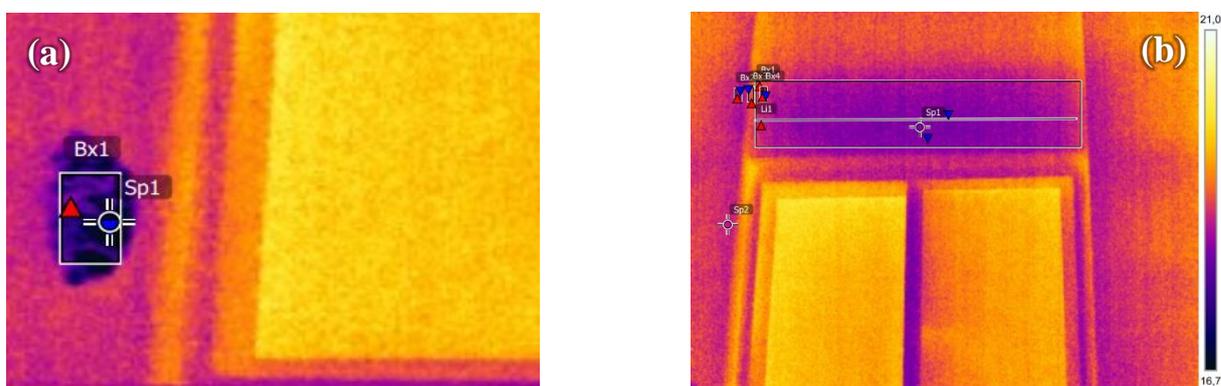


Figura B-6 – Termogramas no exterior da habitação correspondentes ao instante I₆: (a) termograma da folha de papel de alumínio; (b) termograma da zona em estudo.

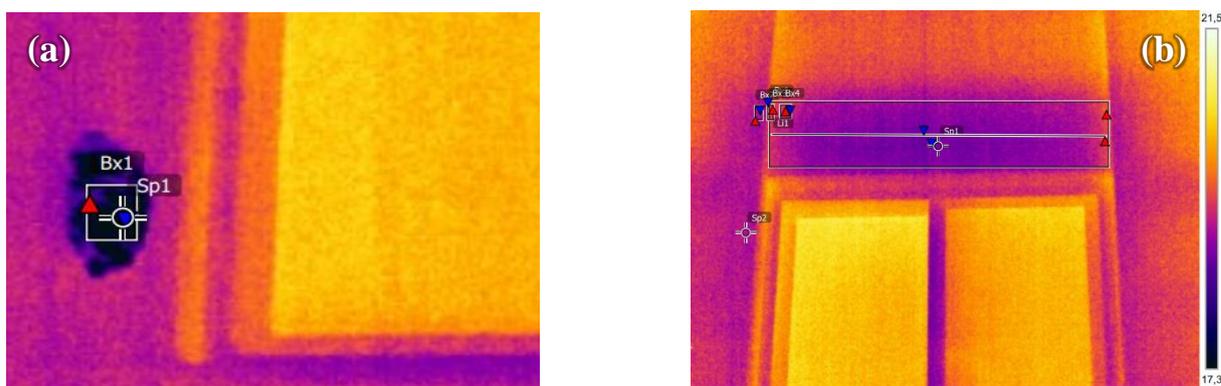


Figura B-7 – Termogramas no exterior da habitação correspondentes ao instante I₇: (a) termograma da folha de papel de alumínio; (b) termograma da zona em estudo.

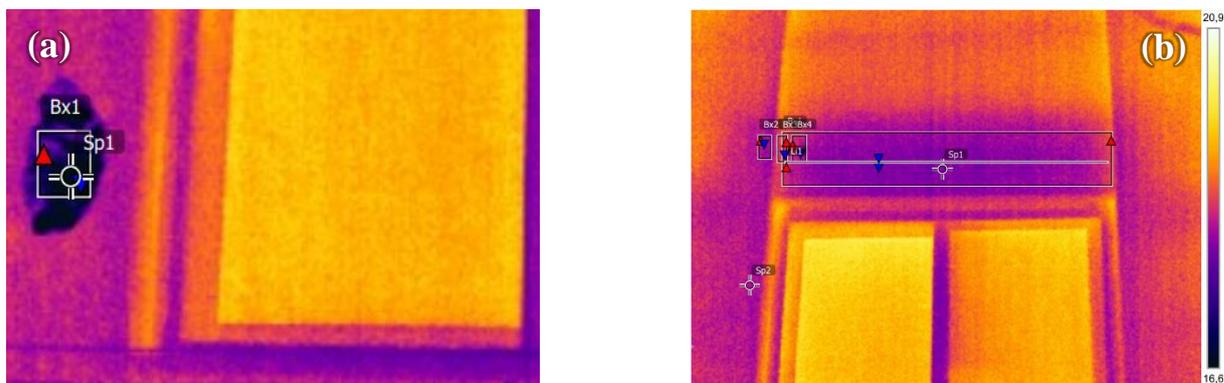


Figura B-8 – Termogramas no exterior da habitação correspondentes ao instante I_8 : (a) termograma da folha de papel de alumínio; (b) termograma da zona em estudo.

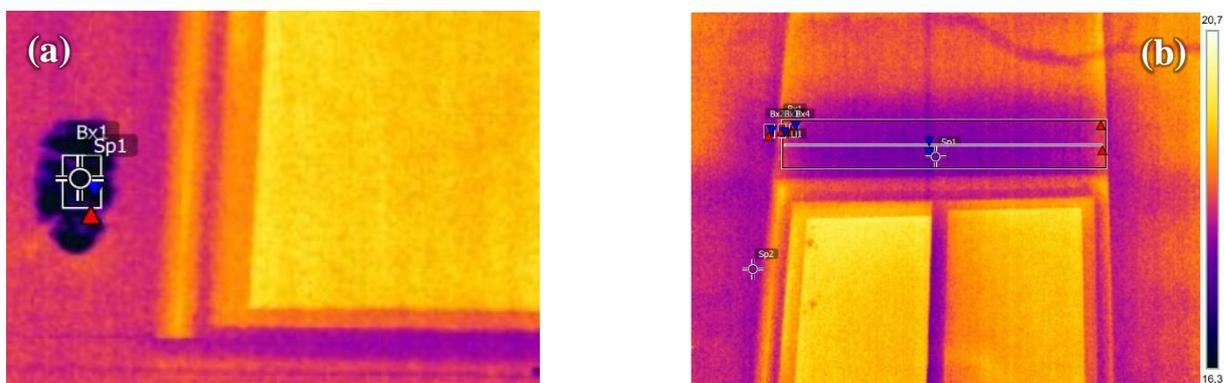


Figura B-9 – Termogramas no exterior da habitação correspondentes ao instante I_9 : (a) termograma da folha de papel de alumínio; (b) termograma da zona em estudo.

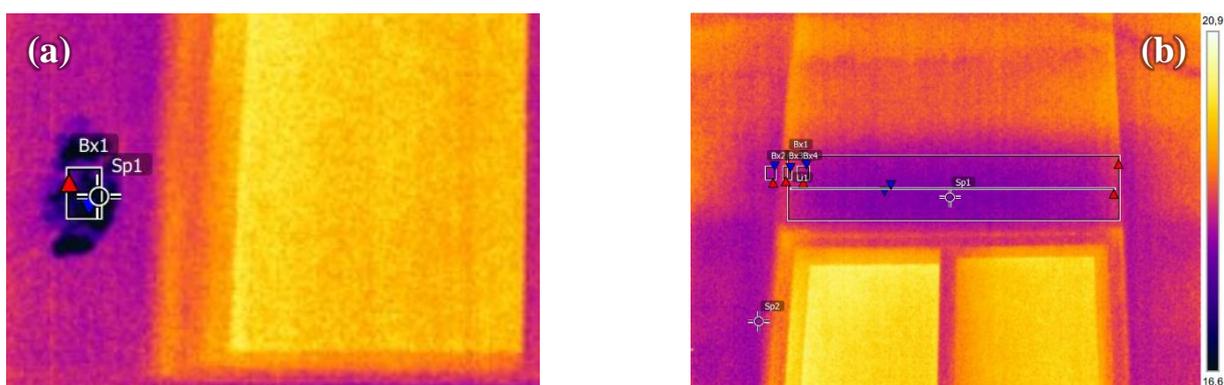


Figura B-10 – Termogramas no exterior da habitação correspondentes ao instante I_{10} : (a) termograma da folha de papel de alumínio; (b) termograma da zona em estudo.

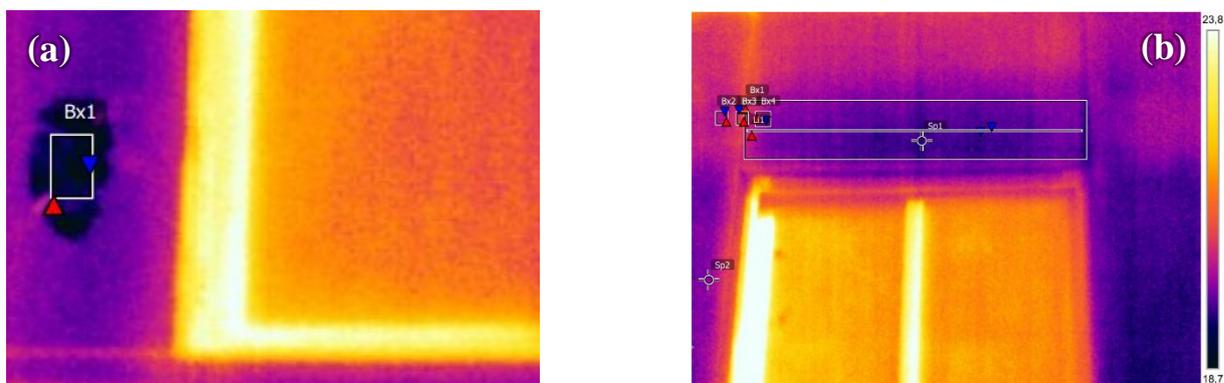


Figura B-11 – Termogramas no exterior da habitação correspondentes ao instante I_{11} : (a) termograma da folha de papel de alumínio; (b) termograma da zona em estudo.

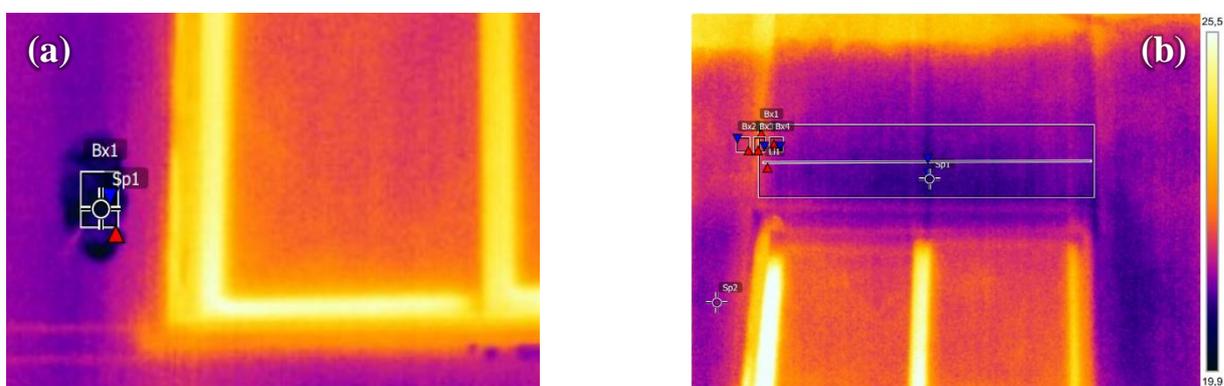


Figura B-12 – Termogramas no exterior da habitação correspondentes ao instante I_{12} : (a) termograma da folha de papel de alumínio; (b) termograma da zona em estudo.

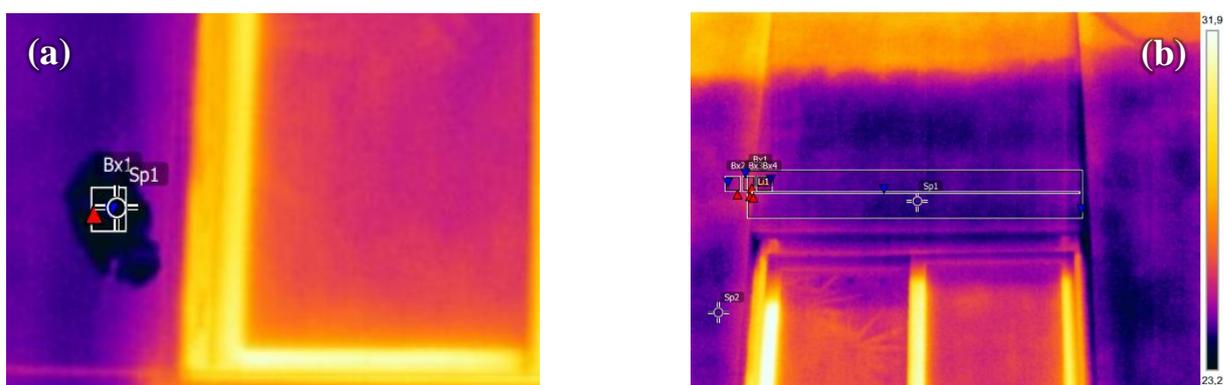


Figura B-13 – Termogramas no exterior da habitação correspondentes ao instante I_{13} : (a) termograma da folha de papel de alumínio; (b) termograma da zona em estudo.

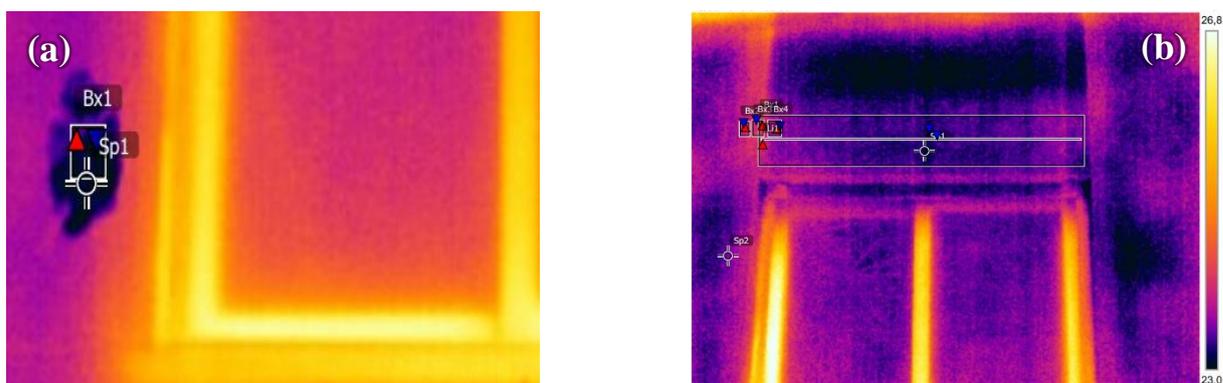


Figura B-14 – Termogramas no exterior da habitação correspondentes ao instante I_{14} : (a) termograma da folha de papel de alumínio; (b) termograma da zona em estudo.

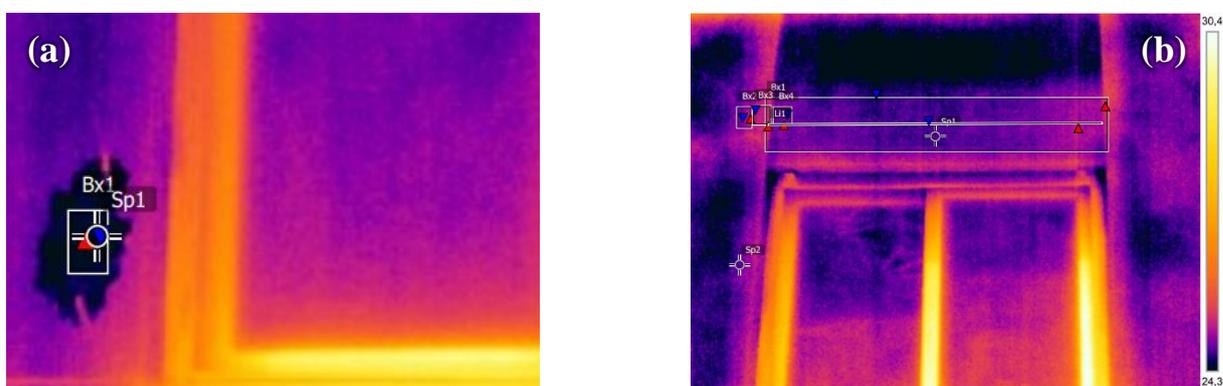


Figura B-15 – Termogramas no exterior da habitação correspondentes ao instante I_{15} : (a) termograma da folha de papel de alumínio; (b) termograma da zona em estudo.

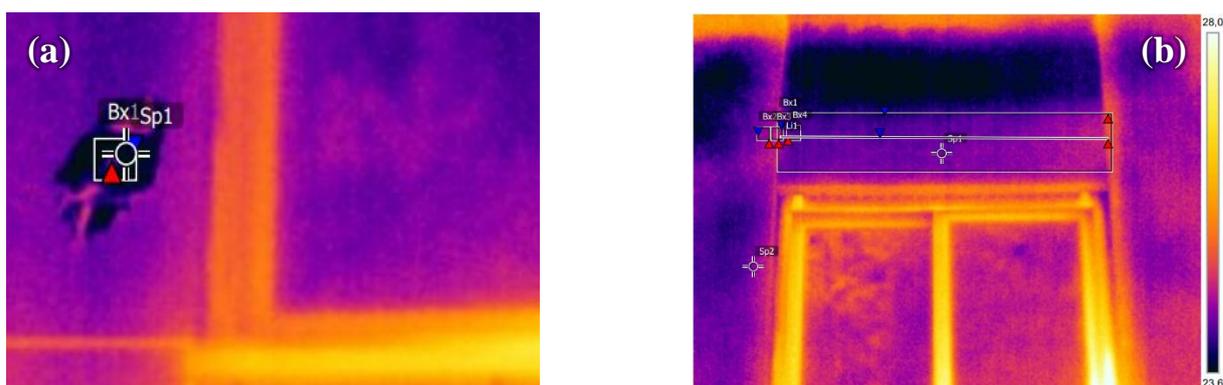


Figura B-16 – Termogramas no exterior da habitação correspondentes ao instante I_{16} : (a) termograma da folha de papel de alumínio; (b) termograma da zona em estudo.