



Instituto Politécnico
de Castelo Branco
Escola Superior
de Tecnologia

Contribuição para a Análise de Manifestações Patológicas em Madeira na Construção com Recurso à Termografia

Determinação da Emissividade de algumas espécies de madeira empregues em Portugal

Mestrado em Construção Sustentável

João Crisóstomo Alves Pereira

Orientadores:
Rui Pitarma
Luís Jorge

Abril de 2014



Instituto Politécnico
de Castelo Branco
Escola Superior
de Tecnologia

Contribuição para a Análise de Manifestações Patológicas em Madeira na Construção com Recurso à Termografia

Determinação da Emissividade de algumas espécies de madeira empregues em Portugal

João Crisóstomo Alves Pereira

Orientadores

Rui Pitarma

Luís Jorge

Trabalho de Projeto apresentado à Escola Superior de Tecnologia do Instituto Politécnico de Castelo Branco para cumprimento dos requisitos necessários à obtenção do grau de Mestre em Construção Sustentável, realizada sob a orientação científica do Professor Coordenador Doutor Rui Pitarma, do Instituto Politécnico da Guarda, e coorientação do Professor Adjunto da Unidade Técnico Científica de Engenharia Civil Doutor Luís Jorge, do Instituto Politécnico de Castelo Branco.

Abril de 2014

Composição do júri

Presidente do júri

Doutora Ana Teresa Vaz Ferreira Ramos,
Professor Adjunto da Escola Superior de Tecnologia de Castelo Branco

Vogais

Doutor João Esteves Ramos,
Professor Coordenador do Instituto Politécnico de Leiria (arguente)

Doutora Cristina Calmeiro dos Santos,
Professor Adjunto da Escola Superior de Tecnologia de Castelo Branco (arguente)

Doutor Rui Pitarma
Professor Coordenador do Instituto Politécnico da Guarda (orientador)

Dedicatória

À Cristina.

"Quando alimentamos mais a nossa coragem
do que os nossos medos ...
passamos a derrubar muros e a construir pontes."

Lígia Guerra

Agradecimentos

Agradeço em primeiro lugar à minha esposa, aos meus Pais e Sogros, pela ajuda, estímulo e amizade.

Agradeço também ao meu irmão e aos tios da minha esposa pelo estímulo e encorajamento.

Ao meu coorientador Professor Doutor Luís Jorge por me ter arranjado as amostras de madeira, sem as quais o trabalho não teria sido possível, também pelo facto de me ter dado oportunidade de executar parte dos ensaios no Laboratório de Construções da Escola Superior de Tecnologia de Castelo Branco, bem como pela utilização da estufa e humidímetro.

Agradeço ao meu orientador Professor Doutor Rui Pitarma que muito gentilmente me cedeu os equipamentos (Câmara de Termografia, e dispositivo com sensores para determinação da temperatura, humidade ambiente e luminosidade).

Estou grato aos dois pela partilha de ideias e paciência, estímulo e orientação, pela disponibilidade e apoio a qualquer hora.

Agradeço, à esposa do meu orientador, Professora Doutora Maria Eduarda, o facto de muito gentilmente me ter cedido as instalações laboratoriais e a utilização da estufa, onde foram realizados os ensaios no IPG.

Agradeço, de forma muito especial, a ajuda prestada pela minha esposa, sem a qual, também se teria tornado muito mais complicada a realização dos ensaios.

Resumo

Grande parte do património edificado encontra-se construído em estrutura de madeira que, devido à inexistência de manutenção, fica suscetível a ataques de agentes biológicos como fungos e insetos xilófagos. O perigo do fenómeno aumenta quando, exteriormente, apenas pequenos sinais de dano são visíveis. Só um perito os relaciona com a presença e dimensão do dano interno. Frequentemente, o dano só é revelado quando a estrutura entra em pré-colapso.

A deteção precoce do dano é desejável, requerendo inspeções regulares para prevenir prejuízos às pessoas e à propriedade.

A deteção de manifestações patológicas em estruturas de madeira reveste-se ainda de grande interesse para os técnicos em contextos de reabilitação de construções. Os sistemas de diagnóstico existentes, consomem muito tempo em obra e requerem a presença de equipas de pessoal se a estrutura a ser examinada não pode ser alcançada a partir do chão. Geralmente são invasivos, requerendo a realização de orifícios que podem vir a tornar-se caminhos de acesso para agentes patogénicos. Outros métodos utilizam raio x que dão a perceção de que não são seguros para a saúde.

O método mais frequente é a percussão da madeira, com objeto contundente, e interpretação do som produzido. É entendido como rápido e de melhor relação custo/benefício. Os resultados estão dependentes da experiência do operador. Requerendo contacto direto com a área a ser avaliada, são necessárias uma ou duas pessoas ao nível do chão e mais quando se precisa alcançar partes superiores da estrutura, com recurso a equipamento como elevadores ou montagem de andaimes. A interpretação da informação pode ser lenta e difícil, dependendo da variedade e quantidade de elementos.

As técnicas correntemente utilizadas fornecem informação apenas pontual. O todo é obtido por extrapolação, com uma prolongada série de investigações.

Como metodologia de planeamento dos sistemas de avaliação das estruturas, estes devem ser utilizados dos menos para os mais invasivos, para que seja minimizado o dano na estrutura.

Este trabalho investiga o papel da termografia como método de avaliação durante ou após uma inspeção visual ter sido realizada. Sendo uma técnica não destrutiva, de não contacto e versátil, pode constituir uma ferramenta de inspeção de grande utilidade. Pode ser usada previamente ou durante obras de reparação e manutenção de edifícios de grande valor histórico e artístico. Contribui para detetar diferentes teores de água, distintos estados de deterioração, perdas de densidade e defeitos, com o objetivo de avaliar o estado da madeira e localizar componentes a ser substituídos, contribuindo para a sustentabilidade, evitando-se a substituição integral dos elementos de madeira.

A utilização de uma câmara de infravermelhos portátil, permite avaliar partes elevadas da estrutura, que não podem ser acedidas do chão em tempo real. Este método é não invasivo e totalmente inócuo para as pessoas. Permite a monitorização do progresso de uma patologia, o que é vantajoso relativamente a outros métodos.

Neste trabalho, o método utilizado baseia-se na avaliação de imagens térmicas o qual é descrito de forma crítica. A termografia foca-se num exame visual cuidado da madeira para encontrar sinais externos que possam revelar possíveis deteriorações internas.

A termografia é uma técnica pouco testada *in situ* para a madeira. O objetivo inicial deste trabalho é denotar o alcance e as possibilidades de utilização desta técnica, partindo de uma revisão bibliográfica ao tema. Em relação ao trabalho experimental, com a determinação da emissividade pretende-se um contributo para a utilização da técnica, considerando que a correta medição da temperatura está fortemente dependente do valor da emissividade do material. Neste trabalho são apresentados e discutidos resultados das medições da emissividade para amostras de madeira de diferentes espécies de origem nacional. Apesar de apenas recentemente estar a ser utilizada como técnica de inspeção para avaliação e diagnóstico de estruturas de madeira, os resultados apontam para um contributo efetivo nesta matéria.

Palavras chave

Emissividade; Termografia por Infravermelhos (TIV); Madeira; Inspeção de Estruturas; Ensaio Não-Destrutivo.

Abstract

Much of the built heritage is done on wooden structure which due to lack of maintenance, is susceptible to biological attack such as fungi and wood-destroying insects. The danger increases when, outwardly, only small signs of damage are visible. Only experts associate the presence and extent of internal damage. Often, the damage is only revealed when the structure fails.

Preservation shall be made by early detection of damage, requiring regular inspections to prevent harm to people and property.

Detection of pathological manifestations is of great interest to engineers who make assessment of timber structures, for the rehabilitation of buildings. The existing diagnostic systems, are time consuming and require the presence of team personnel. Generally are invasive, requiring drilling holes that may become access roads to pathogens . Other methods use x-ray that give the perception that they are not safe for health.

The most common method is the forerunner of wood with blunt object, and interpretation of the sound produced. It is understood, quick and good cost/benefit ratio. However, the results are dependent on operator experience. Requiring direct contact with the area to be evaluated, one or two people are needed at ground level and more when you need to reach higher parts of the structure, using equipment such as lifts or scaffolding. The interpretation of information can be slow and difficult, depending on the variety and quantity of elements.

The techniques currently used only provide information on short tracks of the wood elements. The whole is obtained through extrapolation with an extended series of investigations.

The systems for the evaluation of the structures should take care of low invasive approach, so that the structure is damaged as little as possible.

This paper investigates the role of thermal imaging as a method of assessment during or after a visual inspection has been performed. Being a non-destructive technique for non-contact it can be a versatile tool, very useful for inspection. Can be used for repair and maintenance of buildings of great historical and artistic value. Helps to detect different water contents, different states of deterioration, loss of density and defects, in order to assess the state of the timber and locate components to be replaced, contributing to sustainability, avoiding the full replacement of wooden elements.

The use of an portable infrared camera, allows to evaluate the structure, which cannot be accessed from the ground in real time. This method is non-invasive and totally harmless to people. Allows monitoring the progress of a disease, which is advantageous over other methods.

Hereby, the thermal imaging methodology is used and critically described. Thermography focuses on a careful visual examination of the wood to find external signs which might indicate possible internal deterioration.

Thermography is a in situ technique with few experience for wood. The purpose is to denote the scope and possibilities of this technique in terms of literature review. Regarding the experimental work, the determination of the emissivity intends to contribute to the use of the technique. The correct measurement of temperature is strongly dependent on the value of the emissivity of the material. Are presented and discussed results of measurements of emissivity for wood samples from different species of domestic origin in this only recently is being used as inspection technique for the evaluation and diagnosis of wooden structures, the results point to an effective contribution in this area.

Keywords

Emissivity; Infrared Thermography (IRT); Wood; Structures Assessment; Nondestructive Testing (NDT)

Índice geral

| | |
|-------------------------------------------------------|------|
| Índice de Figuras | XVII |
| Índice de Tabelas..... | XXII |
| 1. Introdução..... | 1 |
| 1.1 Descrição Geral do Trabalho | 2 |
| 1.1.1 Objetivos Gerais | 2 |
| 1.1.2 Objetivos Específicos..... | 3 |
| 1.2 O Problema em Estudo e Sua Relevância..... | 3 |
| 1.3 Organização do Trabalho | 4 |
| 2. Métodos de Avaliação de Estruturas de Madeira..... | 7 |
| 2.1 Inspeção Inicial | 7 |
| 2.1.1 Inspeção Visual..... | 7 |
| 2.1.2 Impacto Sonoro | 7 |
| 2.1.3 Mapeamento de Fendas | 7 |
| 2.2 Suscetibilidade Ambiental..... | 9 |
| 2.2.1 Medição das condições ambientais..... | 9 |
| 2.2.2 Medição do Teor de Água na Madeira | 9 |
| 2.3 Endoscopia | 11 |
| 2.4 Ensaios de Resistência | 12 |
| 2.4.1 Resistência à Penetração | 12 |
| 2.4.2 Resistência ao Arrancamento | 12 |
| 2.4.3 Resistência à Perfuração..... | 13 |
| 2.5 Extração de Carotes | 15 |
| 2.6 Ensaios Dinâmicos..... | 17 |
| 2.6.1 Ondas de Tensão | 17 |
| 2.6.1.1 Ondas de Tensão Sonoras..... | 18 |
| 2.6.1.2 Análise do Espectro de Frequência..... | 18 |
| 2.6.1.3 Ondas de Tensão Ultrassónicas..... | 19 |
| 2.6.1.4 Técnica de Eco Ultrassónica | 19 |
| 2.6.2 Resposta Dinâmica..... | 21 |
| 2.7 Raio X..... | 22 |
| 3. Termografia por Infravermelhos | 23 |

| | |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| 3.1 Algumas Definições de Termografia por Infravermelhos..... | 23 |
| 3.2 Radiação Infravermelha..... | 25 |
| 3.3 História da Termografia por Infravermelhos | 27 |
| 3.4 Termografia Qualitativa vs Termografia Quantitativa..... | 28 |
| 3.5 Avaliação Não Destrutiva por Termografia..... | 30 |
| 3.6 Diferentes Tipos de Termografia..... | 31 |
| 3.7 Aplicações da Termografia por Infravermelhos..... | 35 |
| 3.7.1 Campos de Aplicação na Engenharia Civil..... | 38 |
| 3.8 Leis que regem a Radiação..... | 40 |
| 3.8.1 Fenómenos de Transferência de Calor | 40 |
| 3.8.2 Definição de Corpo Negro | 40 |
| 3.8.3 Lei de Planck | 41 |
| 3.8.4 Lei do Deslocamento de Wien | 41 |
| 3.8.5 Lei de Stefan-Boltzman | 42 |
| 3.8.6 Corpo Real..... | 42 |
| 3.9 Noção de Emissividade e Fatores que a Afetam | 46 |
| 3.9.1 Comprimento de Onda | 46 |
| 3.9.2 Ângulo de Observação..... | 47 |
| 3.9.3 Temperatura | 47 |
| 3.10 Métodos Expeditos para a Determinação da Emissividade..... | 48 |
| 3.10.1 Utilização de um termopar | 48 |
| 3.10.2 Utilização de fita isolante preta adesiva | 49 |
| 3.10.3 Utilização de tinta preta..... | 49 |
| 3.10.4 Dificuldades na Aplicação dos Métodos Expeditos..... | 49 |
| 3.11 Tabela com Valores para a Emissividade do Material Madeira | 50 |
| 3.12 Outros Fatores que afetam a TIV | 52 |
| 3.13 Incerteza na escolha dum valor correto para a Emissividade..... | 52 |
| 3.14 Vantagens e Limitações da TIV..... | 53 |
| 3.15 Que Câmara Termográfica escolher | 54 |
| 3.16 Alguns Trabalhos Académicos Realizados no Campo da Termografia, em Língua Portuguesa..... | 56 |
| 4. Termografia na Madeira..... | 59 |
| 4.1 Ensaios Laboratoriais | 60 |

| | |
|----------------------------------------------------------------------------|-----|
| 4.2 Ensaaios <i>in situ</i> | 75 |
| 4.3 Inspeção de Biodegradação | 87 |
| 5. Determinação da Emissividade..... | 91 |
| 6. Programa Experimental..... | 98 |
| 6.1 Introdução | 98 |
| 6.1.1 Objetivos do trabalho Experimental | 98 |
| 6.1.2 Caracterização do Problema..... | 98 |
| 6.2 Metodologia..... | 100 |
| 6.2.1 Material e Equipamentos..... | 100 |
| 6.2.1.1 Amostras | 103 |
| 6.2.2 Métodos | 105 |
| 6.2.2.1 Determinação da Temperatura Aparente Refletida (Método Refletor) | |
| | 105 |
| 6.2.2.2 Determinação da Emissividade | 106 |
| 6.2.2.3 Determinação do Teor em Água das Amostras | 108 |
| 6.2.2.4 Descrição da Organização dos ensaios nos diferentes Estudos..... | 108 |
| 6.3 Resultados..... | 110 |
| 6.3.1 Emissividade | 110 |
| 6.3.1.1 Emissividade em CNL..... | 110 |
| 6.3.1.2 Emissividade em LEM/IPG..... | 112 |
| 6.3.1.3 Emissividade em LEC/IPCB | 116 |
| 6.3.2 Síntese dos Resultados | 124 |
| 6.3.2.1 Condições Ambientais..... | 124 |
| 6.3.2.2 Por Amostra de Madeira | 125 |
| 6.4 Discussão..... | 128 |
| 6.4.1 Fatores Relevantes e Dificuldades | 128 |
| 6.4.1.1 Teor de Água das Amostras | 128 |
| 6.4.1.2 Geração do Gradiente Térmico..... | 129 |
| 6.4.2 Análise dos Valores Máximo e Mínimo Obtidos para a Emissividade, nos | |
| diferentes Ambientes, e respetivo Teor de Água para cada Amostra..... | 131 |
| 6.4.3 Comparação dos Valores Obtidos para a Emissividade com os de Outros | |
| Autores | 133 |
| 6.4.4 Relação da Emissividade com outros parâmetros..... | 135 |
| 6.4.4.1 Relação da Emissividade com o Teor de Água das amostras..... | 135 |

| | |
|----------------------------------------------|-----|
| 7. Conclusões | 139 |
| 7.1 Considerações Finais..... | 139 |
| 7.2. Proposta de Desenvolvimento Futuro..... | 140 |
| 8. Referências Bibliográficas | 141 |

Índice de Figuras

| | |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Figura 1 - Reflorestação e sequestro extra de carbono. (Retirado de Gervásio, 2013). | 1 |
| Figura 2 - Humidímetro - (Foto do Autor). | 9 |
| Figura 3 - Em A - Boroscópio rígido de lentes. Em B - Flexoscópio. | 11 |
| Figura 4 - Esquema de montagem do equipamento de ensaio sonoro. | 18 |
| Figura 5 - Esquema da técnica de eco ultrassónica. | 20 |
| Figura 6 - Equipamento de ensaio da técnica de eco ultrassónica | 20 |
| Figura 7 - Espectro de Radiação Eletromagnética, onde se pode ver o Espectro Infravermelho contínuo ao Espectro Visível. | 25 |
| Figura 8 - Balanço Energético de um corpo sólido semitransparente, quando irradiado numa das suas faces (Adaptado de Raphael de Almeida, 2010). | 26 |
| Figura 9 - M_T deve ser diferente de M_B para a deteção do alvo (Retirado de Holst, 2000). | 26 |
| Figura 10 - Variação da Temperatura Superficial da amostra lida em função da variação da emissividade considerada. | 28 |
| Figura 11 - Termograma de estrutura de madeira, obtido no modo passivo. | 30 |
| Figura 12 - Termograma de amostra de madeira, obtido no modo ativo. | 30 |
| Figura 13 - Representação de TIV do modo reflexão e do modo de transmissão. (Adaptado de Raphael de Almeida, 2010). | 31 |
| Figura 14 - Representação de TIV no modo de reflexão de peça sem e com defeito. (Adaptado de Raphael de Almeida, 2010). | 32 |
| Figura 15 - Modo de reflexão da TIV. Variação da temperatura em função do tempo e existência ou não de defeito (Adaptado de Raphael de Almeida, 2010). | 32 |
| Figura 16 - Representação de TIV no modo de transmissão de peça sem e com defeito. (Adaptado de Raphael de Almeida, 2010). | 33 |
| Figura 17 - Modo de transmissão da TIV. Variação da temperatura em função do tempo e existência ou não de defeito (Adaptado de Raphael de Almeida, 2010). | 33 |
| Figura 18 - Equipamento completo para execução de inspeção termográfica pela técnica de pulso instantâneo. (1) Máquina termográfica acoplada a flash de alta potência 1MW. (2) Unidade processadora de sinal (Raphael de Almeida, 2010). | 36 |
| Figura 19 - Comparação da utilização de técnicas de inspeção não destrutiva. | 37 |
| Figura 20 - Vista desarmada de uma parede pombalina. (Cóias, 2006). | 38 |
| Figura 21 - Vista termográfica de parede pombalina relativa à imagem anterior onde se podem ver destacadas as treliças de madeira. (Cóias, 2006). | 38 |
| Figura 22 - Fundamentação teórica de deteção de elementos de madeira em paredes de alvenaria. (Cóias, 2006). | 39 |
| Figura 23 - Emissividade espectral para diferentes corpos. | 44 |
| Figura 24 - Emissividade espectral para diferentes corpos não metálicos: água (1), terra (2), plástico (3) (Gaussorgues como citado em Barreira, 2004). | 46 |

| | |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Figura 25 - Diagrama polar da variação da emissividade em função do ângulo de observação (adaptado de Maldague, 2000)..... | 47 |
| Figura 26 - Variação da emissividade com a temperatura em materiais não-metálicos: borracha (1); porcelana (2); cortiça (3); papel (4); argila refratária (5).... | 48 |
| Figura 27 - Espectro Eletromagnético onde se destaca dentro das regiões do Infravermelho a transmitância atmosférica (Retirado de Ibarra-Castanedo <i>et al.</i> , 2011, October)..... | 52 |
| Figura 28 - Detecção de defeito em composto com base em madeira:..... | 64 |
| Figura 29 - Espécimes de madeira de pinho usados nos ensaios (retirado de Luong, 2004)..... | 65 |
| Figura 30 - Localização da dissipação intrínseca nos espécimes de madeira de pinho como função da sua anisotropia. Sendo a primeira imagem relativa à direção longitudinal, a segunda relativa à direção radial e a terceira relativa à direção transversal. Cada cor corresponde a 0,2°C..... | 66 |
| Figura 31 - Ligação metálica em peças de madeira submetidas a carga de tensão à esquerda e correspondente Imagem térmica à direita (cada cor corresponde a 0,05°C) | 66 |
| Figura 32 - Ligação metálica em peças de madeira submetidas a tensão de corte, à esquerda, e correspondente termograma, à direita, (cada cor corresponde a 0,2°C).. | 66 |
| Figura 33 - Localização de estrutura de madeira oculta por revestimento. Na fig. da esquerda é inclusive possível visualizar as uniões realizadas por pregos (retirado de Spencer, 2008)..... | 69 |
| Figura 34 - Detecção de ponto de infiltração através de TIV numa construção histórica no estado do Kentucky. Do lado esquerdo pode ver-se o termograma e do lado direito a fotografia regular. Em baixo a ampliação evidencia um ponto de infiltração de humidade..... | 70 |
| Figura 35 - Teste de tensão e equipamento de termografia (retirado de Kutin <i>et al.</i> , 2011)..... | 74 |
| Figura 36 - Diagramas de força versus extensão e alterações de temperatura versus tempo com termogramas em pontos específicos do espécime (retirado de Kutin <i>et al.</i> , 2011)..... | 74 |
| Figura 37 - Identificação de pequenas cavidades na base de <i>Laurus nobilis</i> | 79 |
| Figura 38 - Termograma obtido da posição da seta preta na figura anterior. É possível identificar uma grande região danificada, evidenciada pela tonalidade cinzenta escura, que se estende desde as raízes até ao tronco (retirado de Catena, 2003, June)..... | 79 |
| Figura 39 - O abate da árvore, referida nas duas figuras anteriores, conduziu à verificação da presença e do tamanho do dano, detetado por investigação termográfica | 79 |
| Figura 40 - Excitação por impacto térmico e captação da emissão de calor. Desenho esquemático ilustrativo do princípio de deteção de defeitos por termografia de infravermelhos, com ponto quente acima na zona do defeito (retirado de Meinschmidt, 2005, May)..... | 80 |

| | |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| Figura 41 - Pontos quentes evidenciam pobre adesividade entre camadas não identificáveis na fotografia corrente (retirado de Meinschmidt, 2005, May)..... | 81 |
| Figura 42 - Falta de um nó na 3ª camada, defeito este dificilmente detetável visualmente mas identificado por ponto quente através da termografia (retirado de Meinschmidt, 2005, May)..... | 81 |
| Figura 43 - Foto de um painel de madeira com 2 tipos de nós, bons e negros. Imagem termográfica onde se podem identificar claramente os nós negros como pontos quentes na superfície (retirado de Meinschmidt, 2005, May)..... | 82 |
| Figura 44 - São visíveis, através de termograma, áreas húmidas, na madeira do revestimento do teto (retirado de Kandemir-Yucel <i>et al.</i> , 2007)..... | 83 |
| Figura 45 - Fotografia e termograma do conjunto caibros e tabuado, utilizando termografia passiva (retirado de Liñán <i>et al.</i> , 2011). | 84 |
| Figura 46 - Através da termografia passiva, por aquecimento natural solar podem ser identificadas zonas com diferente conteúdo de humidade e deterioração parda. 85 | |
| Figura 47 - Imagem digital, termograma a cinzento e termograma a cores da área de um revestimento de madeira. Atividade de térmitas sob revestimento de madeira no chão e na parede (retirado de Grossman, 2004)..... | 87 |
| Figura 48 - Visualização de área húmida ativa em viga e teto em que foram revelados fungos em atividade (retirado de Grossman, 2004). | 88 |
| Figura 49 - Imagem digital de elemento construtivo. Defeitos subsuperficiais identificados pela aplicação de termografia ativa (retirado de Grossman, 2004). | 88 |
| Figura 50 - A imagem da direita, em baixo, revelou uma anomalia subsuperficial que a imagem da esquerda não revela (retirado de Grossman, 2004)..... | 89 |
| Figura 51 - As imagens de infravermelhos a longa distância mostram claramente humidade residual, no elemento estrutural, identificada com setas. A investigação visual e mecânica revelou evidencia de tubos de lama, térmitas vivas, tal como outros danos físicos..... | 90 |
| Figura 52 - Dispositivos utilizados na determinação das condições ambientais (foto do autor)..... | 100 |
| Figura 53 - Câmara termográfica utilizada na determinação da emissividade (fotos do autor)..... | 100 |
| Figura 54 - Fita preta Isoladora com emissividade de 0,970 para 35°C (foto do autor)..... | 101 |
| Figura 55 - Dispositivos utilizados na geração do gradiente térmico para os três ambientes respetivamente. Nas duas imagens de baixo podem ver-se as amostras colocadas no interior das estufas para os dois últimos ambientes (fotos do autor).. | 101 |
| Figura 56 - Dispositivo utilizado na determinação das massas das amostras (foto do autor)..... | 102 |
| Figura 57 - Termopar do tipo K (foto do autor). | 102 |
| Figura 58 - As oito amostras utilizadas nos ensaios com a fita preta isoladora (foto do autor)..... | 104 |
| Figura 59 - Exemplo do dispositivo para determinação da temperatura refletida (foto do autor)..... | 105 |

| | |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| Figura 60 - Exemplo de termograma com as duas áreas definidas para determinação da emissividade (foto do autor). | 107 |
| Figura 61 - Local da realização do primeiro estudo (CNL) (foto do autor). | 110 |
| Figura 62 - Laboratório da realização do segundo estudo (LEM/IPG) (foto do autor)..... | 112 |
| Figura 63 - Condições Laboratoriais do terceiro estudo (LEC/IPCB) (foto do autor)..... | 116 |
| Figura 64 - Determinação do Teor de Água superficial de uma amostra através da aplicação de humidímetro (foto do autor). | 129 |
| Figura 65 - Termograma obtido em resultado da reflexão, da radiação emitida pelo corpo humano, nos azulejos (LEC/IPCB) (foto do autor). | 130 |
| Figura 66 - Variação do valor da emissividade em função do Teor em Água para a amostra de Acácia. | 136 |
| Figura 67 - Variação do valor da emissividade em função do Teor em Água para a amostra de Amieiro. | 136 |
| Figura 68 - Variação do valor da emissividade em função do Teor em Água para a amostra de Carvalho. | 136 |
| Figura 69 - Variação do valor da emissividade em função do Teor em Água para a amostra de Castanho..... | 137 |
| Figura 70 - Variação do valor da emissividade em função do Teor em Água para a amostra de Cedro. | 137 |
| Figura 71 - Variação do valor da emissividade em função do Teor em Água para a amostra de Choupo..... | 137 |
| Figura 72 - Variação do valor da emissividade em função do Teor em Água para a amostra de Pinho de Leiria..... | 138 |
| Figura 73 - Variação do valor da emissividade em função do Teor em Água para a amostra de Pinho Serrano..... | 138 |

Simbologia

| Símbolo | Designação | Unidades |
|-----------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------|
| M_B | Poder Radiativo do Ambiente | - |
| M_T | Poder Radiativo do Objeto | - |
| $W_{\lambda, cn} = dR(\lambda, T) / d\lambda$ | Emissão Radiante do Corpo Negro ou Radiância Espectral por Comprimento de Onda | $[W \cdot m^{-3}]$ ou $[J \cdot s^{-1} \cdot m^{-3}]$ |
| h | Constante de Planck -> $h = 6,626176 \cdot 10^{-34}$ | $[W \cdot s^2]$ ou $[J \cdot s]$ |
| c | Velocidade da Luz -> $c = 2,998 \cdot 10^8$ | $[m \cdot s^{-1}]$ |
| λ | Comprimento de Onda | $[\mu m]$ |
| e | Base Neperiana | - |
| k | Constante de Boltzman -> $k = 1,380662 \cdot 10^{-23}$ | $[J \cdot K^{-1}]$ |
| T | Temperatura Absoluta | $[K]$ |
| σ | Constante de Stefan-Boltzman -> $\sigma = 5,7 \cdot 10^{-8}$ | $[W \cdot m^{-2} \cdot K^{-4}]$ |
| α_λ | Absorção Espectral | - |
| ρ_λ | Reflexão Espectral | - |
| τ_λ | Transmissão Espectral | - |
| ϵ_λ | Emissividade espectral | - |
| $w_{\lambda o}$ | Radiação Emitida pelo Objeto | $[W/m^2]$ |
| $w_{\lambda cn}$ | Radiação Emitida pelo Corpo Ideal Negro | $[W/m^2]$ |
| θ | Ângulo de Observação | $[^\circ]$ |
| et | Excesso de Temperatura | $[^\circ C]$ |
| m | Magnitude ou Ritmo de Arrefecimento ou Aquecimento | - |
| t | Tempo | $[s]$ |
| C | Constante | - |
| c_p | Calor Específico a Pressão Constante | $[J/(kg \cdot ^\circ C)]$ |
| k | Condutibilidade Térmica | $[W/(m \cdot ^\circ C)]$ |
| α | Difusividade Térmica | $[m^2/s]$ |
| ρ | Massa Volúmica | $[kg/m^3]$ |
| ϵ | Emissividade | - |
| | | |
| | | |
| | | |

Índice de Tabelas

| | |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| Tabela 1 - Inspeção Inicial (Adaptado de Dietsch & Hosl, 2010b, 2010c, 2010e) .. | 8 |
| Tabela 2 - Suscetibilidade Ambiental | 10 |
| Tabela 3 - Endoscopia (Adaptado de Dietsch & Hosl, 2010a; Lombillo <i>et al.</i> 2007). | 11 |
| Tabela 4 - Ensaio de Resistência (Adaptado de Dietsch & Hosl, 2010d; Tannert 2010b, 2010c)..... | 14 |
| Tabela 5 - Avaliações Realizáveis e Resultados Obtidos sobre Amostras de Núcleo | 15 |
| Tabela 6 - Extração de Carotes (Adaptado de Tannert, 2010a)..... | 16 |
| Tabela 7 - Ensaio Dinâmico (Adaptado de Kreuzinger & Dietsch, 2010; Tannert, 2010d)..... | 21 |
| Tabela 8 - Raios X (Adaptado de Tannert, 2010e)..... | 22 |
| Tabela 9 - Nomenclatura Espectral que salienta as subdivisões no Espectro Infravermelho..... | 25 |
| Tabela 10 - Aplicações Representativas dos Sistemas de Imagem Térmicos (Holst, 2000)..... | 35 |
| Tabela 11 - Valores de Emissividade para a Madeira e derivados, na Bibliografia consultada..... | 51 |
| Tabela 12 - Espécies de madeira das amostras ensaiadas..... | 103 |
| Tabela 13 - Condições Ambientais Não Laboratoriais..... | 110 |
| Tabela 14 - Valores Registrados para a Emissividade das 8 amostras..... | 111 |
| Tabela 15 - Condições das Amostras e emissividade determinada (CNL)..... | 111 |
| Tabela 16 - Condições Ambientais Laboratoriais LEM/IPG..... | 112 |
| Tabela 17 - Acácia - Valores Registrados para a Emissividade..... | 112 |
| Tabela 18 - Amieiro - Valores Registrados para a Emissividade..... | 113 |
| Tabela 19 - Carvalho - Valores Registrados para a Emissividade..... | 113 |
| Tabela 20 - Castanho - Valores Registrados para a Emissividade..... | 113 |
| Tabela 21 - Cedro - Valores Registrados para a Emissividade..... | 114 |
| Tabela 22 - Choupo - Valores Registrados para a Emissividade..... | 114 |
| Tabela 23 - Pinho Leiria - Valores Registrados para a Emissividade..... | 114 |
| Tabela 24 - Pinho Serrano - Valores Registrados para a Emissividade..... | 114 |
| Tabela 25 - Condições das Amostras e emissividade média (LEM/IPG)..... | 115 |
| Tabela 26 - Condições Ambientais Laboratoriais LEC/IPCB..... | 116 |
| Tabela 27 - Acácia - Valores Registrados para a Emissividade..... | 116 |
| Tabela 28 - Amieiro - Valores Registrados para a Emissividade..... | 117 |
| Tabela 29 - Carvalho - Valores Registrados para a Emissividade..... | 117 |
| Tabela 30 - Castanho - Valores Registrados para a Emissividade..... | 117 |
| Tabela 31 - Cedro - Valores Registrados para a Emissividade..... | 117 |
| Tabela 32 - Choupo - Valores Registrados para a Emissividade..... | 118 |
| Tabela 33 - Pinho Leiria - Valores Registrados para a Emissividade..... | 118 |

| | |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| Tabela 34 - Pinho Serrano - Valores Registados para a Emissividade..... | 118 |
| Tabela 35 - Condições das Amostras e emissividade média (LEC/IPCB)..... | 119 |
| Tabela 36 - Condições Ambientais Laboratoriais LEC/IPCB..... | 119 |
| Tabela 37 - Valores Registados para a Emissividade das 8 amostras..... | 119 |
| Tabela 38 - Condições das Amostras no sexto ensaio (LEC/IPCB)..... | 120 |
| Tabela 39 - Condições Ambientais Laboratoriais LEC/IPCB..... | 120 |
| Tabela 40 - Acácia - Valores Registados para a Emissividade | 120 |
| Tabela 41 - Amieiro - Valores Registados para a Emissividade | 121 |
| Tabela 42 - Carvalho - Valores Registados para a Emissividade | 121 |
| Tabela 43 - Castanho - Valores Registados para a Emissividade..... | 121 |
| Tabela 44 - Cedro - Valores Registados para a Emissividade | 122 |
| Tabela 45 - Choupo - Valores Registados para a Emissividade | 122 |
| Tabela 46 - Pinho Leiria - Valores Registados para a Emissividade..... | 122 |
| Tabela 47 - Pinho Serrano - Valores Registados para a Emissividade..... | 123 |
| Tabela 48 - Condições das Amostras | 123 |
| Tabela 49 - Resumo dos 5 Estudos e Respetivas Condições Ambientais..... | 124 |
| Tabela 50 - Acácia - Condições da Amostra - Emissividade..... | 125 |
| Tabela 51 - Amieiro - Condições da Amostra - Emissividade..... | 125 |
| Tabela 52 - Carvalho - Condições da Amostra - Emissividade..... | 125 |
| Tabela 53 - Castanho - Condições da Amostra - Emissividade | 126 |
| Tabela 54 - Cedro - Condições da Amostra - Emissividade..... | 126 |
| Tabela 55 - Choupo - Condições da Amostra - Emissividade | 126 |
| Tabela 56 - Pinho Leiria - Condições da Amostra - Emissividade | 127 |
| Tabela 57 - Pinho Serrano - Condições da Amostra - Emissividade..... | 127 |
| Tabela 58 - Utilização do Humidímetro, valores determinados e calibração utilizada | 128 |
| Tabela 59 - Comparação dos valores do Teor de Água obtidos pela NP614:1973 e Humidímetro..... | 129 |

Lista de abreviaturas, siglas e acrónimos

TIV – Termografia por Infravermelhos

IRT – Infrared Thermography

NDT – NonDestructive Testing - Testes Não Destrutivos

TNDE – Thermographic NonDestructive Evaluation - Avaliação Termográfica Não Destrutiva

NDI - Inspeção Não Destrutiva

NDE - Avaliação Não Destrutiva

FOV - Field of View

HFOV - Horizontal Field of View

VFOV - Vertical Field of View

IFOV - Instantaneous Field of View

$P_{\text{Húmido}}$ - Peso Húmido

P_{Seco} - Peso Seco

Temp.Amb. - Temperatura Ambiente

H.R. - Humidade Relativa

Temp. Refl. - Temperatura Reflexiva ou Refletida

Int Lum. - Intensidade Luminosa

Temp. Sup Amostra - Temperatura da Superfície da Amostra

CNL - Condições Não Laboratoriais

LEM/IPG - Laboratório do Instituto Politécnico da Guarda

LEC/IPCB - Laboratório do Instituto Politécnico de Castelo Branco

LWIR - Long Wavelength Infrared - Comprimento de onda infravermelho longo

MWIR - Mid-Wavelength Infrared - Comprimento de onda infravermelho médio

QIRT - Quantitative InfraRed Thermography

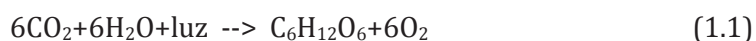
1. Introdução

A sustentabilidade na construção, segundo Gervásio (2013), rege-se por três aspetos fundamentais a saber: utilização de materiais renováveis em detrimento de matérias primas não renováveis; redução ao mínimo da energia consumida na fase de utilização do edifício e existência dum mínimo de resíduos a quando do fim de vida útil do edifício.

A utilização da madeira na construção vai de encontro a estas expectativas sustentáveis enumeradas anteriormente.

A madeira contribui para a produção de menores emissões poluentes, pois contribui para a redução dos gastos energéticos para aquecimento e arrefecimento em edifícios, devido às suas propriedades térmicas. É um material que cresce em abundância, é renovável e necessita de reduzida energia para a sua produção e aplicação em obra. É um material atraente do ponto de vista estético, leve e resistente.

As árvores, no seu processo de crescimento, através da fotossíntese, extraem e armazenam na sua constituição carbono existente na atmosfera. Assim, a madeira representa um importante reservatório natural de carbono. O processo da fotossíntese é genericamente esquematizado pela reação química seguinte:



Porém, no final da vida da árvore, este carbono volta para a atmosfera, ao ser queimado ou pelo processo de decomposição.

Quando se aumenta a área de floresta e o volume de construção com madeira, ao mesmo tempo, é maior o sequestro de carbono, contribuindo para a redução do problema do aquecimento global. (Vogtlander, como citado em Gervásio, 2013). Esta ideia está representada no gráfico da figura seguinte.

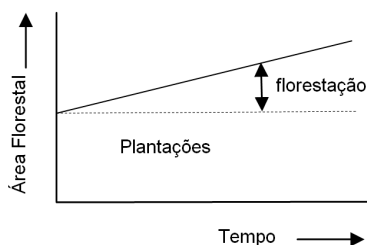


Figura 1 - Reflorestação e sequestro extra de carbono. (Retirado de Gervásio, 2013).

O corte e a extração das árvores envolvem um consumo de energia muito baixo quando comparados com o uso de outros materiais estruturais como o betão e o aço,

que têm processos de produção altamente poluentes, para além de exigirem uma devastação ambiental quando extraídos da natureza. Devemos ter ainda em atenção que para produzir o aço e o betão, num intenso processo industrial, são consumidas $3000 \times 10^3 \text{kcal}$ de energia para a produção de uma tonelada de aço, $780 \times 10^3 \text{kcal}$ para uma tonelada de betão e apenas $2,4 \times 10^3 \text{kcal}$ para produzir a mesma quantidade de madeira. Por outro lado, a matéria prima retirada da natureza, no caso do betão e do aço, não mais será reposta, o que não acontece com a madeira que pode sempre ser plantada novamente (Brito e Silva, 2010).

Grande parte do património edificado encontra-se construído em estrutura de madeira. Pela sua ampla utilização torna-se relevante o emprego de métodos expeditos de inspeção e diagnóstico do seu estado de conservação. A termografia por infravermelhos (TIV), sendo uma técnica não destrutiva, de não contacto e versátil, pode constituir uma ferramenta de grande utilidade neste domínio. Porém a correta medição da temperatura está fortemente dependente do valor da emissividade do material.

1.1 Descrição Geral do Trabalho

Neste trabalho de investigação procurou-se conhecer a técnica de termografia por infravermelhos como técnica não destrutiva e de não contacto aplicada na avaliação de estruturas de madeira, como contributo para a sustentabilidade na construção. Pela promoção e contributo para o desenvolvimento de uma técnica que facilite a fase de inspeção e diagnóstico na reabilitação de estruturas e construções que contenham o material madeira.

1.1.1 Objetivos Gerais

Consciencialização da importância da termografia por infravermelhos (TIV), assim pretende-se conhecer em que consiste esta técnica. Aquisição de conhecimento sobre que autores, em que países e de que modo utilizam a técnica, a que materiais, nomeadamente a madeira, e com que objetivos.

Conhecer para que fins é utilizada a técnica de TIV.

Aplicação da Técnica de Termografia por Infravermelhos (TIV) ao material madeira frequentemente utilizado em construções.

Salientar a importância da emissividade na técnica da termografia.

Relacionar o valor da emissividade das diferentes amostras com parâmetros destas e do ambiente em que se realiza o estudo.

1.1.2 Objetivos Específicos

Pesquisa e revisão bibliográfica sobre:

- métodos de avaliação de estruturas de madeira;
- termografia e sua fundamentação teórica;
- termografia aplicada ao material madeira;
- emissividade, dando preponderância ao material madeira.

Conhecer o estado da arte da termografia através de trabalhos académicos realizados na língua portuguesa.

Determinação da emissividade de amostras de madeira de diferentes espécies em diferentes condições ambientais.

Relacionar a emissividade das amostras das diferentes espécies com o teor de água apresentado por estas no decurso dos estudos.

1.2 O Problema em Estudo e Sua Relevância

A identificação de anomalias ou patologias por técnicas destrutivas ou semi-destrutivas pode descaracterizar, danificar, alterar ou destruir características, detalhes ou mesmo a integridade do bem imóvel.

De forma a não causar ou agravar danos à edificação é ideal a utilização de técnicas não destrutivas. O uso da termografia como método não invasivo é relativamente novo ou pouco usado nas estruturas de madeira, tanto pelo elevado custo do equipamento ou por desconhecimento e dificuldade de aplicação prática.

Este trabalho tese pretende ser um contributo para a aplicação da técnica não destrutiva, de não contacto e não invasiva ao material madeira que, na realidade, já tem vindo a ser aplicada a diversos campos de aplicação, nomeadamente, na construção civil.

Esta técnica está bastante difundida na Itália devido ao enorme acervo histórico do país. A necessidade de um trabalho nesta área recai no facto de estruturas antigas possuírem uma grande parte de elementos em madeira, assim como o notado crescimento de edificações com estrutura e elementos em madeira no presente e perspectivando-se um aumento de construções utilizando este material para o futuro.

1.3 Organização do Trabalho

Este trabalho está dividido em duas grandes componentes: na primeira é feita uma revisão bibliográfica de diferentes assuntos inerentes à temática em estudo e na segunda parte é realizado um conjunto de trabalhos laboratoriais onde é determinada a emissividade de amostras de madeira em diferentes condições ambientais.

Começa com o primeiro capítulo onde é feita uma introdução geral do trabalho.

No segundo capítulo é feito um breve levantamento de métodos de avaliação de estruturas de madeira, de utilização mais ou menos corrente. Assim, é feita uma pequena descrição de cada método salientando-se numa tabela resumo onde o método é aplicado, laboratório ou *in situ*, em que tipo de técnica se baseia, como visual, acústica, elétrica, ótica ou mecânica, o nível de destruição que provoca e o âmbito em que se abordam as limitações do método. Esta apresentação é realizada uma vez que esta tese tem como intuito promover uma técnica, a Termografia por Infravermelhos, também ela aplicável na avaliação de estruturas de madeira, mas ainda pouco vulgar no nosso país, que apesar de, como todas as técnicas, possuir algumas limitações evidencia grandes vantagens.

No terceiro capítulo é feita uma fundamentação teórica da termografia por infravermelhos e relatadas algumas aplicações, destacando as efetuadas no campo da engenharia civil. Apresentam-se algumas definições da termografia, uma explanação sobre a radiação infravermelha contextualizando-a no espectro eletromagnético. É exposta uma breve resenha histórica desde a sua descoberta por Frederick William Herschel, no início do século XIX. Segue-se uma comparação das abordagens qualitativa e quantitativa, desta técnica, na qual sobressai a importância da emissividade. Salienta-se o carácter não destrutivo da termografia. São ainda descritos diferentes tipos de termografia dos quais se destacam o carácter ativo ou passivo, consoante é ou não feita uma estimulação térmica do objeto a inspecionar, bem como os modos de reflexão ou transmissão. Segue-se uma variedade de aplicações da TIV, dando relevo aos campos de aplicação na engenharia civil.

São descritas as leis que regem a radiação, onde são explicados desde os fenómenos de transferência de calor, definição de corpo negro, lei de Planck, lei de deslocamento de Wien, lei de Stefan-Boltzman até chegar ao comportamento do corpo real. Salienta-se a noção de emissividade como sendo uma propriedade ótica dos materiais e fatores que a afetam, entre os quais se destacam, o comprimento de onda, o ângulo de observação e a temperatura.

Sendo a emissividade um fator tão importante na técnica de termografia pelo que importa saber determiná-la de forma expedita. Assim, são apresentados métodos para atingir este objetivo. Refere-se a utilização de um termopar ou de fita isolante preta adesiva ou ainda a aplicação de tinta preta, como referenciais de comparação

para alcançar o valor desta grandeza, culminando na descrição das dificuldades encontradas na aplicação destes métodos.

É apresentada uma tabela com valores para a emissividade, do material madeira, segundo diferentes autores, evidenciando fatores que a afetam, como sendo a janela espectral, a temperatura, o acabamento superficial, o ângulo de observação e a espécie em causa.

A termografia não só é afetada pela emissividade, mas também por outros fatores que importa referir, pelo que são expostos.

Quando não se consegue determinar *in situ* o valor da emissividade, nem se encontram em tabelas valores que se aproximem da situação em análise, apesar de toda esta incerteza pela escolha de um valor correto para a emissividade, convém escolher um que garanta o mínimo de erro na medição da temperatura superficial do objeto em análise.

A técnica de TIV, tal como todas as outras técnicas, apresenta vantagens e limitações que são enunciadas.

Seguidamente são enunciadas algumas indicações que norteiam a escolha de uma câmara termográfica.

Embora esta técnica de TIV já exista há algum tempo, desde a década de 50 ou 60 do século XX, não se encontra referida em muitos trabalhos académicos na língua portuguesa. Assim foram escolhidos e citados alguns trabalhos que aplicam termografia a diferentes campos do saber. Salientando-se a inexistência deste tipo de estudos, em língua portuguesa, relacionados com o material madeira.

O quarto capítulo é dedicado à aplicação da técnica de termografia ao material madeira. Assim, é feita uma revisão de diferentes estudos científicos.

No que concerne ao quinto capítulo, resulta também da pesquisa de estudos científicos, mas na área da emissividade, onde é feita uma compilação de diferentes estudos da sua determinação em diferentes materiais, desde produtos hortícolas a materiais de construção, culminando na madeira. Salientando-se a importância desta grandeza na análise quantitativa por termografia.

Após esta fundamentação teórica é feito um trabalho prático que a seguir é descrito. Neste trabalho experimental são inicialmente definidos os objetivos, seguidos da caracterização do problema que se relaciona com a determinação da emissividade de amostras de madeira de diferentes espécies, sujeitas a diferentes condições ambientais.

Na metodologia são descritos os materiais e equipamentos utilizados, dos quais se destaca a caracterização das amostras de madeira utilizadas. Efetua-se uma descrição dos procedimentos efetuados na determinação dos seguintes parâmetros: da temperatura aparente refletida, da emissividade e do teor de água das amostras.

Em seguida é feita uma descrição da organização dos ensaios nos diferentes estudos, de forma a aclarar as tabelas apresentadas na secção dos resultados.

Na secção dos resultados são apresentadas as condições ambientais em que foram determinados os valores de emissividade, para as oito amostras e as condições das amostras, para cada um dos três ambientes: CNL, LEM/IPG e LEC/IPCB.

Na secção síntese dos resultados, apresenta-se uma tabela resumo, com as condições ambientais para os três locais e para os cinco estudos realizados, totalizando onze ensaios. Seguidamente apresentam-se os resultados obtidos em função de cada espécie.

Em fatores relevantes e dificuldades, no início da discussão, foram comparados os valores do teor de água inicial de cada amostra, obtidos por duas técnicas diferentes, uma utilizando um humidímetro e outra através da aplicação da norma NP614 de 1973.

Discutiu-se a forma como foi gerado o gradiente térmico e a dificuldade do controlo da quantidade de luz existente nos locais de realização dos ensaios.

Relatou-se a dificuldade que surgiu pela existência de reflexões decorrentes do tipo de revestimento do laboratório do LEC/IPCB.

Seguidamente foi feita uma análise dos valores máximo e mínimo obtidos para a emissividade nos diferentes ambientes e respetivo teor de água, para cada amostra.

Em jeito de conclusão, foi feita uma comparação dos valores obtidos para a emissividade com os de outros autores encontrados na bibliografia.

Foi procurada uma relação da emissividade com outros parâmetros, nomeadamente, com o teor de água das amostras e ainda com a sua temperatura superficial. Notou-se a existência de uma relação linear para o primeiro caso.

Finalmente, foram tecidas algumas considerações finais e elaboradas propostas de desenvolvimento futuro.

2. Métodos de Avaliação de Estruturas de Madeira

2.1 Inspeção Inicial

2.1.1 Inspeção Visual

Dietsch e Hosl (2010b) referem que a inspeção visual é o ponto inicial de cada avaliação, sendo efetuada em conjugação com revisão de documentação existente e projeto. Gera-se uma impressão da condição global da estrutura e dos elementos de madeira, incluindo um primeiro panorama e registo do grau de danos visíveis.

Todos os elementos estruturais acessíveis são examinados em termos de penetração da humidade, degradação, ataque de fungos e insetos, incluindo também medição de dimensões, geometria, deformações, torção, encurvadura e fissuras. O sistema estrutural e apoios são determinados e as ligações são examinadas. Consideram-se renovações e conversões ou extensões da estrutura.

A inspeção visual deve incluir sempre documentação fotográfica detalhada.

2.1.2 Impacto Sonoro

Dietsch e Hosl (2010e) descrevem que os danos ocultos podem ser percecionados pela simples aplicação de um martelo e de um canivete. O som e diferenças de som fornecem referências da condição interna do elemento estrutural. Este método de avaliação ajuda a estimar a extensão do dano da degradação por fungos ou insetos, a sua localização e a dimensão de cavidades. Por outro lado degradações moderadas poderão não ser facilmente avaliadas com esta metodologia. A experiência do inspetor será determinante para a qualidade do resultado.

2.1.3 Mapeamento de Fendas

A deteção e avaliação de fendas faz parte de todas as inspeções iniciais de estruturas de madeira, especialmente as estruturas de grande extensão conforme descrevem Dietsch e Hosl (2010c).

A deteção e documentação da distribuição de fendas bem como a medição da sua dimensão é feita, por exemplo, pelo uso de um medidor de espessura e fita métrica. Uma lupa também pode ajudar na determinação da idade de uma fenda (pó, descoloração no interior da fenda são sinalizadores da idade da fenda) bem como na

identificação de potenciais problemas de adesão/coesão se as fendas aparecem principalmente na junta estrutural de colagem.

O mapeamento de fendas deve ser executado em duas fases, na primeira é realizado de forma genérica e só na segunda é feito de forma detalhada e completa.

A determinação das dimensões das fendas contribui para a avaliação da secção transversal residual dos elementos estruturais. Neste contexto a profundidade da fenda é de particular importância, devendo ser medida em múltiplas localizações ao longo da fenda.

Além das dimensões das fendas (comprimento, espessura e profundidade) a sua posição, no interior dos elementos estruturais, é essencial para a avaliação das consequências. É também relevante se as fendas aparecem exclusivamente ou com certa frequência na madeira ou nas juntas estruturais de colagem.

As dimensões das fendas e a sua localização são avaliadas individualmente para cada estrutura. Isto inclui o sistema estrutural, a relevância do elemento estrutural, o uso da construção e condições ambientais de fronteira para determinar as causas e possíveis consequências das fendas.

A marcação/mapeamento da largura de fendas, profundidade e extremidades é importante para analisar possíveis alterações das dimensões das fendas ao longo do tempo. Isto é essencial para estruturas que estão sujeitas a alterações ambientais sazonais, conduzindo a alterações do conteúdo de água da madeira, o que pode ter influência nas dimensões destas.

As áreas não examinadas devem ser marcadas e examinadas posteriormente com métodos mais específicos.

Não existe uma abordagem universalmente válida para uma inspeção inicial, cada engenheiro deve encontrar uma forma de agir individual, de acordo com as suas experiências anteriores.

Tabela 1 - Inspeção Inicial (Adaptado de Dietsch & Hosl, 2010b, 2010c, 2010e).

| Método | | Tipo | | | Âmbito |
|------------------|----------------------|----------------|----------|----------------|-----------------------------------------------------------|
| | | Local | Técnica | Destrutivo | |
| Inspeção Inicial | Inspeção Visual | <i>In-Situ</i> | Visual | Não Destrutivo | Limitado (Qualitativo Superficial Depende da Experiência) |
| | Impacto Sonoro | | Acústica | | Limitado (Qualitativo Depende da Experiência) |
| | Mapeamento de Fendas | | Visual | | Limitado (Incerteza da Profundidade das Fendas) |

2.2 Suscetibilidade Ambiental

2.2.1 Medição das condições ambientais

Hosl e Dietsch (2010) descrevem a importância da monitorização das condições ambientais. A medição da temperatura e humidade do ar na vizinhança da componente estrutural é feita por meio de termómetros e higrómetros. A informação sobre o macroclima é – entre outros elementos – necessária para uma avaliação analítica do teor de água da madeira.

2.2.2 Medição do Teor de Água na Madeira

Bruninghoff, Dietsch e Hosl (2010) explicam que a medição do teor de água na madeira pode ser realizada por dois métodos: pesagem e medição da resistência elétrica.

O primeiro método – usando forno de secagem de amostras de madeira – é o método tradicional de medição do teor de água; contudo não é adequado para investigações *in-situ* e portanto o método de resistência com medidores portáteis é comumente aplicado. Estes fazem utilização das propriedades elétricas dos materiais para medir o teor de água.

Os medidores de agulhas são tipicamente utilizados para investigações em madeira *in-situ*. As agulhas são empurradas para o elemento de madeira e é medida a resistência à corrente elétrica, entre elas, como se pode observar na figura 2.



Figura 2 - Humidímetro - (Foto do Autor).

A resistência elétrica é inversamente proporcional ao teor de água contido na madeira. A água é um bom condutor e a madeira um fraco condutor de corrente

elétrica, pelo que o efeito do teor de água, sobre as propriedades de resistência da agulha, torna-o adequado para a investigação da madeira.

Os medidores com agulhas isoladas medem o teor de água à profundidade de penetração da mesma. Uma vez que a corrente elétrica só flui entre as pontas não isoladas das agulhas, permite a recolha de leituras a diferentes profundidades (exemplo 10, 30 e 50 mm) para avaliar os gradientes do teor de água, dando informação, por exemplo, das variações sazonais e possibilidade de induzir tensões.

O limite de medição para as agulhas é de cerca de 7% do ponto de saturação da fibra. As leituras do teor de água de materiais de madeira podem ser afetadas por: espécie, direção da medição (paralela ou perpendicular ao grão), temperatura, tratamento químico e ainda a habilidade do operador. Estes fatores produzem variabilidade nas leituras. Os desvios usuais das medidas para a resistência são de cerca de 1,0%.

O método de pesagem é preferencial quando são necessários resultados exatos. Se a madeira contém sais, tais como preservadores da madeira, o método de medida da resistência elétrica não é adequado.

Como refere Bruninghoff *et al.* (2010) a Madeira dilata ou contrai quando o seu teor de água muda, sendo negligenciável na direção longitudinal das fibras, mas estas mudanças de dimensão, têm de ser consideradas na direção radial e tangencial aos anéis anuais. Na direção tangencial, os coeficientes de dilatação e contração são cerca do dobro da direção radial.

Uma vez que a madeira a ser utilizada raramente chega ao equilíbrio com o ambiente circundante, a expansão ou a contração do volume da madeira não é uniforme ao longo da secção transversal. Isto pode originar fendas no interior do volume da madeira, o que é mais pronunciado em grandes volumes, por exemplo em elementos de lamelados colados.

Vigas em lamelados colados são produzidas com um teor em água de 10% a 12%. Isto corresponde a condições de clima de 60% a 65% de humidade relativa, a temperaturas normais de cerca de 10°C a 30°C.

Se o teor de água dos elementos usados não varia significativamente não haverá esforços nos elementos de madeira.

Tabela 2 - Suscetibilidade Ambiental
(Adaptado de Bruninghoff *et al.*, 2010; Hosl & Dietsch, 2010).

| Método | | Tipo | | | Âmbito |
|---------------------------|------------------------------------|----------------|----------|----------------|---------------------------------------------------------------------|
| | | Local | Técnica | Destrutivo | |
| Suscetibilidade Ambiental | Medição das Condições Ambientais | <i>In-Situ</i> | Elétrico | Não Destrutivo | Limitado (Variações Sazonais) |
| | Medição do Teor de Água na Madeira | | | | Preciso; Fiável mas Informação Limitada devido a Variações Sazonais |

2.3 Endoscopia

A endoscopia consiste na observação indireta do interior de algo, através de uma perfuração praticada ou previamente existente, permitindo inspecionar visualmente, como descrito por Lombillo, Agudo e Villegas (2007).

A endoscopia não é um método de avaliação por ele próprio, mas o endoscópio permite um exame visual de elementos estruturais (ou parte deles) que não são abertamente acessíveis. O endoscópio é inserido através de um orifício dentro do elemento estrutural. O diâmetro das perfurações é de 5 a 20 mm. O endoscópio tem uma fonte de luz, um cabo condutor de luz e um prisma deflector na extremidade frontal, podendo ser rígido ou flexível, com lentes ou fibras óticas, como se pode ver na figura 3. Também permite documentação fotográfica. A endoscopia pode ajudar a detetar danos (por exemplo, causados por fungos e insetos) em espaços ocultos (especialmente em paredes) sem que seja necessária a destruição parcial ou extração de elementos. A condição da superfície interior do material pode ser localmente inspecionada, mas a área a ser inspecionada é limitada a aproximadamente 0,2 m², conforme relatam Dietsch e Hosl (2010a).

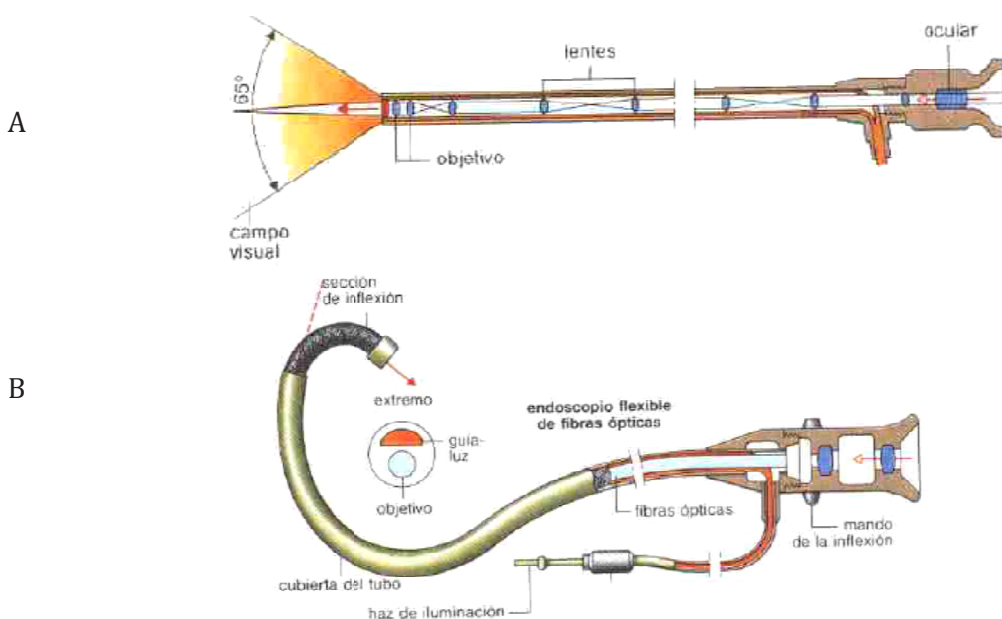


Figura 3 - Em A - Boroscópio rígido de lentes. Em B - Flexoscópio. (Retirado de Lombillo *et al.* 2007)

Tabela 3 - Endoscopia (Adaptado de Dietsch & Hosl, 2010a; Lombillo *et al.* 2007).

| Método | Tipo | | | Âmbito |
|------------|-------------|---------|------------------|-------------------------------------------------------------------|
| | Local | Técnica | Destrutivo | |
| Endoscopia | Flexoscopia | Ótico | Pouco Destrutivo | Limitado (Avaliação Local; Qualitativo; Superficial; Experiência) |
| | Boroscopia | | | |

2.4 Ensaios de Resistência

2.4.1 Resistência à Penetração

No entendimento de Dietsch e Hosl (2010d) o método de resistência à penetração utiliza vulgarmente o resistómetro e baseia-se no princípio de que cada material sólido terá uma resistência interna contra uma carga exterior. É medida a profundidade de penetração de uma agulha que é lançada na madeira, pela libertação de uma mola de retenção retida por uma força definida. A profundidade de penetração é medida numa escala de cores. Esta apresenta uma boa correlação da massa volúmica da madeira à força de compressão.

Para cada espécie e teor de água na madeira selecionados estão disponíveis calibrações da profundidade de penetração.

Ao comparar os resultados com estudos exaustivos, podem ser obtidas conclusões qualitativas sobre a resistência dos elementos de madeira inspecionados. Permite ainda a determinação da redução da massa volúmica devida a, por exemplo, deterioração e/ou ataques de fungos se os danos se desenvolverem a partir da superfície.

Só os 20 mm exteriores do elemento da madeira inspecionada podem ser avaliados, devido ao curto comprimento da agulha. O dispositivo deixa orifícios de aproximadamente 2,5 mm, pelo que se considera de baixo nível destrutivo.

Quando se inspecionam elementos de madeira sujeitos a elevadas tensões onde não é possível obter uma amostra, a resistência à penetração é a única alternativa para além da resistência à perfuração para obter resultados mais objetivos, sobre a massa volúmica da madeira, que os obtidos por métodos comuns, como por exemplo a penetração da lâmina de uma faca.

Esta técnica é adequada à aplicação a elementos de madeira maciça mas limitada em elementos lamelados colados, devido à variação da massa volúmica das lamelas.

A resistência à penetração é classificada por dar resultados melhores e mais rápidos do que os métodos de resistência ao arrancamento.

2.4.2 Resistência ao Arrancamento

Tannert (2010c) descreve que foi desenvolvido um teste quantitativo baseado no princípio de que o arrancamento de parafusos pode ser indicador simples de degradação biológica. Assim, a resistência ao arrancamento de uma sonda roscada inserida num elemento, pode ser examinada, e uma relação entre a força ultrapassada e a correspondente resistência da sonda, pode ser conhecida.

O efeito do conteúdo de teor em água, efeito da dimensão, efeito de alburno e cerne, etc., não são avaliados eficientemente. A sua aplicação em elementos lamelados colados é limitada devido à variação da massa volúmica das lamelas.

2.4.3 Resistência à Perfuração

Tannert (2010b) relata a resistência à perfuração como um método semi-destrutivo que causa danos mínimos à superfície do elemento ao mesmo tempo que dá informação sobre o interior dos elementos de madeira.

Esta técnica é aplicada em estudos do crescimento e saúde de árvores, pontes e edifícios e no controlo de térmitas e pragas.

As brocas são do tipo agulha com um pequeno diâmetro (1,5 a 3 mm), para perfurar elementos de madeira e medir a resistência oferecida. A resistência observada durante a perfuração é proporcional às variações de massa volúmica: menor resistência está associada a massa volúmica reduzida, tal como pontos com vazios interiores, deterioração ou fendas.

A podridão total não oferece resistência e o perfil de perfuração aparece como uma linha horizontal nula onde os vazios estão presentes. Picos e mínimos locais diferenciam entre áreas de elevada e baixa massa volúmica. Os materiais deteriorados apresentam alguma resistência que é inferior à da madeira sã.

A madeira sã também exhibe altos e baixos, associados com o lenho precoce e tardio, resultantes da variação de massa volúmica. Os registos de múltiplas perfurações das diferentes direções, através da secção transversal, e ao longo do comprimento dos elementos são posteriormente compiladas em mapas do estado de conservação do elemento.

A questão da acessibilidade pode tornar impraticável a aplicação deste método e inclui questões tais como o espaço limitado para caber o equipamento, realização do alinhamento exigido, a completa obstrução por outros elementos estruturais e questões de localização tais como altura ou orientação.

O mapeamento da secção transversal é útil para a localização e identificação da extensão dos danos internos, mas requer múltiplos requisitos, gasto de tempo em perfurações, que se permitidas, podem ser limitadas: pela decoração da superfície, significância, ou outras objeções dos proprietários. Apesar da agulha ser fina, o orifício de perfuração pode ser demasiado grande para elementos históricos de madeira.

A agulha de perfuração de pequeno diâmetro tem uma baixa rigidez que a torna flexível, podendo dobrar e seguir os anéis de crescimento à medida que penetram o elemento causando um desvio no caminho de perfuração e imprecisão nos perfis de perfuração, especialmente se o desvio não for detetado. Apesar da resistência à

perfuração poder alcançar boas correlações entre resistência média e massa volúmica, estes valores não abrangem nós, desvios de fibras e outros aspetos que têm que ser considerados, se os valores de resistência forem necessários. Este método é adequado à determinação da profundidade da podridão. Uma exata quantificação da massa volúmica da madeira, por si só, não é possível.

Uma vez que os elementos lamelados colados são constituídos por múltiplas lamelas, caracterizando-se por diferentes massas volúmicas e ângulos de anéis de crescimento, são mais difíceis de ser avaliados com o método de resistência à perfuração, do que elementos de madeira maciça.

Tabela 4 - Ensaio de Resistência (Adaptado de Dietsch & Hosl, 2010d; Tannert 2010b, 2010c).

| Método | | Tipo | | | Âmbito |
|-----------------------|-----------------------------|----------------|----------|------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| | | Local | Técnica | Destrutivo | |
| Ensaio de Resistência | Resistência à Penetração | <i>In-Situ</i> | Mecânico | Pouco Destrutivo | Validade Média dos Resultados (Bastante Qualitativos) |
| | Resistência ao Arrancamento | | | | Validade Média dos Resultados (Menos Precisos que para a Perfuração e Resistência à Penetração) |
| | Resistência à Perfuração | | | Semi-Destrutivo | Validade Média dos Resultados (Existência de Defeito Determinável; Difícil de Determinar o tipo de Defeito) |

2.5 Extração de Carotes

Na opinião de Tannert (2010a) a perfuração de núcleo é um método semi-destrutivo onde núcleos de pequeno diâmetro de cerca de 5 mm são extraídos e testados em laboratório. As amostras fornecem valores para as propriedades locais que podem ser utilizados para fazer inferências sobre as características de resistência de toda a peça.

O equipamento inclui brocas dirigidas para extração do núcleo, manuais ou elétricas, bem como equipamento de ensaio. As amostras variam em tamanho, mas a premissa é a de que a extração de núcleos deixa cavidades que são menores que a maioria dos nós, não comprometendo a resistência.

Orifícios deixados pela perfuração devem ser preenchidos para evitar entrada de água e de insetos, para reduzir o risco de deterioração no local de perfuração, para restaurar alguma da resistência à compressão perdida e ajudar a preservar a aparência da peça.

Tabela 5 - Avaliações Realizáveis e Resultados Obtidos sobre Amostras de Núcleo (Adaptado de Tannert, 2010a).

| Tipo de Avaliação | Resultados Possíveis de Obter |
|-------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Métodos Visuais | Determinação Macroscópicas das Espécies de Madeira Proporção de Cerne e Borne Ataque de Insetos Ataque de Fungos Deteção da Secção Transversal Residual |
| Métodos Laboratoriais Microscópicos | Deteção Microscópica das Espécies de Madeira Deteção Microscópica de Fungos Deteção Microscópica de Ataque de Insetos Dendrocronologia (Idade e Origem) |
| Químicas | Tipo de Cola Usada Tipo de Conservante Usado Meios Agressivos (Sais) Profundidade de Penetração Profundidade de Deterioração |
| Métodos Laboratoriais Macroscópicos | Determinação do Teor em Água na Madeira Determinação da Massa Volúmica Determinação de Resistência à Compressão Determinação da Resistência ao Corte |

As amostras de núcleo são frequentemente utilizadas para identificação de espécies, dendrocronologia, inspeções microscópicas para detecção de sinais indicadores de deterioração precoce, bem como inspeção visual e medições de penetração do tratamento preventivo. Podem ainda determinar-se uma variedade de propriedades, como a massa volúmica (de forma exata), o teor de água (limitado pelo aquecimento induzido pela broca), módulo de elasticidade e outras propriedades de resistência.

Como em qualquer técnica que utiliza pequenas amostras, estas dão informação acerca do local específico de onde foram obtidas. Para fazer estimativas globais das propriedades mecânicas de uma peça, devem ser obtidas várias amostras ao longo do comprimento do elemento estrutural.

Limitações à técnica incluem características locais, dos dados obtidos e questões de acessibilidade. O acesso *in situ* a peças de madeira pode impedir o uso do procedimento da técnica da perfuração do núcleo. Os núcleos devem ser perfurados na direção radial em ordem a se obter as amostras, o que será útil para testar a resistência à compressão paralela ao fio. Isto requer uma inspeção superficial das peças e das suas fibras para localizar a posição apropriada para a perfuração, o que pode ser difícil se as fibras não forem pronunciadas, ou o tratamento superficial ocultar o padrão das fibras de madeira (Kasal, 2010).

Tabela 6 - Extração de Carotes (Adaptado de Tannert, 2010a).

| Método | Tipo | | | Âmbito |
|---------------------|---------------------------------|----------------------------------|---------------------|-----------------------------------------------------|
| | Local | Técnica | Destrutivo | |
| Extração de Carotes | <i>In situ</i> / Laboratório | Mecânico; Não Estacionário | Semi- Destrutivo | Elevada Validade dos Resultados (ao Nível Local) |

2.6 Ensaios Dinâmicos

2.6.1 Ondas de Tensão

Tannert (2010d) narra que a utilização de ondas de tensão é baseada na propagação de ondas sonoras através do material e é amplamente utilizada para a deteção de vazios interiores e deterioração em elementos estruturais, bem como para a determinação de propriedades mecânicas. Os parâmetros analisados são: o tempo de propagação ou a velocidade correspondente, a análise do espectro de atenuação e de frequência.

As ondas de tensão sonoras apresentam frequências dentro da faixa do audível e as ultrassónicas são inaudíveis.

Muitos fatores podem afetar o conjunto das técnicas de ondas de tensão na madeira:

- As frequências utilizadas: Nas altas frequências e na presença de deterioração, a atenuação do sinal poderá ser total. Estas são mais sensíveis a defeitos internos, sendo limitadas a curtas extensões, por vezes sem qualquer uso prático. As de baixa frequência não são tão atenuadas a pequenos defeitos, podendo aplicar-se a grandes distâncias.

- Características dos elementos, tais como a sua geometria, orientação dos anéis e tratamentos de preservação, a tensão mecânica no elemento, o seu teor em água e a temperatura;

- O equipamento e as condições de medição, incluindo os agentes de ligação e a sua capacidade de ligação, a sensibilidade e frequência de resposta dos transdutores, e a dificuldade no controlo da duração do impacto e a energia do impacto do martelo.

- O acesso *in situ* aos elementos.

- As condições ambientais, tais como calor e humidade, e a condição da superfície do elemento pode tornar difícil a repetição das experiências.

- Ondas longitudinais podem originar valores médios realísticos da rigidez da viga mas podem ser significativamente afetadas por defeitos tais como variações nos anéis, deterioração localizada e gradientes do teor de água. As ondas podem ignorar estas áreas, registando só os mais rápidos tempos de atravessamento. Estas ondas têm uma maior história de aplicação do que as transversais, contudo os efeitos acima mencionados podem levar a um desvio na determinação do módulo de elasticidade de mais do que +/- 20%.

- Transmissões transversais são melhores na determinação da deterioração e podem dar informação da sua distribuição; gradiente do teor de água pode alterar o tempos de propagação e nós próximos dos transdutores e orientados com o seu eixo

longitudinal em direção à propagação das ondas podem aumentar a velocidade das ondas dando resultados enganosos.

- Inexistência de base de dados para materiais de boa qualidade, o que dificulta a interpretação quantitativa de resultados. Nem todas as espécies foram testadas para estabelecer a velocidade de transmissão de elementos são, especialmente as folhosas, e existe variabilidade entre as espécies a qual influencia a comparação da velocidade.

- A identificação precisa das espécies deve ser estabelecida de forma a usar estes dados de modo fiável.

- O efeito do teor de água, os tratamentos preservadores, a orientação do fio e a direção de propagação das ondas também devem ser consideradas.

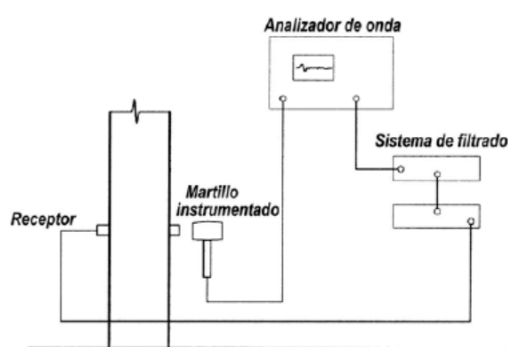


Figura 4 - Esquema de montagem do equipamento de ensaio sonoro.
(Retirado de Lombillo *et al.* 2007)

2.6.1.1 Ondas de Tensão Sonoras

As ondas de tensão podem ser transmitidas numa peça, com um simples impacto mecânico de um martelo ou outro objeto contundente, em qualquer direção transversal ou longitudinal como se pode ver através do esquema da figura 4. Dois acelerómetros, montados no dispositivo de impacto e colocados na peça são usados para medir o tempo de transmissão. A investigação por ondas transversais requer o acesso às duas faces opostas. As ondas de tensão longitudinais podem ser transmitidas por duas vias, por impacto direto na face de extremidade ou impactando transdutores incorporados na peça (Tannert, 2010d).

2.6.1.2 Análise do Espectro de Frequência

A análise do espectro de frequência pode ser usada para avaliar e quantificar a degradação da madeira com a vantagem de ser necessária apenas uma face para o teste.

Uma sonda contendo um acelerómetro, e cabos ligados a um osciloscópio, está ligada à face da peça. Para induzir ondas de tensão na peça é usado um martelo. À medida que a sonda recebe o sinal das ondas de tensão, o osciloscópio transforma o sinal, no domínio do tempo, em espectro de frequência. Como a frequência está dependente da condição da madeira, as variações de frequência podem ser designadas em níveis de condição e fornecem um método para caracterizar e diferenciar graus de deterioração (Tannert, 2010d).

2.6.1.3 Ondas de Tensão Ultrassónicas

A forma comum de ultrassons utiliza material piezoelétrico que converte uma corrente elétrica fornecida em ondas oscilatórias. Durante a operação, o transdutor é alimentado com uma corrente elétrica, convertendo-a num sinal ondulatório, e direcionando as ondas para o interior do material. O sistema de aquisição de dados consiste num detetor de sinal, um analisador e um registrador, que reúne e mantém a informação das ondas para futuras análises. A digitalização de contacto requer transdutores para serem acoplados à superfície do material para as medições de transmissão direta.

A investigação ultrassónica é frequentemente usada na classificação de madeira, com os transdutores dispostos nas extremidades das peças de madeira serrada, para medir a propagação das ondas diretamente ao longo das fibras (Tannert, 2010d).

2.6.1.4 Técnica de Eco Ultrassónica

A técnica de eco ultrassónica, é usada para obter informação indireta acerca da condição e danos internos da madeira. É baseada na reflexão de ondas nas heterogeneidades deste material.

A montagem experimental consiste num gerador de sinal, pré-amplificado, um amplificador, um transdutor e um sistema de aquisição de dados. Durante a medição, o sensor é colocado na superfície do elemento. A onda sónica passa através da madeira e é refletida; o sinal refletido é chamado eco de parede posterior e é recebido pelos sensores. Qualquer irregularidade na estrutura da madeira produz alterações na estrutura do sinal do eco de parede posterior como se pode ver na figura 5.

É possível conseguir informação 3D acerca da estrutura interna do elemento de madeira pela composição de digitalizações sucessivas transversais e interpolação entre elas, obtendo-se a longitudinal.

A técnica de eco ultrassónica permite uma localização direta de uma parede posterior ou qualquer heterogeneidade como danos na sua estrutura. Contudo é

diffícil localizar a exata posição do dano ou distinguir entre uma grande irregularidade de várias pequenas. São necessárias medições sistemáticas em amostras com imperfeições artificiais para tirar conclusões qualitativas dos resultados medidos. Uma exata classificação dos danos, por análise da estrutura do sinal, ainda não é possível (Tannert, 2010d).

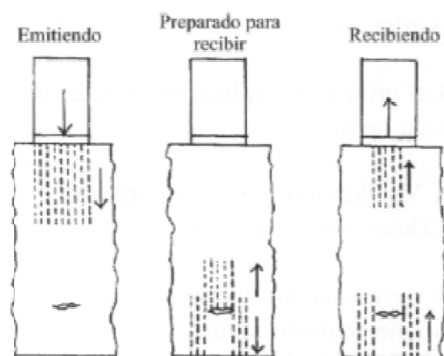


Figura 5 - Esquema da técnica de eco ultrassônica.
(Retirado de Lombillo *et al.*2007)

A técnica de eco tem a vantagem de ser apenas necessário aceder a uma das faces da peça. Na imagem da figura 6 pode ser observada a sua aplicação. (Lombillo *et al.*, 2007).

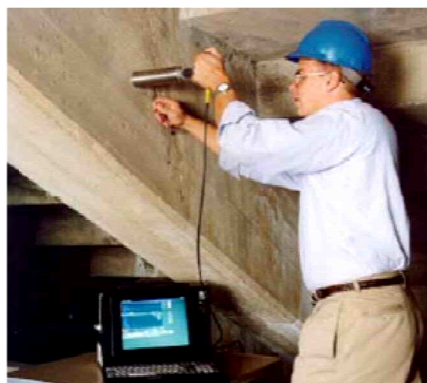


Figura 6 - Equipamento de ensaio da técnica de eco ultrassônica
(Retirado de Lombillo *et al.*2007)

2.6.2 Resposta Dinâmica

Através de Kreuzinger e Dietsch (2010), ficamos a saber que cada estrutura pode ser excitada para vibrar. Estas vibrações ocorrem primeiramente nas frequências próprias do sistema. São caracterizadas pelos modos próprios e frequências associadas.

Uma viga simplesmente apoiada, de rigidez constante e distribuição de massa ao longo do comprimento da viga tem um modo de vibração sinusoidal. Uma forma sinusoidal com n ondas está associada com a n -ésima frequência própria. As frequências próprias são dependentes das seguintes características do sistema: rigidez, massa e condições de fronteira. Estas podem ser deduzidas das frequências próprias medidas.

Um sensor de vibração é colocado no sistema estrutural, a ser analisado, na posição caracterizada pela maior amplitude do modo de vibração esperado. A excitação pode ser realizada, por exemplo, por pessoas saltando ou pelo impacto de um saco de areia. Estes tipos simples de excitação são geralmente suficientes uma vez que os sensores podem registar os mais pequenos movimentos.

A análise de Fourier dos dados obtidos, fornece as frequências próprias associadas.

Atualmente o equipamento de medição necessário é pequeno e prático.

As frequências próprias estão dependentes das características do sistema global, sendo, quase impossível, determinar fragilidades locais.

Tabela 7 - Ensaio Dinâmicos (Adaptado de Kreuzinger & Dietsch, 2010; Tannert, 2010d).

| Método | | Tipo | | | Âmbito |
|------------------|-----------------------------------|----------------|----------------------------------------------|----------------|----------------------------------------------------------------------|
| | | Local | Técnica | Destrutivo | |
| Ensaio Dinâmicos | Ondas de Tensão Sonoras | <i>In-Situ</i> | Acústica | Não Destrutivo | Limitado (Experiência) |
| | Análise do Espectro de Frequência | | | | Local; Diferencia Graus de Deterioração |
| | Ondas de Tensão Ultrassónicas | | | | Limitado (Defeitos Locais Não São Determináveis) |
| | Técnica de Eco-Ultrassónica | | Local; Limitado (Experiência e Tipo de Dano) | | |
| | Resposta Dinâmica | | Elétrico | | Bons Resultados Quando as Condições de Fronteira Estão Bem Definidas |

2.7 Raio X

A propósito do raio X, Tannert (2010e) refere que a radiografia utiliza radiação penetrante para descrever a estrutura interna dos elementos. Uma fonte de radiação emite um feixe dirigido ao objeto em estudo. Este tem diferentes absorções de radiação em função da massa volúmica e espessura do material. A técnica permite investigar aspetos tais como a composição da estrutura, materiais internos escondidos, defeitos e o estado de preservação, o que por vezes não pode ser determinado por outros meios.

A investigação radiográfica identifica deterioração e defeitos em material de madeira; sem localizar a sua profundidade nem quantificar a extensão da deterioração.

Uma película sensível à radiação ou meio de gravação, que produz imagens, é colocada do lado oposto à fonte de radiação, atrás do objeto de interesse. As imagens são uma representação 2D do elemento inspecionado, por compressão de dados através da espessura num plano. Obtém-se assim uma média da massa volúmica do elemento através da espessura. Este processo faz a deteção de fissuras ou defeitos que estão orientados perpendicularmente ao caminho da radiação.

A estrutura de madeira sã pode também ser sobreposta sobre as áreas degradadas e dificultar a interpretação e quantificação.

A disposição dos elementos também pode tornar difícil a colocação da fonte e chapas de imagem exigindo equipamento para o acesso bem como mais tempo de reflexão. As unidades portáteis tornam os elementos mais acessíveis para inspeção, e permitem o processamento das imagens no local, com poucos custos.

Tabela 8 - Raios X (Adaptado de Tannert, 2010e).

| Método | Tipo | | | Âmbito |
|--------|----------------|-----------------|----------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------|
| | Local | Técnica | Destrutivo | |
| Raio X | <i>In situ</i> | Eletromagnético | Não Destrutivo | Avaliação dos Defeitos Interiores Possível mas com Restrições (Limitações); Difícil quantificação |

3. Termografia por Infravermelhos

Uma grande maioria das técnicas utilizadas são métodos invasivos, os quais podem agravar danos já existentes ou facilitar o seu aparecimento através da introdução de agentes biológicos xilófagos.

Os sistemas que utilizam os raios X também são alvo de preocupação devido à percepção de perigo público.

O tempo necessário para uma completa investigação, com os métodos descritos no capítulo anterior, depende de diversos fatores, como sejam a capacidade de alcançar a estrutura, a resistência da madeira (no caso de investigações invasivas), o número de medições necessário para obter uma avaliação exaustiva da condição da estrutura, a capacidade para tirar medidas em sítios altos da estrutura onde o equipamento de subida pode ser necessário e a dimensão dos elementos estruturais.

Assim sendo, surge a necessidade de uma técnica não invasiva nem destrutiva, que não dê a percepção de perigo para a saúde pública, que seja abrangente e que não necessite da disponibilidade de grandes equipas de trabalho, durante muito tempo.

3.1 Algumas Definições de Termografia por Infravermelhos

A palavra Termografia surge do grego *θέρμη therme* que significa calor e *γραφία grafia* que quer dizer escrita. Na wikipédia (2013a, 2013b) podemos encontrar as seguintes explicações para definir esta tecnologia:

Técnica de mapeamento de temperatura num corpo;

Permite a visualização artificial da luz dentro do espectro infravermelho;

As vibrações de campos elétricos e magnéticos que se propagam no espaço à velocidade da luz dão origem a ondas eletromagnéticas, e o conjunto de ondas eletromagnéticas de todas as frequências formam o espectro eletromagnético;

A emissão de ondas eletromagnéticas pelos corpos aquecidos é estudada na Física mediante o que se denomina por radiação de corpo negro, sendo essa descrita pela Lei de Planck.

Cortizo (2007), na sua tese de Doutoramento refere Tavares (2004) como tendo realizado uma pesquisa através de diferentes autores da literatura técnico-científica, sobre as suas interpretações acerca do termo Termografia. Nesse trabalho é referido Williams (1980) que descreve a Termografia como um "ensaio térmico não destrutivo, utilizado na obtenção do perfil de temperatura superficial em estruturas e subsequentemente a correlação da informação obtida com algumas imperfeições internas"; já Krapez (1994) definiu como "uma técnica de diagnose, que avalia o

comportamento temporal do campo de temperatura superficial de uma estrutura excitada termicamente"; Giorleo (2002) salienta novamente o facto de ser uma técnica não destrutiva, acrescentando que mede de forma bidimensional a temperatura da superfície de qualquer material; ainda Sakagami (2002) destaca esta técnica como uma das mais poderosas para aferir a temperatura sem contacto.

Como descrito em Holst (2000) a termografia é definida por Vavilov (1996) como um método de determinação da distribuição espacial de calor nos objetos.

Segundo Doebelin (1990), a maioria dos sistemas de imagem por infravermelhos tem a função de fornecer uma imagem visual, na qual são exibidos diferentes tons de cinzento que representam diferentes níveis de temperatura da superfície do objeto alvo, em que a câmara de infravermelhos está focada.

Enquanto que estes níveis de cinzento estão relacionados, de forma precisa, com os níveis de energia infravermelha emitida desde o alvo, é de salientar que todos os sensores de temperatura por infravermelhos requerem conhecimento da emitância da superfície alvo para converter o sinal detetado em graus de temperatura.

Maldague (1993), refere que uma das várias técnicas de medição da temperatura faz-se por avaliação da radiação, que tem como princípio a medição remota da energia emitida. Esta possui a vantagem de não ser necessário equilíbrio térmico entre o objeto a ser medido e o sensor, tendo porém os problemas da emissividade e das reflexões, sendo também mais cara que as outras técnicas de medição da temperatura. Esta categoria de instrumentos usa o fluxo de calor para inspecionar a estrutura interna de materiais. A disponibilidade comercial de aparelhos de medição de radiação em meados dos anos 60 do século XX, conduziu ao uso do conceito de TNDE (Avaliação Termográfica Não Destrutiva) que se expandiu rapidamente.

Williams *et al.* (1983 como citado em Maldague, 1993) defende que apesar de algumas aplicações de TNDE serem possíveis por utilização de métodos por contacto, as suas utilizações são limitadas.

3.2 Radiação Infravermelha

A radiação Infravermelha, como refere Gaussorgues (1984) faz parte do espectro eletromagnético, visível na figura 7, que, apesar de ser contínuo, apresenta várias divisões em função da aplicação feita da radiação. Esta está compreendida aproximadamente entre os 0,7 e os 1000 μm podendo ainda ser subdividida com diferentes designações. Como o próprio nome o diz, situa-se junto à radiação visível vermelha, apesar desta não ser perceptível ao olho humano. Porém, tal como a luz visível, viaja através do espaço à velocidade da luz (300 000 km/s).

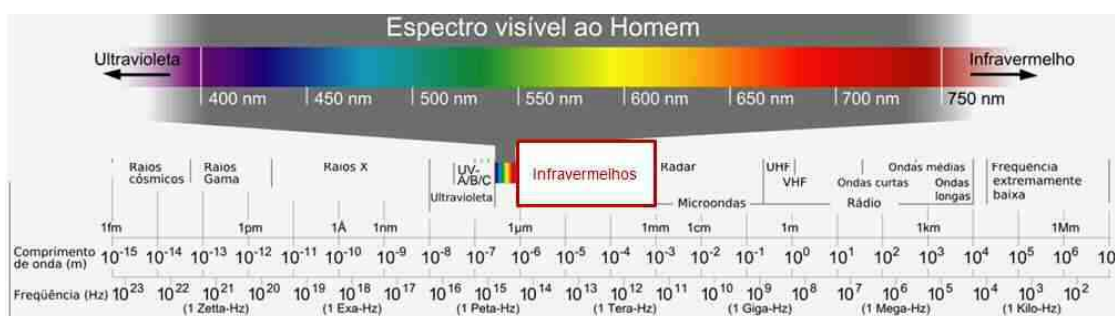


Figura 7 - Espectro de Radiação Eletromagnética, onde se pode ver o Espectro Infravermelho contínuo ao Espectro Visível. (Adaptado de Sociedade Brasileira de Física, 2013).

| Spectral band | Wavelength range (μm) |
|--------------------------------------------------|------------------------------------|
| Vacuum ultraviolet | 0.05 to 0.20 |
| Short ultraviolet (UV-C) | 0.20 to 0.29 |
| Mid-wave ultraviolet (UV-B) | 0.29 to 0.32 |
| Long-wave ultraviolet (UV-A) | 0.32 to 0.40 |
| Visible | 0.40 to 0.70 |
| Violet | 0.40 to 0.46 |
| Blue | 0.46 to 0.49 |
| Green | 0.49 to 0.55 |
| Yellow | 0.55 to 0.58 |
| Orange | 0.58 to 0.60 |
| Red | 0.60 to 0.70 |
| Near infrared (NIR) | 0.7 to 1.1 |
| Short wavelength infrared (SWIR) | 1.1 to 2.5 |
| Mid-wavelength infrared (MWIR) | 2.5 to 7.0 |
| <i>Note: labeled as SWIR in older literature</i> | |
| First thermal imaging band | 3.0 to 5.5 |
| Blue spike plume | 4.1 to 4.3 |
| Red spike plume | 4.3 to 4.6 |
| Long wavelength infrared (LWIR) | 7.0 to 15.0 |
| Second thermal imaging band | 8 to 14 |
| Very long wavelength infrared (VLWIR) | > 15.0 |
| Extreme infrared | 15 to 100 |
| Near millimeter | 100 to 1000 |
| Millimeter | 1000 to 10,000 |

Tabela 9 - Nomenclatura Espectral que salienta as subdivisões no Espectro Infravermelho. (Retirado de Holst, 2000)

A radiação Infravermelha, tal como a radiação visível, pode, da mesma forma, ser refletida, transmitida, absorvida e emitida, como evidenciado no esquema da figura 8.

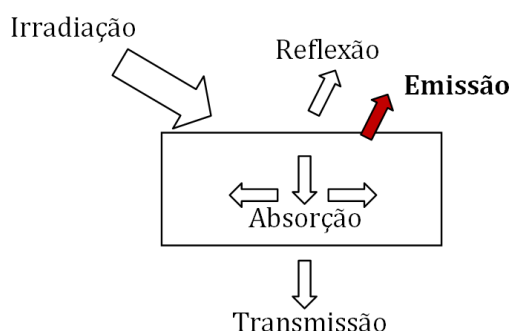


Figura 8 - Balanço Energético de um corpo sólido semitransparente, quando irradiado numa das suas faces (Adaptado de Raphael de Almeida, 2010).

Todos os corpos, a uma determinada temperatura acima dos zero graus absolutos (0 K ou seja -273 °C), emitem radiação infravermelha. Esta é tanto maior, quanto mais elevada for a temperatura, e resulta de uma maior agitação dos átomos e moléculas constituintes do corpo.

Tem que existir uma diferença entre o poder radiativo do ambiente (M_B) e o poder radiativo do objeto (M_T) em análise para que este possa ser detetado pela câmara termográfica como referido e ilustrado por Holst (2000), na figura 9.

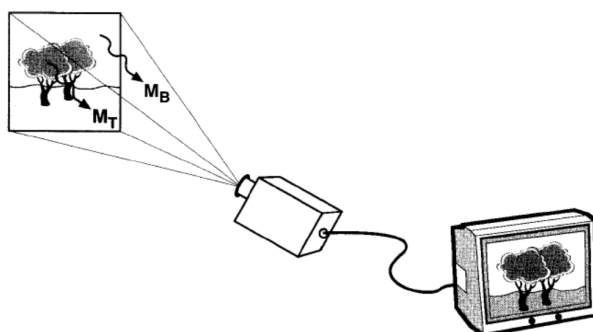


Figura 9 - M_T deve ser diferente de M_B para a deteção do alvo (Retirado de Holst, 2000).

3.3 História da Termografia por Infravermelhos

Frederick William Herschel, astrónomo e músico Alemão, descobriu no ano de 1800 a existência de uma radiação quente que mais tarde se veio a chamar infravermelha. Esta descoberta resultou de uma experiência, na qual se fez passar a luz solar por um prisma. Neste ensaio estudava as propriedades de diferentes bandas do espectro da luz solar, utilizando um termómetro de mercúrio. Observou que a temperatura ia subindo desde a radiação violeta até à vermelha e, para seu espanto, verificou que o termómetro apresentava maior valor numa zona imediatamente ao lado da banda vermelha do espectro visível, portanto impercetível ao olho humano. Referiu-se a esta zona como "espectro termométrico", outras vezes referia-se à radiação como "calor escuro" ou os "raios invisíveis". O termo infravermelho só aparece mais tarde, não se conhecendo a sua autoria, como se pode ver no Manual da Flir ThermaCAM B20 (FLIR Systems, 2006a).

De acordo com a empresa Erasmus (2013), em Breve História da Termografia, em meados do século XX desenvolveram-se os primeiros sistemas infravermelhos. Estes eram compostos por várias unidades modelares de grande tamanho que formavam conjuntos pesados e difíceis de manejar. O elemento sensor era uma conjugação de diferentes elementos, como mercúrio, cádmio e telúrio, que por efeito fotoelétrico produziam um sinal elétrico ao incidir a radiação infravermelha sobre ele. O inconveniente desta técnica era o facto do sensor aquecer e a consequente necessidade de um sistema paralelo de arrefecimento, que evoluiu desde os ciclos de Stirling através de azoto líquido até à refrigeração termoelétrica por células Peltier. Na década dos anos 80 apareceu outra tecnologia que revolucionou o mundo da medida da temperatura sem contacto: os sensores de efeito térmico designados microbolorímetros. Estes, ainda hoje, utilizam o efeito térmico da radiação infravermelha para fazer variar as condições elétricas de uma micro resistência. Composta por material semiconductor, esta micro resistência obtém um sinal proporcional à potência do infravermelho recebido. Uma vez que esta tecnologia já não necessita de nenhum tipo de refrigeração, pode-se então reduzir o tamanho e o peso dos sistemas termográficos. Atualmente estes sistemas têm o tamanho de uma câmara portátil, podendo ser manejados só com uma mão.

3.4 Termografia Qualitativa vs Termografia Quantitativa

Existem dois princípios diferentes de análise termográfica: o qualitativo e o quantitativo. Rosina e Robison (2002) referem a diferença entre o método qualitativo e quantitativo na aplicação da termografia por infravermelhos. A termografia qualitativa debruça-se na análise de padrões térmicos para revelar a existência e a localização das anomalias enquanto a termografia quantitativa utiliza medições de temperatura como um critério para determinar a gravidade de uma anomalia e conseguir delinear prioridades de reparação. O método qualitativo procura detetar a existência e localização de um problema. Em termos quantitativos, a questão reside em determinar a gravidade do problema, quando deverá ser reparado através da quantificação da temperatura. Porém, a correta medição da temperatura está fortemente dependente do valor considerado como referência para a emissividade do material, como é referido pelo autor em 2013. Este aspeto pode ser analisado através do gráfico da figura 10 que relaciona a temperatura superficial lida com o valor da emissividade considerado para a mesma superfície.

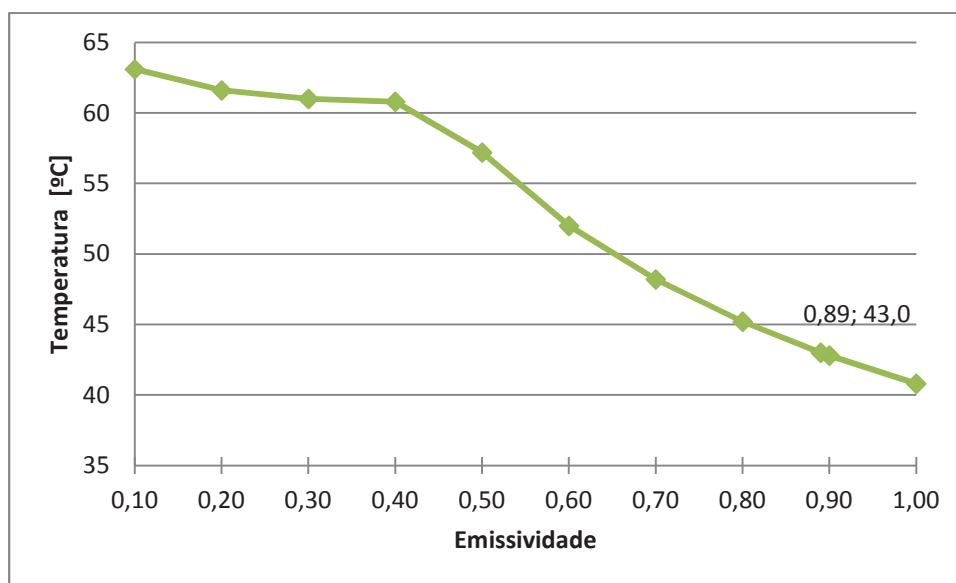


Figura 10 - Variação da Temperatura Superficial da amostra lida em função da variação da emissividade considerada.

Neste exemplo a emissividade correta, para a superfície em causa, é de 0,89 ao que corresponde uma leitura da temperatura superficial de 43 °C. Como podemos constatar pela observação do gráfico, ao introduzir um valor para a emissividade diferente do correto o valor da temperatura lido afasta-se do valor real, e tanto mais quanto maior for o erro na consideração da emissividade.

Também Barreira (2004) refere a importância da emissividade para a medição da temperatura pela técnica de termografia, acrescentando que não é relevante o valor da emissividade para uma análise qualitativa. Porém salienta que no caso de se pretenderem destacar diferenças de temperatura num termograma é importante que o valor da emissividade utilizado seja o correto.

Existe inclusivamente uma organização designada Quantitative Infrared Thermography [QIRT] (2013), que periodicamente desenvolve conferências internacionais, tendo como objetivos: discutir os desenvolvimentos da técnica mais recentes, bem como metodologias e métodos de análise contribuindo para a divulgação dos resultados mais recentes na área, em todo o mundo industrial e de pesquisa.

3.5 Avaliação Não Destrutiva por Termografia

A condutividade térmica ou a resistividade dos materiais relaciona-se com o grau de integridade dos mesmos. Ou seja, quando existem anomalias no fluxo de calor é alterado. É por esta razão que se utiliza a termografia, pois esta faz o mapeamento térmico das superfícies, através de termogramas, indicando-nos assim se uma estrutura tem regiões danificadas ou defeituosas, mostrando a sua localização onde existem as heterogeneidades térmicas. O termograma exibe as diferentes temperaturas locais através de gradientes de coloração que podem ser escalas monocromáticas, como as iniciais em tonalidades de cinzento ou as mais atuais escalas policromáticas. Nos termogramas seguintes nas figuras 11 e 12 podem ser observadas heterogeneidades térmicas que denotam a existência de fendas, tanto nos modos ativo como passivo. No modo passivo as fendas ou fissuras são notadas por temperaturas inferiores, enquanto que no modo ativo são evidenciadas por temperaturas mais elevadas. No primeiro termograma podem ainda distinguir-se as vigotas de uma laje realizada em betão pré-esforçado.

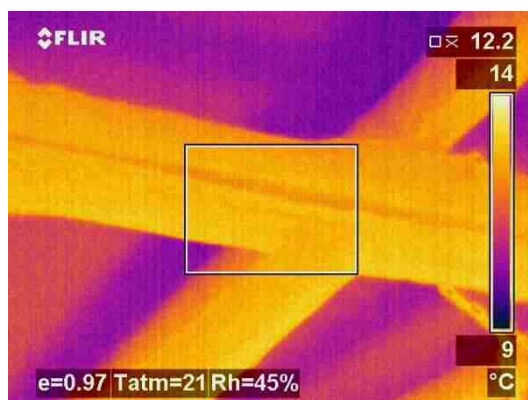


Figura 11 - Termograma de estrutura de madeira, obtido no modo passivo.



Figura 12 - Termograma de amostra de madeira, obtido no modo ativo.

3.6 Diferentes Tipos de Termografia

Maldague (1993), descreve que em TNDE são possíveis duas abordagens: a passiva e a ativa.

A abordagem passiva testa materiais e estruturas cuja temperatura, geralmente superior, é naturalmente diferente da temperatura do ambiente que as rodeia. As primeiras pesquisas são realizadas por Barker (1934), para deteção de incêndios florestais, seguido por Nichols (1935), para obter perfis de temperatura durante a laminação de aço a quente (como citado em Maldague, 1993).

Na investigação de edifícios é geralmente utilizada a termografia passiva, em que normalmente é pretendida uma avaliação qualitativa, como detetar irregularidades de revestimentos ou isolamentos, assim como maus funcionamentos em tubagens de aquecimento, por exemplo referido por Avdelidis e Moropoulou (2003).

Na abordagem ativa, ao contrário da passiva, é requerida uma fonte externa de calor para estimular os materiais a ser inspecionados.

Nem sempre a diferença entre as abordagens ativa e passiva é tão clara quanto parece, como referido por Maldague (1993).

Na termografia ativa é produzido um estímulo energético sobre a amostra em estudo, de modo provocar um fluxo interno de calor na superfície a inspecionar. Este pode ser provocado através de diferentes processos: fontes térmicas simples como lâmpadas ou flashes, jatos de ar quente, pulsos ultrassónicos, radiação infravermelha, micro-ondas, laser, entre outros, como é descrito por Raphael de Almeida (2010).

A termografia ativa pode ser realizada de duas formas diferentes, dependendo da posição relativa das fontes térmicas e da câmara termográfica. Quando estão ambas do mesmo lado, estamos perante o modo reflexivo. Quando a amostra a inspecionar se encontra entre ambas, estamos a usar o modo transmissivo, ver figura 13.

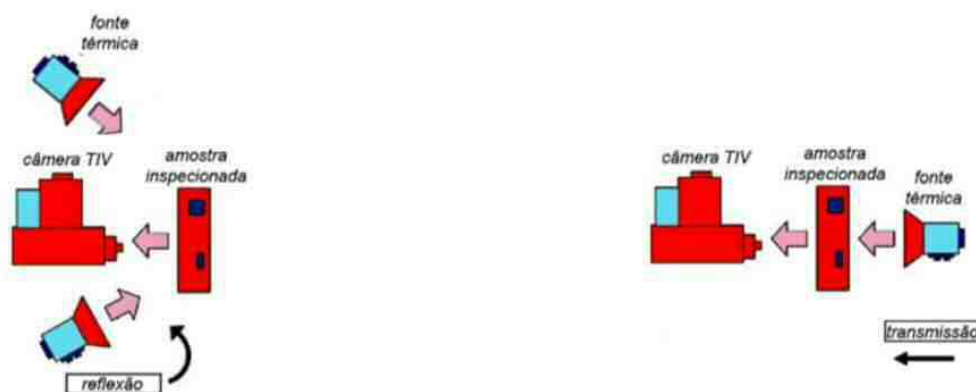


Figura 13 - Representação de TIV do modo reflexão e do modo de transmissão. (Adaptado de Raphael de Almeida, 2010).

O fluxo de calor gerado na termografia ativa é perturbado caso existam defeitos ou danos, na superfície ou próximo dela, nos elementos a analisar, provocando, desta forma, descontinuidade ou contraste térmico, que é detetado através da análise dos termogramas colhidos aquando da inspeção termográfica. A figura 14 descreve este processo, evidenciando a diferença existente entre a situação dum inspeção termográfica onde o elemento a inspecionar não contém defeito e outra quando possui defeito, no modo de reflexão. A figura 16 descreve o mesmo fenómeno para o modo de transmissão.

No modo reflexivo o local com defeito apresenta um incremento de temperatura, uma vez que o calor não atravessa o material, sendo refletido nesse local.

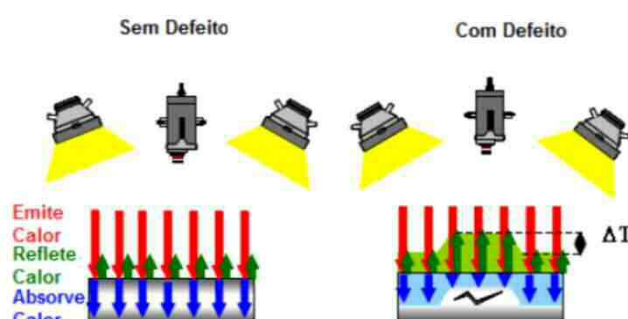


Figura 14 - Representação de TIV no modo de reflexão de peça sem e com defeito. (Adaptado de Raphael de Almeida, 2010).

No gráfico da figura 15, do modo de reflexão, é ilustrado o arrefecimento que ocorre após o aquecimento do objeto, salientando-se o ressalto de temperatura no local com defeito, não mantendo o andamento logarítmico característico do arrefecimento do material são.

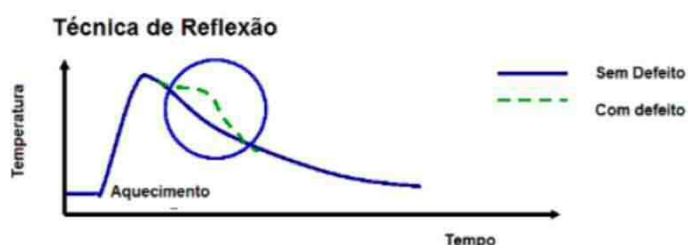


Figura 15 - Modo de reflexão da TIV. Variação da temperatura em função do tempo e existência ou não de defeito (Adaptado de Raphael de Almeida, 2010).

No modo transmissivo, o local com defeito apresenta uma diminuição da temperatura, pois nesse local o calor tem mais dificuldade em atravessar o objeto, uma vez a existência da deterioração. Na vizinhança, onde o material está são, o calor é transmitido, como é evidenciado na figura 16.

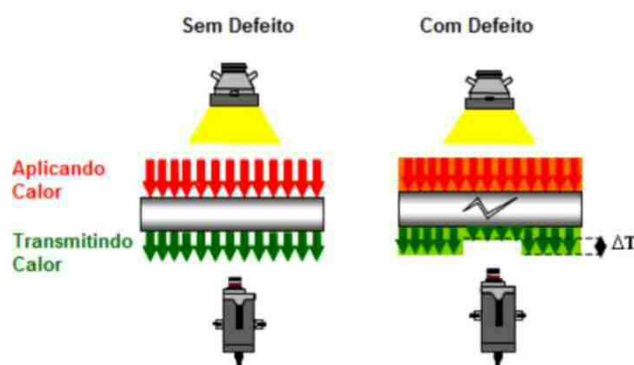


Figura 16 - Representação de TIV no modo de transmissão de peça sem e com defeito. (Adaptado de Raphael de Almeida, 2010).

No gráfico, da figura 17, pode ser destacada uma quebra no decorrer do processo de aquecimento do material com defeito em relação ao material são, que ocorre no modo de transmissão.



Figura 17 - Modo de transmissão da TIV. Variação da temperatura em função do tempo e existência ou não de defeito (Adaptado de Raphael de Almeida, 2010).

No processo de termografia ativa, a estimulação térmica pode ser menos ou mais prolongada no tempo, tomando a designação de termografia por pulso rápido, como acontece no gráfico, da figura 15, ou termografia por aquecimento contínuo, como acontece no gráfico, da figura 17, respetivamente.

Outra técnica possível é a termografia transiente, na qual o ciclo de aquecimento é substituído por um ciclo de arrefecimento. Neste caso, o elemento em observação é colocado num ambiente previamente aquecido (forno, mantas térmicas, etc.) até que atinja uma condição de estabilidade térmica. Seguidamente é retirado desta condição para um ambiente mais frio onde ocorre fluxo de calor desde a peça para o ambiente.

É no decorrer desta etapa que se observa por TIV tornando possível a detecção de deteriorações na amostra.

Outra possibilidade ainda é a que ocorre após o aquecimento contínuo apresentado no gráfico da figura 17, depois da estabilização da temperatura pode ser iniciado um ciclo de arrefecimento no qual sejam observadas as amostras, denominando-se esta inspeção termográfica por arrefecimento contínuo.

Estes processos de termografia descritos anteriormente foram consultados de Raphael de Almeida (2010).

3.7 Aplicações da Termografia por Infravermelhos

A aplicação militar está entre as primeiras dos sistemas de visão por infravermelhos. Usado nas duas grandes guerras mundiais. A ideia principal é ter um sistema de visão capaz de revelar a presença de potenciais alvos em condições de deficiente visibilidade como à noite ou na presença de nevoeiro (Maldague, 1993).

O desenvolvimento de termografia por infravermelhos, na medicina, tem sido reportado para avaliação de doentes com problemas no sistema da musculatura esquelética ou para estudo do cancro da mama onde esta técnica conduz a diagnósticos mais precoces do que com a mamografia convencional. De facto a medicina é reconhecida por Lawson (1956 como citado em Maldague, 1993) como uma das primeiras aplicações, não militares, de termografia.

Segundo Brioschi (2013), o desenvolvimento dos computadores e eletrónica tem mudado muito a termografia médica moderna, devido aos sensores de altíssima resolução e sensibilidade térmica do final dos anos 90. Em 2013 é possível fazer filmes em tempo real e avaliar a funcionalidade do sistema nervoso autónomo. A existência de softwares cada vez mais específicos tem contribuído para mudar a opinião da classe médica sobre os exames com base nesta tecnologia, que ressurge com trabalhos de grande valor científico, refere este autor do Instituto de Física de São Carlos da Universidade de São Paulo.

Atualmente, as aplicações dos sistemas de imagem térmicos são divididos em duas categorias principais, Militar e Comercial, que se encontram descritos na tabela seguinte. Embora em 1969 já tinha sido construída uma lista com mais de 100 diferentes aplicações (Holst, 2000).

Tabela 10 - Aplicações Representativas dos Sistemas de Imagem Térmicos (Holst, 2000).

| Comunidade | Aplicações | |
|------------|------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------|
| Militar | Reconhecimento, aquisição de alvos, controlo de incêndios e navegação. | |
| Comercial | Civil | Cumprimento da lei, luta contra incêndios e integridade de edifícios. |
| | Ambiental | Recursos geológicos, controlo da poluição e conservação de energia. |
| | Industrial | Manutenção preditiva, produção e testes não destrutivos. |
| | Medicina | Mamografia, lesões nos tecidos moles e constrição arterial. |

Surgiram várias terminologias em consequência do grande número de aplicações comerciais NDT (Testes Não Destrutivos), NDI (Inspeção Não Destrutiva), NDE (Avaliação Não Destrutiva), estas designações descrevem métodos de teste sem causar danos ao objeto a ser analisado (Holst, 2000).

Uma das mais recentes aplicações da termografia aparece com a chamada termografia flash, técnica de pulso instantâneo, aplicada na indústria aeronáutica e aeroespacial. Com esta técnica são adquiridas imagens em tempo real no modo de reflexão, o que constitui a vantagem de só ser requerido o acesso a um dos lados do elemento a observar para efetuar a inspeção, porém com o inconveniente de ser ainda muito dispendiosa. A figura 18 retrata este equipamento de ponta.



Figura 18 - Equipamento completo para execução de inspeção termográfica pela técnica de pulso instantâneo. (1) Máquina termográfica acoplada a flash de alta potência 1MW. (2) Unidade processadora de sinal (Raphael de Almeida, 2010).

A figura 19 retrata a aplicação de diferentes técnicas de inspeção não destrutiva, neutrongrafia, ultrassonografia, radiografia e termografia, a uma peça de uma aeronave militar, na qual pode ser observado que a termografia apresenta os melhores resultados conseguindo identificar e delimitar a deterioração da peça como indicado pela seta.

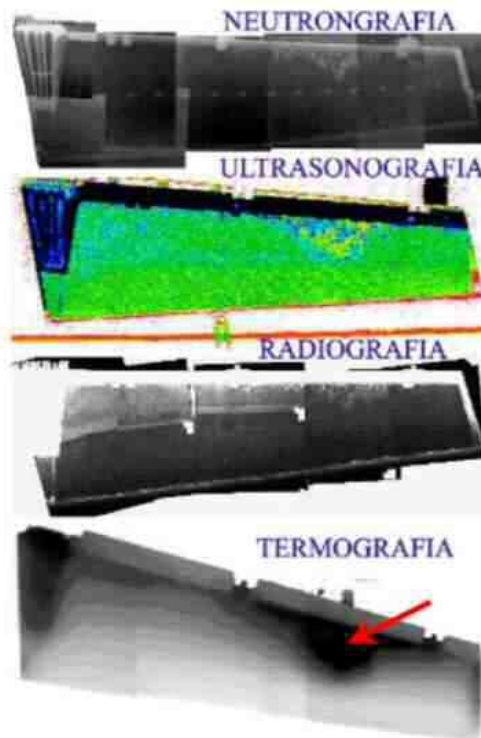


Figura 19 - Comparação da utilização de técnicas de inspeção não destrutiva.
(Raphael de Almeida, 2010).

Outras aplicações segundo Prakash Rao (2008, May), incluem uma ampla gama, desde os campos elétricos, mecânicos, de produção, de automóveis, eletrônicos e sistemas de computador, refere também ser útil no combate a incêndios, indústria de processamento de alimentos, estudos de vida selvagem, sistemas de vigilância, segurança e defesa.

3.7.1 Campos de Aplicação na Engenharia Civil

A termografia por infravermelhos é mencionada por Wild (2007) como um método de avaliação moderno para construções, sejam elas novas ou reconstruções de edifícios antigos.

As câmaras de infravermelhos permitem uma avaliação da temperatura na construção de edifícios, a partir do seu interior ou do exterior. Assim, podem identificar-se pontes térmicas. Também é possível identificar a posição exata de tubagens de aquecimento ou descobrir razões pelas quais os fungos ou bolores surgem numa área particular.

As imagens térmicas fornecem uma excelente ferramenta para uma rápida avaliação das estruturas. Sendo um método de não contacto e não destrutivo é útil na pesquisa de condição rápida, de estruturas, sem necessidade de qualquer meio de acesso. O método tem imenso potencial no controlo da qualidade durante a construção, bem como em investigação de estruturas deterioradas, sem interromper a construção ou utilidade da mesma. Esta técnica tem aplicações tanto na investigação de betão como em estruturas de alvenaria. As aplicações incluem também a avaliação de pavimentos, estruturas históricas, canalização, linhas de esgoto, fissuras, e entrada de humidade (Prakash Rao, 2008, May).

Cóias (2006) refere a termografia como técnica utilizada para fazer um levantamento rigoroso sem danificar ou alterar o revestimento superficial, como reboco, estuque ou pintura mural. Desta forma, é possível medir e avaliar heterogeneidades em paredes ou outros elementos estruturais, sem remover os respetivos revestimentos, como ocorre no modo tradicional que é destrutivo, demorado e impossível de utilizar no caso de revestimentos decorativos de valor.

Nas figuras seguintes pode observar-se uma parede pombalina a ser inspecionada à vista desarmada (figura 20) e a respetiva imagem termográfica (figura 21). Graças à termografia é possível identificar as treliças em madeira sem destruição do reboco.



Figura 20 - Vista desarmada de uma parede pombalina. (Cóias, 2006).



Figura 21 - Vista termográfica de parede pombalina relativa à imagem anterior onde se podem ver destacadas as treliças de madeira. (Cóias, 2006).

Na composição das paredes e elementos estruturais existem diferentes materiais que reagem às solicitações térmicas de modo diferente. Ainda segundo Córias (2006), o que determina o comportamento térmico dos materiais são os parâmetros: calor específico e condutibilidade térmica. Quando sujeitos à mesma solicitação térmica absorvem, conduzem e emitem de diferente modo devido aos diferentes valores que possuem nos parâmetros referidos.

A figura 22 evidencia a maior emissão de calor dos elementos de madeira relativamente aos materiais adjacentes.

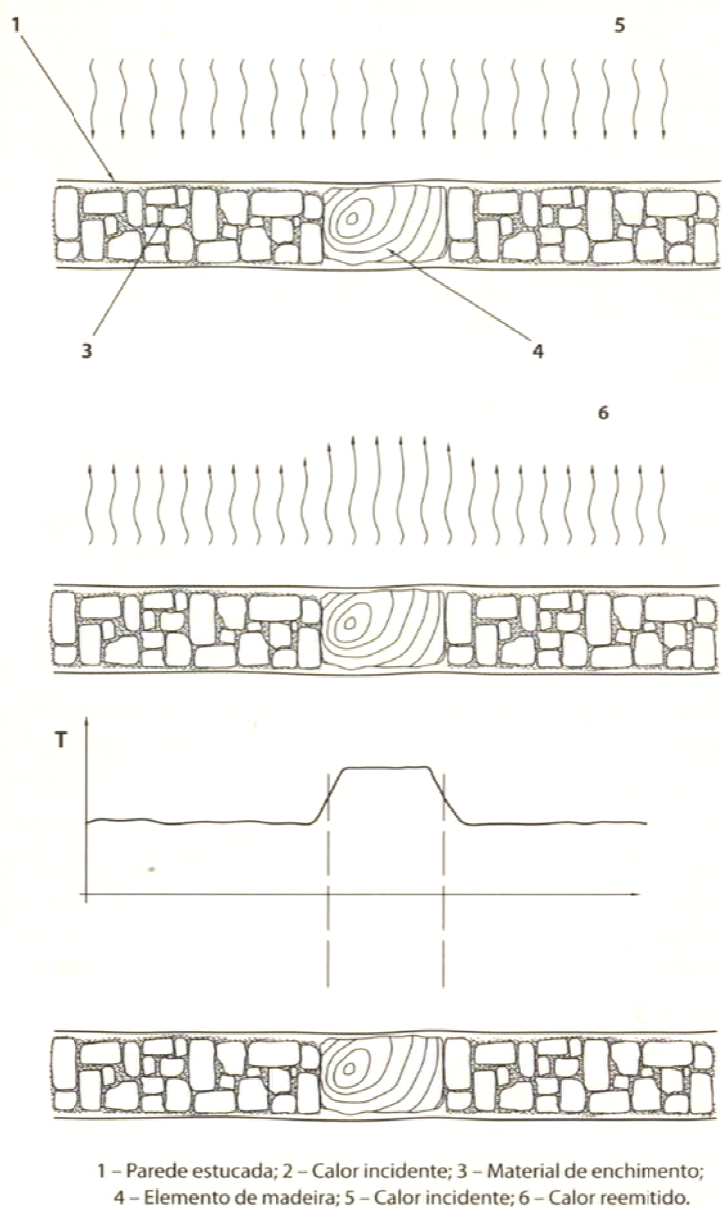


Figura 22 - Fundamentação teórica de detecção de elementos de madeira em paredes de alvenaria. (Córias, 2006).

3.8 Leis que regem a Radiação

3.8.1 Fenómenos de Transferência de Calor

A Radiação é o único modo de transferência de calor detetado diretamente pela TIV. No entanto, existem três modos de transferência de calor: radiação, condução e convecção. Na radiação a transferência de calor ocorre através de ondas eletromagnéticas as quais podem atravessar meios transparentes ou o vácuo. A condução refere-se ao modo de transferência de calor que existe nos corpos e entre estes. Na convecção o calor é transferido entre uma superfície sólida e um fluido.

A radiação transfere energia de forma mais eficiente através do vácuo ao contrário do que ocorre com a condução e com a convecção as quais exigem a presença de um meio material.

Alguns agentes podem dificultar a transferência de calor por radiação, como por exemplo a atmosfera, a qual possui humidade, dióxido de carbono e partículas. Por outro lado, uma diferença de temperatura elevada entre objetos e uma menor distância ao corpo quente, bem como uma elevada emissividade do objeto, concorrem para uma maior rapidez de transferência de calor por radiação (Oliveira, 2012).

Convém, então, conhecer as leis que regem a radiação, as quais se baseiam no conceito teórico de corpo negro.

3.8.2 Definição de Corpo Negro

O Corpo Negro é definido como um objeto capaz de absorver toda a radiação, independentemente da direção, que sobre ele incida, seja qual for o comprimento de onda. O corpo negro emite também radiação, para todos os comprimentos de onda, fornecendo energia para o ambiente envolvente até atingir o equilíbrio termodinâmico, como descrito pela Lei de Kirchoff (Barreira, 2004).

De acordo com o definido para este corpo teórico, não existe nenhuma superfície capaz de emitir mais energia, para uma dada temperatura e comprimento de onda e é um emissor difuso pois a emissão ocorre em todas as direções.

O corpo negro é considerado como sendo um emissor perfeito, para o qual é definida emissividade igual à unidade.

A lei que descreve a distribuição da radiação emitida por um corpo negro, a uma determinada temperatura, no espectro eletromagnético é a lei de Planck.

3.8.3 Lei de Planck

Esta lei relaciona a radiação emitida, a temperatura do emissor e o comprimento de onda da radiação.

A lei de Planck é descrita, em função do comprimento de onda da radiação, pela fórmula que a seguir se apresenta:

$$W_{\lambda cn} = \frac{dR(\lambda, T)}{d\lambda} = \frac{2 \cdot \Pi \cdot h \cdot c^2}{\lambda^5 \cdot (e^{h \cdot c / \lambda \cdot k \cdot T} - 1)} \quad [\text{W} \cdot \text{m}^{-3}] \quad (3.1)$$

| | | | |
|------------------|--------------------------------------------------------|--------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------|
| $W_{\lambda cn}$ | Emissão radiante do corpo negro ou radiância espectral | | $[\text{W} \cdot \text{m}^{-3}]$ ou $[\text{J} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{m}^{-3}]$ |
| h | Constante de Planck | $h = 6,626176 \times 10^{-34}$ | $[\text{W} \cdot \text{s}^2]$ ou $[\text{J} \cdot \text{s}]$ |
| c | Velocidade da Luz | $c = 2,998 \times 10^8$ | $[\text{m} \cdot \text{s}^{-1}]$ |
| λ | Comprimento de onda | | $[\mu\text{m}]$ |
| e | Base neperiana | | |
| k | Constante de Boltzman | $k = 1,380662 \times 10^{-23}$ | $[\text{J} \cdot \text{K}^{-1}]$ |
| T | Temperatura absoluta | | $[\text{K}]$ |

Se introduzirmos diferentes valores de temperatura na equação da Lei de Planck, esta gera diferentes curvas relativas à emissão espectral. Para valores de temperatura superiores a curva gerada é mais elevada pois a radiação de energia é mais elevada e assume uma configuração mais larga em virtude de a radiação ocorrer numa maior largura do espectro (Barreira, 2004; Contreras, 1998).

Para relacionar a temperatura da superfície do corpo negro com o comprimento de onda com o qual se irradia a máxima energia é utilizada a Lei de Wien.

3.8.4 Lei do Deslocamento de Wien

Esta lei resulta da obtenção do máximo da expressão da Lei de Planck, ou seja, derivando e igualando a zero:

$$\frac{dW_{\lambda cn}}{d\lambda} = 0$$

obtém-se: $\lambda_{m\acute{a}x} = \frac{2898}{T} \quad [\mu\text{m}] \quad (3.2)$

O comprimento de onda, que corresponde ao máximo da radiação do corpo, diminui quando a temperatura da superfície aumenta é o que nos transmite esta equação conhecida como deslocamento do máximo de radiação em função da temperatura (Barreira, 2004; Contreras, 1998).

Se quisermos conhecer a totalidade da energia emitida por um corpo negro recorreremos à Lei de Stefan-Boltzman.

3.8.5 Lei de Stefan-Boltzman

Se integrarmos a equação da Lei de Planck no intervalo entre zero e infinito, em ordem ao comprimento de onda, obtém-se a seguinte expressão:

$$W_{cn} = \int_0^{\infty} W_{\lambda_{cn}} d\lambda = \sigma \cdot T^4 \quad [\text{W/m}^2] \quad (3.3)$$

onde σ é a Constante de Stefan-Boltzman $\sigma=5,7 \cdot 10^{-8} [\text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-4}]$

À medida que aumenta a temperatura do corpo negro maior é a quantidade de energia libertada e maior proporção desta entra dentro do campo visível. O corpo torna-se incandescente quando é superado um certo limite de temperatura.

Todas estas leis relativas ao corpo negro constituem uma aproximação ao comportamento térmico dos corpos reais, pois estes não absorvem toda a radiação que recebem tal como o faz um corpo negro (Barreira, 2004; Contreras, 1998).

3.8.6 Corpo Real

Um corpo real não absorve toda a radiação que recebe tal como acontece com o corpo negro, uma vez que o corpo negro é uma idealização teórica.

Num corpo real apenas uma fração da radiação incidente é absorvida sendo a restante refletida e transmitida. Todos estes fatores dependem do comprimento de onda. Assim, para um dado comprimento de onda, a soma destas frações é a totalidade da radiação, sendo, por isso, igualada à unidade (Gaussorgues como citado em Contreras, 1998).

$$\alpha_{\lambda} + \rho_{\lambda} + \tau_{\lambda} = 1 \quad (3.4)$$

| | |
|--------------------|-----------------------|
| α_{λ} | Absorção espectral |
| ρ_{λ} | Reflexão espectral |
| τ_{λ} | Transmissão espectral |

Para um dado comprimento de onda, podem ser definidas:

a absorção espectral, como a relação entre a radiação absorvida e a radiação incidente;

a reflexão espectral, como a relação entre a radiação refletida e a radiação incidente;

a transmissão espectral, como a relação entre a radiação transmitida e a radiação incidente.

Para que exista equilíbrio no sistema, é necessário que a energia absorvida por um corpo iguale a energia emitida por esse corpo, a emissividade, para um determinado comprimento de onda, isto é o traduzido pela Lei de Kirchoff, para qualquer material, a uma determinada temperatura (Barreira, 2004).

Logo $\alpha_{\lambda} = \varepsilon_{\lambda}$ (3.5)

Em que ε_{λ} representa a emissividade espectral.

Assim a equação $\alpha_{\lambda} + \rho_{\lambda} + \tau_{\lambda} = 1$ (3.6)

pode ser escrita como: $\varepsilon_{\lambda} + \rho_{\lambda} + \tau_{\lambda} = 1$ (3.7)

Do mesmo modo que para o espectro visível classificamos os materiais como opacos, semitransparentes e transparentes, para o espectro dos infravermelhos também existe esta classificação, a qual depende dos valores dos coeficientes de absorção, ou emissividade, reflexão e transmissão, como se pode ver na descrição abaixo.

| | | | |
|--------------------|----------------------------------------------|----------------------|----------------------|
| Corpo Negro | $\varepsilon_{\lambda} = 1$ | $\rho_{\lambda} = 0$ | $\tau_{\lambda} = 0$ |
| Corpo Transparente | $\varepsilon_{\lambda} = 0$ | $\rho_{\lambda} = 0$ | $\tau_{\lambda} = 1$ |
| Espelho Perfeito | $\varepsilon_{\lambda} = 0$ | $\rho_{\lambda} = 1$ | $\tau_{\lambda} = 0$ |
| Superfície Opaca | $\varepsilon_{\lambda} + \rho_{\lambda} = 1$ | | $\tau_{\lambda} = 0$ |
| Corpo Cinzento | $\varepsilon_{\lambda} = \text{constante}$ | | |

Tal como o corpo negro, o corpo cinzento é também uma idealização dos corpos reais, em que a emissividade é constante para qualquer comprimento de onda, ou seja, a emissividade é independente do comprimento de onda.

Na figura 23 podem distinguir-se os corpos negro, cinzento, real e espelho, quanto à emissividade espectral.



Figura 23 - Emissividade espectral para diferentes corpos.
(Gaussorgues como citado em Barreira, 2004).

A radiância espectral de qualquer corpo, expressa pela Lei de Planck, é dada pela seguinte expressão, (Barreira, 2004):

$$\frac{dR(\lambda, T)}{d\lambda} = \varepsilon_{\lambda} \cdot \frac{dR_{cn}(\lambda, T)}{d\lambda} \quad (3.8)$$

De onde se destaca a emissividade espectral de uma dada superfície ou objeto, que pode ser descrita como, a razão entre a radiação emitida pelo objeto e a emitida por um corpo ideal negro, à mesma temperatura e mesmo comprimento de onda.

$$\varepsilon_{\lambda} = \frac{W_{\lambda,0}}{W_{\lambda,cn}} \quad (3.9)$$

Para o cumprimento do princípio da conservação da energia, como anteriormente referido, deduz-se que a emissividade é igual à absorção, para qualquer temperatura e comprimento de onda. Concluindo-se assim, que um bom absorvedor é também um bom radiador como é o caso da pele humana e do metal oxidado. Da mesma forma um bom refletor é considerado um mau radiador, de que são exemplo as superfícies brilhantes.

Quanto mais refletor é um corpo mais baixo é o valor da sua emissividade. No entanto, tanto a absorção como a emissividade são função do comprimento de onda.

Um corpo, diretamente exposto à luz solar, absorve raios infravermelhos, de acordo com o seu coeficiente de absorção, para os comprimentos de onda da luz solar. Ao mesmo tempo, estará a irradiar em infravermelhos de acordo com a emissividade que possui, para determinada temperatura e comprimento de onda de radiação (Contreras, 1998).

A Lei de Stefan-Boltzman, para um corpo real, converte-se em:

$$W_{\lambda_0} = \varepsilon \cdot \sigma \cdot T^4 \quad [\text{W/m}^2] \quad (3.10)$$

Isto significa que o poder de emissão total de um corpo real é o mesmo que o de um corpo negro, para o mesmo valor de temperatura, mas reduzido proporcionalmente pelo valor da emissividade do corpo real em estudo. Assim sendo, é determinante o conhecimento do valor da emissividade da superfície do objeto em estudo, para uma correta leitura dos resultados termográficos obtidos (Contreras, 1998).

3.9 Noção de Emissividade e Fatores que a Afetam

A emissividade é uma expressão usada para caracterizar propriedades óticas dos materiais, tendo em conta a quantidade de energia emitida em comparação com um corpo negro ideal (Avdelidis & Moropoulou, 2003).

Os valores de emissividade estão compreendidos entre 0 (espelho perfeito refletor) e 1 (emissor perfeito corpo negro). Como resultado, a emissividade tem um papel importante na termografia e é dependente de vários fatores como é descrito seguidamente (Avdelidis & Moropoulou, 2003; Marinetti & Cesaratto, 2012).

Existem diversos fatores que afetam a emissividade dos objetos, de entre os quais se destacam, o comprimento de onda (λ), o ângulo de observação (θ) e a temperatura da superfície do objeto em estudo (T).

$$\varepsilon = f(\lambda, \theta, T) \quad (3.11)$$

3.9.1 Comprimento de Onda

Como se pode ver no gráfico da figura 24, os valores de emissividade de diferentes materiais modificam-se à medida que varia o comprimento de onda. Os materiais representados são a água, a terra e o plástico. De uma maneira geral, para os sólidos a emissividade espectral varia de forma lenta com o comprimento de onda, enquanto que os líquidos apresentam variações bruscas. Sendo a madeira um material sólido, é espetável que se encontre dentro do comportamento lento (Gaussorgues como citado em Barreira, 2004).

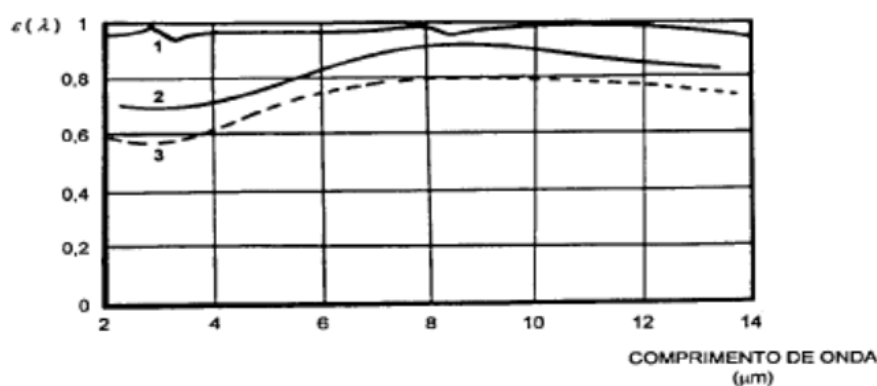


Figura 24 - Emissividade espectral para diferentes corpos não metálicos: água (1), terra (2), plástico (3) (Gaussorgues como citado em Barreira, 2004).

3.9.2 Ângulo de Observação

O ângulo de observação é um fator a ter em conta aquando da observação termográfica, uma vez que afeta os resultados. Como podemos ver, através do diagrama da figura 25, para a madeira (wood), esta variação só tem significado a partir dos 60° , pois desde os 0° aos 60° , em relação à normal à superfície, representada por 0° na figura, as variações existentes são praticamente insignificantes. Para valores angulares superiores, a emissividade diminui, para valores próximos de zero, de forma acentuada.

Para observar superfícies não planas, como as cilíndricas, há que ter um cuidado redobrado, uma vez que a emissividade varia de ponto para ponto, quando o ângulo em relação à normal é superior a 60° , apesar do material ser o mesmo. Sendo apenas possível observar uma pequena largura do objeto, de cada vez, quando este tem uma forma arredondada (Gaussorgues como citado em Barreira, 2004).

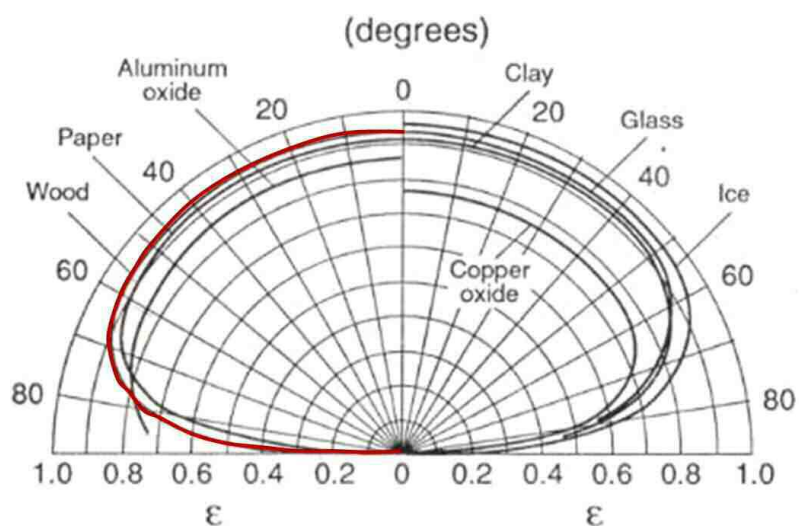


Figura 25 - Diagrama polar da variação da emissividade em função do ângulo de observação (adaptado de Maldague, 2000).

3.9.3 Temperatura

Os materiais não-metálicos, nos quais se enquadra a madeira, apresentam uma emissividade elevada, normalmente superior a 0,80. Porém, esta diminui com o aumento da temperatura, como se pode ver no gráfico da figura 26. No entanto, como a madeira em observação se encontra à temperatura ambiente, ou a valores inferiores a 100°C , estas variações não têm significado, pois pelo que se pode constatar através do gráfico da figura 26, para materiais não metálicos, não chegam a ser de uma décima (Gaussorgues como citado em Barreira, 2004).

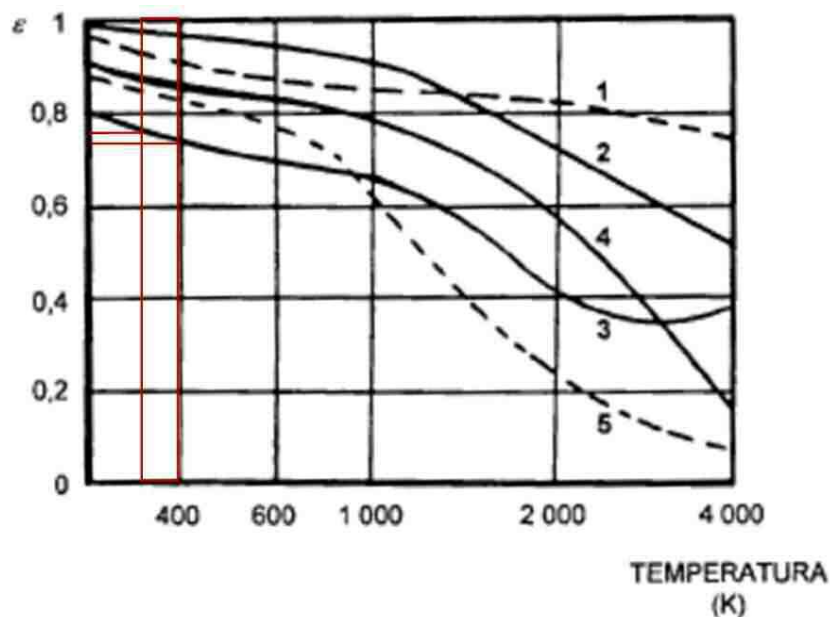


Figura 26 - Variação da emissividade com a temperatura em materiais não-metálicos: borracha (1); porcelana (2); cortiça (3); papel (4); argila refratária (5) (Adaptado de Gaussorgues como citado em Barreira, 2004).

3.10 Métodos Expeditos para a Determinação da Emissividade

Um dos principais fatores a ser introduzido na câmara termográfica, para a determinação da temperatura, é a emissividade. Como existem diversos parâmetros que influenciam a determinação da emissividade, convém, sempre que possível, utilizar um valor que tenha sido determinado nas mesmas condições daquelas onde vai ser medida a temperatura. Assim, nada melhor que determinar a emissividade, no próprio local, onde vão ser feitas as observações, através de métodos expeditos, como os que a seguir se apresentam.

3.10.1 Utilização de um termopar

Utiliza-se um termopar para a determinação da temperatura da superfície em causa, em seguida utiliza-se o sensor ou câmara termográfica e vai-se variando o valor da emissividade, de forma a que a temperatura seja o mais possível próxima da determinada pelo termopar. Esse valor é o da emissividade para a superfície (Barreira, 2004; RoMiotto, 2011).

É de ter em conta que existem diferenças entre uma temperatura de contacto, baseada na condução, e uma temperatura radiativa, como é o caso da obtida através da máquina de termografia (FLIR, 2006a; Holst, 2000).

3.10.2 Utilização de fita isolante preta adesiva

Nos casos em que a temperatura da superfície em causa é próxima da temperatura ambiente, como é o caso das estruturas de madeira *in situ*, pode ser utilizada fita isoladora preta, que é colada à superfície em análise. Para esta fita é conhecido o valor da emissividade, que segundo Holst (2000) é de 0,970, para 35°C de temperatura ambiente. É inserido este valor de 0.970 na máquina, com o qual se determina a temperatura da superfície a apontar para a fita preta. Aponta-se com o termógrafo para o lado adjacente sem fita e vai-se alterando o valor da emissividade, até que o valor da temperatura lido seja o mesmo. Quando for o mesmo estamos perante o valor da emissividade para a superfície.

Neste método parte-se do princípio que a temperatura da superfície com fita é a mesma que a da superfície sem fita (Barreira, 2004; Flir 2006a; RoMiotto, 2011).

3.10.3 Utilização de tinta preta

Este método é idêntico ao anterior mas utilizando tinta, logo pintando parte da superfície em vez da fita que era colada.

Deste modo, esta metodologia pode ser considerada destrutiva, no caso, por exemplo, de murais pintados, não devendo então ser utilizado este método (Barreira, 2004; RoMiotto, 2011).

A emissividade para a tinta preta é considerada normalmente de 0,930 a 0,980, este valor depende do tipo de tinta e pode ser consultado em tabelas de emissividade (Holts, 2000).

Neste método também se parte do princípio que a temperatura da superfície do objeto com tinta é a mesma que a da superfície do objeto sem tinta.

3.10.4 Dificuldades na Aplicação dos Métodos Expeditos

Em muitos casos por impossibilidade de utilização dos métodos expeditos, quer por dificuldades de acesso ao local ou para não danificar o material, então pode recorrer-se a valores existentes, tabelados, que se aproximem das mesmas circunstâncias de ensaio.

Assim, podem ser consultadas tabelas com valores para a emissividade em diferentes condições e para diferentes materiais. Estas tabelas só deverão ser usadas em última instância, dada a dificuldade de reproduzir as mesmas condições existentes em cada caso. Para o material madeira existem poucos dados tabelados. A madeira é

um material com grande variabilidade quer a nível da espécie quer ao nível do acabamento superficial, o que nem sempre consta nas tabelas.

3.11 Tabela com Valores para a Emissividade do Material Madeira

De seguida apresenta-se uma tabela, de emissividades, recolhida de diferentes autores consultados, sobre o material madeira. Na tabela seguinte para lá do material, está geralmente caracterizada a sua superfície, pelo tipo de acabamento, a temperatura em que é feito o ensaio, a janela espectral, a emissividade, o ângulo de observação e a referência de onde foram recolhidos os valores.

Como se pode constatar, de modo geral, a emissividade varia com o tipo de acabamento da superfície, a janela espectral, com a temperatura e com o ângulo de observação. Nem todos os autores apresentam estes dados para os valores de emissividade que determinam, de forma a que se possa proceder a uma comparação entre resultados e a permitir uma mais clara utilização dos mesmos.

Tabela 11 - Valores de Emissividade para a Madeira e derivados, na Bibliografia consultada.

| Material | Especificação da Superfície | Temperatura [°C] | Janela Espectral [μm] | Emissividade | Ângulo [°] | Referência |
|-----------------------------------|----------------------------------------------|------------------|-----------------------|--------------|------------|-----------------------------------|
| Madeira | — | 17 | 2-5 | 0,98 | — | Jones,A <i>et al.</i> (1977) (1) |
| Madeira | — | 19 | 6,5-20 | 0,962 | — | Kern (1) |
| Madeira | Aplainada | 20 | Total | 0,8-0,9 | — | Mikaél A. (1) |
| Madeira | Branca,Húmida | 20 | Total | 0,7-0,8 | — | Mikaél A. (1) |
| Carvalho | Aplainado | 20 | Total | 0,90 | — | William L. <i>et al.</i> (1) |
| Carvalho | Aplainado | 70 | 8-14 | 0,88 | — | Ohman, C. (1999) (1) |
| Carvalho | Aplainado | 70 | 2-5 | 0,77 | — | Ohman, C. (1999) (1) |
| Contraplacado | Não Tratado | 20 | 2-5 | 0,83 | — | Paljak, P. (1972) (1) |
| Contraplacado | Suave, Seco | 36 | 2-5 | 0,82 | — | Vlcek,J. (1) |
| Madeira | Esmerilada | — | Total | 0,5-0,7 | — | Mikaél A. (1) |
| Pinho 4 Amostras | — | 70 | 8-14 | 0,81-0,89 | — | Ohman, C. (1999) (1) |
| Pinho 5 Amostras | — | 70 | 2-5 | 0,67-0,75 | — | Ohman, C. (1999) (1) |
| Madeira | Natural | — | 8-14 | 0,9-0,95 | — | Raytec FLUKE |
| Madeira | Natural | — | 8-14 | 0,9-0,95 | 0 | RoMiotto (2011) |
| Faia | Aplainado | 70 | — | 0,94 | — | OMEGA |
| Carvalho | Aplainado | 38 | — | 0,91 | — | OMEGA |
| Abeto | Lixado | 38 | — | 0,89 | — | OMEGA |
| Madeira | — | — | — | 0,8-0,9 | — | OMEGA |
| Madeira | — | 22 | — | 0,98 | 0 | Tanaka e Divós (2000) |
| Madeira | — | — | — | 0,8-0,9 | — | Childs 2001 (2) |
| Carvalho Branco | Aplainado | — | — | 0,9 | — | ASHRAE 2001 (2) |
| Produtos comuns da Madeira | — | — | — | 0,94-0,95 | — | Fabricantes de Termómetros IV (2) |
| <i>Pinus strobus</i> cerne | Aplainado | — | — | 0,89 | 0 | Rice (2004) |
| <i>Pinus strobus</i> | Rugoso | — | — | 0,91 | 0 | Rice (2004) |
| <i>Produtos Comuns da Madeira</i> | — | — | — | 0,89-0,92 | — | Rice (2004) |
| Madeira | — | — | — | 0,96 | — | Wild (2007) |
| Caibros de Madeira | Aquecimento direcional catalítico de Propano | 21,1 | — | 0,85 | 0 | Fromapfel e Stolz (2011) |
| | | | — | 0,81 | 45 | |
| | | | — | 0,81 | 60 | |
| | | | — | 0,77 | 75 | |
| | Aquecimento com Luz Visível | | — | 0,50 | 0 | |
| | | | — | 0,69 | 45 | |
| | | | — | 0,74 | 60 | |
| | | | — | 0,65 | 75 | |
| Madeira | — | — | — | 0,90 | — | Linán <i>et al.</i> (2011) |
| Contraplacado Claro | — | — | 3-5 | 0,62 | — | Ciocia e Marinetti (2012, June) |
| | — | — | 7,5-13 | 0,79 | — | |
| Madeira | — | — | 7,5-13 | 0,90 | — | Conde <i>et al.</i> (2012) |
| Madeira | Natural | 22,0 | 7,5-13 | 0,924 | 0 | López <i>et al.</i> (2013, June) |

(1) como citado em FLIR (2006a).

(2) citado em Rice (2004)

3.12 Outros Fatores que afetam a TIV

A detecção da radiação no espectro eletromagnético na banda do infravermelho é feita usualmente entre 2-5,6 μm e 8-14 μm , estas duas bandas espectrais são mais comumente usadas devido à sua fraca absorção atmosférica (Maldague, 1993). Como se pode ver na figura 27, existe um intervalo, referido como sendo de 5 a 7 μm , em que a transmitância atmosférica é baixa, ou seja, os constituintes da atmosfera não permitem a passagem da radiação, assim, é conhecida esta região do espectro como janela de baixa transmitância atmosférica (Holst, 2000).

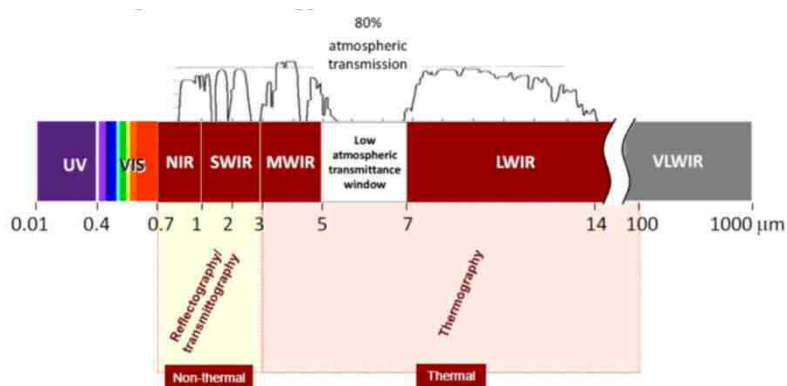


Figura 27 - Espectro Eletromagnético onde se destaca dentro das regiões do Infravermelho a transmitância atmosférica (Retirado de Ibarra-Castanedo *et al.*, 2011, October).

Pode ser complicada a análise das imagens TIV pelo que devem ser tomadas algumas precauções de modo a evitar erros. Estes podem surgir de considerações de valores incorretos para a emissividade, para a temperatura atmosférica, a distância entre a câmara e o objeto e diferentes acabamentos na mesma superfície. Pode ainda ser geradora de erros a presença de fontes externas de radiação, como reflexões e a presença de sombras (Barreira, 2004; Oliveira, 2012).

3.13 Incerteza na escolha dum valor correto para a Emissividade

O erro com maior significado nas medições termográficas surge com a escolha do valor para a emissividade das superfícies em análise. Aquando da incerteza do valor que esta deve tomar devemos sobrestimá-lo, pois desta forma garantimos que o erro na medição da temperatura será menor. Nesta circunstância, Minkina e Dudzik (2009) recomendam para a emissividade um valor entre 0,9 e 1,0, no caso de incerteza de qual o valor a escolher para uma dada superfície.

3.14 Vantagens e Limitações da TIV

Apresentam-se, seguidamente, alguns méritos da técnica.

A termografia permite uma rápida inspeção superficial, em alguns casos foi referido que a termografia conduz a inspeções tão boas como as ultrassónicas ou por raio X em apenas 20% do tempo necessário para aquelas técnicas (Chambers, 1984 como citado em Maldague, 1993).

Para esta técnica não é necessário contacto físico, tanto para a estimulação pela fonte térmica ou para a deteção pela câmara de infravermelhos, sendo fácil a intervenção por parte do operador da câmara (Maldague, 1993).

Esta técnica é de possível utilização mesmo se o acesso for restrito apenas a um lado do elemento a ser inspecionado, se pretendido a inspeção pode ser feita de ambos os lados em modo de transmissão (Maldague, 1993).

A radiação em causa não é prejudicial à saúde humana nem para o ambiente nem tão pouco para os elementos inspecionados desde que a temperatura da superfície não ultrapasse 5 a 10°C (Maldague, 1993).

Os Termogramas obtidos através desta técnica são de fácil interpretação, podendo ser facilmente arquivados por longos períodos de tempo como o tempo de vida útil dos elementos inspecionados (Maldague, 1993).

Existe grande versatilidade de aplicações com esta técnica uma vez que pode ser utilizada a uma grande variedade de materiais e seus compósitos (Maldague, 1993).

Foi descrita a deteção de defeitos, com a TIV, de tamanho inferior a 1 mm e uma profundidade acima de 13 mm (Quinn *et al*, 1988 como citado em Maldague, 1993).

É por vezes o único instrumento para obter informação acerca da estrutura interna de um componente (Maldague, 1993).

A análise termográfica é possível ser realizada em tempo real (Raphael de Almeida, 2010).

Esta técnica permite realizar uma inspeção global do elemento sendo possível analisar elementos com diferentes geometrias (Raphael de Almeida, 2010).

A TIV mostra-se adequada também para grandes superfícies (Raphael de Almeida, 2010).

Esta técnica, no entanto, também se reveste de algumas limitações que a seguir se enumeram.

Quando a superfície em observação é de grandes dimensões, pode ser difícil obter um aquecimento ou arrefecimento uniforme (Maldague, 1993).

Diferentes emissividades numa mesma peça podem provocar contrastes perturbadores na fase de interpretação dos termogramas e baixas emissividades também podem induzir problemas de reflexões parasitas pela vizinhança de corpos mais quentes (Maldague, 1993).

O equipamento pode ser relativamente caro, especialmente o destinado à análise quantitativa (Maldague, 1993).

Os elementos a inspecionar têm espessura limitada (Raphael de Almeida, 2010).

Os defeitos apenas são detetados a pequena profundidade (Raphael de Almeida, 2010).

Existe sensibilidade ao modo de aquecimento, no que se refere ao seu tipo, duração e posição (Raphael de Almeida, 2010).

3.15 Que Câmara Termográfica escolher

Consoante refere Specman (2008 como citado em Dinis, 2009) da grande variedade de câmaras deverá ser seleccionada uma que possua uma precisão mínima de 2% ou $\pm 2^{\circ}\text{C}$ o que dará maior garantia de resultados fiáveis e repetíveis.

Deverá ser sempre escolhida uma máquina que permita a configuração do valor da emissividade do material em observação de forma a permitir uma mais correta determinação do valor da temperatura superficial. Deverá ser tido em conta que quanto melhor for a resolução do detetor de infravermelhos melhor será a qualidade da imagem do termograma, porém quanto maior for a resolução maior será o custo do equipamento.

Terá que ser tida em consideração a gama de medição de temperatura adequada à aplicação em causa uma vez que esta também varia com os equipamentos, ou seja, quando se pretende inspecionar um elemento cuja temperatura superficial é de 40°C deve ser escolhida uma câmara termográfica com uma gama de medição, por exemplo, de -20°C a $+50^{\circ}\text{C}$, que inclua o valor da temperatura da superfície em questão.

É ainda de salientar que, para não comprometer a vantagem da portabilidade, convém que o equipamento possua mais que uma bateria, para que enquanto uma carrega se possa trabalhar com a outra, de forma a se poder trabalhar em contínuo.

Convém que o formato da imagem seja JPEG ou outro compatível com qualquer sistema de modo a não se ficar dependente de software dedicado.

Será também uma vantagem a máquina termográfica possuir incorporada um equipamento fotográfico digital o que facilita a realização de relatórios, de preferência com iluminação integrada para o caso de ambientes com reduzida iluminação.

É também vantajosa a existência de ponteiro laser para se poder ter orientação em relação ao alvo, aquando das inspeções.

Outra função que poderá ser interessante em algumas situações é a que permite realizar fusão de imagem, através da qual termograma e fotografia digital são sobrepostos, possibilitando o redimensionar da imagem e manipular o termograma, no entanto não se deverá confundir com a função PiP que só permite a sobreposição das imagens.

3.16 Alguns Trabalhos Académicos Realizados no Campo da Termografia, em Língua Portuguesa

Neste item apresentam-se algumas ideias relevantes retiradas dos trabalhos académicos realizados utilizando a técnica de termografia por infravermelhos. Para esta secção foi realizada uma vasta pesquisa bibliográfica, inclusivamente no repositório nacional português.

Os critérios de seleção dos trabalhos académicos foram: estarem escritos na língua portuguesa; de forma a abranger diferentes aplicações da termografia e ainda não repetir temáticas, assim, para cada tema foi selecionado apenas um trabalho.

Cortizo (2007) ao realizar a sua tese de doutoramento salienta que os seus trabalhos são de importância primordial para o Brasil. Faz uma revisão bibliográfica da técnica e da sua utilização na Europa. Nos seus trabalhos utiliza termopares como método de referência, técnica de contacto, e modelos matemáticos.

Refere na conclusão do seu trabalho que, "...os resultados alcançados demonstram qualitativamente e quantitativamente as características da técnica e confirmam um ganho substancial na metodologia de diagnóstico das habitações, quando usadas as técnicas de termografia digital." Refere ainda que "a termografia digital apresenta um imenso espectro de aplicações, seja no campo do conhecimento científico seja no campo da técnica de inspeção. Para ambos, as únicas verdades absolutas serão a permeabilidade entre os dois campos e a interação nas ações no avanço do conhecimento."

Barreira (2004) na sua tese de mestrado, de entre as suas conclusões, nas considerações finais, refere nos principais fatores que influenciam as medições, a emissividade. Defende que esta é "...função da temperatura superficial do material, do comprimento de onda da radiação e do ângulo de observação. A emissividade poderá ser considerada constante se as temperaturas em estudo estiverem contidas num intervalo relativamente estreito, se os objetos tiverem um comportamento aproximado ao do corpo cinzento e se as medições forem efetuadas na direção perpendicular à superfície ou com inclinações pouco acentuadas."

Na síntese crítica dos resultados aponta as principais conclusões retiradas dos estudos efetuados, de que salienta:

"A emissividade influencia consideravelmente a medição da temperatura por termografia. Esta influência é tanto mais notória quanto maior for a diferença entre as temperaturas superficiais a medir e quanto mais afastado do valor real for o valor adotado para a emissividade."

"Para a análise qualitativa o valor da emissividade não é relevante. No entanto, uma escolha adequada pode facilitar a visualização na imagem térmica das diferenças de temperatura."

Mário (2011) ao realizar o seu trabalho final de curso, dentro das suas conclusões na síntese crítica dos resultados refere, entre outros assuntos, o facto de "o revestimento com sujidade apresentar uma alteração da emissividade e logo para se aplicar a termografia para avaliar esta região, deve-se ter em atenção para utilizar a emissividade correspondente a cada parte da superfície." Refere ainda que, "embora a câmara termográfica tenha um alto custo inicial, ela é uma ferramenta rápida e que se pode utilizar remotamente. Ela não substitui as técnicas existentes, como a análise visual e o ensaio de percussão, mas pode ser utilizada como mais uma ferramenta para verificar a existência de problemas no revestimento."

Dinis (2009) ao realizar o seu trabalho de final de curso, dentro das suas conclusões escreve que: "A termografia permite converter as radiações infravermelhas em imagens térmicas visíveis ou termogramas, nos quais as diferentes temperaturas da superfície do objeto são apresentadas a diferentes cores segundo uma determinada escala. Recorrendo a esta técnica todos os objetos podem ser observados uma vez que, tendo temperaturas superiores ao zero absoluto, emitem radiações infravermelhas captadas pelos equipamentos. Apesar da simplicidade aparente da termografia, a análise dos resultados pode ser complicada e até conduzir a conclusões erradas se não forem tomadas algumas precauções antes e durante a realização do ensaio. Na análise dos termogramas é bastante provável confundirem-se defeitos do objeto com irregularidades na temperatura superficial resultantes de fatores exteriores."

Oliveira (2012) ao realizar a sua tese de mestrado, das suas conclusões, pode realçar-se quando afirma " que a emissividade é um fator muito importante para a medição da radiação infravermelha e um fator de erro da mesma."

Raphael de Almeida (2010) na sua tese de mestrado realiza ensaios termográficos para deteção de danos causados por impacto. Das suas propostas realço a que aponta como desenvolvimento futuro "...novos métodos para excitação das amostras como por exemplo por intermédio de ondas ultrassónicas, vibro-termografia."

Rodrigues de Sousa (2010) ao realizar a sua tese de mestrado, conclui que: "...a aplicação de técnicas de análise de deteção automática de imagens térmicas provenientes da termografia por infravermelhos, com especial destaque na vertente passiva, apresentam-se como uma mais-valia na caracterização da envolvente opaca de edifícios, e um grande potencial na determinação do coeficiente de transmissão de calor da envolvente de edifícios existentes."

De salientar que não foram encontrados trabalhos académicos de termografia aplicada à madeira em língua portuguesa, pelo que o presente trabalho se configura pioneiro.

4. Termografia na Madeira

Com este capítulo pretende-se dar a conhecer o alcance da técnica termográfica relativamente à madeira, para tal são expostos diferentes artigos referentes a trabalhos realizados onde a temática é a termografia aplicada ao material madeira. Os artigos abordam a temática de diferente modo, uns realizam modelação matemática, simulando informaticamente os ensaios termográficos, outros realizam ensaios termográficos sobre amostras em laboratório, outros ainda fazem ensaios *in situ* de edifícios do património histórico e recolhem amostras que analisam em laboratório. Há também o caso da aplicação da termografia a uma linha de produção de derivados de madeira. No final são apresentadas duas inspeções, uma a uma habitação e outra a uma ponte, ambas em madeira, na pesquisa de biodeterioração.

Este capítulo organiza, assim, os artigos apresentados, em três partes: ensaios laboratoriais, ensaios *in situ* e inspeção de biodegradação, cada uma das quais por ordem cronológica.

4.1 Ensaaios Laboratoriais

Tanaka (1994, July) investiga a possibilidade de aplicação da termografia como meio de deteção de biodeterioração na madeira. Para isso foram utilizados vários procedimentos no sentido de produzir um gradiente térmico: arrefecendo as amostras, aquecendo-as, soprando ar quente sobre elas e secando-as após a aplicação de spray com solução de álcool. Utiliza duas espécies de madeira diferentes, as quais refere com o seu nome científico.

Foram preparadas diferentes amostras que, de forma artificial simulavam deterioração biológica produzida por xilófagos e fungos. Os espécimes preparados foram analisados por termografia, tanto nas regiões sãs como nas processadas simulando a deterioração. As amostras foram arrefecidas no procedimento (I) a uma temperatura de -12°C , numa câmara controlada, durante dois dias e meio e observadas à temperatura ambiente de 20°C .

No procedimento (II) as amostras foram aquecidas a 60°C , numa câmara controlada, durante um dia e observadas à temperatura ambiente de 20°C .

No procedimento (III) os espécimes foram aquecidos por um fluxo de ar quente na sua superfície, durante aproximadamente 30 segundos e observados à mesma temperatura ambiente de 20°C .

No procedimento (IV) sobre as amostras foi lançado um spray de 50% de álcool em água, e observadas à temperatura ambiente de 20°C .

Todas as sete amostras foram observadas seguindo estes quatro procedimentos.

Tanaka (1994, July) não refere o valor da emissividade usado para visualizar as estruturas de madeira através da máquina termográfica.

Com este trabalho conclui-se que: é possível detetar termograficamente perfurações e fendas superficiais, quando se utilizam os procedimentos I e II; o método termográfico é limitado na deteção de cavidades internas, podridão superficial moderada ou podridão interna severa e podridão branca severa com os procedimentos I e II.

A deteção dos danos por termografia, quando são utilizados os procedimentos III e IV, é difícil tanto à superfície como internamente.

Tanaka (1994, July) conclui que mais testes devem ser realizados, principalmente na forma de produzir excitação térmica, tanto para detetar danos internos como superficiais, de modo a tornar a termografia uma prática corrente.

Tanaka e Divós (2000) descrevem as propriedades térmicas da madeira. Referem que a condutividade térmica da madeira depende da sua densidade e a temperatura superficial da madeira, em regime transiente, também depende da densidade. Assim, como a madeira biodeteriorada tem uma densidade inferior à da madeira sã, logo terá uma temperatura superficial diferente. Consideram este facto fundamental para a investigação. Esta ideia constitui a fundamentação teórica da pesquisa de madeira biodeteriorada através da termografia.

Neste trabalho prático realizado por Tanaka e Divós (2000) foram observadas amostras de seis espécies diferentes, com valores de densidade distintos, variando desde 265 a 948 kg/m³. Os espécimes foram acondicionados num forno à temperatura de 60°C, e depois arrefecidos durante 20 minutos e testados por termografia com temperatura do ar de 22°C.

Para este conjunto de estudos é referida uma sensibilidade térmica, da máquina em uso, de 0,01°C, que ainda nos dias de hoje é difícil de encontrar no mercado.

Uma relação linear entre a densidade e a temperatura superficial da madeira foi encontrada, quando o tempo de arrefecimento é superior a 20 minutos. Assim, zonas com densidade diferente poderão ser identificadas, tais como: nós em coníferas, em que a densidade é superior à envolvente e apodrecimento superficial, em que a densidade é inferior. Os nós das árvores de folha caduca também são detetados, apesar de não haver diferença na densidade, mas como a direção das fibras é diferente produz-se uma diferença na difusividade térmica.

As amostras de madeira de pequena dimensão são facilmente manejáveis e logo passíveis de ser submetidas ao procedimento anterior, o que não é possível executar com estruturas em serviço. Desta forma, na seguinte parte do trabalho procuraram-se detetar defeitos usando a mudança de temperatura natural existente ao longo de um dia, providenciada pela abertura de portas e janelas, com o objetivo de encontrar o melhor momento para a execução da inspeção termográfica. Por este estudo concluiu-se que é possível detetar defeitos superficiais como deterioração e nós, simplesmente através da variação da temperatura durante um dia. Foi detetada uma diferença superior a 0,7°C entre a madeira sã e a madeira deteriorada. Bem como entre nós e a madeira envolvente. Assim, este método pode ser útil na avaliação de estruturas de madeira antigas.

Neste mesmo trabalho de Tanaka e Divós (2000), num estudo seguinte, foram elaboradas cavidades em 5 amostras para simular a degradação interna da madeira. As cavidades estão situadas a diferentes distâncias relativamente à superfície, desde esta até 15mm. Estas amostras foram aquecidas, salientando-se que o sucesso da inspeção termográfica depende da homogeneidade do aquecimento.

Concluiu-se com este último estudo, que a deteção de cavidades é possível, no entanto, é necessário um forte poder de aquecimento, o que torna difícil esta realização *in situ*.

É de referir também que o termograma da imagem disponível no artigo apresenta o valor de 0,98 para a emissividade considerada, com a qual foram feitas as observações às amostras de madeira. No final do artigo, Tanaka e Divós (2000) recomendam que sejam elaborados mais estudos *in situ*.

Wyckhuyse e Maldague (2001a), no seu estudo, fizeram uma simulação utilizando um modelo matemático de equações diferenciais e o método dos elementos finitos, para simular diferentes tipos de deterioração em postes de madeira cilíndricos, com o diâmetro mínimo de 20 cm.

As propriedades térmicas da madeira são também abordadas.

O objetivo é averiguar, se com a técnica de termografia testada, se detetam as deteriorações nos postes de madeira, uma vez que estes têm que ser substituídos a cada 20 a 30 anos devido à degradação da madeira. Portanto, tem-se como objetivo a diminuição de custos, uma vez que, com um instrumento de inspeção não destrutivo se poderia determinar, de forma mais apropriada, o momento da sua substituição.

A hipótese usada é a de que a madeira deteriorada contém um teor de água diferente do da madeira sã. Foi considerado 15% para a madeira sã e 30% para a madeira deteriorada. Foram ainda supostas diferentes formas geométricas para simular a deterioração no interior dos postes.

Na 1ª parte do artigo o problema é analisado com base em 3 tipos diferentes de aquecimento: interno através de orifícios, externo e por micro-ondas.

Concluíram que a TIV não é apropriada para este tipo de inspeção, a não ser que os defeitos sejam superficiais, o que é justificado pela grande profundidade dos defeitos, baixa difusividade térmica da madeira e dependência das propriedades da madeira em relação à temperatura, teor de água, espécies e orientação das fibras.

Como o método se pretende que seja não destrutivo e existem estudos que indicam que: abaixo de 200°C é necessário uma chama para disparar a ignição, acima dos 200°C a madeira entra em autoignição, uma exposição prolongada e segura limita a temperatura a 80°C ou no máximo 100°C, para que este material não fique danificado. Esta será a temperatura máxima possível para gerar o gradiente térmico.

Wyckhuyse e Maldague (2001b) repetiram as simulações descritas no artigo anterior, mas agora supondo uma geometria plana da peça e não cilíndrica. Para além disso, os defeitos simulados são superficiais. As conclusões a que chegaram são as mesmas do artigo anterior (Wyckhuyse & Maldague 2001a) e já descritas.

No trabalho de Wyckhuysse e Maldague (2002), procuraram detetar madeira deteriorada por Termografia de Infravermelhos, com estimulação térmica da madeira e observação durante o arrefecimento. Foram utilizadas as variantes de reflexão e de transmissão da termografia.

Wyckhuysse e Maldague (2002) baseiam-se no princípio de que a madeira sã e a madeira deteriorada têm diferentes propriedades térmicas, relacionadas com diferentes conteúdos de água, que darão informação do nível de deterioração da madeira. Assim, as diferenças de temperatura serão proporcionais ao conteúdo de água ou humidade e consequentemente ao nível de deterioração. A abordagem é generalizada a todos os tipos de madeira e defeitos.

A degradação da madeira foi simulada através da realização de orifícios com diferentes dimensões e profundidades. Procurou-se identificar a posição dos orifícios, tanto secos como após os humedecer.

Num dos testes foi utilizado um micro-ondas doméstico como fonte de excitação térmica.

Com este estudo concluiu-se que deverão haver precauções na inspeção da madeira com termografia, tais como devido a variáveis adversas, como o desconhecimento do conteúdo de água da madeira e muito baixa difusividade térmica.

Concluem ainda que os defeitos secos são difíceis de detetar através de termografia. As deteções subsuperficiais são possíveis, apesar da investigação quantitativa ser difícil.

A geometria dos defeitos não foi possível detetar com precisão devido à baixa difusividade térmica, contudo é possível obter informação sobre a profundidade e dimensão do defeito subsuperficial.

Os pequenos defeitos, a pequenas profundidades, podem ser detetados por TIV, porém, se se esperar durante um maior espaço de tempo, poder-se-á detetar os defeitos maiores e mais profundos (Wyckhuysse & Maldague 2002).

Bucur (2003a, 2003b) aponta a termografia por IV como técnica não destrutiva para caracterização do material madeira, entre outras técnicas como as que utilizam radiação ionizante, micro-ondas, ultrassons e ressonância magnética nuclear. Classifica todas estas técnicas como excelentes para obter informação acerca da estrutura interna da madeira. O critério utilizado para a distinção das técnicas é o comprimento de onda da radiação que interage com a madeira.

Bucur (2003a, 2003b) sobre as técnicas térmicas refere variados trabalhos realizados por diferentes autores donde se destaca um estudo no qual se deteta a presença de um nó sob folhas de madeira em distintas zonas com diferentes espessuras, como se pode ver através da figura 28.

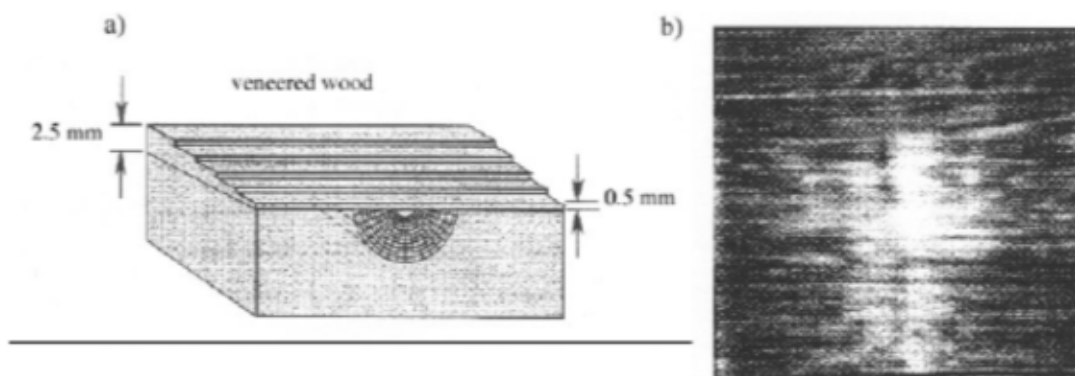


Figura 28 - Detecção de defeito em composto com base em madeira:

- a) Geometria do espécime, a espessura da superfície que cobre o defeito varia de 0,5 a 2,5 mm.
- b) Termograma do espécime contendo o defeito (retirado de Bucur, 2003a, 2003b).

A termografia é um termo genérico para uma variedade de técnicas usadas para visualizar num plano, num mapa, a temperatura da superfície de objetos. O parâmetro físico em investigação é a temperatura. A imagem térmica é o resultado duma muito complexa interação entre a fonte de calor, o material e os defeitos. Podem ser usados procedimentos de aquecimento ativos ou passivos. Na ciência da madeira, a termografia é um relativamente novo campo de estudo. Referido por Luong (1996) e Tanaka e Divós (2000) como citados em Bucur (2003a).

O objetivo do artigo de Luong (2004) é o de ilustrar o uso relevante da termografia infravermelha como uma técnica não destrutiva, de não contacto e em tempo real:

a) para observar o processo de dano progressivo e o mecanismo de falha da madeira;

b) para detetar a localização da ocorrência de dissipação intrínseca.

O parâmetro investigado é o calor gerado durante a dissipação intrínseca, causada pela falta de elasticidade. Graças ao emparelhamento termomecânico, esta técnica útil providencia uma ferramenta muito conveniente para detetar fenómenos mecânicos representando danos e falhas na madeira.

Esta técnica fornece uma medida do limite de um processo progressivo de dano sob carregamento, no qual, o material de madeira é destruído.

Neste artigo são mostrados os diagramas de força-deslocamento correspondentes aos ensaios de três amostras de pinho submetidas a ensaios de compressão, na direção longitudinal à fibra (L), na direção radial (R) e na direção transversal (T). Na figura 29 podem ver-se as três amostras usadas nos ensaios.



Figura 29 - Espécimes de madeira de pinho usados nos ensaios (retirado de Luong, 2004).

Quando as amostras de madeira de pinho são submetidas a uma carga de compressão, a técnica de termografia infravermelha realmente evidencia a influência da anisotropia, sendo diferente nos três espécimes L, R e T que falham de diferente modo devido à anisotropia da madeira.

São apresentadas imagens da dissipação intrínseca nos espécimes de madeira função da sua direção anisotrópica, como se pode ver nos termogramas da figura 30.

Nas figuras 31 e 32 podem ainda observar-se ligações metálicas em peças de madeira através da termografia.

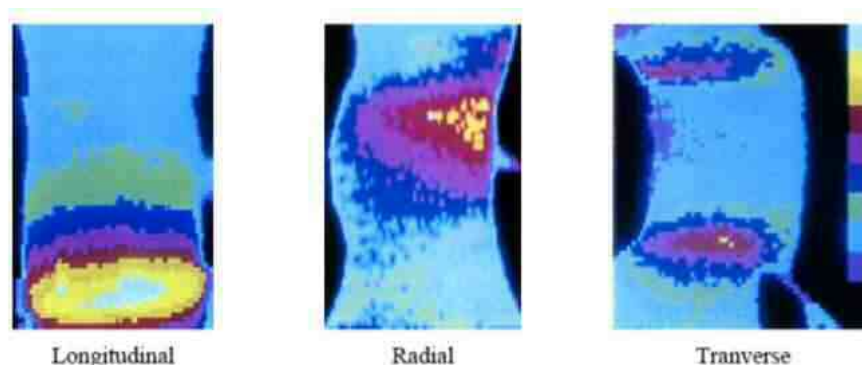


Figura 30 - Localização da dissipação intrínseca nos espécimes de madeira de pinho como função da sua anisotropia. Sendo a primeira imagem relativa à direção longitudinal, a segunda relativa à direção radial e a terceira relativa à direção transversal. Cada cor corresponde a 0,2°C (retirado de Luong, 2004).

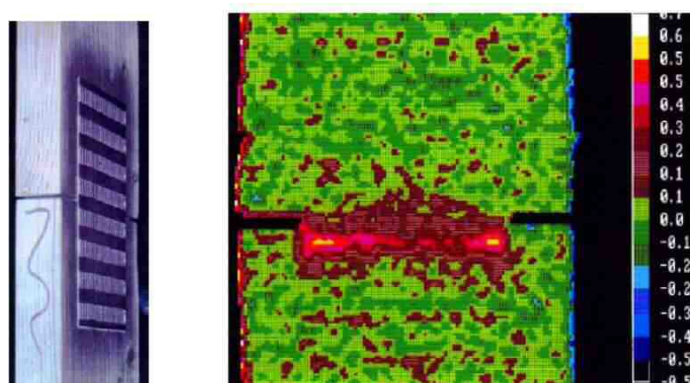


Figura 31 - Ligação metálica em peças de madeira submetidas a carga de tensão à esquerda e correspondente Imagem térmica à direita (cada cor corresponde a 0,05°C) (retirado de Luong, 2004).

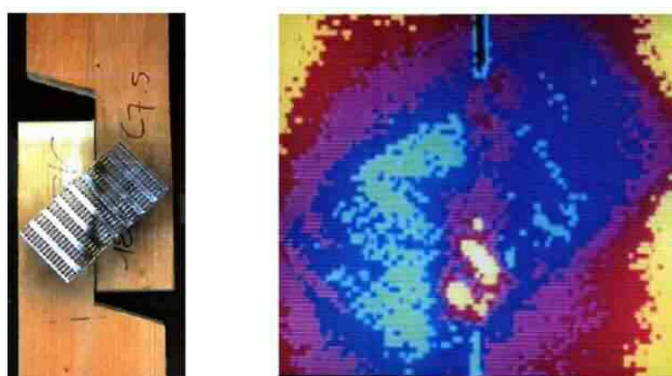


Figura 32 - Ligação metálica em peças de madeira submetidas a tensão de corte, à esquerda, e correspondente termograma, à direita, (cada cor corresponde a 0,2°C) (retirado de Luong, 2004).

Luong (2004) demonstrou que a dissipação de calor, de materiais de construção de madeira, submetidos a carregamento, é a mais sensível e precisa manifestação de dano.

Devido ao acoplamento termomecânico, a termografia infravermelha providencia um teste não destrutivo de não contacto e em tempo real para observar o processo físico de degradação da madeira e para detetar a ocorrência de dissipação intrínseca. Portanto, este teste dá, prontamente, uma medida de dano do material, permitindo avaliar o limite, de um processo de dano progressivo sob carga, além do qual o material é suscetível de falhar.

Este método tem interesse, pois, para além de informação qualitativa, como seja encontrar defeitos ou zonas de fraqueza, também fornece informação quantitativa do efeito das falhas e defeitos na resistência e durabilidade dos componentes estruturais de madeira. Esta técnica oferece ilustração precisa do início de abertura de fendas, do começo da propagação da instabilidade através do material e coalescência de falhas quando o aumento irreversível de microfraturas é gerado por cargas cíclicas. O principal interesse desta abordagem energética é unificar dados de teste microscópicos e macroscópicos. O parâmetro dissipação intrínseca, em consideração, é uma quantidade escalar, simples de avaliar com precisão. Subsequentemente isto pode sugerir critérios de normas multiaxiais, fortemente relevantes para testes à escala real em engenharia de estruturas. A termografia infravermelha é uma técnica atrativa e inexplorada para avaliação não destrutiva de falhas de materiais industriais e estruturas.

A vantagem principal desta técnica é a rapidez com que é feita e o facto de não necessitar de contacto. As técnicas de processamento de sinal podem ser eficientemente usadas para extrair mais informação quantitativa. São esperados brevemente desenvolvimentos significativos, aproveitando os recentes progressos no poder da computação e técnicas de processamento de imagem. As oportunidades oferecidas pelas técnicas térmicas, com operação remota, e as taxas de varrimento rápido de superfícies são particularmente atrativas para aplicações online.

No trabalho de Spencer (2008) para lá de referir as propriedades térmicas da madeira, sua caracterização e constituição, elabora secções modelo de paredes em madeira, comuns na construção tradicional dos Estados Unidos da América.

As secções realizadas foram observadas e analisadas através da termografia e comparados os resultados com os obtidos com termopares. Foi utilizada a variante ativa da termografia na sua vertente de transmissão e reflexão.

Foram também realizados orifícios em amostras com o objetivo de simular deterioração - as quais foram igualmente observadas com recurso à mesma técnica de TIV.

Meola, Carlomagno e Giorleo como citado em Spencer (2008) salientam que a presença de um defeito, a uma dada profundidade, interfere com a propagação de calor e tal interferência produz uma variação local superficial. Geralmente, um defeito superficial torna-se imediatamente visível, enquanto que um defeito profundo se torna visível com um certo atraso. Um grande defeito superficial está associado com um grande contraste e o contraste diminui com a diminuição do tamanho do defeito ou à medida que a profundidade aumenta. É evidente, que o contraste térmico depende da diferença entre a condutibilidade térmica do material são e a condutibilidade térmica da heterogeneidade.

Spencer (2008) descreve a constituição biológica da madeira, a heterogeneidade da sua constituição que daí advém. O que afeta as características térmicas da madeira, por diferentes vias. Ao contrario dos tijolos, produzidos pelo Homem e logo apresentando elevado grau de homogeneidade, a madeira exhibe numerosas características que têm potencial para afetar a condutibilidade térmica. O efeito destas características é claro quando tabelados os valores de condutibilidade e comparados entre espécies. Estas características incluem a direção do grão ou orientação celular, dimensão e dispersão dos poros, dimensão e dispersão dos vasos condutores da seiva, dimensão das fibras, dimensão e quantidade de canais resinosos, estrutura celular, densidade, teor de água e irregularidades como por exemplo os nós. É importante ter em consideração todos estes fatores para aplicação da TIV à madeira.

Spencer (2008) refere que a utilização de TIV para a inspeção da envolvente de edifícios tem sido aplicada nos últimos 50 anos. Ao longo deste tempo tem havido significativos progressos para tornar a tecnologia mais confortável, portátil e fácil de utilizar. Nos últimos anos aumentou o interesse em estruturas históricas, tendo contribuído para promover a utilização de testes de avaliação não destrutivos em detrimento dos métodos de avaliação convencionais invasivos. Estes métodos incluem, para além de outros, a radiografia, ultrassons, magnetometria e TIV.

Os benefícios do desenvolvimento de tais técnicas para a conservação de edifícios históricos são tanto financeiros como culturais. Os quais são particularmente evidentes durante a manutenção, reabilitação, restauro ou esforços de conservação.

São inúmeras as questões que levam à não reabilitação, conservação e restauro de estruturas históricas e não é apenas uma questão económica. É o facto de não se dominarem fatores como a localização, dimensão e estado de conservação dos elementos que compõe a estrutura de madeira reticulada, uma vez que estes, na maioria das vezes, estão ocultos por materiais de revestimento, frequentemente o gesso.

Podem ser tomadas medidas tipicamente invasivas como seja o retirar parcialmente o revestimento, porém não dá uma ideia do todo. Se quisermos uma estimativa mais precisa, ela pode ser realizada após demolição, porém, assim perde-se a integridade do material estrutural, comprometendo-se o valor e significado histórico.

A avaliação não destrutiva ajuda a determinar questões relativas à capacidade de carga, estimativa de custos e potencial de restauro, ao mesmo tempo que mantém as estruturas históricas. A TIV tem sido usada durante anos para detetar elementos estruturais escondidos, figura 33, providenciando informação precisa da sua dimensão e configuração.

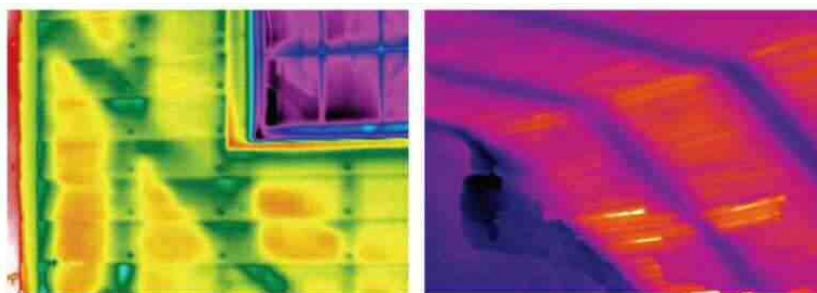


Figura 33 - Localização de estrutura de madeira oculta por revestimento. Na fig. da esquerda é inclusive possível visualizar as uniões realizadas por pregos (retirado de Spencer, 2008).

A TIV permite ainda localizar vãos ocultos, que dão informação acerca da história do desenvolvimento da estrutura e detetar áreas de infiltração de humidade, figura 34, frequentemente associadas com a deterioração, danos provocados por térmitas e infestações e lacunas na envolvente dos edifícios, tudo isto importante para a manutenção da estrutura. A investigação apresentada baseia-se nos usos iniciais de TIV na tentativa de conhecer melhor os elementos de madeira não visíveis, assim como a deterioração nos mesmos.

Estes objetivos podem ser atingidos pela compreensão das características físico-químicas da madeira.

Para lá da identificação dos elementos estruturais de madeira escondidos, interesse de engenheiros e arquitetos, ultimamente desenvolvimentos associados com a deteção por TIV do tipo de madeira têm o potencial de contribuir para a

investigação em torno de outros atributos da madeira afetados pela condutibilidade térmica nomeadamente a deterioração.



Figura 34 - Detecção de ponto de infiltração através de TIV numa construção histórica no estado do Kentucky. Do lado esquerdo pode ver-se o termograma e do lado direito a fotografia regular. Em baixo a ampliação evidencia um ponto de infiltração de humidade (retirado de Spencer, 2008).

Spencer (2008) propõe para trabalhos futuros a realização de mais testes, com mais e diferentes tipos de secção estrutural de madeira, a ser analisados em laboratório e comparando os resultados com os obtidos em campo, de forma a que se conheçam mais e melhor as soluções estruturais construtivas históricas, de forma a que a reabilitação e restauro tenham custos cada vez menores.

Liñán, Conde, Rubio de Hita e Gálvez (2012) realizaram um trabalho que descreveram. Neste trabalho foram realizados vários estudos, nos quais em parte deles as amostras de madeira estão secas e noutra parte as amostras estão húmidas em locais com orifícios, simulando assim a humidade associada à biodeterioração. Os orifícios foram realizados de forma artificial, variando as suas dimensões e posição interna, para simular a deterioração por parte de térmitas e outros agentes de degradação biológica.

Iniciaram os seus trabalhos verificando que as amostras de diversas espécies, por terem diferentes densidades, apresentam distintos valores de temperatura superficial. As amostras de maior densidade apresentam valores superiores de temperatura superficial. As propriedades térmicas da madeira, descritas no início do artigo, fundamentaram os seus ensaios.

Todos os ensaios foram realizados em laboratório, tendo sido utilizadas as duas vertentes da termografia, a ativa e a passiva. Na vertente ativa da termografia foi utilizado o modo de reflexão, justificando que não usaram o modo transmissor devido à baixa condutividade térmica da madeira, pois seria necessário aquecer as amostras durante um longo período de tempo e a uma elevada temperatura o que danificaria a madeira. Alegaram ainda que se optassem por temperaturas mais baixas como acontece na estimulação térmica natural de coberturas, seriam necessárias horas para fazer o aquecimento da madeira.

Concluem que é possível distinguir diferentes tipos de madeira se tiverem diferentes densidades, uma vez que esta característica é determinante para a temperatura superficial da madeira.

Concluíram ainda que através da termografia passiva, sem aplicação de qualquer tipo de estimulação térmica, quando as amostras têm o mesmo teor de água, tanto na parte sã como na simulada biodeteriorada, nestas condições não é possível identificar os orifícios que simulam a deterioração interna, qualquer que seja a sua posição ou dimensão. No entanto, através da termografia ativa já é possível detetar degradação na madeira, com uma profundidade até 1 cm e um tamanho mínimo de 2 cm x 2 cm, mesmo que a zona deteriorada tenha o mesmo conteúdo de água que a zona sã. É possível detetar, por termografia ativa, orifícios mais pequenos de 1 cm x 1 cm até 1,5 cm de profundidade, desde que estes tenham teor de água superior ao resto da amostra sã, devido ao processo evaporativo da água.

Assim, com a termografia ativa e com o mesmo teor de água em toda a amostra não é possível detetar galerias de 0,6 cm de diâmetro, simuladoras das produzidas pelas térmitas.

Como conclusão final, as autoras referem que pela TIV é possível detetar nós e outros defeitos superficiais na face das amostras, graças à sua diferença de densidade, mas também zonas com diferente conteúdo de água, no entanto quando se pretendem identificar defeitos internos, limitados pela sua dimensão e profundidade, em relação à superfície, deve produzir-se uma estimulação térmica.

López, Basterra e Acuña (2013) realizaram um trabalho onde é referido o comportamento termodinâmico da madeira como função da sua densidade. Salientam a importância da densidade como característica física da madeira, dando indicação da sua qualidade geral como material estrutural. A densidade é relacionada com a resistência e comportamento mecânico da madeira. Os autores referem a norma europeia EN 338:2010 na qual a densidade é um dos parâmetros associado à classe de resistência, permitindo uma classificação inicial da madeira.

López *et al.* (2013) valorizam a técnica de TIV como técnica não destrutiva, porém referem que a sua aplicação prática à madeira se tem reduzido à deteção de elevados conteúdos de humidade, madeiras ocultas e áreas significativamente deterioradas. Salientam a falta de conhecimento que existe, de todos os parâmetros envolvidos na TIV, tais como, a relação entre a radiação e a temperatura, a natureza do calor emitido pelos objetos, os processos físicos determinados por equações diferenciais complexas e que fornecem uma indicação das propriedades físicas dum dado objeto.

No seu trabalho López *et al.* (2013) têm como objetivo um estudo no qual através da TIV se propõe uma avaliação fiável da densidade, para tal, são estudadas sete amostras de diferentes espécies de madeira e um aglomerado com mais ou menos a mesma dimensão e forma. Depois de aquecidas as amostras durante três dias, a 60°C, mantendo o teor de água de 6% foi monitorizado o processo de arrefecimento por TIV.

O processo de arrefecimento é descrito como compreendendo três fases:

A fase inicial depende fundamentalmente da distribuição inicial da temperatura e tem um regime térmico irregular;

A segunda fase é designada regime térmico regular. Este é determinado pelo coeficiente de transferência da superfície que resulta das dimensões, forma e propriedades físicas do corpo. Esta fase tem carácter exponencial como é descrito para qualquer corpo. Nesta, existe uma constante, que não depende da localização ou do tempo, designada por ritmo de arrefecimento;

Na terceira fase é atingido o valor da temperatura ambiente pela totalidade do corpo.

Neste trabalho conceberam um procedimento para estimar o valor da densidade a partir do valor constante, m , magnitude do ritmo de arrefecimento.

Assim, concluem que para atingir a segunda fase, regime térmico regular, que relacionam com a densidade, só é necessário assegurar um intenso contraste térmico, para que o processo de arrefecimento ocorra.

Seguidamente apresentam-se as equações de cálculo para a constante m.

$$\ln et = -m.t + C \quad (4.1)$$

onde: et é o excesso de temperatura
m é a magnitude do ritmo de arrefecimento ou aquecimento
t é o tempo
C é uma constante

$$et = C.e^{-m.t} \quad (4.2)$$

Na sua observação termográfica salientam o valor de emissividade utilizado para a determinação da temperatura de todas as diferentes espécies de madeira. O valor referido foi de 0,90.

Kutin *et al.* (2011) fazem uma comparação entre os métodos tradicionais de testes de tração ao aço, comumente utilizado em ligações de madeira, procurando encontrar com a termografia, relação entre os diagramas de força versus tensão e alterações térmicas versus tempo, com termogramas gravados de forma contínua.

Conclui-se que, durante o teste de tração, a termografia dá informação visível das alterações de temperatura da superfície do espécime em teste, isto prova que as variações de temperatura capturadas pelas câmaras de infravermelhos estão fortemente correlacionadas com as cargas aplicadas ao espécime, figura 36. A TIV mostra ser uma ferramenta de valor incalculável para resolver uma grande variedade de questões científicas e problemas relacionados com a avaliação da integridade estrutural e tempo de vida.

Os trabalhos foram realizados em laboratório tendo sido referida a lacuna de referências bibliográficas deste tipo de trabalhos realizados *in situ*. Na figura 35 pode observar-se o equipamento utilizado.



Figura 35 - Teste de tensão e equipamento de termografia (retirado de Kutin *et al.*, 2011).

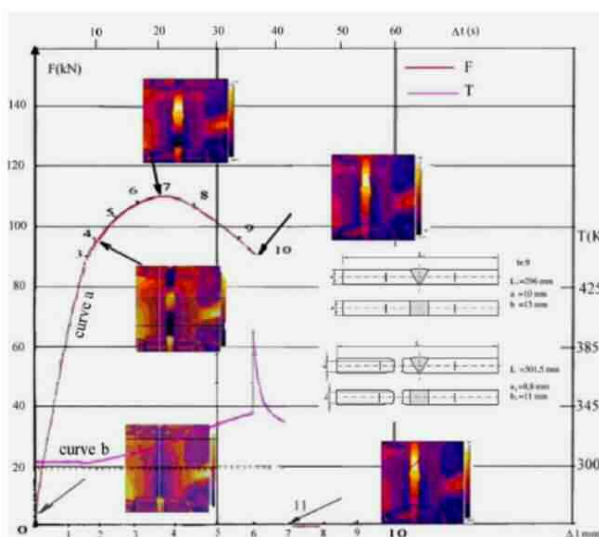


Figura 36 - Diagramas de força versus extensão e alterações de temperatura versus tempo com termogramas em pontos específicos do espécime (retirado de Kutin *et al.*, 2011).

4.2 Ensaio *in situ*

Rosina e Robison (2002) definem a técnica da termografia e descrevem as suas aplicações ao longo do tempo. São referidos desenvolvimentos de modelos térmicos matemáticos de transferência de calor, no interior de estruturas e materiais, para permitir uma análise comparativa entre zonas sãs e anómalas. Relatam, que nas últimas décadas, tem sido realizada muita pesquisa em TIV, tanto laboratorial como *in situ*. Destacam a aplicação a edifícios do património histórico Italiano. Salientam que a técnica de TIV é aplicada em diferentes fases de restauro de edifícios, desde as avaliações preliminares, no próprio procedimento de restauro, na inspeção final e mais tarde no processo de manutenção cíclico.

Neste artigo Rosina e Robison (2002) aplicam as técnicas de TIV às construções com estrutura de madeira, comuns nos EUA, essencialmente em edifícios históricos. As espécies de madeira em causa são os carvalhos, os choupos, pinhos e os abetos. Revelam que é possível identificar texturas, formas e conexões entre elementos construtivos, não visíveis na superfície, apenas sob condições de fronteira apropriadas, como sejam o aquecimento solar, central ou arrefecimento rápido. O que permite investigação subsuperficial, sem a destruição de edifícios históricos. Apontam vantagens da técnica de TIV: avaliação em tempo real, técnica de avaliação à distância, de não contacto, que permite evitar o uso de elevadores e andaimes no caso da avaliação de edifícios altos e ainda um reduzido período de tempo de inspeção para grandes áreas.

Descrevem as possibilidades da termografia passiva, bem como as suas vantagens, advertindo no entanto, para cuidados a serem tidos em conta para a observação de fachadas com diferente orientação e de forma a garantir as vantagens e possibilidades enunciadas.

Destacam o carácter da termografia ativa como sendo uma técnica mais quantitativa.

Descrevem que a obtenção de informação a dada profundidade depende da potência do fluxo de calor, referindo alguns centímetros para o seu limite.

Noutro exemplo é relatada a deteção de elementos estruturais de madeira, por detrás da camada de revestimento superficial - cujo gradiente térmico, que permitiu a aplicação da técnica, foi conseguido por aquecimento da casa numa época fria.

Apontam as vantagens e procedimentos a serem tidos em conta para a localização e determinação de humidade. Explicam que graças ao processo de evaporação, no qual a superfície com água é arrefecida, devido ao elevado valor do calor latente, é possível detetar, pelo processo passivo, a presença de água, como zonas mais frias no termograma. Esta situação só ocorre quando existem condições de fronteira que favorecem a evaporação, tal como a baixa humidade relativa (inferior a 80%) e temperatura ambiente superior a 6 a 7°C. Sendo, caso contrário, impossível detetar

áreas húmidas pelo processo passivo. Acrescentaram ainda, que apesar da ausência do processo evaporativo, é possível em regime transiente, mesmo com baixo gradiente térmico, identificar áreas húmidas, as quais, aparecem como zonas mais quentes nos termogramas, devido à elevada capacidade térmica da água.

São ainda enumeradas as vantagens da deteção da humidade pela técnica termográfica: a humidade é localizada sem necessidade de recolha de amostras e independentemente da existência de sais solúveis; pode ser monitorizado o processo de infiltração ao longo do tempo; podem também ser detetadas mudanças no estado termo-higrométrico da parede submetidas a diferentes condições climáticas.

Com a termografia não é possível quantificar o teor de água num material. No entanto, nas mesmas condições de fronteira, a mesma temperatura medida indica o mesmo teor de humidade, bastando, para a sua quantificação, utilizar um outro método pontual (exemplo sonda de humidade) para saber o teor de humidade numa grande área, correspondente à mesma temperatura.

Relatam diferentes exemplos em distintos casos de estudo nos EUA, onde foram detetadas humidades, pontes térmicas, localizaram estruturas de madeira escondidas atrás de revestimentos de gesso e estuque, descobriram que afinal outras não eram de madeira como previsto no projeto mas sim metálicas.

Concluíram que apesar da água atravessar uma parede de madeira de forma diferente do que faz atravessando uma parede de alvenaria, através das células dos vasos e fibras de madeira, a difusão da água desde a madeira para o gesso permite a sua deteção por TIV, no modo passivo. Foi possível chegar a estas conclusões por terem aplicado a mesma técnica na Itália e EUA, com construções de estrutura diferente, mas ambas revestidas por gesso.

Catena (2003, June) descreve as vantagens da utilização da termografia na avaliação de danos, inclusivamente não visíveis a olho nu, em árvores. Para tal utiliza uma máquina de termografia e descreve as características que estes aparelhos deverão possuir.

Conclui que a termografia consegue identificar a presença de danos internos, mesmo num estágio inicial de deterioração. O método permite uma identificação rápida, precisa e fiável da área de dano. Salienta o facto do método ser não invasivo, não agravando ou iniciando danos existentes nas árvores, pois não causa nem favorece a introdução de agentes patogénicos. Desta forma a investigação pode ser feita por uma só pessoa a manejar a câmara, o que pode compensar o valor elevado da mesma.

Catena (2003, June) refere as condições de utilização do método, descrevendo que não deve ser utilizado nas seguintes situações: enquanto chove, quando a árvore está sob radiação direta da luz solar ou quando partes da árvore estão molhadas. Aponta a importância da árvore não estar coberta por outros elementos, como folhas ou outra vegetação.

Como método não invasivo o sistema não consegue detetar o tipo de dano, nem o agente que o produziu, nem tão pouco a espessura do tecido que permanece sã. Para isso são necessárias ferramentas invasivas, como por exemplo o resistógrafo. Graças à termografia, os métodos invasivos podem ser só usados nos pontos onde o dano foi detetado, o que reduz o tempo de investigação. Adicionalmente, a habilidade de avaliação de grandes porções da árvore e partes aéreas fazem da termografia um método rápido e apropriado ao mesmo tempo que a inspeção visual.

A possibilidade de gravar e guardar as imagens térmicas dá ao patologista a capacidade de seguir, ao longo do tempo, o evoluir do desenvolvimento dos danos, bastando para isso comparar as imagens obtidas em momentos diferentes. Consequentemente é possível estabelecer, com certeza, quando e onde é necessário tomar medidas.

A TIV é uma contribuição valiosa para a avaliação da saúde e condição das árvores, podendo ser utilizada na sua manutenção em cidades, parques e jardins.

O sistema proposto usa uma câmara de IV que pode medir diferenças na temperatura superficial, deste modo a câmara deteta a presença de descontinuidades nos tecidos da árvore devidos a cavidades ou a tecidos corrompidos. O que é possível mediante diferenças nas propriedades térmicas, entre a área danificada e a sã. As duas áreas apresentam temperaturas superficiais diferentes, o que é mostrado pela câmara ao providenciar um mapa térmico. A secção onde a descontinuidade aparece, isto é, a área danificada, geralmente possui uma menor temperatura superficial que uma área não danificada, figura 38. Adicionalmente a uma avaliação das partes aéreas da árvore, uma avaliação do seu colo mostra a presença de deterioração no sistema radicular. Há ainda que ter em linha de conta que os termogramas de diferentes espécies de árvores é diferente, devido ao seu aspeto superficial ser também distinto.

Até à data de realização do artigo foram analisadas cerca de 2000 árvores, desde folhosas, coníferas e palmeiras. O sistema foi usado no intervalo de temperaturas dos 2 aos 35°C, tanto à noite como de dia. A presença de danos severos encontrados pela termografia, sempre que possível, foram confirmados, abatendo a árvore em investigação, ver figuras 37, 38 e 39. Em alguns casos as árvores pareciam muito danificadas quando avaliadas visualmente mas a termografia mostrou não ser necessário abate-las. No caso de serem identificados danos pouco severos e quando pareceu apropriado, para determinar a espessura dos tecidos residuais não danificados, foi usado um dendrodensímetro.

Para a investigação não invasiva em árvores, qualquer tipo de câmara termográfica corrente disponível pode ser usada, independentemente do intervalo de comprimento de onda operacional: 2,5-5,6 μm ou 8-14 μm e sensores arrefecidos produzem pequena diferença na aplicação da termografia. No entanto é um requisito fundamental que estas câmaras possuam uma resolução geométrica e sensibilidade térmicas elevadas e seja possível visualizar as imagens filmadas num monitor. É também necessário que as imagens sejam guardadas para que possam ser usadas na avaliação do evoluir de qualquer dano. Assim o melhor é utilizar uma câmara que permita o processamento de imagens num computador.

O dispositivo usado por Catena (2003, June) é portátil, de 3 kg, AVIO TVS 610 - que é sensível no intervalo de comprimento de onda de 8-14 μm , com uma sensibilidade térmica de 0,1°C à temperatura ambiente e uma resolução geométrica de 1,4mrad, isto é, capaz de distinguir entre dois objetos de 1,4 cm por 1,4 cm de lado, à distância de 10m, com uma diferença de temperatura superficial superior a 0,1°C. À distância de 10m o sistema tem um campo de visão, FOV, de 4,5m x 3,3m, ou seja, este é o limite do tamanho da porção da árvore que pode ser visto a esta distância. O sensor de IV, que mede a temperatura superficial, é feito por uma matriz de microbolométrico de 320x240, que não necessita de ser arrefecido.

Nas imagens a preto e branco os tecidos danificados são revelados pela presença de sombras cinzentas escuras relativamente às áreas circundantes. A área desta está relacionada com a dimensão da parte danificada. Em imagens de falsa cor o dano é revelado através de áreas de diferente cor relativamente à área envolvente, figura 35.

A investigação é levada a cabo apontando e focando a lente à árvore escolhida, desde o chão e avaliando as imagens das várias áreas filmadas. As partes aéreas da árvore podem também ser avaliadas a partir do chão, a uma distância de 20-25m, entre a câmara e o objeto. Para distâncias superiores, o operador falha a deteção de pequenas áreas de tecido danificado devido à pequena resolução geométrica e da reduzida dimensão da imagem no monitor da câmara.



Figura 37 - Identificação de pequenas cavidades na base de *Laurus nobilis* (retirado de Catena, 2003, June).



Figura 38 - Termograma obtido da posição da seta preta na figura anterior. É possível identificar uma grande região danificada, evidenciada pela tonalidade cinzenta escura, que se estende desde as raízes até ao tronco (retirado de Catena, 2003, June).



Figura 39 - O abate da árvore, referida nas duas figuras anteriores, conduziu à verificação da presença e do tamanho do dano, detetado por investigação termográfica (retirado de Catena, 2003, June).

Meinlschmidt (2005, May) relata a necessidade crescente de métodos de inspeção rápidos, a trabalhar na linha de produção, de modo a supervisionar os defeitos dos materiais em madeira, figura 42. Esta necessidade resulta das técnicas de produção de madeira e produtos nela baseados terem aumentado em muito a sua qualidade e o ritmo de produção. Espera-se que a termografia por infravermelhos teça um contributo baseado no facto de se tratar dum método rápido, não destrutivo e capaz de avaliar grandes superfícies na pesquisa de defeitos e falhas estruturais.

Meinlschmidt (2005, May) neste artigo descreve procedimentos referentes a termografia ativa e passiva. A ativa resulta da excitação térmica produzida por meio de radiadores infravermelhos, em que a temperatura da superfície aumenta rapidamente. A passiva decorre de quando o material inspecionado é aquecido durante o próprio processo de produção, com diminuição da temperatura após a saída da linha de produção.

A velocidade a que o calor é dissipado depende de propriedades térmicas, como a densidade, o calor específico, condutividade térmica e a qualidade das ligações entre a camada superficial de topo e as camadas de base.

Na termografia ativa, a temperatura superficial na zona do defeito irá diminuir mais lentamente do que nas restantes regiões, porque o defeito funciona como barreira para a difusão do calor. Assim poderá observar-se um ponto quente na superfície no local do defeito durante mais tempo que na sua vizinhança, como está esquematizado na figura 40.

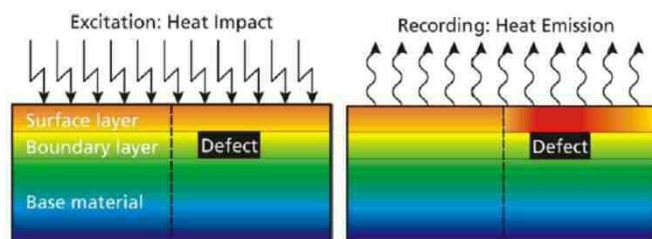


Figura 40 - Excitação por impacto térmico e captação da emissão de calor. Desenho esquemático ilustrativo do princípio de deteção de defeitos por termografia de infravermelhos, com ponto quente acima na zona do defeito (retirado de Meinlschmidt, 2005, May).

A deteção dos defeitos pode demorar alguns segundos ou mesmo minutos após o impacto do aquecimento dependendo do material e da profundidade do defeito. No caso dos materiais baseados em madeira é mais lento o arrefecimento do que em materiais metálicos.

A termografia é considerada passiva quando o aquecimento ocorre durante o normal processo de produção. Após a saída do material da linha de produção a sua temperatura superficial diminui, tornando visíveis os defeitos no interior do mesmo

que serão denotados como pontos frios, no termograma, devido ao bom isolamento entre o núcleo quente do material e a sua superfície mais fria.

Conclui-se que em ambos os tipos de termografia os defeitos podem ser detetados, porém com aspetos diferentes.

Os testes realizados foram confirmados com técnicas destrutivas onde foi comprovada uma diminuição da adesão entre camadas em comparação com o resto do material envolvente, como se pode ver na figura 41.

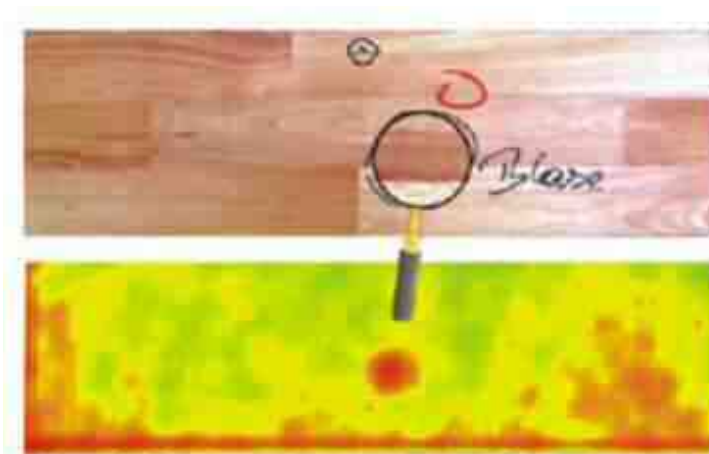


Figura 41 - Pontos quentes evidenciam pobre adesividade entre camadas não identificáveis na fotografia corrente (retirado de Meinschmidt, 2005, May).

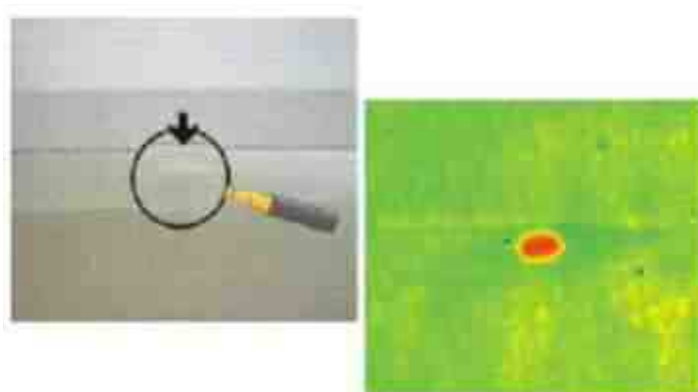


Figura 42 - Falta de um nó na 3ª camada, defeito este dificilmente detetável visualmente mas identificado por ponto quente através da termografia (retirado de Meinschmidt, 2005, May).

Usando em linha a termografia passiva logo atrás da máquina de prensagem podem ser identificados os seguintes defeitos:

- > diferenças de espessura na camada de cola;
- > descontinuidades em placas aglomeradas do lado superior ou inferior;
- > bolhas entre o papel de decoração e o material de suporte;
- > separações do papel;
- > defeitos de colagem entre camadas de folheados;
- > defeitos em contraplacados e no núcleo de aglomerados ou nas camadas de revestimento.

Outra aplicação da termografia é a deteção de nós negros em painéis de madeira a qual é habitualmente difícil mesmo para especialistas, figura 43.

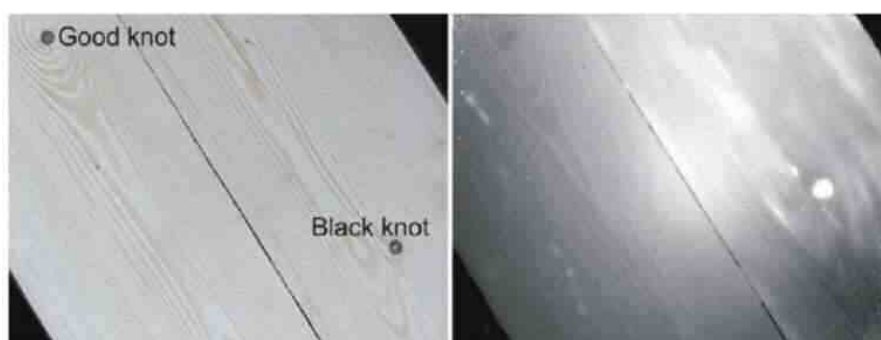


Figura 43 - Foto de um painel de madeira com 2 tipos de nós, bons e negros. Imagem termográfica onde se podem identificar claramente os nós negros como pontos quentes na superfície (retirado de Meinlschmidt, 2005, May).

Meinlschmidt (2005, May) concluiu que a técnica de termografia, tanto ativa como passiva, poderá ser usada na indústria de madeira e compósitos de madeira no controlo de qualidade de produção.

Kandemir-Yucel, Tavukcuoglu, Caner-Saltik (2007) fizeram a avaliação do estado de conservação de uma mesquita do século XIII, em Ancara, utilizando para isso a conjugação da TIV e medição da velocidade ultrassónica, *in situ*, juntamente com trabalhos laboratoriais. A análise conjugada destas técnicas foi feita para avaliar a condição dos elementos estruturais de madeira, em termos do seu estado de preservação, problemas de humidade e reparações recentes incompatíveis que os afetam.

Os resultados indicaram que os problemas de humidade encontrados, figura 44, estavam relacionados com problemas de drenagem no telhado e reparações anteriores realizadas com materiais incompatíveis, tais como argamassas de cimento.

Esta conjugação de técnicas foi referida como útil na avaliação da fiabilidade da madeira aumentando a precisão e efetividade da vistoria, facilitando e distinguindo os trabalhos de intervenção urgente dos programas de conservação a longo termo.

Os problemas de humidade e a sua distribuição foram eficientemente detetados pela técnica de TIV.

Referiram ainda a necessidade da identificação das condições microclimáticas para uma melhor interpretação dos termogramas. As diferenças de temperatura de 1 a 2°C não indicam problemas de humidade sendo necessárias diferenças superiores nos termogramas para identificar estas anomalias.

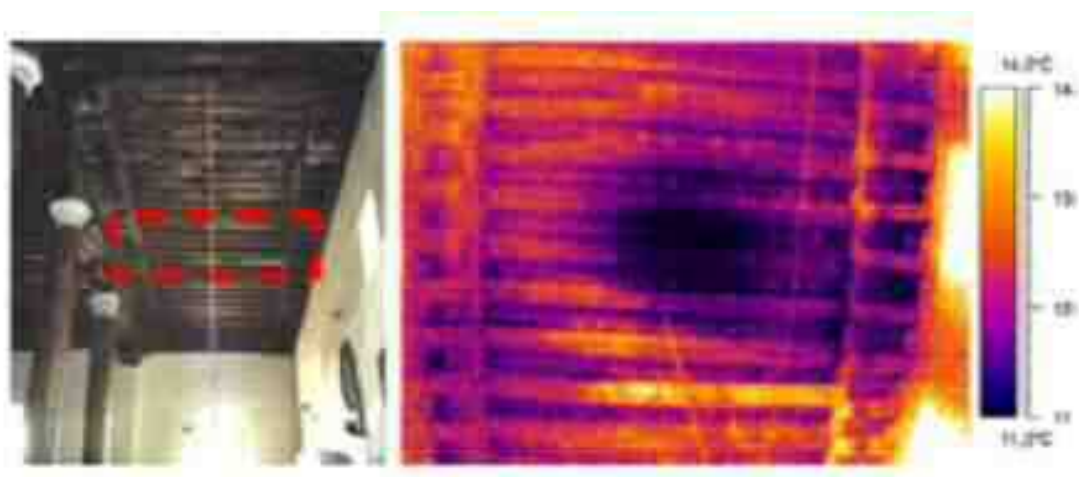


Figura 44 - São visíveis, através de termograma, áreas húmidas, na madeira do revestimento do teto (retirado de Kandemir-Yucel *et al.*, 2007).

Liñán, Conde, Rubio de Hita e Gálvez (2011) descrevem trabalhos de termografia em madeira, *in situ*, figura 45, no Oratório San Felipe Neri (Cádiz) e de amostras de madeira daí obtidas, analisando-as em laboratório. São assim testadas as capacidades e limitações da técnica de termografia e a necessidade da sua complementaridade com outras técnicas de forma a quantificar o grau de deterioração, por xilófagos e fungos. No caso foi usada a técnica de ultrassons, da qual também são descritas vantagens e desvantagens. É dado realce à importância das técnicas não invasivas para avaliação de edifícios históricos. Apontam vários aspetos que se podem aferir de uma inspeção termográfica na madeira: identificação de zonas com diferente conteúdo de humidade como indiciadoras de atual ou provável apodrecimento futuro; distinção de diferentes madeiras com diferentes densidades, como ocorre em zonas com madeira de reparação; localização de deteriorações superficiais, condicionada (a sua localização) pelo conteúdo de humidade superior ao da madeira sã; perdas generalizadas por ataque de fungos de podridão, figura 46; presença de nós e fendas.

Relatam ainda os aspetos que *in situ* podem perturbar a realização de inspeções termográficas, como é o caso do vento - que atenua a temperatura superficial dos corpos pelo efeito da convecção, mascarando os resultados; da temperatura ambiente e da transmissão na atmosfera.

Foi indicado o valor aproximado de 0,90 para a emissividade da madeira.

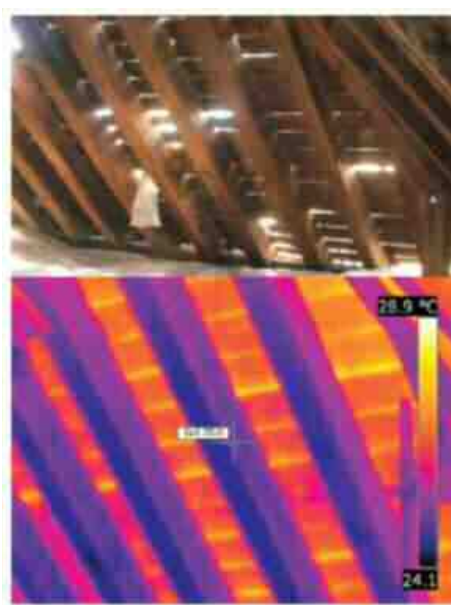


Figura 45 - Fotografia e termograma do conjunto caibros e tabuado, utilizando termografia passiva (retirado de Liñán *et al.*, 2011).



Figura 46 - Através da termografia passiva, por aquecimento natural solar podem ser identificadas zonas com diferente conteúdo de humidade e deterioração parda (retirado de Liñán *et al.*, 2011).

São descritas algumas propriedades térmicas caracterizadoras do material madeira, das quais referem ser dependentes as observações pela técnica de termografia. Estas propriedades térmicas são, o calor específico, a condutibilidade térmica e a difusividade térmica. Na madeira, o calor específico varia com o conteúdo de humidade, não variando com a densidade ou espécie da madeira. É descrito como a quantidade de calor necessária para incrementar 1°C de temperatura a uma unidade de massa em kg, cujas unidades são [J/(kg.°C)].

A estrutura porosa da madeira, a sua densidade, o conteúdo de humidade, as irregularidades estruturais e a temperatura afetam a sua condutibilidade térmica - tornando-a num mau condutor de calor, com um valor aproximado de 0,17 W/(m.°C). A condutibilidade térmica é descrita pela quantidade de calor que atravessa um corpo, por unidade de superfície e de espessura, em unidade de tempo [W/(m.°C)].

A rapidez com que o calor se difunde através de um material é designada por difusividade térmica [m²/s]. Para a madeira o valor é de 0,13.10⁻⁶, que é um valor extremamente baixo, denotando que o material madeira absorve uma grande quantidade de calor mas apenas uma pequena parte do mesmo é conduzida. Esta propriedade também varia com a densidade e o conteúdo de humidade.

Devido a estas propriedades térmicas na madeira a termografia deverá conseguir detetar madeiras com diferentes densidades, distinguir conteúdos de humidade e apontar madeiras de distintas espécies. São referidos Maldague e Tanaka que baseiam os seus trabalhos nestes princípios para a deteção de deterioração em diferentes graus em amostras de madeira.

Morales-Conde, Rodriguez-Liñán e Rubio de Hita (2013) realizaram a inspeção de outra cobertura de madeira de um edifício histórico, utilizando a conjugação de diferentes técnicas não destrutivas, ultrassons, resistógrafo onde, de entre as quais, se encontra a termografia.

Na utilização da técnica da termografia, referem uma emissividade, aproximada para a madeira, de 0,90 e através dos termogramas ilustrados pode ver-se considerada uma emissividade de 0,95.

As zonas mais húmidas foram identificadas pela termografia. Nestas mesmas áreas foram usados ultrassons para averiguar a existência de perdas de densidade nessas regiões.

Concluíram que as técnicas de inspeção não destrutivas contribuem para que as intervenções sejam mais sustentáveis na natureza e permitem fazer um melhor uso do material pela substituição só das áreas danificadas, atribuindo com grande precisão a classe de resistência dos elementos sob análise.

4.3 Inspeção de Biodegradação

Grossman (2004) relata como com a evolução do Homem também evoluíram os materiais de construção sendo estes, na maioria das vezes, uma fonte de alimento e de esconderijo para pragas de insetos como térmitas. A inspeção visual e manual já não é o suficiente para a deteção destas pragas, sendo assim a TIV uma técnica incontornável na deteção das mesmas, nomeadamente em estruturas de madeira e revestimentos deste mesmo material.

As pragas de térmitas são detetadas através de subtis diferenças de teor de humidade que se evidencia em pequenas diferenças de temperatura resultantes de padrões térmicos associados com a infestação de insetos. Estas anomalias, não são frequentemente detetáveis a olho nu.

As inspeções usando imagem de IV, no controlo de pragas, consistem na maioria das vezes, quase sempre, em baixas emissões de temperatura, ou emissões próximas da temperatura ambiente, com por vezes variações muito subtis na imagem, figura 47.

A imagem térmica permite a um profissional de deteção de pragas procurar dois tipos de elementos: áreas exibindo anormal envolvente fria, usualmente associadas com a presença de humidade, a presença de defeitos subsuperficiais.

A câmara de infravermelhos pode, em primeiro lugar, ser classificada como sendo uma ferramenta de inspeção grosseira mas, no entanto, após observação dos elementos atrás referidos, a imagem térmica pode ter um papel importante noutras fases da inspeção de pragas, tais como na verificação do tratamento aplicado.

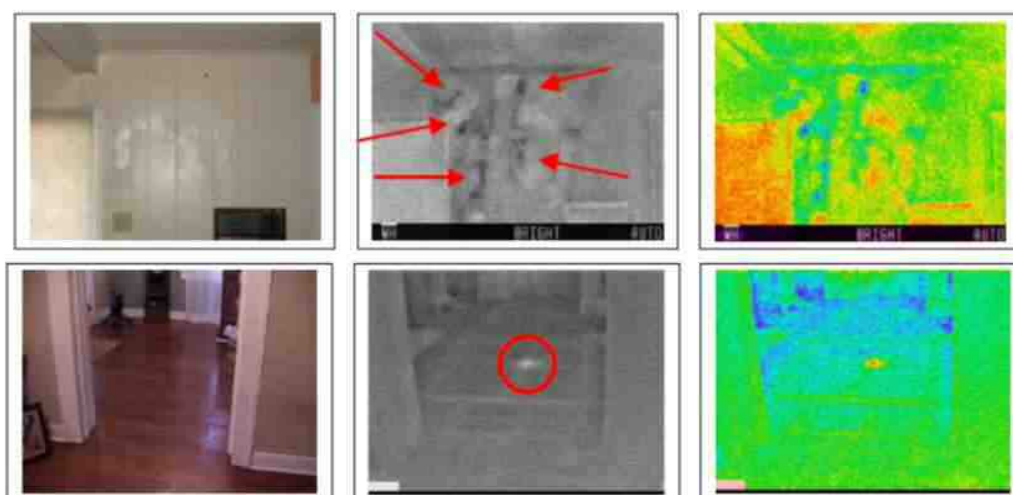


Figura 47 - Imagem digital, termograma a cinzento e termograma a cores da área de um revestimento de madeira. Atividade de térmitas sob revestimento de madeira no chão e na parede (retirado de Grossman, 2004).

Qualquer presença superficial ou subsuperficial de humidade descoberta durante uma inspeção por IV é um importante indicador que deve ser investigado. As imagens da figura 48, são exemplos de imagens de IV de localização de fungos descobertos após a investigação de uma área húmida ativa.

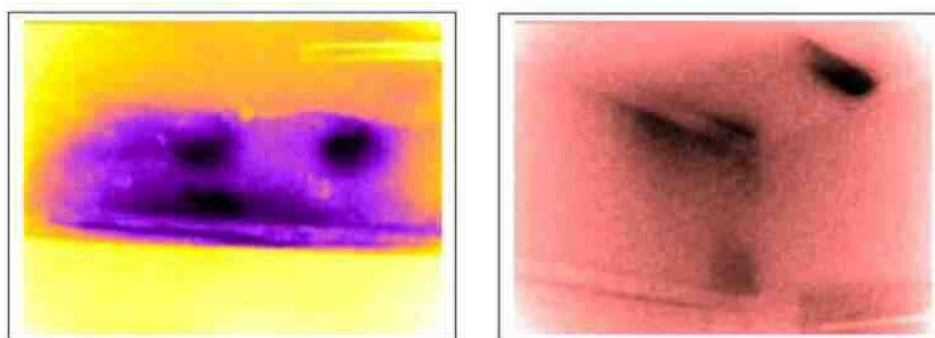


Figura 48 - Visualização de área húmida ativa em viga e teto em que foram revelados fungos em atividade (retirado de Grossman, 2004).

A imagem térmica de IV é uma importante ferramenta de recurso para a deteção de fungos, tal como da verificação das respetivas medidas corretivas.

Existem pragas constituídas por variados insetos que destroem a madeira comendo-a ou escavando a parte macia ou tenra da madeira ou a sua estrutura de celulose, deixando muitas vezes uma camada exterior de madeira com aspeto intacto. Muitas vezes a integridade estrutural das peças de madeira é comprometida sem qualquer sinal exterior de degradação.

Em variados casos as câmaras de imagem térmica podem localizar e detetar estes problemas mostrando defeitos subsuperficiais, figura 49. No entanto, está em causa não só a habilidade do operador da termocâmara, como também um conhecimento de possíveis locais em que se podem encontrar as pragas, como o tipo de dano que cada praga pode causar. Nestes casos pode ser empregue a termografia ativa, aquecendo ou arrefecendo partes da estrutura, para evidenciar a visualização dos defeitos.

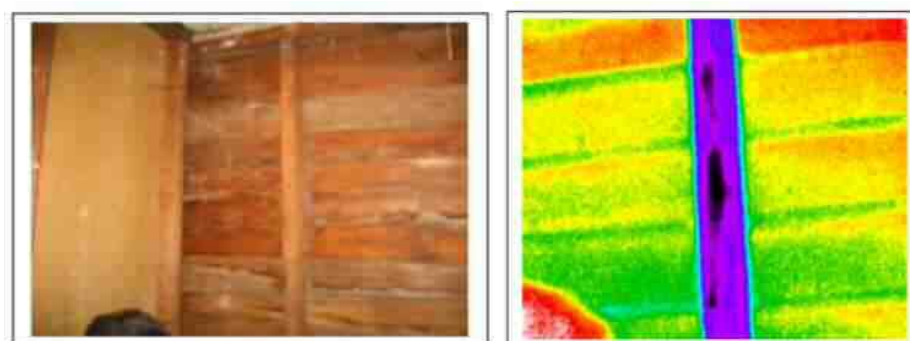


Figura 49 - Imagem digital de elemento construtivo. Defeitos subsuperficiais identificados pela aplicação de termografia ativa (retirado de Grossman, 2004).

Em alguns casos, a termografia ativa é a única via através da qual a infestação de uma praga pode ser totalmente localizada. No processo de inspeção de pragas é importante ter em atenção a verificação dos dados ou das deteções. É necessário capturar e gravar imagens digitais e de infravermelhos. A utilização de equipamentos adicionais para verificação é uma mais valia muito importante. Os equipamentos referidos são: o humidímetro, o equipamento de deteção de micro-ondas, o de deteção de emissões acústicas, o resistógrafo e os boroscópios de imagem de vídeo.

No final deste artigo é referenciado que nem sempre as câmaras mais caras evidenciam melhor as anomalias, como se pode denotar através do conjunto das imagens da figura 50.

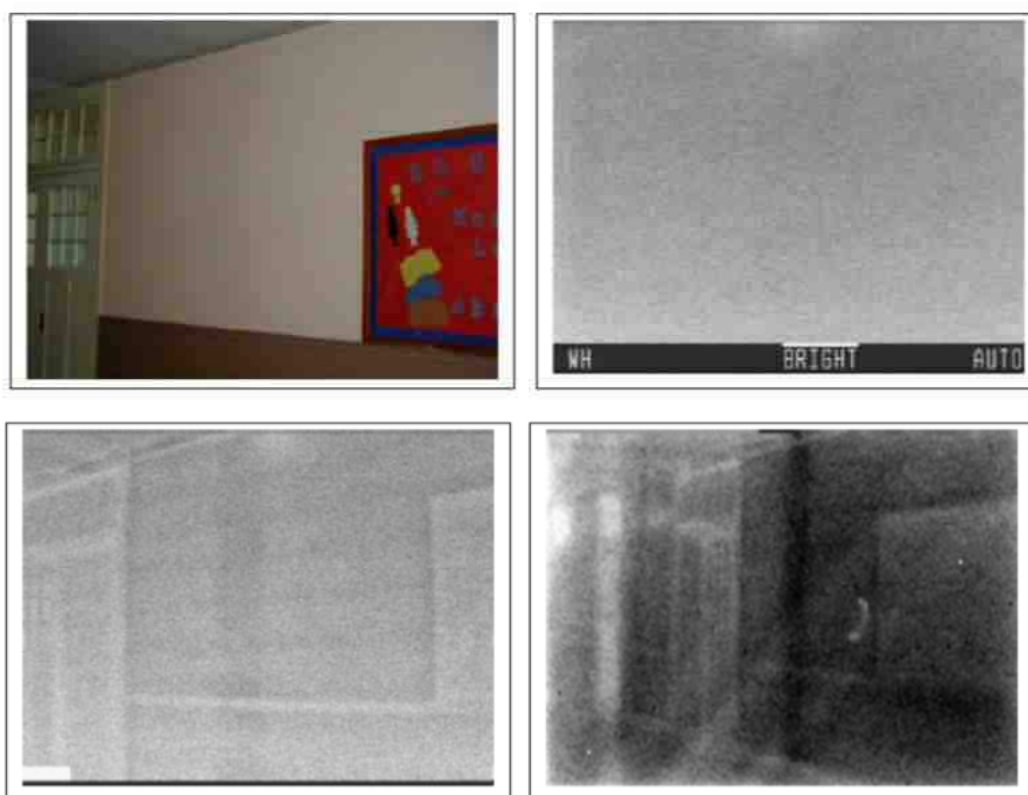


Figura 50 - A imagem da direita, em baixo, revelou uma anomalia subsuperficial que a imagem da esquerda não revela (retirado de Grossman, 2004).

É também de suma importância o artigo de Grossman (2006), em que é referida a inspeção realizada a uma ponte de madeira ferroviária com o auxílio, entre outras técnicas, de termografia. Relata como peças de madeira revestidas por creosoto se pensavam imunes à destruição por parte de insetos denotando que, apesar deste tratamento, as estruturas foram atacadas do interior para o exterior, deixando aparentar peças perfeitas vistas pelo exterior, sendo na realidade, elementos ocultos sem integridade estrutural, ver figura 51. Refere novamente que os inspetores já não podem confiar apenas em meios visuais ou manuais no processo de inspeção para localizar insetos ou fungos destruidores de madeira, que comprometem a sua integridade estrutural.

Conclui que a termografia por IV desempenhou um papel único numa só aplicação. É destacado que, sem a câmara termográfica, uma quantidade significativa de danos estruturais não teriam sido encontrados.

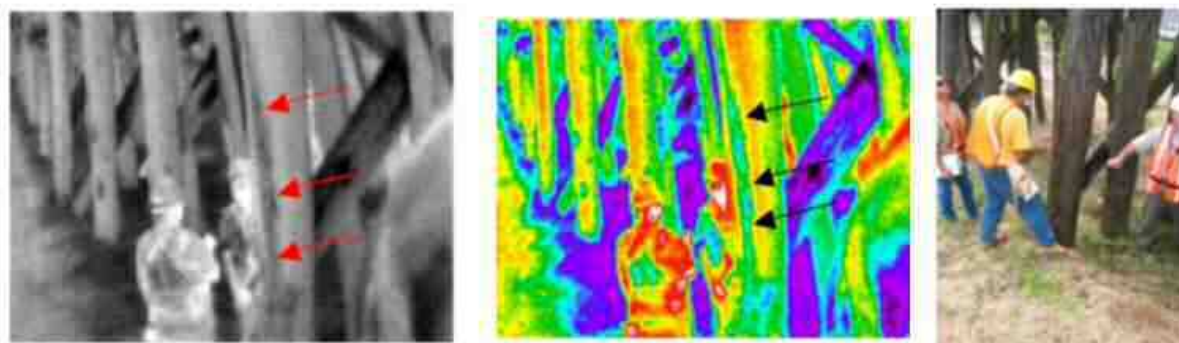


Figura 51 - As imagens de infravermelhos a longa distância mostram claramente humidade residual, no elemento estrutural, identificada com setas. A investigação visual e mecânica revelou evidencia de tubos de lama, térmitas vivas, tal como outros danos físicos (retirado de Grossman, 2006).

5. Determinação da Emissividade

Neste capítulo apresentam-se diversos estudos relativos à determinação da emissividade. Salientam a sua importância para a análise quantitativa da temperatura lida pela técnica da termografia por infravermelhos. Enumeram os fatores que influenciam esta grandeza da emissividade.

Nos diversos artigos apresentados, uns fazem os ensaios ao ar livre, outros em ambiente laboratorial e outros ainda realizam simulações computacionais.

Os materiais para os quais são determinados os valores de emissividade vão desde os produtos hortícolas, passando por materiais de construção simples e multicamada até chegar finalmente à madeira. A madeira foi analisada tanto na sua forma natural como em compósitos.

Os artigos selecionados apresentam-se por ordem cronológica, do mais antigo para o mais recente, excetuando o último caso por ser um documento proveniente de uma empresa, RoMiotto (2011), de instrumentação de aparelhos medidores de temperatura por radiação infravermelha.

O artigo de Hellebrand, Beuche e Linke (2001), apesar de não abordar o material madeira, salienta a importância do valor da emissividade. Assim, realçam a necessidade da correta avaliação da emissividade, de modo a que a medição da temperatura seja o mais fiável possível.

Para este estudo procura-se que, com a emissividade aferida, se consiga avaliar a qualidade e o estado de maturação de produtos hortícolas, pela técnica da termografia. Concluíram que o valor da emissividade era de $0,94 \pm 0,04$, para os produtos hortícolas testados nos ensaios.

Desta forma, podemos verificar que, quando se pretende fazer uma análise termográfica, de maior exatidão do valor da temperatura, deve ser utilizado um valor para a emissividade, em conformidade com o material a ser avaliado.

Avdelidis e Moropoulou (2003) elaboraram um conjunto de estudos no qual foi dada destacada importância à grandeza emissividade, referindo mesmo que a emissividade é a questão fundamental para as observações termográficas.

Dado que uma câmara de TIV deteta a radiação emitida por um material em investigação e transforma esta energia em temperatura, num termograma, a característica que descreve a relação entre a radiação emitida e a temperatura lida é designada por emissividade ou emitância. A emissividade é uma característica da superfície dos materiais que descreve a capacidade dos materiais, sob investigação, de emitir energia.

Os valores corretos de emissividade fornecem uma informação valiosa para a interpretação das imagens térmicas, obtidas de investigações termográficas. Neste trabalho foram determinados os valores de emissividade de materiais de construção selecionados, para diferentes valores de temperatura e comprimentos de onda, médio e longo, no espectro de infravermelhos. Tiveram ainda em consideração o estado da superfície dos materiais. Os materiais foram testados em laboratório e deles constam, gessos, mármore e pedras porosas, para os quais foram obtidos diferentes valores de emissividade. As diferenças de valor foram atribuídas à textura, à composição dos materiais, à temperatura e ao comprimento de onda utilizados.

Avdelidis e Moropoulou (2003) recomendam que para a realização duma inspeção termográfica é necessário ter os valores de emissividade dos materiais a ser testados, pelo que o ideal seria, no início duma investigação *in situ*, determinar ou avaliar estes valores. Uma vez que esta abordagem nem sempre é possível, dever-se-á recolher amostras de materiais e fazer esta análise em laboratório.

Salientam a importância deste trabalho, uma vez que existe escassa informação, com listagens de emissividade, para diferentes valores de temperatura.

Rice (2004) refere que a maioria dos termómetros por infravermelhos e pirómetros requer que seja introduzido um valor de emissividade para que estes aparelhos apresentem como resposta um valor correto para a temperatura. Este valor de temperatura é tanto mais preciso, quanto melhor tiver sido previsto o valor para a emissividade, da superfície em causa a ser avaliada.

Foram realizados uma série de trabalhos que envolvem madeira natural, referindo as espécies através de seu nome científico e materiais compostos de madeira, os quais possuíam cores e texturas diferentes nas suas superfícies. Para todos estes materiais de madeira foram aferidos os correspondentes valores de emissividade.

A metodologia utilizada foi baseada na refletância e é descrita no artigo.

Após as determinações das emissividades foram realizadas medições dos valores da temperatura, para três níveis de temperatura diferentes, próximo de 0°C, temperatura ambiente aproximadamente 25°C e próximo de 100°C, usando dois termómetros infravermelhos.

As leituras de temperatura foram realizadas por duas etapas, uma utilizando os valores de emissividade indicados pelos produtores e outra com os valores de emissividade aferidos.

Os valores de emissividade para produtos de madeira variam geralmente dentro do intervalo de 0,89 e 0,92, mas são apontados os valores de 0,94 a 0,95 como convenientes para esta variedade de materiais pelas empresas produtoras deste tipo de equipamentos.

Para os valores de temperatura ambiente, as medições de temperatura não se mostraram muito diferentes para os diferentes valores de emissividade. No entanto, para os valores de temperatura extremos, mais altos e mais baixos, foram denotadas diferenças significativas.

O trabalho Fronapfel e Stolz (2006) tem como objetivo contribuir para a ajuda das inspeções termográficas, com infravermelhos, através da determinação da emissividade de materiais de construção comuns.

Abordam conjuntos de materiais que formam secções de paredes, de entre os quais se destaca os que incluem estrutura de madeira. Salientam a importância da determinação da emissividade para materiais multicamada, ou seja, partes constituídas por vários materiais.

Referem ainda a questão do ângulo de visão, ou seja, a importância da inclinação com a qual são efetuadas as observações termográficas. Assim sendo, foram determinadas as emissividades para diferentes ângulos de visão, 0° (perpendicular à superfície), 45°, 60° e 75°.

A emissividade é função do material, sua condição superficial, temperatura superficial e ângulo com o qual se faz a observação. Constataram que para diferentes ângulos de visão, a emissividade assume valores diferentes, para um caibro de madeira, porém não foram descritas as características da sua superfície. Utilizaram dois processos de aquecimento diferentes, um dos quais foi a luz solar, de onde resultaram emissividades com valores diferentes.

Para a determinação da emissividade foi criado um gradiente térmico e utilizada a fita isoladora preta como emissor de referência.

O estudo de Kang *et al.* (2011) utiliza o método inverso para determinar a absorvidade solar e emissividade da madeira. Reconhecem que a emissividade determinada foi muito menor do que a obtida noutros estudos.

Este trabalho é realizado no exterior, com a madeira exposta à luz solar.

É apresentada uma listagem de aproximadamente cem espécies de madeira, da Coreia e Trópicos, para as quais apresentam, o nome científico, o nome comum, a densidade, os valores dados pelo colorímetro, com base no sistema Lxaxb e propriedades que incluem a absorvidade α e a emissividade ϵ .

Todas as amostras possuíam o mesmo acabamento superficial, tendo sido todas elas desgastadas com lixa com grão fino, 120.

Este artigo serviu de inspiração para o autor do presente trabalho se aperceber que diferentes espécies de madeira poderão apresentar valores de emissividade distintos. Também reforçou a importância da existência de uma listagem de valores de emissividade para diferentes espécies de madeira.

Ciocia e Marinetti (2012) salientam a importância da emissividade e da temperatura refletida para a obtenção de valores quantitativos de temperatura através da termografia.

Realizaram trabalhos tanto em laboratório como *in-situ*.

Abordam a questão da necessidade dum método expedito e preciso para a determinação da emissividade *in-situ*.

Referem também não existirem listagens de valores de emissividade determinados *in-situ* para diferentes tipos de materiais.

Salientam ainda que existem materiais com diferente valor de emissividade para diferentes janelas de observação, no espectro infravermelho, como é o caso da madeira.

Existem outros materiais que, independentemente da janela de observação, apresentam a mesma emissividade, como é o caso do mármore branco.

As amostras foram investigadas para as janelas espectrais de infravermelhos MWIR e LWIR.

Marinetti e Cesaratto (2012) no seu artigo desenvolvem uma técnica para a determinação da emissividade, sem que seja requerido ou necessário saber qual a temperatura refletida, uma vez que esta é assumida como constante.

Fazem simulações computacionais, no interior e exterior, chegando à conclusão que existe uma diferença na precisão das medições termográficas.

A emissividade depende de muitos fatores, tais como a temperatura, a rugosidade superficial, o comprimento de onda e o ângulo de visão.

A temperatura refletida, que depende principalmente da radiação envolvente, afeta a precisão da medição termográfica da temperatura.

Desta forma os ensaios realizados pelo autor do presente Trabalho de Projeto, foram efetuados com o mínimo de luz possível, em cada ambiente distinto, para minimizar o efeito da radiação do meio envolvente.

Em López, Basterra, Acuña e Casado (2013 June) é referido que a técnica de TIV tem vindo a ser aplicada, recentemente, para o diagnóstico e avaliação de estruturas de madeira.

Salientam a emissividade como a principal variável a ser introduzida nos aparelhos de termografia quando se pretende analisar a temperatura dos materiais.

Acrescentam ainda que o conhecimento da emissividade à priori é essencial para a inspeção termográfica, porque permite a determinação de forma quantitativa da energia radiada pelo material.

Neste estudo foi determinada a emissividade para amostras de diferentes espécies de madeira e uma amostra de aglomerado, de forma a obter valores para uma variedade de cor, de textura, de grão e de densidade. Foi ainda analisada a influência de diferentes fatores na determinação da emissividade, tais como, a temperatura e o acabamento superficial.

É reforçada a importância da emissividade na determinação da temperatura superficial dos objetos, de forma rigorosa, pela técnica de TIV.

Descrevem, de forma breve, diferentes métodos para a determinação da emissividade, métodos diretos dos quais o mais comum é o do emissor de referência (fita isoladora preta adesiva ou tinta preta) à mesma temperatura que o material sob investigação ou a utilização de um termopar. Estes métodos diretos são descritos pela Norma ASTM E1933, 1999a(2005).

Em métodos indiretos, utilizam a relação entre o coeficiente de reflexão e o coeficiente de absorção ou emissividade da superfície dos materiais.

A madeira como material natural que é, proveniente de seres vivos pode apresentar um aspeto muito heterogéneo, dependendo das espécies. Originando diferentes aspetos superficiais que afetam a emissividade.

Utilizaram também seis amostras de *Pinus sylvestris* L. para as quais determinaram a emissividade para diferentes valores de temperatura e com acabamentos comuns nas aplicações de construção.

Seguiram a norma ASTM já referida, utilizando o método direto da fita isoladora.

Cada termograma foi efetuado tendo em consideração as condições ambientais. A fita isoladora foi colocada em 40cm² da amostra em estudo. A temperatura lida é a média para uma área de aproximadamente 60cm².

Os valores da emissividade variaram significativamente com a temperatura a que se encontra a amostra. Em todos os casos a emissividade diminuiu com o aumento da temperatura. Foi referido que o valor da emissividade varia com fatores como a cor, a textura, o grão e a tonalidade da madeira. Referiram ainda que a existência de uma camada de pó, a pintura ou a camada de proteção que reveste a madeira têm influência no valor da emissividade determinado.

Dado que a madeira é um material heterogéneo, as medições termográficas devem ser feitas sobre a média da área de superfície. Medições feitas num só ponto podem levar a leituras de temperatura erradas e devem ser evitadas.

No final concluem que, para a banda espectral 7,5 a 13 μ m, o valor de 0,924 de emissividade, para a temperatura ambiente de 22°C, pode ser usado de forma a minimizar os erros López *et al.* (2013 June).

RoMiotto (2012) faz uma sucinta descrição do conceito de emissividade, e fornece indicações de como estimar o valor da emissividade para os objetos.

São referidos vários fatores que afetam a emissividade, como a temperatura, o ângulo de medição, a geometria do objeto, a qualidade da superfície, a faixa espectral dos IV, e a transmissividade que somente existe no caso de objetos não opacos.

Transmite ainda orientações para otimizar as leituras da temperatura, como sendo, a determinação da emissividade previamente, para a faixa espectral em que vai ser realizada a medição da temperatura, evitar reflexões causadas por altas temperaturas de objetos existentes na periferia e manter o equipamento perpendicular à superfície na qual irá ser feita a medição.

Finalmente apresenta uma lista de valores para a emissividade relativos a diferentes materiais, onde consta a madeira natural com intervalo de 0,90 a 0,95, para os comprimentos de onda indicados, de onde se salienta o de 8 a 14 μ m, por ser o utilizado pela câmara termográfica de que se fez utilização para a realização do presente trabalho experimental.

6. Programa Experimental

6.1 Introdução

6.1.1 Objetivos do trabalho Experimental

Neste trabalho realizaram-se uma série de experiências nas quais foram determinados os valores da emissividade para oito diferentes amostras de madeira serrada, com texturas semelhantes, de espécies existentes em Portugal.

Foi adotado um diferencial térmico de aproximadamente 20°C, como também é sugerido no manual da FLIR ThermaCAM B20 (2006a).

O trabalho experimental decorreu em três ambientes diferentes, dos quais o primeiro foi realizado em condições não laboratoriais (CNL) e os restantes, num dos laboratórios do Instituto Politécnico da Guarda (LEM/IPG) e o outro no laboratório de estruturas e construções do Instituto Politécnico de Castelo Branco (LEC/IPCB).

No primeiro ambiente o ensaio serviu também como teste e definição do procedimento para aperfeiçoamento da técnica a utilizar.

Nos três locais as condições ambientais eram diferentes e procurou-se encontrar os valores da emissividade correspondentes.

Devido à inexistência de valores tabelados para a emissividade destas espécies de madeira e nestas condições ambientais, espera-se que este trabalho venha a trazer um contributo positivo para a observação e avaliação de estruturas de madeira, de forma qualitativa e principalmente quantitativa, para diagnóstico de manifestações patológicas.

6.1.2 Caracterização do Problema

A emissividade é um dos principais fatores que regem a leitura da temperatura correta da superfície dos objetos. Esta grandeza é afetada por vários fatores que variam de local para local. Assim, o mais correto é determinar, durante a inspeção *in situ*, o valor da emissividade, por métodos expeditos, uma vez que se está perante as condições de análise e avaliação do problema de inspeção.

Para a determinação do valor da emissividade é necessário aceder à superfície em causa, porém nem sempre é possível, dada a frequente inacessibilidade das estruturas. Assim, convém existir uma lista de valores para a emissividade, para diferentes condições ambientais, de modo a que, para cada situação, se encontre o valor que melhor se enquadre com o contexto existente *in situ*.

Uma vez que a madeira é um material natural, conseqüentemente também é heterogéneo, o que acarreta variações no valor de emissividade de espécie para espécie.

Procurou-se, com este estudo, para diferentes ambientes e diferentes espécies de madeira, contribuir com valores, para uma lista de emissividades, que sejam úteis para utilizar em situações reais, *in situ*.

Para uma análise qualitativa o valor da emissividade não é muito relevante, no entanto, uma escolha adequada pode facilitar a visualização, na imagem térmica, das diferenças de temperatura.

Para uma análise quantitativa o valor da emissividade é o parâmetro para que a leitura da temperatura superficial seja o mais correta possível porque a madeira deteriorada tem um valor de temperatura diferente do da madeira sã, para as mesmas condições uma vez que a densidade diminuiu. Para diferentes estudos é relacionada a densidade com a temperatura superficial. Ora uma perda de densidade devida à deterioração leva a temperaturas superficiais diferentes.

6.2 Metodologia

6.2.1 Material e Equipamentos

Para a determinação das condições ambientais utilizou-se um termohigrómetro digital multifunção DVM 401 Velleman, o qual possuía sensores dos quais os utilizados foram o de temperatura, humidade relativa e luxímetro, figura 52.



Figura 52 - Dispositivos utilizados na determinação das condições ambientais (foto do autor).

A máquina termográfica utilizada foi a FLIR ThermaCAM B20, figura 53, (cujos três primeiros algarismos do número de série são 234 e a lente é de 36 mm). Estes dados determinam um FOV de 22,6°. A distância mínima de focagem é de 0,30 m. Para uma distância de 0,50 m entre a lente da máquina e a superfície da amostra, apresenta um HFOV de 0,20 m, VFOV de 0,15 m e IFOV de 0,63 mm. A termocâmara funciona na banda espectral de 7,5-13 μ m, com uma sensibilidade térmica de 0,10°C aos 30°C e precisão de $\pm 2^\circ\text{C}$ ou $\pm 2\%$, sendo a focagem realizada manualmente ou automaticamente. O tipo de detetor é um microbolómetro não arrefecido (FPA), com resolução de 320x240 píxeis. Os softwares utilizados são o ThermaCAM QuickView 1,3 e o ThermaCAM Reporter 7.0.



Figura 53 - Câmara termográfica utilizada na determinação da emissividade (fotos do autor).

Na determinação da emissividade seguiu-se o método da fita preta, tendo-se utilizado fita isoladora adesiva preta Iso Tape Tesa, figura 54.



Figura 54 - Fita preta Isoladora com emissividade de 0,970 para 35°C (foto do autor).

Para a elevação da temperatura das amostras foram usados três aparelhos diferentes: forno de cozinha TRISTAR para o ambiente 1 (CNL), uma estufa WTC binder para o ambiente 2 (LEM/IPG) e uma estufa P SELECTA para o ambiente 3 (LEC/IPCB), ver figura 55.



Figura 55 - Dispositivos utilizados na geração do gradiente térmico para os três ambientes respetivamente. Nas duas imagens de baixo podem ver-se as amostras colocadas no interior das estufas para os dois últimos ambientes (fotos do autor).

A pesagem das amostras foi realizada recorrendo a uma balança eletrónica, com se pode ver na figura 56, com 5 kg de capacidade máxima e precisão de $\pm 1g$.



Figura 56 - Dispositivo utilizado na determinação das massas das amostras (foto do autor).

A fixação da amostra em observação e da termocâmara, foi efetuada com recurso a dois tripés, figuras 61 e 62.

Um termopar do tipo K foi utilizado para verificar que a temperatura do lado da fita era igual ao lado sem fita, da madeira testada, figura 57.



Figura 57 - Termopar do tipo K (foto do autor).

Foram ainda utilizadas uma folha de alumínio e uma de cartão com as quais se construiu o dispositivo para auxílio da determinação da temperatura refletida.

6.2.1.1 Amostras

As amostras de madeira são de sete espécies diferentes, comuns no território português e com densidades diferentes. Apesar de umas mais usadas que outras, estas espécies, são de utilização corrente em Portugal, estando grande parte do património edificado, construído com recurso a estas espécies de madeira, em coberturas, pavimentos e componentes de paredes. Na tabela 12 são identificadas as espécies usadas pelo seu nome científico.

Da espécie *Pinus pinaster* foram usadas duas amostras com origens diferentes.

As oito amostras testadas possuem densidades distintas, as duas de *Pinus pinaster* embora da mesma espécie, possuem também densidades diferentes, uma vez que são provenientes de localizações distintas, uma oriunda da região de Leiria (Litoral) e a outra da região da Serra da Estrela (Interior Serrano).

Tabela 12 - Espécies de madeira das amostras ensaiadas.

| Nome Comum | Nome Científico |
|---------------|--------------------------------------|
| Acácia | <i>Acacia dealbata</i> Link |
| Amieiro | <i>Alnus glutinosa</i> (L.) Gaertner |
| Carvalho | <i>Quercus rubra</i> L. |
| Castanho | <i>Castanea sativa</i> Miller |
| Cedro | <i>Cedrus deodara</i> (D. Don) |
| Choupo | <i>Populus tremula</i> L. |
| Pinho | <i>Pinus pinaster</i> Aiton |
| Pinho Serrano | <i>Pinus pinaster</i> Aiton |

As amostras utilizadas são de madeira serrada, sem qualquer tipo de acabamento, como frequentemente a madeira é encontrada em estruturas.



Figura 58 - As oito amostras utilizadas nos ensaios com a fita preta isoladora (foto do autor).

As dimensões das amostras em estudo, ver figura 58, são de: 20cm longitudinalmente às fibras, 15cm na dimensão transversal e 15cm de espessura. Estas dimensões foram definidas tendo em conta dois aspetos: simular um pequeno troço de uma viga corrente e minimizar o efeito da envolvente sobre a superfície a observar, face às características da máquina de termografia e da lente com que se encontra equipada. Assim, para uma distância de observação de 0,5m entre a lente da máquina e a superfície da amostra, esta apresenta um HFOV de 20cm e um VFOV de 15cm. Estes dados são fatores determinantes para a escolha das dimensões da face da amostra a observar de forma a reduzir o contributo da envolvente, minimizando assim erros.

Para cada uma das amostras foram observadas as faces paralelas ao fio da madeira (20cmx15cm) e escolhida para o estudo aquela que apresentava menos irregularidades, evitando-se fissuras e nós, figura 58.

A densidade das amostras foi determinada e pode ser consultada nas tabelas das condições das amostras, na secção dos resultados.

6.2.2 Métodos

Uma vez que este trabalho experimental utiliza uma câmara termográfica do fabricante *FLIR* e correspondente software, foi seguida a metodologia indicada no respetivo manual, igualmente mencionada por Spencer (2008) e na Norma ASTM E1933-99a (reapproved 2010), para a determinação da temperatura aparente refletida (Método Refletor) e para a determinação da emissividade, nesta fizeram-se algumas adaptações.

6.2.2.1 Determinação da Temperatura Aparente Refletida (Método Refletor)

Para a realização deste procedimento é necessário amarrotar uma folha grande de alumínio cuja emissividade é igual a 1,00. Seguidamente alisa-se a mesma folha que se cola sobre uma folha de cartão de tamanho A3, com a mesma dimensão.

Coloca-se este utensílio à frente do objeto que se pretende observar com a câmara termográfica, com o lado da folha de alumínio voltado para a câmara.

Introduzem-se na câmara os parâmetros, distância ao objeto, temperatura ambiente, humidade relativa e define-se a emissividade para 1,00.

Medir através da câmara termográfica a temperatura da folha de alumínio, este será o valor da temperatura refletida, figura 59. Para este procedimento utiliza-se a função caixa de análise, a qual tem como resposta um valor médio para a área da caixa definida. Este aspeto é importante uma vez que existem variações de ponto para ponto, na leitura feita à folha de alumínio. Este procedimento está descrito no manual da câmara termográfica.



Figura 59 - Exemplo do dispositivo para determinação da temperatura refletida (foto do autor).

6.2.2.2 Determinação da Emissividade

A determinação da emissividade foi realizada segundo a metodologia da fita isoladora preta (material com valor de emissividade conhecido). Assim, foram colocadas tiras de fita adesiva preta isoladora justapostas, com emissividade de 0,97 para 35°C, (Holst, 2000, p.341), na direção perpendicular ao fio, de modo a preencher metade da face da amostra, ou seja, 10cmx15cm, como se pode observar na figura 58 da secção amostras.

As amostras foram aquecidas, pelo menos, 20°C acima da temperatura ambiente onde se realizaram as observações. Deste modo, e de forma a assegurar uniformidade térmica, as amostras foram colocadas no dispositivo de aquecimento a 60°C durante 24h. Para o ambiente dois (LEM/IPG) após o aquecimento foram obtidos 2 termogramas. No caso do ambiente três (LEC/IPCB) este procedimento foi repetido três vezes: foi feito um período de aquecimento de 24h e obtidos dois termogramas, posteriormente a mais 24h de aquecimento foi obtido um novo termograma e ainda um novo período de aquecimento de 24h e obtidos 5 termogramas. Para o ambiente um (CNL) cada amostra foi colocada no forno durante aproximadamente uma hora a 60°C após o qual foi obtido um termograma. No ambiente um (CNL) as amostras, uma de cada vez, foram envolvidas em papel de alumínio, para melhor uniformização do aquecimento, uma vez que o forno apresentava resistências elétricas, por cima e por baixo, sem proteção.

Um termopar do tipo K permitiu aferir que as temperaturas superficiais das duas zonas, da fita preta e da madeira exposta, eram iguais.

Os ensaios foram realizados praticamente na ausência de luz, ver tabela das condições ambientais para cada ambiente, de modo a evitar reflexões, verificando-se que, para uma intensidade luminosa baixa, a temperatura refletida era igual ou muito próxima da temperatura ambiente.

A distância utilizada entre a câmara e a amostra foi de 0,5m, tendo-se utilizado um tripé para fixar a amostra, de modo a que esta fosse observada segundo a perpendicular ao plano da sua superfície.

Para fixar a câmara termográfica foi utilizado outro tripé.

Foram monitorizadas as condições ambientais relevantes, e necessárias à calibração da máquina - temperatura ambiente, humidade relativa e temperatura refletida. Estas podem ser consultadas na tabela das condições ambientais de cada ambiente.

Dado que a madeira é um material muito heterogéneo, as avaliações termográficas devem corresponder a uma média de uma área de observação relativamente grande, uma vez que, medidas obtidas num só ponto são meramente pontuais, não dando a ideia do todo, devendo assim ser evitadas. Assim as medições

realizadas foram aplicadas numa área significativa e sempre igual (de 100x100 no software utilizado).

Depois de introduzidas na câmara os valores das condições ambientais, temperatura ambiente, humidade relativa e temperatura refletida, bem como distancia da máquina à amostra, realizaram-se termogramas de cada uma das amostras, depois de aquecidas, com emissividade igual a 0,97.

Os termogramas obtidos, foram primeiro descarregados para o computador com o o auxilio do software ThermaCAM QuickView 1.3, analisados com o auxilio do software ThermaCAM Reporter 7.0, permitindo determinar o valor da emissividade para uma área de superfície descoberta da amostra (zona de madeira exposta). O valor obtido corresponde à emissividade da amostra de madeira analisada para as condições ambientais correspondentes.

Com o ultimo software referido, foram realizadas duas caixas de observação, com a mesma dimensão, uma no local correspondente à fita preta e outra no local correspondente ao da madeira, figura 60. Primeiro anotou-se o valor da temperatura correspondente ao lado da fita preta com emissividade de 0.97 com que se tirou o termograma. Seguidamente, fez-se variar o valor da emissividade do quadrado correspondente ao lado da madeira, até se obter o mesmo valor de temperatura lido no lado da fita. O valor assim obtido corresponde ao valor da emissividade dessa amostra de madeira.

Este conjunto de procedimentos foi repetido um número de vezes diferente em CNL, LEM/IPG e LEC/IPCB, como pode ser consultado nas tabelas dos resultados.

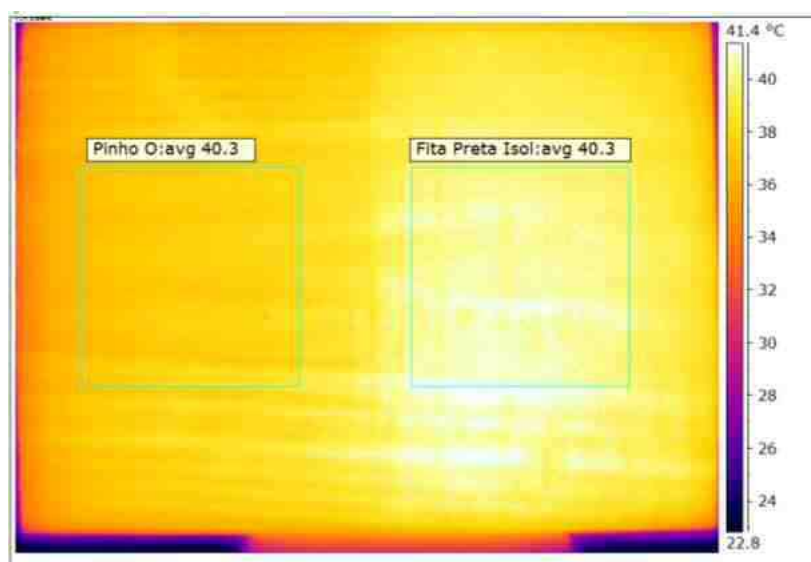


Figura 60 - Exemplo de termograma com as duas áreas definidas para determinação da emissividade (foto do autor).

6.2.2.3 Determinação do Teor em Água das Amostras

Antes de cada ensaio foi efetuada uma pesagem de cada amostra para posterior determinação do teor em água (ver equação seguinte).

$$\text{Teor em Água [\%]} = ((P_{\text{Húmido}} - P_{\text{Seco}}) / P_{\text{Seco}}) \times 100 \quad (6.1)$$

Para a determinação do teor em água das amostras, o que foi realizado no final de todos os ensaios estarem concluídos, seguiu-se a NP 614:1973. Desta forma colocaram-se as amostras a 100°C, na estufa do LEC/IPCB, durante 48h, tendo-se realizado pesagens sucessivas até que o peso de cada amostra se mantivesse constante (Peso Seco).

6.2.2.4 Descrição da Organização dos ensaios nos diferentes Estudos

O trabalho experimental desenvolveu-se em três ambientes diferentes nos quais se repetiram todos os procedimentos descritos nas secções 1, 2 e 3 dos Métodos: Determinação da Temperatura Aparente Refletida, Determinação da Emissividade e Determinação do Teor de Água das amostras.

O trabalho experimental iniciou-se em Condições Não Laboratoriais, designado por ambiente CNL, a que corresponde um estudo com a realização de um único ensaio. Assim a CNL é dada a designação de estudo 1.

O trabalho experimental prosseguiu em condições laboratoriais em dois ambientes diferentes: LEM/IPG e LEC/IPCB.

No laboratório do Instituto Politécnico da Guarda, designado por LEM/IPG foi executado um estudo, com a designação de estudo 2, onde foram realizados dois ensaios. Desses dois ensaios foi realizada a média da emissividade e da temperatura superficial da amostra, uma vez que as condições ambientais e das amostras se mantiveram ao longo destes dois ensaios. Entre estes dois ensaios as amostras não foram à estufa pelo que o seu teor de água se manteve inalterado.

No laboratório do Instituto Politécnico de Castelo Branco, designado por LEC/IPCB foram realizados três estudos. No primeiro estudo, com a designação de estudo 3, foram realizados dois ensaios, para os quais se determinou a média da emissividade e a média da temperatura superficial de cada amostra, uma vez que as condições ambientais não se alteraram, nem as condições da amostra, por não terem ido à estufa entre os dois ensaios.

No segundo estudo no LEC/IPCB, com a designação de estudo 4, foi realizado um só ensaio. Entre o estudos 3 e 4 as amostras alteraram o seu teor de água por terem

ido à estufa, assim não foi realizado uma média entre eles, apesar das condições ambientais se terem mantido.

No terceiro estudo do LEC/IPCB, com a designação de estudo 5, foram realizados cinco ensaios, dos quais foi feita a média das emissividades e das temperaturas superficiais de cada amostra, pois as condições ambientais e de cada amostra se mantiveram constantes. O valor do teor de água de cada amostra manteve-se constante por as amostras não terem ido à estufa entre estes cinco ensaios.

A cada ensaio corresponde um termograma a partir do qual foi determinada a emissividade.

6.3 Resultados

6.3.1 Emissividade

Seguidamente apresentam-se os resultados obtidos para os diferentes estudos que constituem os ensaios experimentais. Os resultados são apresentados em tabelas fazendo referência ao local dos ensaios, às condições ambientais dos mesmos, identificando as amostras e condições referentes a estas.

No início de cada ambiente distinto é apresentada uma imagem relativa ao local em causa.

6.3.1.1 Emissividade em CNL

A imagem da figura 61 é ilustrativa das condições não laboratoriais onde foram realizados os primeiros ensaios.



Figura 61 - Local da realização do primeiro estudo (CNL) (foto do autor).

Na tabela 13 são apresentadas as condições ambientais não laboratoriais durante a obtenção dos termogramas, para as 8 amostras.

Tabela 13 - Condições Ambientais Não Laboratoriais.

| Local | Temp. Amb. [°C] | H.R. [%] | Temp. Refl. [°C] | Int. Lum. [Lux] |
|-------|-----------------|----------|------------------|-----------------|
| CNL | 11,6 | 84 | 15,0 | 0,68 |

Na tabela 14 são apresentadas as emissividades e as respetivas temperaturas superficiais, para cada termograma de cada ensaio, para as 8 amostras.

Tabela 14 - Valores Registados para a Emissividade das 8 amostras.

| Local | N.º ensaio | Amostras | ϵ | Temp. Sup. Amostra [°C] |
|-------|------------|---------------|------------|-------------------------|
| CNL | 1 | Acácia | 0,835 | 33,1 |
| | 1 | Amieiro | 0,880 | 32,6 |
| | 1 | Carvalho | 0,890 | 36,9 |
| | 1 | Castanho | 0,770 | 38,6 |
| | 1 | Cedro | 0,878 | 39,0 |
| | 1 | Choupo | 0,820 | 37,3 |
| | 1 | Pinho Leiria | 0,975 | 35,1 |
| | 1 | Pinho Serrano | 0,835 | 33,1 |

Na tabela 15 apresentam-se os resultados das determinações das emissividades para as 8 amostras de madeira para CNL.

Tabela 15 - Condições das Amostras e emissividade determinada (CNL).

| Amostra | N de Ensaio | Volume [cm ³] | Peso Seco [g] | Peso [g] | Teor Água [%] | Densidade | Temp. Sup. Amostra [°C] | Emissividade |
|---------------|-------------|---------------------------|---------------|----------|---------------|-----------|-------------------------|--------------|
| Acácia | 1 | 4500 | 2243 | 2794 | 24,6 | 0,621 | 33,1 | 0,835 |
| Amieiro | 1 | 4500 | 1985 | 2374 | 19,6 | 0,528 | 32,6 | 0,880 |
| Carvalho | 1 | 4500 | 3209 | 4078 | 27,1 | 0,906 | 36,9 | 0,890 |
| Castanho | 1 | 4500 | 2399 | 3022 | 26,0 | 0,672 | 38,6 | 0,770 |
| Cedro | 1 | 4500 | 1665 | 1956 | 17,5 | 0,435 | 39,0 | 0,878 |
| Choupo | 1 | 4500 | 1479 | 1771 | 19,7 | 0,394 | 37,3 | 0,820 |
| Pinho Leiria | 1 | 4500 | 2507 | 3006 | 19,9 | 0,668 | 35,1 | 0,975 |
| Pinho Serrano | 1 | 4500 | 1869 | 2157 | 15,4 | 0,479 | 33,1 | 0,835 |

6.3.1.2 Emissividade em LEM/IPG

A imagem da figura 62 é ilustrativa das condições laboratoriais do LEM/IPG, onde foram realizados os segundos ensaios .



Figura 62 - Laboratório da realização do segundo estudo (LEM/IPG) (foto do autor).

Na tabela 16 são apresentadas as condições ambientais do laboratório durante a obtenção dos termogramas, para as 8 amostras no LEM/IPG.

Tabela 16 - Condições Ambientais Laboratoriais LEM/IPG

| Local | Temp. Amb. [°C] | H.R. [%] | Temp. Refl. [°C] | Int. Lum. [Lux] |
|---------|-----------------|----------|------------------|-----------------|
| LEM/IPG | 21,0 | 45 | 21,5 | 2,85 |

Na tabela 17 são apresentadas as emissividades e as respetivas temperaturas superficiais, para cada termograma de cada ensaio, para a amostra de Acácia.

Tabela 17 - Acácia - Valores Registados para a Emissividade

| Local | N.º ensaio | ϵ | Temp. Sup. Amostra [°C] |
|---------|------------|--------------|-------------------------|
| LEM/IPG | 2 | 0,873 | 43,5 |
| | 3 | 0,878 | 43,7 |
| | Média | 0,876 | 43,6 |

Na tabela 18 são apresentadas as emissividades e as respetivas temperaturas superficiais, para cada termograma de cada ensaio, para a amostra de Amieiro.

Tabela 18 - Amieiro - Valores Registados para a Emissividade

| Local | N.º ensaio | ϵ | Temp. Sup. Amostra [°C] |
|---------|------------|------------|-------------------------|
| LEM/IPG | 2 | 0,880 | 43,5 |
| | 3 | 0,905 | 45,6 |
| Média | | 0,893 | 44,6 |

Na tabela 19 são apresentadas as emissividades e as respetivas temperaturas superficiais, para cada termograma de cada ensaio, para a amostra de Carvalho.

Tabela 19 - Carvalho - Valores Registados para a Emissividade

| Local | N.º ensaio | ϵ | Temp. Sup. Amostra [°C] |
|---------|------------|------------|-------------------------|
| LEM/IPG | 2 | 0,905 | 44,2 |
| | 3 | 0,930 | 45,7 |
| Média | | 0,918 | 45,0 |

Na tabela 20 são apresentadas as emissividades e as respetivas temperaturas superficiais, para cada termograma de cada ensaio, para a amostra de Castanho.

Tabela 20 - Castanho - Valores Registados para a Emissividade

| Local | N.º ensaio | ϵ | Temp. Sup. Amostra [°C] |
|---------|------------|------------|-------------------------|
| LEM/IPG | 2 | 0,905 | 42,5 |
| | 3 | 0,915 | 43,6 |
| Média | | 0,910 | 43,1 |

Na tabela 21 são apresentadas as emissividades e as respetivas temperaturas superficiais, para cada termograma de cada ensaio, para a amostra de Cedro.

Tabela 21 - Cedro - Valores Registados para a Emissividade

| Local | N.º ensaio | ϵ | Temp. Sup. Amostra [°C] |
|---------|------------|------------|-------------------------|
| LEM/IPG | 2 | 0,950 | 41,7 |
| | 3 | 0,960 | 45,6 |
| | Média | 0,955 | 43,7 |

Na tabela 22 são apresentadas as emissividades e as respetivas temperaturas superficiais, para cada termograma de cada ensaio, para a amostra de Choupo.

Tabela 22 - Choupo - Valores Registados para a Emissividade

| Local | N.º ensaio | ϵ | Temp. Sup. Amostra [°C] |
|---------|------------|------------|-------------------------|
| LEM/IPG | 2 | 0,860 | 41,6 |
| | 3 | 0,870 | 42,6 |
| | Média | 0,865 | 42,1 |

Na tabela 23 são apresentadas as emissividades e as respetivas temperaturas superficiais, para cada termograma de cada ensaio, para a amostra do Pinho de Leiria.

Tabela 23 - Pinho Leiria - Valores Registados para a Emissividade

| Local | N.º ensaio | ϵ | Temp. Sup. Amostra [°C] |
|---------|------------|------------|-------------------------|
| LEM/IPG | 2 | 0,855 | 42,0 |
| | 3 | 0,873 | 43,4 |
| | Média | 0,864 | 42,7 |

Na tabela 24 são apresentadas as emissividades e as respetivas temperaturas superficiais, para cada termograma de cada ensaio, para a amostra do Pinho Serrano.

Tabela 24 - Pinho Serrano - Valores Registados para a Emissividade

| Local | N.º ensaio | ϵ | Temp. Sup. Amostra [°C] |
|---------|------------|------------|-------------------------|
| LEM/IPG | 2 | 0,855 | 47,1 |
| | 3 | 0,890 | 43,0 |
| | Média | 0,873 | 45,1 |

Na tabela 25 apresentam-se os resultados das determinações das emissividades médias, para as oito amostras de madeira para LEM/IPG.

Tabela 25 - Condições das Amostras e emissividade média (LEM/IPG).

| Amostra | N de Ensaios | Volume [cm ³] | Peso Seco [g] | Peso [g] | Teor Água [%] | Densidade | Temp. Sup. Amostra [°C] | Emissividade |
|---------------|--------------|---------------------------|---------------|----------|---------------|-----------|-------------------------|--------------|
| Acácia | 2 | 4500 | 2243 | 2562 | 14,2 | 0,589 | 43,6 | 0,876 |
| Amieiro | 2 | 4500 | 1985 | 2207 | 11,2 | 0,490 | 44,6 | 0,893 |
| Carvalho | 2 | 4500 | 3209 | 3803 | 18,5 | 0,845 | 45,0 | 0,918 |
| Castanho | 2 | 4500 | 2399 | 2815 | 17,3 | 0,625 | 43,1 | 0,910 |
| Cedro | 2 | 4500 | 1665 | 1845 | 10,8 | 0,410 | 43,7 | 0,855 |
| Choupo | 2 | 4500 | 1479 | 1628 | 10,0 | 0,362 | 42,1 | 0,865 |
| Pinho Leiria | 2 | 4500 | 2507 | 2810 | 12,1 | 0,624 | 42,7 | 0,864 |
| Pinho Serrano | 2 | 4500 | 1869 | 2058 | 10,1 | 0,457 | 45,1 | 0,873 |

6.3.1.3 Emissividade em LEC/IPCB

A imagem da figura 63 é ilustrativa das condições laboratoriais do LEC/IPCB, onde foi realizado o terceiro conjunto de ensaios .



Figura 63 - Condições Laboratoriais do terceiro estudo (LEC/IPCB) (foto do autor).

Na tabela 26 são apresentadas as condições ambientais do laboratório durante a obtenção dos termogramas. para as 8 amostras no LEC/IPCB.

Tabela 26 - Condições Ambientais Laboratoriais LEC/IPCB.

| Local | Temp. Amb. [°C] | H.R. [%] | Temp. Refl. [°C] | Int. Lum. [Lux] |
|----------|-----------------|----------|------------------|-----------------|
| LEC/IPCB | 17,5 | 70 | 17,5 | 0,05 |

Na tabela 27 são apresentadas as emissividades e as respetivas temperaturas superficiais, para cada termograma de cada ensaio, para a amostra de Acácia.

Tabela 27 - Acácia - Valores Registados para a Emissividade

| Local | N.º ensaio | ϵ | Temp. Sup. Amostra [°C] |
|----------|------------|------------|-------------------------|
| LEC/IPCB | 4 | 0,950 | 50,5 |
| | 5 | 0,950 | 45,2 |
| | Média | 0,950 | 46,7 |

Na tabela 28 são apresentadas as emissividades e as respetivas temperaturas superficiais, para cada termograma de cada ensaio, para a amostra de Amieiro.

Tabela 28 - Amieiro - Valores Registados para a Emissividade

| Local | N.º ensaio | ϵ | Temp. Sup. Amostra [°C] |
|----------|------------|------------|-------------------------|
| LEC/IPCB | 4 | 0,925 | 50,4 |
| | 5 | 0,915 | 45,4 |
| | Média | 0,920 | 47,9 |

Na tabela 29 são apresentadas as emissividades e as respetivas temperaturas superficiais, para cada termograma de cada ensaio, para a amostra de Carvalho.

Tabela 29 - Carvalho - Valores Registados para a Emissividade

| Local | N.º ensaio | ϵ | Temp. Sup. Amostra [°C] |
|----------|------------|------------|-------------------------|
| LEC/IPCB | 4 | 0,898 | 49,9 |
| | 5 | 0,902 | 44,9 |
| | Média | 0,900 | 47,4 |

Na tabela 30 são apresentadas as emissividades e as respetivas temperaturas superficiais, para cada termograma de cada ensaio, para a amostra de Castanho.

Tabela 30 - Castanho - Valores Registados para a Emissividade

| Local | N.º ensaio | ϵ | Temp. Sup. Amostra [°C] |
|----------|------------|------------|-------------------------|
| LEC/IPCB | 4 | ND | 50,4 |
| | 5 | ND | 45,3 |
| | Média | ND | 47,9 |

Na tabela 31 são apresentadas as emissividades e as respetivas temperaturas superficiais, para cada termograma de cada ensaio, para a amostra de Cedro.

Tabela 31 - Cedro - Valores Registados para a Emissividade

| Local | N.º ensaio | ϵ | Temp. Sup. Amostra [°C] |
|----------|------------|------------|-------------------------|
| LEC/IPCB | 4 | 0,915 | 49,8 |
| | 5 | 0,913 | 46,4 |
| | Média | 0,914 | 48,1 |

Na tabela 32 são apresentadas as emissividades e as respetivas temperaturas superficiais, para cada termograma de cada ensaio, para a amostra de Choupo.

Tabela 32 - Choupo - Valores Registados para a Emissividade

| Local | N.º ensaio | ϵ | Temp. Sup. Amostra [°C] |
|----------|------------|------------|-------------------------|
| LEC/IPCB | 4 | 0,945 | 50,4 |
| | 5 | 0,935 | 45,2 |
| | Média | 0,940 | 47,8 |

Na tabela 33 são apresentadas as emissividades e as respetivas temperaturas superficiais, para cada termograma de cada ensaio, para a amostra do Pinho de Leiria.

Tabela 33 - Pinho Leiria - Valores Registados para a Emissividade

| Local | N.º ensaio | ϵ | Temp. Sup. Amostra [°C] |
|----------|------------|------------|-------------------------|
| LEC/IPCB | 4 | 0,935 | 50,3 |
| | 5 | 0,925 | 44,8 |
| | Média | 0,930 | 47,6 |

Na tabela 34 são apresentadas as emissividades e as respetivas temperaturas superficiais, para cada termograma de cada ensaio, para a amostra do Pinho Serrano.

Tabela 34 - Pinho Serrano - Valores Registados para a Emissividade

| Local | N.º ensaio | ϵ | Temp. Sup. Amostra [°C] |
|----------|------------|------------|-------------------------|
| LEC/IPCB | 4 | 0,970 | 48,3 |
| | 5 | 0,975 | 44,5 |
| | Média | 0,973 | 46,4 |

Na tabela 35 apresentam-se os resultados das determinações das emissividades médias para as amostras de madeira para o LEC/IPCB.

Tabela 35 - Condições das Amostras e emissividade média (LEC/IPCB)

| Amostra | N de Ensaios | Volume [cm ³] | Peso Seco [g] | Peso [g] | Teor Água [%] | Densidade | Temp. Sup. Amostra [°C] | Emissividade |
|---------------|--------------|---------------------------|---------------|----------|---------------|-----------|-------------------------|--------------|
| Acácia | 2 | 4500 | 2243 | 2434 | 8,5 | 0,541 | 47,9 | 0,950 |
| Amieiro | 2 | 4500 | 1985 | 2097 | 5,6 | 0,466 | 47,9 | 0,920 |
| Carvalho | 2 | 4500 | 3209 | 3635 | 13,3 | 0,808 | 47,4 | 0,900 |
| Castanho | 2 | 4500 | 2399 | 2688 | 12,0 | 0,597 | 47,9 | ND |
| Cedro | 2 | 4500 | 1665 | 1758 | 5,6 | 0,391 | 48,1 | 0,914 |
| Choupo | 2 | 4500 | 1479 | 1548 | 4,7 | 0,344 | 47,8 | 0,940 |
| Pinho Leiria | 2 | 4500 | 2507 | 2677 | 6,8 | 0,595 | 47,6 | 0,930 |
| Pinho Serrano | 2 | 4500 | 1869 | 1970 | 5,4 | 0,438 | 46,4 | 0,973 |

Para a realização do sexto ensaio as condições ambientais são as mesmas que para os ensaios quatro e cinco realizados no LEC/IPCB.

Na tabela 36 são apresentadas as condições ambientais laboratoriais (LEC/IPCB) durante a obtenção dos termogramas. para as 8 amostras, durante sexto ensaio.

Tabela 36 - Condições Ambientais Laboratoriais LEC/IPCB.

| Local | Temp. Amb. [°C] | H.R. [%] | Temp. Refl. [°C] | Int. Lum. [Lux] |
|----------|-----------------|----------|------------------|-----------------|
| LEC/IPCB | 17,5 | 70 | 17,5 | 0,05 |

Na tabela 37 são apresentadas as emissividades e as respetivas temperaturas superficiais, para cada termograma de cada ensaio, para as 8 amostras.

Tabela 37 - Valores Registados para a Emissividade das 8 amostras.

| Local | N.º ensaio | Espécie | ε | Temp. Sup. Amostra [°C] |
|----------|------------|---------------|-------|-------------------------|
| LEC/IPCB | 6 | Acácia | 0,945 | 46,7 |
| | 6 | Amieiro | 0,995 | 45,9 |
| | 6 | Carvalho | 0,965 | 50,0 |
| | 6 | Castanho | ND | 41,5 |
| | 6 | Cedro | 0,930 | 45,3 |
| | 6 | Choupo | 0,935 | 41,5 |
| | 6 | Pinho Leiria | 0,940 | 45,3 |
| | 6 | Pinho Serrano | 0,990 | 41,9 |

Na tabela 38 apresentam-se os resultados das determinações das emissividades para as 8 amostras de madeira.

Tabela 38 - Condições das Amostras no sexto ensaio (LEC/IPCB).

| Amostra | N de Ensaíos | Volume [cm ³] | Peso Seco [g] | Peso [g] | Teor Água [%] | Densidade | Temp. Sup. Amostra [°C] | Emissividade |
|---------------|--------------|---------------------------|---------------|----------|---------------|-----------|-------------------------|--------------|
| Acácia | 1 | 4500 | 2243 | 2339 | 4,3 | 0,520 | 46,7 | 0,945 |
| Amieiro | 1 | 4500 | 1985 | 2053 | 3,4 | 0,456 | 45,9 | 0,995 |
| Carvalho | 1 | 4500 | 3209 | 3473 | 8,2 | 0,772 | 50,0 | 0,965 |
| Castanho | 1 | 4500 | 2399 | 2570 | 7,1 | 0,571 | 41,5 | ND |
| Cedro | 1 | 4500 | 1665 | 1703 | 2,3 | 0,378 | 45,3 | 0,930 |
| Choupo | 1 | 4500 | 1479 | 1514 | 2,4 | 0,336 | 41,5 | 0,935 |
| Pinho Leiria | 1 | 4500 | 2507 | 2589 | 3,3 | 0,575 | 45,3 | 0,940 |
| Pinho Serrano | 1 | 4500 | 1869 | 1920 | 2,7 | 0,427 | 41,9 | 0,990 |

Para o seguinte conjunto de cinco ensaios as condições ambientais foram as mesmas no LEC/IPCB.

Na tabela 39 são apresentadas as condições ambientais do laboratório durante a obtenção dos termogramas. para as 8 amostras no LEC/IPCB.

Tabela 39 - Condições Ambientais Laboratoriais LEC/IPCB.

| Local | Temp. Amb. [°C] | H.R. [%] | Temp. Refl. [°C] | Int. Lum. [Lux] |
|----------|-----------------|----------|------------------|-----------------|
| LEC/IPCB | 17,5 | 70 | 17,5 | 0,05 |

Na tabela 40 são apresentadas as emissividades e as respetivas temperaturas superficiais, para cada termograma de cada ensaio, para a amostra de Acácia.

Tabela 40 - Acácia - Valores Registados para a Emissividade

| Local | N.º ensaio | ϵ | Temp. Sup. Amostra [°C] |
|----------|------------|--------------|-------------------------|
| LEC/IPCB | 7 | 0,963 | 45,2 |
| | 8 | 0,960 | 45,0 |
| | 9 | 0,965 | 44,6 |
| | 10 | 0,960 | 44,4 |
| | 11 | 0,965 | 44,1 |
| | Média | 0,963 | 44,7 |

Na tabela 41 são apresentadas as emissividades e as respetivas temperaturas superficiais, para cada termograma de cada ensaio, para a amostra de Amieiro.

Tabela 41 - Amieiro - Valores Registados para a Emissividade

| Local | N.º ensaio | ϵ | Temp. Sup. Amostra [°C] |
|----------|------------|------------|-------------------------|
| LEC/IPCB | 7 | 0,985 | 43,5 |
| | 8 | 0,990 | 42,8 |
| | 9 | 0,995 | 42,2 |
| | 10 | 0,995 | 41,7 |
| | 11 | 0,995 | 41,3 |
| | Média | 0,992 | 42,3 |

Na tabela 42 são apresentadas as emissividades e as respetivas temperaturas superficiais, para cada termograma de cada ensaio, para a amostra de Carvalho.

Tabela 42 - Carvalho - Valores Registados para a Emissividade

| Local | N.º ensaio | ϵ | Temp. Sup. Amostra [°C] |
|----------|------------|------------|-------------------------|
| LEC/IPCB | 7 | 0,965 | 45,0 |
| | 8 | 0,963 | 45,0 |
| | 9 | 0,960 | 44,9 |
| | 10 | 0,960 | 44,8 |
| | 11 | 0,958 | 44,8 |
| | Média | 0,961 | 44,9 |

Na tabela 43 são apresentadas as emissividades e as respetivas temperaturas superficiais, para cada termograma de cada ensaio, para a amostra de Castanho.

Tabela 43 - Castanho - Valores Registados para a Emissividade

| Local | N.º ensaio | ϵ | Temp. Sup. Amostra [°C] |
|----------|------------|------------|-------------------------|
| LEC/IPCB | 7 | 1,000 | 45,1 |
| | 8 | 1,000 | 45,0 |
| | 9 | 1,000 | 45,1 |
| | 10 | 1,000 | 45,0 |
| | 11 | 1,000 | 44,3 |
| | Média | 1,000 | 44,9 |

Na tabela 44 são apresentadas as emissividades e as respetivas temperaturas superficiais, para cada termograma de cada ensaio, para a amostra de Cedro.

Tabela 44 - Cedro - Valores Registados para a Emissividade

| Local | N.º ensaio | ϵ | Temp. Sup. Amostra [°C] |
|----------|------------|------------|-------------------------|
| LEC/IPCB | 7 | 0,918 | 46,4 |
| | 8 | 0,920 | 45,1 |
| | 9 | 0,913 | 44,6 |
| | 10 | 0,920 | 44,0 |
| | 11 | 0,925 | 43,5 |
| | Média | 0,919 | 44,7 |

Na tabela 45 são apresentadas as emissividades e as respetivas temperaturas superficiais, para cada termograma de cada ensaio, para a amostra de Choupo.

Tabela 45 - Choupo - Valores Registados para a Emissividade

| Local | N.º ensaio | ϵ | Temp. Sup. Amostra [°C] |
|----------|------------|------------|-------------------------|
| LEC/IPCB | 7 | 0,950 | 44,9 |
| | 8 | 0,948 | 44,2 |
| | 9 | 0,950 | 43,6 |
| | 10 | 0,955 | 43,0 |
| | 11 | 0,960 | 42,4 |
| | Média | 0,953 | 43,6 |

Na tabela 46 são apresentadas as emissividades e as respetivas temperaturas superficiais, para cada termograma de cada ensaio, para a amostra do Pinho de Leiria.

Tabela 46 - Pinho Leiria - Valores Registados para a Emissividade

| Local | N.º ensaio | ϵ | Temp. Sup. Amostra [°C] |
|----------|------------|------------|-------------------------|
| LEC/IPCB | 7 | 0,970 | 44,8 |
| | 8 | 0,970 | 44,6 |
| | 9 | 0,970 | 44,4 |
| | 10 | 0,973 | 44,2 |
| | 11 | 0,973 | 44,0 |
| | Média | 0,971 | 44,4 |

Na tabela 47 são apresentadas as emissividades e as respetivas temperaturas superficiais, para cada termograma de cada ensaio, para a amostra do Pinho Serrano.

Tabela 47 - Pinho Serrano - Valores Registados para a Emissividade

| Local | N.º ensaio | ϵ | Temp. Sup. Amostra [°C] |
|----------|------------|------------|-------------------------|
| LEC/IPCB | 7 | 0,985 | 44,4 |
| | 8 | 0,995 | 43,4 |
| | 9 | 0,998 | 42,9 |
| | 10 | 1,000 | 42,1 |
| | 11 | 0,995 | 41,8 |
| | Média | 0,995 | 42,9 |

Na tabela 48 apresentam-se os resultados das determinações das emissividades médias para as 8 amostras de madeira.

Tabela 48 - Condições das Amostras

| Amostra | N de Ensaio | Volume [cm ³] | Peso Seco [g] | Peso [g] | Teor Água [%] | Densidade | Temp. Sup. Amostra [°C] | Emissividade |
|---------------|-------------|---------------------------|---------------|----------|---------------|-----------|-------------------------|--------------|
| Acácia | 5 | 4500 | 2243 | 2336 | 4,1 | 0,519 | 44,7 | 0,963 |
| Amieiro | 5 | 4500 | 1985 | 2050 | 3,3 | 0,456 | 42,3 | 0,992 |
| Carvalho | 5 | 4500 | 3209 | 3466 | 8,0 | 0,770 | 44,9 | 0,961 |
| Castanho | 5 | 4500 | 2399 | 2566 | 7,0 | 0,570 | 44,9 | 1,000 |
| Cedro | 5 | 4500 | 1665 | 1703 | 2,3 | 0,378 | 44,7 | 0,919 |
| Choupo | 5 | 4500 | 1479 | 1515 | 2,4 | 0,337 | 43,6 | 0,953 |
| Pinho Leiria | 5 | 4500 | 2507 | 2588 | 3,2 | 0,575 | 44,4 | 0,971 |
| Pinho Serrano | 5 | 4500 | 1869 | 1922 | 2,8 | 0,427 | 42,9 | 0,995 |

6.3.2 Síntese dos Resultados

Neste item apresenta-se uma síntese dos resultados que se divide em duas partes:

a primeira, em termos de condições ambientais, nos três locais de realização dos ensaios, para poder permitir uma comparação entre os mesmos;

a segunda, em termos de resultados obtidos para a emissividade de cada amostra, para todas as condições ambientais.

6.3.2.1 Condições Ambientais

Na tabela 49 são apresentadas as condições ambientais a que foram sujeitas as 8 amostras de madeira no decurso dos 5 estudos efetuados.

Tabela 49 - Resumo dos 5 Estudos e Respetivas Condições Ambientais

| Local | N. do Estudo | N. de Ensaios | Identificação Dos Ensaios | Temp. Amb. [°C] | H.R. [%] | Temp. Refl. [°C] | Int. Lum. [Lux] |
|----------|--------------|---------------|------------------------------|-----------------|----------|------------------|-----------------|
| CNL | 1 | 1 | 1 | 11,6 | 84 | 15,0 | 0,68 |
| LEM/IPG | 2 | 2 | 2 | 21,0 | 45 | 21,5 | 2,85 |
| | | | 3 | | | | |
| | 3 | 2 | 4 | | | | |
| LEC/IPCB | 4 | 1 | 5 | 17,5 | 70 | 17,5 | 0,05 |
| | | | 6 | | | | |
| | | | 7 | | | | |
| | 5 | 5 | 8 | | | | |
| | | | 9 | | | | |
| | | 10 | | | | | |
| | | 11 | | | | | |

6.3.2.2 Por Amostra de Madeira

Na tabela 50 apresentam-se as variações das condições da amostra de Acácia e respetivo valor de emissividade para os diferentes estudos.

Tabela 50 - Acácia - Condições da Amostra - Emissividade

| Amostra | Local | N. do Estudo | Condições da Amostra | | | | | Emissividade |
|---------|----------|--------------|----------------------|----------|---------------|-----------|-------------------------|--------------|
| | | | Peso Seco [g] | Peso [g] | Teor Água [%] | Densidade | Temp. Sup. Amostra [°C] | |
| Acácia | CNL | 1 | 2243 | 2794 | 24,6 | 0,621 | 36,2 | 0,925 |
| | LEM/IPG | 2 | | 2562 | 14,2 | 0,569 | 43,6 | 0,876 |
| | | 3 | | 2434 | 8,5 | 0,541 | 47,9 | 0,950 |
| | LEC/IPCB | 4 | | 2339 | 4,3 | 0,520 | 46,7 | 0,945 |
| | | 5 | | 2336 | 4,1 | 0,519 | 44,7 | 0,963 |

Na tabela 51 apresentam-se as variações das condições da amostra de Amieiro e respetivo valor de emissividade para os diferentes estudos.

Tabela 51 - Amieiro - Condições da Amostra - Emissividade

| Amostra | Local | N. do Estudo | Condições da Amostra | | | | | Emissividade |
|---------|----------|--------------|----------------------|----------|---------------|-----------|-------------------------|--------------|
| | | | Peso Seco [g] | Peso [g] | Teor Água [%] | Densidade | Temp. Sup. Amostra [°C] | |
| Amieiro | CNL | 1 | 1985 | 2374 | 19,6 | 0,528 | 32,6 | 0,880 |
| | LEM/IPG | 2 | | 2207 | 11,2 | 0,490 | 44,6 | 0,893 |
| | | 3 | | 2097 | 5,6 | 0,466 | 47,9 | 0,920 |
| | LEC/IPCB | 4 | | 2053 | 3,4 | 0,456 | 45,9 | 0,995 |
| | | 5 | | 2050 | 3,3 | 0,456 | 42,3 | 0,992 |

Na tabela 52 apresentam-se as variações das condições da amostra de Carvalho e respetivo valor de emissividade para os diferentes estudos.

Tabela 52 - Carvalho - Condições da Amostra - Emissividade

| Amostra | Local | N. do Estudo | Condições da Amostra | | | | | Emissividade |
|----------|----------|--------------|----------------------|----------|---------------|-----------|-------------------------|--------------|
| | | | Peso Seco [g] | Peso [g] | Teor Água [%] | Densidade | Temp. Sup. Amostra [°C] | |
| Carvalho | CNL | 1 | 3209 | 4078 | 27,1 | 0,906 | 36,9 | 0,890 |
| | LEM/IPG | 2 | | 3803 | 18,5 | 0,845 | 45,0 | 0,918 |
| | | 3 | | 3635 | 13,3 | 0,808 | 47,4 | 0,900 |
| | LEC/IPCB | 4 | | 3473 | 8,2 | 0,772 | 44,9 | 0,902 |
| | | 5 | | 3466 | 8,0 | 0,770 | 44,9 | 0,961 |

Na tabela 53 apresentam-se as variações das condições da amostra de Castanho e respetivo valor de emissividade para os diferentes estudos.

Tabela 53 - Castanho - Condições da Amostra - Emissividade

| Amostra | Local | N. do Estudo | Condições da Amostra | | | | | Emissividade |
|----------|----------|--------------|----------------------|----------|---------------|-----------|-------------------------|--------------|
| | | | Peso Seco [g] | Peso [g] | Teor Água [%] | Densidade | Temp. Sup. Amostra [°C] | |
| Castanho | CNL | 1 | 2399 | 3022 | 26,0 | 0,672 | 38,6 | 0,770 |
| | LEM/IPG | 2 | | 2815 | 17,3 | 0,625 | 43,1 | 0,910 |
| | | 3 | | 2688 | 12,0 | 0,597 | 47,9 | ND |
| | LEC/IPCB | 4 | | 2570 | 7,1 | 0,571 | 41,5 | ND |
| | | 5 | | 2566 | 7,0 | 0,570 | 44,9 | 1,00 |

Na tabela 54 apresentam-se as variações das condições da amostra de Cedro e respetivo valor de emissividade para os diferentes estudos.

Tabela 54 - Cedro - Condições da Amostra - Emissividade

| Amostra | Local | N. do Estudo | Condições da Amostra | | | | | Emissividade |
|---------|----------|--------------|----------------------|----------|---------------|-----------|-------------------------|--------------|
| | | | Peso Seco [g] | Peso [g] | Teor Água [%] | Densidade | Temp. Sup. Amostra [°C] | |
| Cedro | CNL | 1 | 1665 | 1956 | 17,5 | 0,435 | 39,0 | 0,878 |
| | LEM/IPG | 2 | | 1845 | 10,8 | 0,410 | 43,7 | 0,855 |
| | | 3 | | 1758 | 5,6 | 0,391 | 48,1 | 0,914 |
| | LEC/IPCB | 4 | | 1703 | 2,3 | 0,378 | 45,3 | 0,930 |
| | | 5 | | 1703 | 2,3 | 0,378 | 44,7 | 0,919 |

Na tabela 55 apresentam-se as variações das condições da amostra de Choupo e respetivo valor de emissividade para os diferentes estudos.

Tabela 55 - Choupo - Condições da Amostra - Emissividade

| Amostra | Local | N. do Estudo | Condições da Amostra | | | | | Emissividade |
|---------|----------|--------------|----------------------|----------|---------------|-----------|-------------------------|--------------|
| | | | Peso Seco [g] | Peso [g] | Teor Água [%] | Densidade | Temp. Sup. Amostra [°C] | |
| Choupo | CNL | 1 | 1479 | 1771 | 19,7 | 0,394 | 37,3 | 0,820 |
| | LEM/IPG | 2 | | 1628 | 10,0 | 0,362 | 42,1 | 0,865 |
| | | 3 | | 1548 | 4,7 | 0,344 | 47,8 | 0,940 |
| | LEC/IPCB | 4 | | 1514 | 2,4 | 0,336 | 41,5 | 0,935 |
| | | 5 | | 1515 | 2,4 | 0,337 | 43,6 | 0,953 |

Na tabela 56 apresentam-se as variações das condições da amostra de Pinho Leiria e respetivo valor de emissividade para os diferentes estudos.

Tabela 56 - Pinho Leiria - Condições da Amostra - Emissividade

| Amostra | Local | N. do Estudo | Condições da Amostra | | | | | Emissividade |
|--------------|----------|--------------|----------------------|----------|---------------|-----------|-------------------------|--------------|
| | | | Peso Seco [g] | Peso [g] | Teor Água [%] | Densidade | Temp. Sup. Amostra [°C] | |
| Pinho Leiria | CNL | 1 | 2507 | 3006 | 19,9 | 0,668 | 35,1 | 0,975 |
| | LEM/IPG | 2 | | 2810 | 12,1 | 0,624 | 42,7 | 0,864 |
| | | 3 | | 2677 | 6,8 | 0,595 | 47,6 | 0,930 |
| | LEC/IPCB | 4 | | 2589 | 3,3 | 0,575 | 45,3 | 0,940 |
| | | 5 | | 2588 | 3,2 | 0,575 | 44,4 | 0,971 |

Na tabela 57 apresentam-se as variações das condições da amostra de Pinho Serrano e respetivo valor de emissividade para os diferentes estudos.

Tabela 57 - Pinho Serrano - Condições da Amostra - Emissividade

| Amostra | Local | N. do Estudo | Condições da Amostra | | | | | Emissividade |
|---------------|----------|--------------|----------------------|----------|---------------|-----------|-------------------------|--------------|
| | | | Peso Seco [g] | Peso [g] | Teor Água [%] | Densidade | Temp. Sup. Amostra [°C] | |
| Pinho Serrano | CNL | 1 | 1869 | 2157 | 15,4 | 0,479 | 33,1 | 0,835 |
| | LEM/IPG | 2 | | 2058 | 10,1 | 0,457 | 45,1 | 0,873 |
| | | 3 | | 1970 | 5,4 | 0,438 | 46,4 | 0,973 |
| | LEC/IPCB | 4 | | 1920 | 2,7 | 0,427 | 41,9 | 0,990 |
| | | 5 | | 1922 | 2,8 | 0,427 | 42,9 | 0,995 |

6.4 Discussão

6.4.1 Fatores Relevantes e Dificuldades

Neste item são analisados fatores relevantes para os resultados obtidos e dificuldades surgidas no decorrer dos ensaios.

6.4.1.1 Teor de Água das Amostras

Antes do início de todos os ensaios foi utilizado um humidímetro (Hydromette RTU 600 da GANN) ver figura 64, para determinação do teor em água superficial das amostras. Os estudos só começaram quando o teor de água das amostras foi inferior a 20%, valor para o qual se considera a madeira apta a ser comercializada (Coutinho, 1999).

Para a medição do teor de água através deste instrumento é necessário realizar uma correção em função da espécie de madeira a ser analisada. Uma vez que este instrumento mede resistências elétricas e esta grandeza pode variar consideravelmente para diferentes espécies de madeira com o mesmo conteúdo de água. Assim, com o humidímetro RTU 600 podem definir-se aproximadamente 81 calibrações diferentes para uma correção automática das leituras em função da espécie (GANN, 1993, 2006).

Tabela 58 - Utilização do Humidímetro, valores determinados e calibração utilizada.

| Nome Comum | Nome Científico | Teor de Humidade | Tabela Humidímetro | X-Y |
|---------------|--------------------------------------|------------------|---------------------------------------|-------|
| Acácia | <i>Acacia dealbata</i> Link | 19,3 | Acacia, Bastard | 6 - 5 |
| Amieiro | <i>Alnus glutinosa</i> (L.) Gaertner | 18,0 | Alno = Gluta = Ameneiro | 6 - 5 |
| Carvalho | <i>Quercus rubra</i> L. | 18,3 | Roble | 4 - 5 |
| Castanho | <i>Castanea sativa</i> Miller | 18,3 | Castano = Castanha Comestível | 6 - 5 |
| Cedro | <i>Cedrus deodara</i> (D. Don) | 16,8 | Ceder = Cedro (Pinaceae) | 7 - 2 |
| Choupo | <i>Populus tremula</i> L. | 17,1 | Chope blanco = Alamo trémulo = Poplar | 8 - 1 |
| Pinho Leiria | <i>Pinus pinaster</i> Aiton | 18,3 | Pino Bravo = Pino Marítimo = Pinaster | 6 - 5 |
| Pinho Serreno | <i>Pinus pinaster</i> Aiton | 15,7 | Pino Bravo = Pino Marítimo = Pinaster | 6 - 5 |

Estes valores só puderam ser confirmados, pela aplicação da Norma NP614:1973, no final dos ensaios. Na tabela seguinte podemos constatar que afinal havia amostras que ainda ultrapassavam o valor de 20% de teor de água.

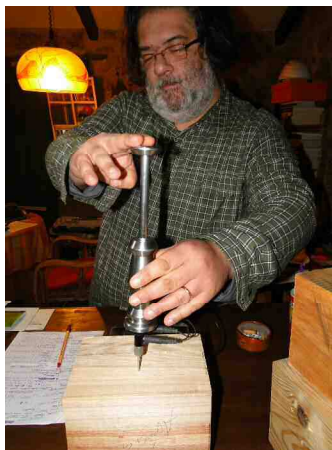


Figura 64 - Determinação do Teor de Água superficial de uma amostra através da aplicação de humidímetro (foto do autor).

Tabela 59 - Comparação dos valores do Teor de Água obtidos pela NP614:1973 e Humidímetro.

| Amostras | Teor de Água NP 614:1973 | Teor de Água Humidímetro |
|----------------------|---------------------------------|---------------------------------|
| Acácia | 24,6% | 19,3% |
| Amieiro | 19,6% | 18,0% |
| Carvalho | 27,1% | 18,3% |
| Castanho | 26,0% | 18,3% |
| Cedro | 17,5% | 16,8% |
| Choupo | 19,7% | 17,1% |
| Pinho Leiria | 19,9% | 18,3% |
| Pinho Serrano | 15,4% | 15,7% |

O humidímetro determina valores de teor de água próximo da superfície, à profundidade de acravamento dos pinos, cerca de 1,0 a 1,7cm. Estes valores determinados nem sempre coincidem com o total de teor de água da amostra. Os casos mais discrepantes são o do Carvalho, o Castanho e a Acácia, assim estas amostras apresentavam afinal mais de 20% de teor de água.

6.4.1.2 Geração do Gradiente Térmico

No primeiro ambiente (CNL) o instrumento utilizado para aquecimento foi um forno de cozinha, cujas resistências, superior e inferior, não estavam protegidas, contribuindo para a existência de heterogeneidades de aquecimento nas amostras. Para minimizar esta situação, cada amostra foi envolvida por papel de alumínio, o qual foi retirado imediatamente antes de se efetuarem as observações.

Outra consequência da utilização deste forno foi o facto de só ter capacidade para uma amostra de cada vez. Assim cada amostra foi aquecida individualmente, ao contrário do que aconteceu nos dois ambientes laboratoriais, em que as amostras foram aquecidas todas ao mesmo tempo.

As temperaturas das amostras no processo de determinação da emissividade são ligeiramente diferentes. No entanto existiu o cuidado de que a temperatura de observação fosse o mais uniforme possível, para todas as amostras, garantindo que existia pelo menos uma diferença de temperatura superior a 20°C em relação à temperatura ambiente. Convém que esta diferença seja o maior possível, para que os resultados também sejam mais fiáveis, segundo o que vem em informação da Norma ASTM E1933-99a (Reapproved 2010), tendo neste trabalho como limite a temperatura máxima de observação da câmara termográfica, que neste caso é de 50°C, aproximadamente.

O segundo ambiente foi o único no qual não foi possível controlar, para todas as amostras, de igual forma, a quantidade de luz existente no local de realização dos ensaios, uma vez que este local possuía janelas com cortinas não totalmente opacas. A luminosidade do dia foi muito variável, com a passagem de nuvens. No ambiente CNL a luz existente era artificial sempre no mesmo local e sempre com a mesma intensidade. No terceiro ambiente LEC/IPCB optou-se por realizar os ensaios sem qualquer luz o que permitiu que a temperatura refletida fosse igual à temperatura ambiente.

Nos três ambientes o teor de água das amostras foi diminuindo do primeiro para o terceiro. Só é possível determinar o valor do teor de água para cada amostra no final dos ensaios, quando se aplicou a norma NP 614.

Há ainda a referir, no terceiro ambiente LEC/IPCB, o problema da elevada reflexão existente, devido ao facto das paredes estarem revestidas com azulejos, o que fazia com que não se conseguisse ver a amostra. Este problema foi resolvido colocando um painel de corticite a revestir a área de azulejo que influenciava o local para onde era efetuada a observação, como se pode observar na imagem da figura 65.

Na secção dos resultados no ambiente referente ao LEC/IPCB existe uma imagem que retrata o ambiente descrito, já com o painel de corticite aplicado.



Figura 65 - Termograma obtido em resultado da reflexão, da radiação emitida pelo corpo humano, nos azulejos (LEC/IPCB) (foto do autor).

6.4.2 Análise dos Valores Máximo e Mínimo Obtidos para a Emissividade, nos diferentes Ambientes, e respetivo Teor de Água para cada Amostra

Vão agora ser analisados os valores das emissividades obtidos para cada amostra nos diferentes estudos. Não é feita uma média de todos os valores da emissividade, entre os diferentes estudos, uma vez que as condições ambientais e o teor em água de cada amostra variam bastante de estudo para estudo, como se pode observar nas tabelas dos resultados. Assim, não foi realizada uma média total para a emissividade de cada amostra de madeira.

Temos assim como resultados finais os que a seguir se descrevem.

Amostra de Acácia

A emissividade da amostra de Acácia variou entre o valor menor de 0,876, para o estudo 2 no LEM/IPG, em que a Temperatura Ambiente é de 21°C e a Humidade Relativa é de 45%, e o valor máximo de 0,963, para o estudo 5 no LEC/IPCB em que a Temperatura Ambiente é de 17,5°C e a Humidade Relativa é de 70%.

O Teor de Água da amostra é de 14,2% para a emissividade de 0,876 e de 4,1% para a emissividade de 0,963.

Amostra de Amieiro

A emissividade mais baixa para a amostra de Amieiro obteve-se em CNL e é de 0,880 em que a Temperatura Ambiente é de 11,6°C e a Humidade Relativa é de 84%, para um Teor de Água da amostra de 19,6%. O valor mais elevado é de 0,995, para o estudo 4, no LEC/IPCB, a uma Temperatura Ambiente de 17,5°C e Humidade Relativa de 70%, com um Teor de Água de 3,4%.

Amostra de Carvalho

A emissividade da amostra de Carvalho variou entre o valor menor de 0,890, com um Teor de Água de 27,1%, no estudo 1, em CNL, e o valor máximo de 0,961 para um Teor de Água de 8% na amostra, no estudo 5 no LEC/IPCB. As condições ambientais variaram, respetivamente, entre 11,6°C com 84% de Humidade Relativa e 17,5°C a 70%.

Amostra de Castanho

A emissividade da amostra de Castanho variou entre 0,770 e 1,000, para CNL, no estudo 1, com um Teor de Água de 26% e para o LEC/IPCB, no estudo 5, com um Teor de Água de 7%. As condições ambientais eram de 11,6°C a 84% e 17,5°C a 70%, respetivamente.

Nesta amostra há ainda a acrescentar que, para os estudos 3 e 4, não foi possível determinar o valor da emissividade, provavelmente pelo surgimento de fissuras na amostra, que levaram a discrepâncias nos valores de temperatura superficial, entre o lado da fita e o lado sem fita, porém esta situação não é muito clara, uma vez que, para o estudo 5 no LEC/IPCB, foi possível determinar novamente o valor da emissividade, sendo igual a 1,000, apesar de terem sido realizados um maior número de ensaios, não referenciados nas tabelas de resultados para os quais não se conseguiu obter o valor da emissividade.

Amostra de Cedro

Na amostra de Cedro o valor mais baixo de emissividade foi de 0,855, para o segundo estudo em LEM/IPG, e o valor mais elevado foi de 0,930, para o quarto estudo no LEC/IPCB. O Teor de Água da amostra variou entre 10,8% e 2,3%.

As condições ambientais oscilaram entre 21°C e 17,5°C para a temperatura ambiente e 45% a 70% para a humidade relativa, pela mesma ordem.

Amostra de Choupo

A amostra de Choupo variou o valor da emissividade entre 0,820 e 0,953, para os teores de água da amostra de 19,7% e 2,4%, respetivamente. Estes valores foram obtidos para CNL, 1º estudo, com 11,6°C e 84% de humidade relativa e LEC/IPCB, 5º estudo, com 17,5°C e 70% de humidade relativa.

Amostra de Pinho de Leiria

Esta amostra apresenta valores de emissividade entre 0,864 e 0,975, para os correspondentes valores de teor de água da amostra de 12,1% e 19,9%. O primeiro valor foi obtido no LEM/IPG, no estudo 2 e o valor mais alto de emissividade encontrou-se no CNL, primeiro estudo. No LEM/IPG a temperatura ambiente era de 11,6°C e humidade relativa de 84%, enquanto que no CNL os valores eram de 21°C e 45%.

Amostra de Pinho Serrano

No caso da amostra de Pinho Serrano a emissividade varia entre o valor mais baixo de 0,835, em CNL, no estudo 1, com 15,4% de teor de água da amostra, e o valor mais elevado de 0,995, em LEC/IPCB, no estudo 5, com 2,8% de teor de água. As condições ambientais de temperatura e humidade relativa variaram entre 11,6°C a 84% e 17,5°C a 70%, para os respetivos ambientes.

Constatação da comparação da emissividade máxima e mínima com a variação do teor de água de cada amostra.

Comparando somente, para cada amostra, os valores mínimo e máximo da emissividade com os respetivos teores de água, verifica-se que, quando diminui o teor de água o valor da emissividade é mais elevado. Porém, esta constatação é contrariada na amostra de Pinho de Leiria em CNL.

6.4.3 Comparação dos Valores Obtidos para a Emissividade com os de Outros Autores

Para cada ensaio e para cada amostra os valores da emissividade e temperatura superficial da amostra foram determinados através da média de uma área de função quadrado do software utilizado.

Os resultados apresentados são válidos para as condições ambientais e condições da amostra que se encontram nas respetivas tabelas anteriores, na secção resultados.

Os valores obtidos para a emissividade estão em conformidade com a bibliografia consultada, com valores elevados, da ordem dos 0,9.

Conforme é referido por Rice (2004), os fabricantes de equipamentos medidores de temperatura por Infravermelhos recomendam frequentemente 0,94 e 0,95 para a emissividade da madeira em geral e condições genéricas.

O fabricante FLIR indica valores a rondar os 0,8 a 0,9 para madeira aplainada, também referidos por Childs, como citado em Rice (2004), e de 0,7 a 0,8 para madeira branca húmida, para uma temperatura de 20°C e janela espectral total. Ainda apresentam valores mais elevados de 0,962 para janela espectral de 6,5 a 20 μm , para 19°C e de 0,98, para janela espectral de 2-5 μm , a 17°C.

Existem tabelas que apontam o intervalo 0,8 a 0,9 para a banda espectral de 8 a 14 μm como o caso de OMEGA, o fabricante RoMiotto e a FLUKE com o intervalo 0,9 a 0,95 para a banda espectral de 8 a 14 μm , não referindo os valores de temperatura.

Também Tanaka e Divós (2000) utilizam o valor de 0,98 como pode ser observado através de um termograma do seu estudo.

López *et al.* (2013 June), após o estudo de emissividades que efetuaram para, diferentes temperaturas, chegaram ao valor de 0,924 para a madeira em geral, como sendo aquele que gera menor erro na determinação da sua temperatura, para a banda espectral de 7,5-13 μm .

Holst (2000) propõe o valor de 0,85 para a banda espectral de 8-14 μm e temperatura de 25°C, para a madeira aplainada, referindo o ângulo normal à superfície para a observação.

Dos valores consultados na bibliografia, podemos salientar que o valor de emissividade mais baixo encontrado, se refere a madeira húmida branca, para 20°C, que é o intervalo de 0,7 a 0,8 (FLIR Systems, 2006a). Apesar de tudo, geralmente, não é referido o teor de água das amostras.

O valor máximo de emissividade encontrado é de 0,98 utilizado por Tanaka e Divós (2000), que referem o teor de água de 12%.

Porém, a comparação de resultados é dificultada, pois os valores existentes na bibliografia reportam-se a outras condições de ensaio ou a experiências cujas condições não são referidas, tanto em termos das características ambientais, como a temperatura ambiente e janela espectral de observação, como das condições relativas à própria amostra, como sejam o acabamento superficial, teor de água, densidade e a própria espécie de madeira, nomeadamente o seu nome científico.

Sempre que se refere a emissividade de um material natural, como é o caso da madeira, é importante indicar também um conjunto de fatores, dos quais a emissividade depende, designadamente a distância entre a máquina e a amostra, o ângulo de observação, janela espectral em que é feita a observação, temperatura ambiente e outras condições ambientais, tais como humidade relativa do ar, luminosidade, temperatura refletida e a temperatura da superfície da amostra.

A diferença entre a temperatura da amostra e a temperatura ambiente deve ser o mais constante possível, durante a determinação da emissividade, por este facto, neste trabalho, a determinação da emissividade foi realizada através de termogramas. Também se deve ter em consideração que quanto mais elevada é esta diferença, mais rigorosa é a determinação da emissividade, conforme consta na Norma ASTM, com o limite superior a partir do qual se deterioram as propriedades físicas do elemento em

estudo, ou no caso deste estudo a limitação da própria câmara de termografia que não lê valores de temperatura acima dos 50°C. Devem ser referidos, também, o tipo de acabamento superficial, identificação da espécie (através da referência ao nome científico), cor, teor de água da amostra e sua densidade. Todos estes fatores condicionam o valor que se determina para a emissividade. Por outro lado, só assim se poderá ter uma noção comparativa das emissividades determinadas em diferentes condições e, assim, mais corretamente, escolher para uma situação real de análise da temperatura superficial, com a técnica de termografia por infravermelhos. Mesmo assim, poderão ocorrer variações nos valores encontrados, quer por parâmetros associados ao meio quer por aspetos relacionados com a própria amostra. Com efeito, sendo a madeira um material natural, existe uma grande variabilidade entre espécies e, mesmo dentro de uma mesma árvore, de local para local, de onde se retira a amostra (cerne ou borne) ou mesmo a forma de corte (direção paralela ou perpendicular ao fio).

Não foram encontrados na literatura consultada valores determinados exatamente nas mesmas condições, tais como a temperatura ambiente, janela espectral e espécie em estudo. De qualquer modo, a bibliografia sobre a temática é escassa e geralmente não apresenta, de forma objetiva, todos os parâmetros relevantes a ter em consideração na medição. Na tabela onde se compilou a bibliografia consultada, apresentam-se alguns dados retirados da FLIR, nos quais não é dada qualquer informação acerca do ângulo de incidência da lente da câmara relativamente à amostra. Acresce que é raro os autores indicarem qual o processo usado no aquecimento da superfície da amostra, apesar deste ser outro fator que condiciona o valor da emissividade, segundo Fronapfel e Stolz (2006). E que nem todos os tipos de aquecimento são convenientes (Flir Systems, 2006a).

6.4.4 Relação da Emissividade com outros parâmetros

6.4.4.1 Relação da Emissividade com o Teor de Água das amostras

Conforme referido no final da secção 6.4.2 na análise dos valores máximos e mínimos obtidos para a emissividade nos diferentes ambientes e respetivo Teor de Água para cada amostra, constatou-se que as amostras apresentavam uma emissividade mais elevada quando o seu Teor em Água era menor.

Desta forma, vamos agora procurar se existe uma relação linear entre a emissividade e o Teor em Água, para cada amostra. Para tal, após se terem introduzido os valores em gráficos, procurou-se encontrar uma relação linear, a qual será tanto mais consistente quanto mais próximo de 1 for o valor do coeficiente de correlação.

Nos gráficos das figuras seguintes, desde a 66 à 73, ilustra-se a variação do valor da emissividade em função do teor em água para cada uma das amostras estudadas.

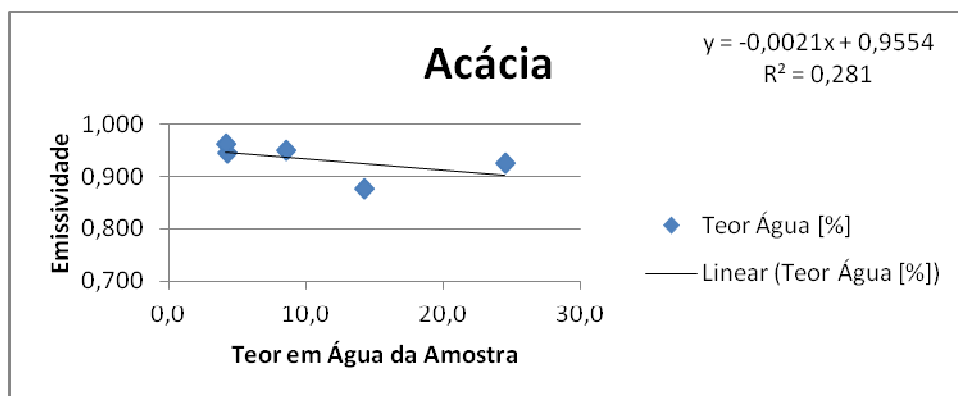


Figura 66 - Variação do valor da emissividade em função do Teor em Água para a amostra de Acácia.

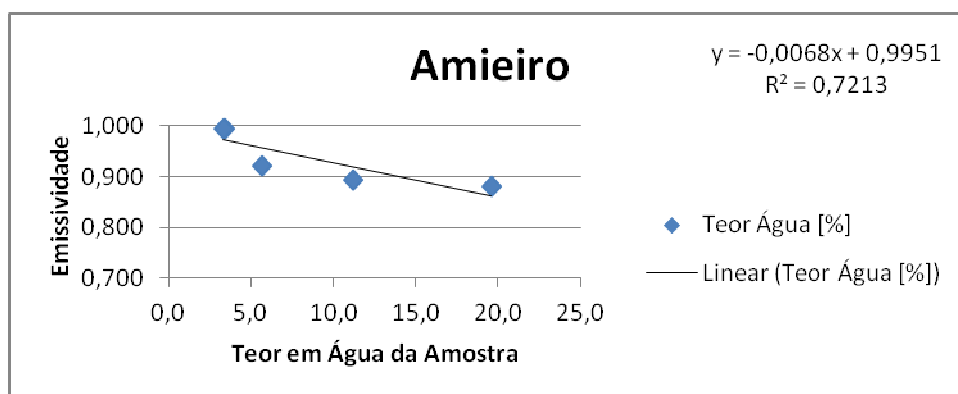


Figura 67 - Variação do valor da emissividade em função do Teor em Água para a amostra de Amieiro.

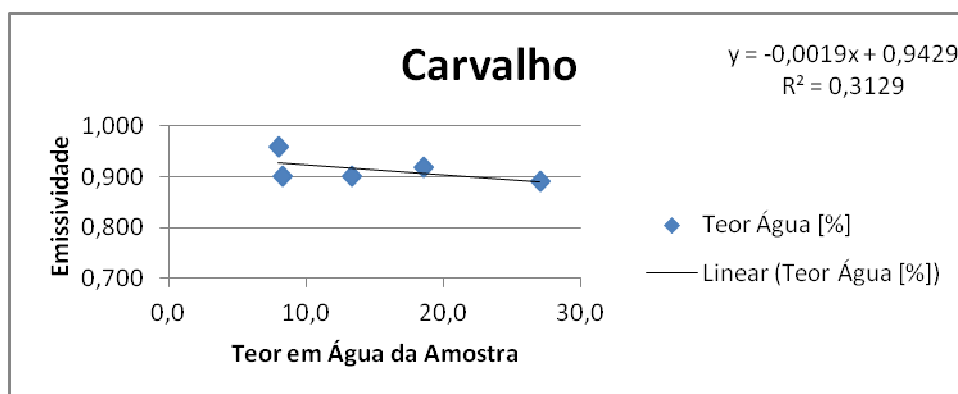


Figura 68 - Variação do valor da emissividade em função do Teor em Água para a amostra de Carvalho.

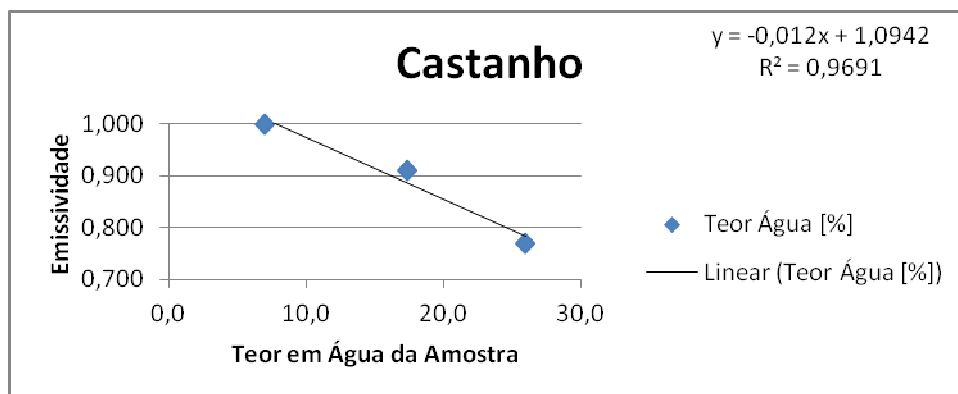


Figura 69 - Variação do valor da emissividade em função do Teor em Água para a amostra de Castanho.

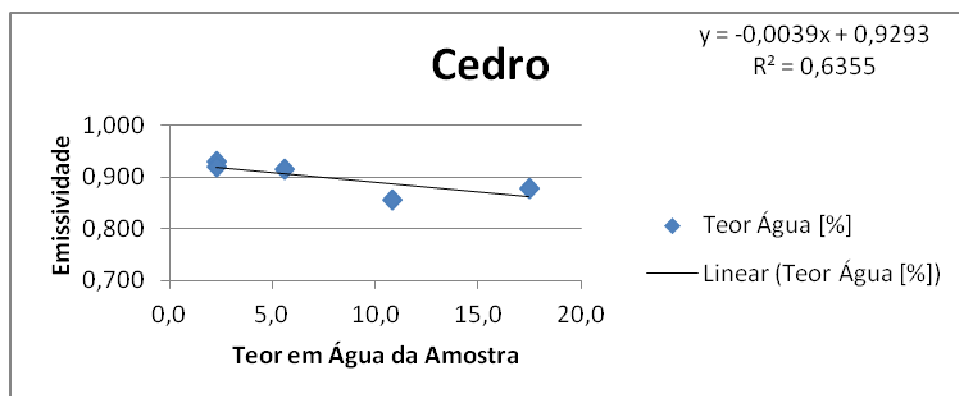


Figura 70 - Variação do valor da emissividade em função do Teor em Água para a amostra de Cedro.

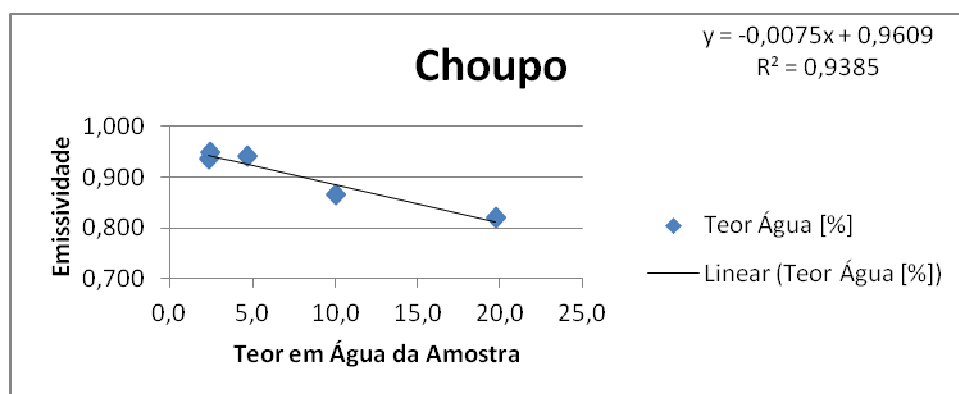


Figura 71 - Variação do valor da emissividade em função do Teor em Água para a amostra de Choupo.

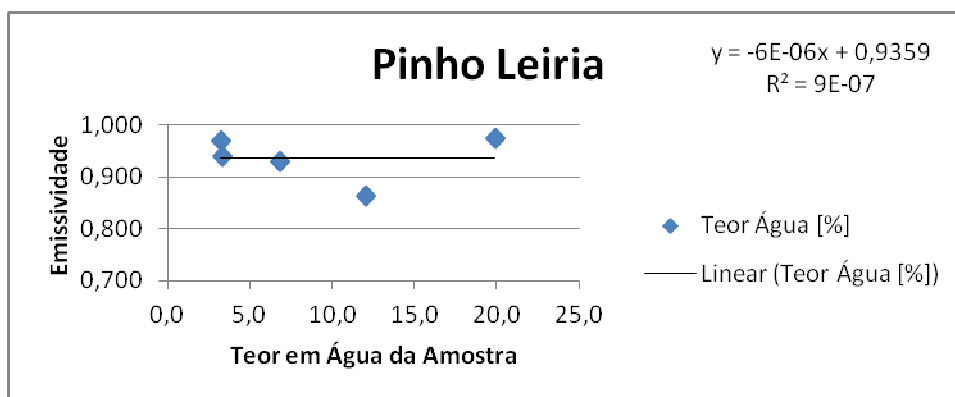


Figura 72 - Variação do valor da emissividade em função do Teor em Água para a amostra de Pinho de Leiria.

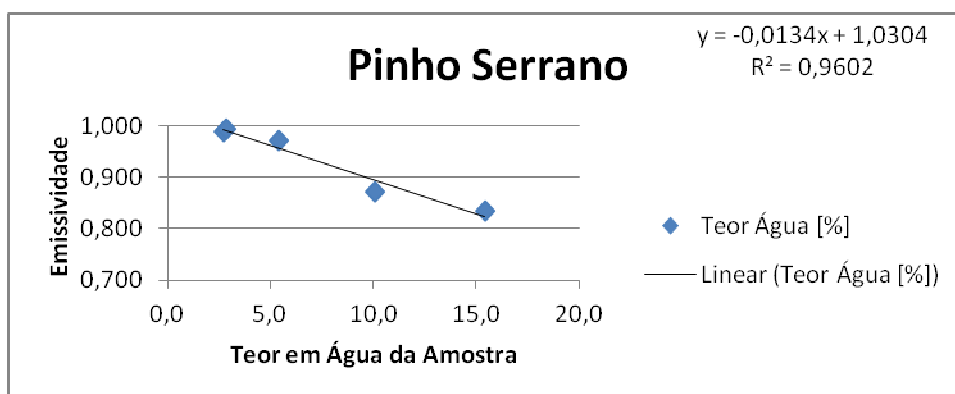


Figura 73 - Variação do valor da emissividade em função do Teor em Água para a amostra de Pinho Serrano.

A correlação da aproximação linear é forte para as amostras de Castanho (embora só tenhamos 3 valores) $R^2=0,9691$, para o Pinho Serrano com $R^2=0,9602$ e para o Choupo com $R^2=0,9385$.

Esta correlação não é tão forte para as amostras de Amieiro com $R^2=0,7213$ e Cedro com $R^2=0,6355$.

Esta correlação é fraca para as amostras de Carvalho com $R^2=0,3129$ e Acácia com $R^2=0,281$ e inexistente para o Pinho de Leiria $R^2=9 \times 10^{-7}$.

Se retirarmos dos resultados o valor obtido em CNL, o Pinho de Leiria passa a ter uma correlação $R^2=0,9106$, ou seja forte, bem como a Acácia, com $R^2=0,8273$, só Carvalho continua com uma aproximação fraca de $R^2=0,1031$.

Este facto talvez se justifique por uma grande heterogeneidade no aquecimento das amostras em CNL.

7. Conclusões

7.1 Considerações Finais

Este trabalho de investigação experimental visou obter informação relevante para a análise do estado de conservação de edifícios e estruturas de madeira, utilizando madeira existente em Portugal e vulgarmente utilizada na construção.

Foram obtidos valores de emissividade para as amostras de madeira, em diferentes condições ambientais.

Os valores de emissividade das oito amostras distintas de madeira, de sete espécies, foram obtidos para três condições ambientais diferentes, que se encontram descritas na tabela 49. As medições foram realizadas sempre à distância de 0,5 m e com as dimensões da face observada de 0,20 m x 0,15 m, de forma a minimizar erros provenientes da envolvente. Foi utilizada a banda espectral de 7,5 a 13 μm , em consonância com as características da termocâmara utilizada, FLIR B20. As amostras observadas não tinham qualquer tipo de acabamento, conforme o que se pode observar habitualmente *in situ*. Dois dos espécimes estudados, embora da mesma espécie, eram provenientes de zonas com climas diferentes e possuíam distintos valores de densidade.

Os resultados obtidos para a emissividade enquadram-se nos valores apresentados na bibliografia para a madeira. No entanto, dentro da literatura não foram encontrados trabalhos que reunissem as mesmas condições de observação no que diz respeito à temperatura ambiente e banda espectral usadas neste trabalho. Há ainda a acrescentar que as espécies observadas não são encontradas na bibliografia, sendo ainda muito rara a referência com o nome científico.

Trabalhos deste tipo são relevantes uma vez que uma emissividade incorreta pode levar a resultados imprecisos na interpretação dos termogramas e daí a falsas conclusões.

A forma correta de obter valores de temperatura para sistemas de termografia IV e suas aplicações, é estabelecendo a emissividade dos materiais a serem testados, porém muitas vezes esta abordagem não é possível no decurso das investigações *in situ*. Neste caso, devem então ser recolhidas amostras de material para serem testadas em laboratório, havendo o cuidado de o fazer para as mesmas condições ambientais, pois podem existir diferentes fatores *in situ* que poderão alterar os resultados.

Na literatura existe pouco trabalho publicado sobre valores de emissividade para madeira e seus derivados. Assim, uma listagem de emissividades de diferentes espécies de madeira, para diferentes temperaturas ambientes e diferentes valores de

humidade relativa ambiental, que constitua um manual de referência para edifícios/estruturas de madeira é oportuna e relevante.

A emissividade varia com o tipo de acabamento da superfície, com a janela espectral, com a temperatura e com o ângulo de observação. Assim, é importante apresentar estes dados para os valores de emissividade que se determinam, de forma a que se possa proceder a uma comparação entre resultados e a permitir uma mais clara utilização dos mesmos.

Os teores de água das amostras também variaram ao longo dos estudos, tendo sido analisada a influência deste fator nos valores obtidos para a emissividade. Parece existir uma relação linear entre o valor da emissividade e o teor em água das amostras. No entanto, esta relação não é totalmente evidente uma vez que ao mesmo tempo que variou o teor de água das amostras, as condições ambientais onde foram realizados os ensaios não foram sempre as mesmas, o que interferiu conjuntamente para o valor da emissividade.

Para a análise qualitativa o valor da emissividade não é relevante. No entanto, uma escolha adequada pode facilitar a visualização, na imagem térmica, das diferenças de temperatura.

O valor da emissividade adequado é importante para a correta determinação da temperatura de uma superfície. É ainda mais importante, quando o que se pretende é salientar diferenças de temperatura existentes num elemento, uma vez que o valor dessa diferença de temperatura é indicador da provável existência de deterioração ou outra manifestação patológica.

7.2. Proposta de Desenvolvimento Futuro

Determinação da emissividade para diferentes amostras da mesma espécie nas mesmas condições ambientais e verificar o alcance da variação da emissividade para esta situação.

Estudar a emissividade das amostras para diferentes distâncias da máquina à amostra, tentando manter constantes os restantes parâmetros, como são exemplos a salientar, a janela espectral, o ângulo de observação, a temperatura ambiente, a humidade relativa do ar, a luminosidade, a temperatura refletida, a temperatura da superfície da amostra, o teor de água da amostra, o acabamento superficial, a espécie de madeira da amostra e a orientação da fibra.

Com os parâmetros citados anteriormente, haverá ainda o interesse em efetuar uma análise de sensibilidade, fazendo variar individualmente cada um dos parâmetros.

8. Referências Bibliográficas

- ASTM E1933-99a (Reapproved 2010). (2010). Standard Test Methods for Measuring and Compensating for Emissivity Using Infrared Imaging Radiometers, American Society for Testing and Materials, West Conshohocken, PA, USA.
- Avdelidis, N., & Moropoulou, A. (2003). Emissivity Considerations in Building Thermography. *Energy and Buildings*, 35, pp. 663-667.
- Barreira, E. (2004). *Aplicação da Termografia ao Estudo do Comportamento Higrotérmico dos Edifícios*. Tese de Mestrado, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Porto, Portugal.
- Brioschi, M. (2013). *A História da Termografia*. São Paulo, Instituto de Física de São Carlos da Universidade de São Paulo. Recuperado em 03 março, 2013, de <http://www.la.ifsc.usp.br/art/ahistoriadatermografia.pdf>
- Brito e Silva, M. (2010). *Estruturas de Madeira*. Recuperado em 20 abril, 2014, de [http://professor.ucg.br/siteDocente/admin/arquivosUpload/3095/material/Estruturas%20de%20madeira%20\(2010-2\).pdf](http://professor.ucg.br/siteDocente/admin/arquivosUpload/3095/material/Estruturas%20de%20madeira%20(2010-2).pdf)
- Bruninghoff, H., Dietsch, P., & Hosl, M. (2010). Measurement of Timber Moisture Content. In P. Dietsch & J. Köhler (Ed.). *Assessment of Timber Structures: COST Action 55 - Modelling of the Performance of Timber Structures*. Aachen: Shaker Verlag.
- Bucur, V. (2003a). *Nondestructive Characterization and Imaging of Wood*. New York: Springer.
- Bucur, V. (2003b). Techniques for High Resolution Imaging of Wood Structure: a review. *Measurement Science and Technology*, 14, pp. R91-R98.
- Catena, A. (2003, June). Thermography Reveals Hidden Tree Decay. *Arboricultural Journal* 27(1), pp. 27-42.
- Ciocia, C., & Marinetti, S. (2012, June). *In-situ Emissivity Measurement of Construction Materials. Proceedings of 11th International Conference on Quantitative InfraRed Thermography*, Naples, Italy.
- Cóias, V. (2006). *Inspeções e Ensaios na Reabilitação de Edifícios*. (pp. 330 - 333). Lisboa: IST Press.
- Conde, M., Liñán, C., Rubio de Hita, P., & Gálvez, F. (2012). Infrared Thermography Applied to Wood. *Research in Nondestructive Evaluation*, vol. (23), Issue 1, pp. 32-45.
- Contreras, J. (1998). Termografia Infrarroja: Una valiosa herramienta. *Energúa: Revista de Ingeniería Energética*, Año XXIV (3), pp. 95-100.
- Cortizo, E. (2007). *Avaliação da Técnica de Termografia Infravermelha para Identificação de Estruturas Ocultas e Diagnóstico de Anomalias em Edificações: Ênfase em Edificações do Património Histórico*. Tese de Doutoramento, Universidade Federal de Minas Gerais, Minas Gerais, Brasil.
- Coutinho, J. (1999). *Madeiras* [Apostila de Materiais de Construção I]. Porto: Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto. Recuperado em 7 janeiro, 2014, de <http://paginas.fe.up.pt/~jcouti/Madeiras%2099.pdf>
- Crisóstomo, J., Pitarma, R., & Jorge, L. (2013, novembro). Emissividade de Amostras de *Pinus pinaster*: Contribuição para Avaliação por Termografia IV [versão eletrónica]. *International Conference on Engineering UBI, ICEUBI 2013 University of Beira Interior*, Covilhã, Portugal.

Dietsch, P., & Hosl, M. (2010a). Endoscopy. In P. Dietsch & J. Köhler (Ed.). *Assessment of Timber Structures: COST Action 55 - Modelling of the Performance of Timber Structures*. Aachen: Shaker Verlag.

Dietsch, P., & Hosl, M. (2010b). Visual (Hands-on) Inspection. In P. Dietsch & J. Köhler (Ed.). *Assessment of Timber Structures: COST Action 55 - Modelling of the Performance of Timber Structures*. Aachen: Shaker Verlag.

Dietsch, P., & Hosl, M. (2010c). Mapping of Cracks. In P. Dietsch & J. Köhler (Ed.). *Assessment of Timber Structures: COST Action 55 - Modelling of the Performance of Timber Structures*. Aachen: Shaker Verlag.

Dietsch, P., & Hosl, M. (2010d). Penetration Resistance. In P. Dietsch & J. Köhler (Ed.). *Assessment of Timber Structures: COST Action 55 - Modelling of the Performance of Timber Structures*. Aachen: Shaker Verlag.

Dietsch, P., & Hosl, M. (2010e). Tapping (Sounding). In P. Dietsch & J. Köhler (Ed.). *Assessment of Timber Structures: COST Action 55 - Modelling of the Performance of Timber Structures*. Aachen: Shaker Verlag.

Dinis, B. (2009). *Termografia Aplicada à Física das Construções*. Monografia de Final de Curso de Engenharia Civil, Universidade Fernando Pessoa, Porto, Portugal.

Doebelin, E. (1990). *Measurement Systems Application and Design* (4th ed., p. 688). Singapore: McGraw-Hill International Editions.

Erasmus. (2013). *Breve Historia de la Termografía*. Recuperado em 02 janeiro, 2013, de <http://www.erasmus.com.co/pdf/camaras/Breve%20Historia%20de%20la%20Termografia.pdf>

FLIR Systems. (2006a). *Manual do Utilizador da FLIR ThermaCAM B20*. FLIR.

FLIR Systems. (2006b). *Manual do Utilizador do Software FLIR ThermaCAM QuickView 1.3*. FLIR.

FLIR Systems. (2006c). *Manual do Utilizador do Software FLIR ThermaCAM Reporter 7.0*. FLIR.

Fronapfel, E., & Stolz, B. (2006). Emissivity Measurements of Common Construction Materials. *InfraMation Proceedings*. Recuperado em 10 janeiro, 2012, de <http://www.callsbsa.com/wp-content/uploads/2011/03/Emissivity-Measurements-of-Common-Construction-Materials.pdf>

GANN Mess-u. Regeltechnik GmbH. (1993). *Hydromette RTU 600: Instrucciones de empleo*. [Manual]. Stuttgart, Germany.

GANN Mess-u. Regeltechnik GmbH. (2006). *Tabla de Maderas*. [Manual]. Stuttgart, Germany.

Gaussorgues, G. (1984). *La Thermographie Infrarouge*. Paris: Lavoisier.

Gervásio, H. (2013). Análise de Ciclo-de-Vida de Casas em Madeira. In P. Lourenço *et al.* (Ed.). *Casas de Madeira: Livro de Atas Seminário LNEC*. Lisboa.

Grossman, J. (2004). *IR Thermography as a Tool for the Pest Management Professional*, Miami, Florida, Hi-Tech Inspection Services, Inc. Recuperado em 05 Janeiro, 2012, de www.irinfo.org/articles/article_8_1_2004_grossman.pdf

Grossman, J. (2006). *Trestles Anyone?: A Thermographic Nightmare*, Miami, Florida, Hi-Tech Inspection Services, Inc. Recuperado em 05 Janeiro, 2012, de www.irinfo.org/articles/article_6_2006_grossman.pdf

Hellebrand, H., Beuche, H., & Linke, M. (2001). *Determination of Thermal Emissivity and Surface Temperature Distribution of Horticultural Products*. Germany: Institute of Agricultural Engineering Bornim. Recuperado em 10 janeiro, 2012, de http://www2.atb-potsdam.de/hauptseite-deutsch/Institut/Abteilungen/abt2/Mitarbeiter/jhellebrand/jhellebrand/Publikat/6th_symp_FNVE2001.pdf

Holst, G. (2000). *Common Sense Approach to Thermal Imaging*. Washington: SPIE Optical Engineering Press.

Hosl, M., & Dietsch, P. (2010). Measurement of Environmental Conditions. In P. Dietsch & J. Köhler (Ed.). *Assessment of Timber Structures: COST Action 55 - Modelling of the Performance of Timber Structures*. Aachen: Shaker Verlag.

Ibarra-Castanedo, C., Bendada, A., & Maldague, X. (2011, October). Infrared Vision Applications for the Nondestructive Testing of Materials. *Proceedings of the 5th Pan American Conference for NDT*, Cancun, México.

IPQ, NP 614: *Madeiras* (1973). Determinação do Teor de Água. Portugal.

Kandemir-Yucel, A., Tavukcuoglu, A., & Caner-Saltik, E. (2007). In situ Assessment of Structural Timber Elements of a Historic Building by Infrared Thermography and Ultrasonic Velocity. *Infrared Physics & Tecnology* 49, pp. 243-248.

Kang, W., Lee, Yong-Hun, Kang, Chun-Won, Chung, Woo-Yang, Xu, Hui-Lan, & Matsumura, J. (2011). Using the Inverse Method to Estimate the Solar Absorptivity and Emissivity of Wood Exposed to the Outdoor Environment, *J. Fac. Agr., Kyushu Univ.*, 56(1) pp. 139-148. QIR. Recuperado em 15 janeiro, 2012, de <http://jairo.nii.ac.jp/0001/00016258/en>

Kasal, B. (2010). Core-Drilling. In B. Kasal & T. Tannert (Ed.). *In Situ Assessment of Structural Timber: RILEM State of the Art Reports*. Breinigsville: Springer.

Kreuzinger, H., & Dietsch, P. (2010). Dynamic Response. In P. Dietsch & J. Köhler (Ed.). *Assessment of Timber Structures: COST Action 55 - Modelling of the Performance of Timber Structures*. Aachen: Shaker Verlag.

Kutin, M., Ristic, S., Prvulovic, M., Prokolab, M., Markovic, N., & Radosavljevic, M. (2011). Application of Thermography During Tensile Testing of Butt Welded Joints. *Faculty of Mechanical Engineering Transactions*, 39, pp. 133-138. Recuperado em 10 Janeiro, 2012, de: http://www.mas.bg.ac.rs/istrazivanje/biblioteka/publikacije/Transactions_FME/Volume39/3/05_MR_Prvulovic.pdf

Liñán, C., Conde, M., Rubio de Hita, P., & Gálvez, F. (2011). Inspección Mediante Técnicas No Destructivas de un Edificio Histórico: Oratorio San Felipe Neri (Cádiz). *Informes de la Construcción*, 63(521), pp. 13-22.

Liñán, C., Conde, M., Rubio de Hita, P., & Gálvez, F. (2012). Analysis of the Influence of Density on Infrared Thermography and of the Scope of this Technique in the Detection of Internal Defects in Wood. *Materiales de Construcción*, 62(305), pp.99-113.

Lombillo, I., Agudo, E., & Villegas, L. (2007). *Evaluación no Destructiva Del Patrimonio Construido: Inspección Visual, Técnicas Acústicas, Electromagnéticas y Tomográficas*. 11º Congreso Español de Ensayos No Destructivos. Gijón. España. Recuperado em 21 março, 2013, de <http://grupos.unican.es/gted/archivos/otros/ponencias/aend.pdf>

López, G., Basterra, L., & Acuña, L. (2013). Estimation of Wood Density Using Infrared Thermography. *Construction and Building Materials*, vol. (42), pp. 29-32.

López, G., Basterra, L., Acuña, L., & Casado, M. (2013, June). Determination of the Emissivity of Wood for Inspection by Infrared Thermography. *Journal of Nondestructive Evaluation*, 32(2), pp. 172-176.

Luong, M. (2004). Mechanical Performance of Wood Construction Materials. *Proceedings of the 16th WCNDT - World Conference on NDT Aug30-Set3*, Montreal, Canada. Recuperado em 10 junho, 2013, de 212.8.206.21/article/wcndt2004/pdf/thermography_thermal_techniques/52_luong.pdf

Maldaque, X. (1993). *Nondestructive Evaluation of Materials by Infrared Thermography*. London: Springer-Verlag.

Marinetti, S., & Cesaratto, P. (2012). Emissivity Estimation for Accurate Quantitative Thermography. *NDT&E International*, 51, pp. 127-134.

Mário, M. (2011). *Uso da Termografia como Ferramenta não Destrutiva para Avaliação de Manifestações Patológicas Ocultas*. Trabalho Final de Curso, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, Brasil.

Meinlschmidt, P. (2005, May). Thermographic Detection of Defects in Wood and Wood-based Materials. *Proceedings of the 4th International Symposium of Nondestructive Testing of Wood*, Hannover, Germany.

Minkina, W., & Dudzik, S. (2009). *Infrared Thermography: Errors and Uncertainties*. Wiley.

Morales-Conde, M., Rodriguez-Liñán, C., & Rubio de Hita, P. (2013). Application of Non-Destructive Techniques in the Inspection of the Wooden Roof of Historic Buildings: a case study. In M. Piazza & M. Riggio (Eds.). *Advanced Materials Research, Structural Health Assessment of Timber Structures* (Vol. 778, pp. 233-242). Trans Tech Publications, Switzerland.

Oliveira, T. (2012). *Análise de Sistemas de Energia e Máquinas Elétricas com Recurso à Termografia*. Tese de Mestrado, Universidade do Porto, Porto, Portugal.

Prakash Rao, D. (2008, May). Infrared Thermography and its Applications in Civil Engineering. *The Indian Concrete Journal*, vol. (82), Edition 5, pp 41-50.

Quantitative Infrared Thermography. (2013). Recuperado em 02 janeiro, 2013, de <http://qirt.gel.ulaval.ca/index.php>

Raphael de Almeida, E. (2010). *Inspeção Termográfica de Danos por Impacto em Laminados Compósitos Sólidos de Matriz Polimérica Fortalecida com Fibras de Carbono*. Tese de Mestrado, Universidade de São Paulo, São Paulo, Brasil.

Rice, R. (2004). Emissance Factors for Infrared Thermometers Used for Wood Products. *Wood and Fiber Science*, 36(4) pp. 520-526.

Rodrigues de Sousa, L. (2010). *Aplicação da Termografia no Estudo do Isolamento Térmico de Edifícios*. Tese de Mestrado, Universidade de Aveiro, Aveiro, Portugal.

RoMiotto, Instrumentos de Medição Ltda. (2011). *Como Determinar a Emissividade dos Objetos*. Recuperado em 10 julho, 2012, de http://www.romiotto.com.br/raytek/tecnologia/valores_tipicos_de_emissividade.pdf

Rosina, E., & Robison, E. (2002). The Application of Infrared Thermography on Wood-Framed North American Historic Buildings. *Bulletin APT (Association for Preservation Technology International)*, 33(4) pp. 37-44.

Sociedade Brasileira de Física (2013). Espectro-eletromagnético. Recuperado em 03 outubro, 2013, de <http://www.sbfisica.org.br/v1/pion/index.php/publicacoes/imagens/130-espectro-eletromagnetico>

Spencer, M. (2008). *Applying Infrared Thermography for the Purpose of Identifying Concealed Wood Framing Member Type and Subsurface Anomalies with Intended Application Towards Historic Structures*. Lexington, Kentucky, National Center for Preservation Technology and Training - Technology Serving the Future of America's Heritage. Recuperado em 12 março, 2012, de <http://ncptt.nps.gov/wp-content/uploads/2008-06.pdf>

Tanaka, T. (1994, July). Preparatory Investigation For Thermographic Detection of Biodeteriorated Location In Wood. *Proceedings of the Pacific Timber Engineering Conference*, Gold Coast Australia.

Tanaka, T., & Divós, F. (2000). Wood Inspection by Thermography. *Proceedings of the 12th International Symposium on Nondestructive Testing of Wood*. Recuperado em 21 maio, 2012, de <http://www.NDT.net/article/v06n03/Tanaka/Tanaka.htm>

Tannert, T. (2010a). Core Drilling. In P. Dietsch & J. Köhler (Ed.). *Assessment of Timber Structures: COST Action 55 - Modelling of the Performance of Timber Structures*. Aachen: Shaker Verlag.

Tannert, T. (2010b). Drill Resistance. In P. Dietsch & J. Köhler (Ed.). *Assessment of Timber Structures: COST Action 55 - Modelling of the Performance of Timber Structures*. Aachen: Shaker Verlag.

Tannert, T. (2010c). Pullout Resistance. In P. Dietsch & J. Köhler (Ed.). *Assessment of Timber Structures: COST Action 55 - Modelling of the Performance of Timber Structures*. Aachen: Shaker Verlag.

Tannert, T. (2010d). Stress Waves. In P. Dietsch & J. Köhler (Ed.). *Assessment of Timber Structures: COST Action 55 - Modelling of the Performance of Timber Structures*. Aachen: Shaker Verlag.

Tannert, T. (2010e). X-Ray. In P. Dietsch & J. Köhler (Ed.). *Assessment of Timber Structures: COST Action 55 - Modelling of the Performance of Timber Structures*. Aachen: Shaker Verlag.

Wikipedia (2013a). *Termografia*. Recuperado em 21 maio, 2013, de <http://pt.wikipedia.org/wiki/Termografia>

Wikipedia (2013b). *Thermography*. Recuperado em 02 março, 2013, de <http://en.wikipedia.org/wiki/Thermography>

Wild, W. (2007). Application of Infrared Thermography in Civil Engineering. *Proceedings of the Estonian Academy of Sciences*, vol. (13), Edition 4, pp. 436-444.

Wyckhuysse, A., & Maldague, X. (2001a). A Study of Wood Inspection by Infrared Thermography, Part I: Wood Pool Inspection by Infrared Thermography [Eletronic version], *Research in Nondestructive Evaluation*, 13(1), pp. 1-12.

Wyckhuysse, A., & Maldague, X. (2001b). A Study of Wood Inspection by Infrared Thermography, Part II: Thermography for Wood Defects Detection, [Eletronic version] *Research in Nondestructive Evaluation*, 13(1), pp. 13-21.

Wyckhuysse, A., & Maldague X. (2002). Wood Inspection by Infrared Thermography. *Proceedings of IVth. IWASPNDE*, 6, pp. 201-206.