

Jorge Pinto, Marcos Teixeira, Cunha VMCF, António Arede, João Miranda Guedes, Sandra Cunha, Artur Feio, Humberto Varum. Correlação entre ensaios com câmara termográfica e resistógrafo na avaliação da integridade de vigas antigas de madeira. 9º congresso nacional de mecânica experimental. CNME 2014. Universidade de Aveiro. 15-17 outubro 2014.

## CORRELAÇÃO ENTRE ENSAIOS COM CÂMARA TERMOGRÁFICA E RESISTÓGRAFO NA AVALIAÇÃO DA INTEGRIDADE DE VIGAS ANTIGAS DE MADEIRA

Jorge Pinto<sup>1,2</sup>, Marcos Teixeira<sup>1,3</sup>, Vítor M.C.F. Cunha<sup>1,3</sup>, António Arede<sup>4</sup>, João Miranda Guedes<sup>4</sup>, Sandra Cunha<sup>1,2</sup>, Artur Feio<sup>5</sup>, Humberto Varum<sup>6</sup>

<sup>1</sup> Universidade de Trás-os-Montes e Alto Douro, Vila Real, Portugal

<sup>2</sup> C-MADE, Universidade da Beira Interior, Covilhã, Portugal

<sup>3</sup> ISE, Universidade do Minho, Guimarães, Portugal

<sup>4</sup> FEUP, Universidade do Porto, Porto, Portugal

<sup>5</sup> Universidade Lusíada, V.N. Famalicão, Portugal

<sup>6</sup> Departamento de Engenharia Civil, Universidade de Aveiro, Aveiro, Portugal

### Resumo:

*Este trabalho de investigação pretende dar um contributo no campo das técnicas não destrutivas de inspeção e de diagnóstico de vigas antigas de madeira. Para o efeito, correlacionou-se os resultados obtidos através do uso do resistógrafo e da termografia no estudo de uma viga recolhida num edifício de habitação unifamiliar que foi sujeito a um processo de remodelação. Verificou-se que poderá haver uma certa correlação entre ensaios. Contudo, também se recomenda a realização de um número mais expressivo de ensaios de amostras para ser possível apresentar uma conclusão mais fidedigna. A relevância desta possível correlação prende-se com o facto de poder haver uma alternância na realização destes ensaios consoante os condicionalismos do cenário de obra.*

**Palavras-chave:** Resistógrafo; termografia; estruturas de madeira; reabilitação; técnicas de ensaio

### 1 – INTRODUÇÃO

O património construído requer trabalhos regulares de manutenção para ser preservado de forma adequada. Infelizmente, nem sempre tais acções são realizadas justificando a existência de um número expressivo de construções antigas em estado de degradação avançado, por vezes, irreversível. Este facto é sublinhado em Pinto *et al* (2014).

Quando se trata de construções anteriores ao uso generalizado do betão armado, é quase certo o uso de elementos estruturais de madeira, nomeadamente, na estrutura dos pavimentos, das escadas interiores, das paredes interiores e da cobertura.

A avaliação da integridade estrutural destes elementos construtivos em obra é uma tarefa nem sempre fácil devido à inacessibilidade e à falta de segurança por vezes verificada nas construções. Por outro

lado, é importante dispor de técnicas eficazes neste processo de avaliação que sejam simples de aplicar em obra e que sejam preferencialmente não, ou pouco intrusivas.

O uso do resistógrafo enquadra-se nas condições referidas, justificando amplamente a sua vasta aplicação neste contexto. Paralelamente, a técnica da termografia preenche os mesmos requisitos, podendo apresentar um potencial de aplicação interessante no estudo de elementos construtivos de madeira antigos em serviço.

O resistógrafo é um equipamento utilizado em processos de inspeção da integridade estrutural de material lenhoso, na detecção de apodrecimento, na análise da qualidade da madeira e no estudo do crescimento anual lenhoso através da medição da resistência mecânica por intermédio de

Jorge Pinto, Marcos Teixeira, Cunha VMCF, António Arede, João Miranda Guedes, Sandra Cunha, Artur Feio, Humberto Varum. Correlação entre ensaios com câmara termográfica e resistógrafo na avaliação da integridade de vigas antigas de madeira. 9º congresso nacional de mecânica experimental. CNME 2014. Universidade de Aveiro. 15-17 outubro 2014.

perfuração, Feio (2006) e Lourenço *et al* (2007).

Por sua vez, o ensaio de termografia é um outro tipo de ensaio não destrutivo amplamente utilizado no contexto da construção civil, não só na análise de elementos de madeira mas também noutros contextos tais como por exemplo nos trabalhos de peritagem de avaliação do desempenho térmico de elementos construtivos aplicados em obra, Tanaka (2001).

Neste trabalho de investigação e no âmbito das técnicas de inspeção e diagnóstico não destrutivas, uma viga antiga de madeira foi ensaiada simultaneamente com o resistógrafo e termograficamente. Os resultados obtidos foram relacionados entre si no sentido de encontrar uma possível correlação. A viga estudada era de madeira de Castanho (*Castanea sativa*), com 5.64 m de vão e fazia parte do pavimento do rés-do-chão de um edifício de habitação do tipo unifamiliar, datado dos finais do século XIX, inícios do século XX, localizado em Amarante.

Este artigo está estruturado do seguinte modo: Inicialmente, o edifício de habitação unifamiliar usado como caso de estudo é apresentado e descrito de forma sucinta. Nesta fase, é dada uma ênfase à viga de madeira que será âmbito deste estudo; Seguidamente, a parte experimental alusiva ao ensaio do resistógrafo da viga de madeira é apresentada. A descrição deste ensaio, a apresentação e a análise dos respectivos resultados são tarefas processadas nesta secção; Depois, a secção subsequente é relativa à análise termográfica da viga; A tentativa de correlação de ensaios é a tarefa processada e exposta seguidamente; Finalmente, algumas considerações finais relativas aos resultados alcançados com a realização deste trabalho de investigação são expostas.

## 2 – CASO DE ESTUDO

O edifício de caso de estudo deste trabalho de investigação é relativo a um edifício de

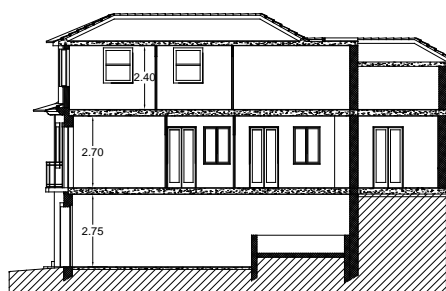
habitação unifamiliar, datado dos finais do século XIX, inícios do século XX, localizado em Amarante e que é constituído por três pisos (semicave, rés-do-chão e águas-furtadas), Figura 1. As paredes exteriores da semicave e do rés-do-chão são em alvenaria de pedra de granito da região e as das águas-furtadas eram em tabique. As paredes interiores também eram em tabique. Os pavimentos, a escada interior de ligação do rés-do-chão às águas-furtadas e a estrutura da cobertura eram de madeira maciça.

A recolha de amostras de madeira dos diversos elementos estruturais permitiu identificar experimentalmente as espécies de madeira aplicadas em obra. Verificou-se que no pavimento das águas-furtadas a generalidade dos elementos estruturais eram de madeira de eucalipto (*Eucalyptus globulus*), e apenas as tábuas do soalho e do forro eram de madeira de pinho bravo (*Pinus pinaster*). No pavimento do rés-do-chão os elementos estruturais eram de madeira de castanho (*Castanea sativa*) e as tábuas de soalho eram de madeira de pinho bravo. Na generalidade, a madeira mais aplicada nos elementos estruturais horizontais foi o eucalipto. A aplicação da madeira de castanho foi circunscrita ao pavimento do rés-do-chão e talvez por ser o sistema estrutural horizontal mais arrojado no sentido que tinha de vencer um vão livre expressivo (5.64 m). Por sua vez, nos elementos estruturais verticais de madeira verificou-se que a madeira de pinho bravo foi a espécie escolhida tanto para o fasquio como para as tábuas verticais.



a) Vista geral

Jorge Pinto, Marcos Teixeira, Cunha VMCF, António Arede, João Miranda Guedes, Sandra Cunha, Artur Feio, Humberto Varum. Correlação entre ensaios com câmara termográfica e resistógrafo na avaliação da integridade de vigas antigas de madeira. 9º congresso nacional de mecânica experimental. CNME 2014. Universidade de Aveiro. 15-17 outubro 2014.

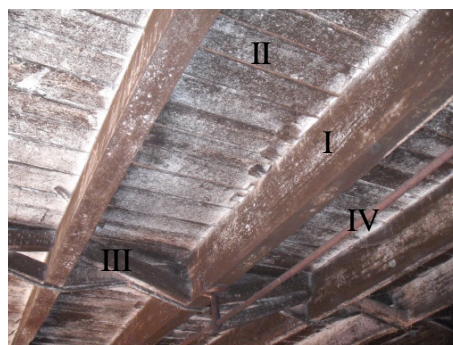


b) Corte longitudinal (m)

Figura 1: Edifício de caso de estudo

No estudo de correlação entre ensaios com câmara termográfica e resistógrafo na avaliação da integridade de vigas antigas de madeira foi usada uma viga constituinte do pavimento do rés-do-chão deste edifício, Figura 2.a. Tratava-se de uma solução estrutural de pavimento de madeira tradicional do tipo viga e tábua de soalho. As vigas estavam afastadas entre si sensivelmente de 0,64 m e estavam travadas transversalmente aos terços por dois alinhamentos de tarugos cruzados. As vigas estavam apoiadas numa parede de alvenaria de pedra de granito (apoio da extremidade direita) e num cachorro corrido de pedra (apoio da extremidade esquerda). Algumas vigas de madeira eram reforçadas estruturalmente por um pré-esforço exterior constituído por aplicação de um varão metálico e análogo ao exposto na Figura 2.a. A viga estudada neste trabalho de investigação é deste tipo.

Este edifício foi sujeito a um processo de remodelação que contemplou a demolição de todo o interior que era construído essencialmente por elementos de madeira. Apenas foi excepção a preservação das paredes exteriores de alvenaria de pedra de granito. Esta opção tomada pelo Dono da Obra permitiu a recolha da viga para posterior estudo em laboratório, Figura 2.b.



a) Face inferior do pavimento



b) Viga no laboratório

Legenda: I – Viga; II – Tábua de soalho; III – Tarugo; IV – Varão metálico

Figura 2: Pavimento de onde foi recolhida a amostra de viga

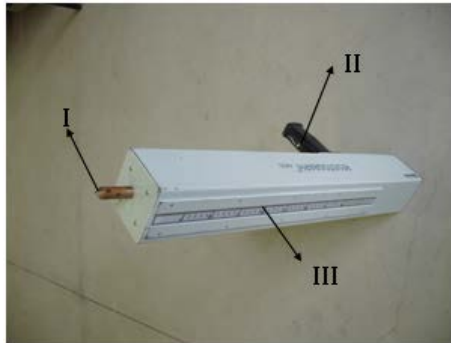
### 3 – ENSAIO DO RESISTÓGRAFO

Existem três componentes do resistógrafo que são importantes referir especificamente e que estão identificadas na Figura 3.a. O componente I é o local por onde a agulha sai e que tem de estar posicionado no ponto de perfuração e em contacto directo com a peça de madeira a ensaiar. Em relação ao componente II, este corresponde ao gatilho que permite controlar a evolução do processo de penetração da agulha na peça de madeira. Para que esta penetre a madeira, o gatilho tem que estar sempre premido. Só se deixa de premir o gatilho quando a agulha ultrapassa a face posterior da peça. Ao se libertar o gatilho numa fase intermédia do ensaio, então serão obtidos dois resultados diferenciados e correspondentes às duas etapas do ensaio, o que pode originar algumas entropias de ensaio. Quanto ao componente III, este trata-se de uma escala centimétrica que corresponde ao alcance máximo da agulha. Quando o ensaio se está a desenrolar,



Jorge Pinto, Marcos Teixeira, Cunha VMCF, António Arede, João Miranda Guedes, Sandra Cunha, Artur Feio, Humberto Varum. Correlação entre ensaios com câmara termográfica e resistógrafo na avaliação da integridade de vigas antigas de madeira. 9º congresso nacional de mecânica experimental. CNME 2014. Universidade de Aveiro. 15-17 outubro 2014.

acende-se uma luz na referida escala que permite perceber quantos centímetros a agulha já penetrou na peça de madeira e, sabendo a largura da peça a ensaiar, perceber quando é necessário terminar o ensaio.



a) O equipamento



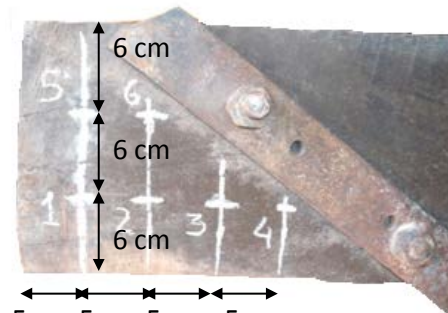
b) A sua aplicação

Figura 3: Resistógrafo

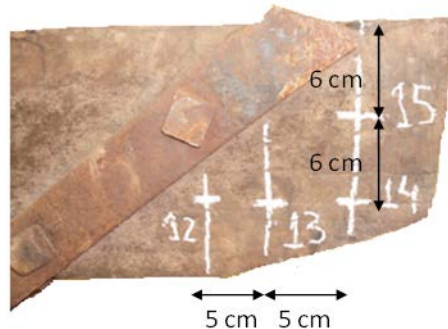
O manuseamento deste equipamento é simples, Figura 3.b. Contudo, é importante evitar a ocorrência movimentos bruscos do resistógrafo aquando da penetração da agulha na peça de madeira e de modo a evitar que esta se parta. Outra causa de dano da agulha é a eventual existência de algum elemento de maior dureza no interior da peça, como por exemplo, um prego de aço, um parafuso de aço ou algum nó da própria madeira.

A viga de madeira apresentava sinais mais acentuados de patologia nas extremidades e que eram referentes às zonas dos apoios em obra. Deste modo, adoptou-se uma malha de quinze pontos de perfuração que contemplou uma trama de pontos mais densa nas extremidades da viga e uma trama de pontos mais esparsa ao longo do desenvolvimento da viga, sendo que esses pontos foram localizados a meia altura da

viga, Figuras 4 e 6. A secção transversal da viga era irregular (quer em termos de forma e quer em termos dimensionais) ao longo do seu eixo longitudinal, apesar de esta apresentar uma secção transversal aproximadamente rectangular. Estas características são típicas de vigas antigas de madeira. Noutros edifícios antigos similares ao estudado neste trabalho de investigação, as vigas principais dos pavimentos são frequentemente troncos de árvores e, por isso, com uma secção transversal aproximadamente circular. Neste caso, nas extremidades, a altura da secção transversal era de 18 cm e a meio vão esta grandeza era de 19 cm.



a) Extremidade esquerda



b) Extremidade direita

Figura 4: Malha de pontos de perfuração adoptada nas extremidades da viga

A malha de pontos de perfuração adoptada nas extremidades esquerda e direita da viga contempla seis pontos (de 1 a 6, Figura 4.a) e quatro pontos (de 12 a 15, Figura 4.b), respectivamente. Em relação aos pontos 7, 8, 9, 10 e 11, estes foram definidos ao longo do desenvolvimento da viga e foram posicionados de forma a garantir 1 m de espaçamento entre si. A localização destes

Jorge Pinto, Marcos Teixeira, Cunha VMCF, António Arede, João Miranda Guedes, Sandra Cunha, Artur Feio, Humberto Varum. Correlação entre ensaios com câmara termográfica e resistógrafo na avaliação da integridade de vigas antigas de madeira. 9º congresso nacional de mecânica experimental. CNME 2014. Universidade de Aveiro. 15-17 outubro 2014.

pontos pode ser observada no esquema apresentado na Figura 6.

O ensaio do resistógrafo foi então realizado em cada um dos quinze pontos de perfuração constituintes da malha anteriormente descrita. Em cada ensaio e após o tratamento dos dados registados, resultou um gráfico indicador da resistência da peça de madeira ao longo da linha de penetração da agulha análogo ao exposto na Figura 5 que é relativo ao ponto de perfuração 7.

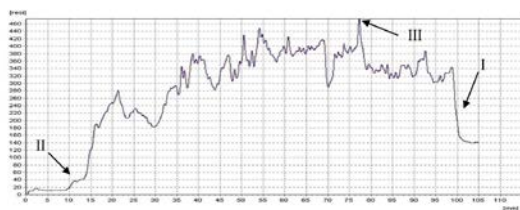


Figura 5: Gráfico resultante da realização do ensaio do resistógrafo no ponto de perfuração 7

Neste tipo de gráfico, o eixo das abcissas é relativo ao comprimento de penetração da agulha do resistógrafo, ou seja, ao valor assinalado na escala do aparelho e identificada na Figura 3. No caso deste ensaio, este valor corresponde sensivelmente à largura da viga e que é igual a aproximadamente 10.5 cm. Apenas não corresponde exactamente à largura da viga porque a agulha tende a sair sempre um pouco da viga. Este facto pode ser comprovado no diagrama pois quando a agulha perfura a totalidade da viga, o valor da resistência apresenta uma queda brusca no seu valor (pormenor I, Figura 5). O facto do valor da resistência não corresponder a zero no final do ensaio, pode indicar que o furo foi executado de uma forma enviesada. Por sua vez, o eixo das ordenadas é relativo ao valor da resistência que a agulha encontra ao penetrar a madeira. Este valor não tem qualquer relação com outro tipo de resistência, pelo que é adimensional. Este facto justifica que apenas se pode fazer uma análise comparativa com outro tipo de ensaio. A título de exemplo, a Faculdade de

Engenharia da Universidade do Porto (FEUP), Departamento de Engenharia Civil, Secção de Estruturas, considera que, em termos práticos, para valores de resistência inferiores a 100, a madeira ou é de baixa dureza ou apresenta uma degradação material notória. Como se verifica na Figura 5, o valor máximo atingido no ponto de perfuração 7 foi bastante superior a 100, o que deixa antever que a madeira em estudo apresenta uma elevada dureza e um bom estado de conservação na zona da circunscrita ao ponto 7. Aliás, tal como se poderá comprovar na Figura 5, os resultados de resistência obtidos neste ensaio excedem claramente o valor de 100, para todos os pontos. Adicionalmente, a fase inicial do diagrama da Figura 5 (pormenor II) também espelha que existe uma fase inicial de adaptação da penetração da agulha na peça de madeira. Nos primeiros milímetros de penetração da agulha, regista-se uma resistência da madeira muito reduzida (inferior a 20), que quando é comparada com a resistência registada ao longo da parte restante de realização do ensaio, é deveras inferior. Por isso, pensa-se que não deverá ser considerada na interpretação dos resultados finais do estado de conservação da madeira. Paralelamente, no ensaio do resistógrafo ao ponto 7 registou-se o valor máximo de resistência de 460 e para uma profundidade de penetração de 77 mm, pormenor III da Figura 5.

Atendendo a que não é possível tratar numericamente os dados registados ao longo da realização dos ensaios, foi desenvolvido um diagrama (Figura 6) referente ao pico de resistência (resistência máxima) aferido em cada ponto de perfuração ensaiado. Como nas extremidades da viga os pontos que compõem a malha estão alinhados verticalmente, existe uma sobreposição dos valores de resistência máxima dos pontos de perfuração existentes nessas zonas.

Jorge Pinto, Marcos Teixeira, Cunha VMCF, António Arede, João Miranda Guedes, Sandra Cunha, Artur Feio, Humberto Varum. Correlação entre ensaios com câmara termográfica e resistógrafo na avaliação da integridade de vigas antigas de madeira. 9º congresso nacional de mecânica experimental. CNME 2014. Universidade de Aveiro. 15-17 outubro 2014.

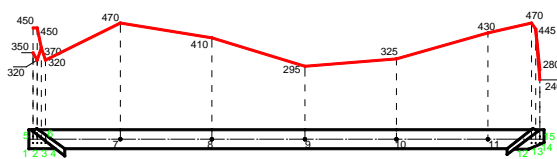


Figura 6: Resultados tratados do ensaio do resistógrafo

Tal como se pode observar no diagrama da Figura 6, os valores de resistência foram ligeiramente mais baixos na metade direita da viga. A maior discrepância de valores de resistência foi notada na zona dos apoios. Os valores de resistência medidos no lado esquerdo da viga foram superiores em relação aos verificados no apoio direito. Este facto também se nota nos pontos ensaiados na zona central da viga (de 7 a 11). Neste caso, os pontos 10 e 11 apresentaram valores de resistência inferiores em relação aos pontos 7 e 8, sendo que o valor mais baixo de resistência ocorreu nesta zona foi no ponto mais próximo do meio vão, 9. Em relação à globalidade da viga, constata-se que os pontos que apresentaram maior resistência foram os pontos 7 e 12, com uma resistência de 470. Em contrapartida, os pontos que apresentaram um menor valor de resistência foram os pontos 14 e 15, com 240 e 280, respectivamente.

Tomando como base o referido anteriormente e tendo em conta estes resultados experimentais, é possível afirmar que aparentemente a madeira da amostra de viga ensaiada apresenta um bom estado de conservação e não parece haver zonas localizadas danificadas no interior do elemento estrutural. De facto, em cada ponto de perfuração da malha obtém-se sempre um valor de resistência superior a 100. Contudo estes resultados devem ser encarados com alguma cautela, visto este ensaio não destrutivo conferir resultados de natureza qualitativa.

Apesar do referido anteriormente e de forma genérica, observa-se a ocorrência de uma simetria de resistência do elemento estrutural. A zona central da viga parece ser a zona crítica em termos de valor da resistência. Apesar de na zona das

extremidades da viga ter-se registado alguns valores reduzidos de resistência, também se registou os valores máximos ou próximos dos máximos e, como tal, esta informação não parece permitir afirmar que estas zonas da viga tenham apresentado um estado patológico mais gravoso ou acentuado do que a parte restante da viga.

Parece oportuno referir que associado a este ensaio poderá haver muitos factores que podem influenciar os resultados finais. Uma peça de madeira maciça tende a ser heterogénea em termos materiais porque a madeira é naturalmente um material com essas características. O facto da viga ensaiada ser uma peça de madeira que foi cortada de um tronco de uma árvore também poderá influenciar os resultados porque a dificuldade de penetração da agulha poderá ser dependente do alinhamento das fibras da madeira e da orientação dos anéis após o processo de corte da peça.

#### 4 – ENSAIO DA TERMOGRAFIA

De forma muito resumida, o ensaio da termografia consiste na medição da temperatura superficial de um elemento através da recolha de imagens térmicas, Tanaka (2001). A quantidade de calor irradiado é aferida através da utilização de uma câmara de termografia constituinte do aparelho utilizado no ensaio, denominado de câmara termográfica. A imagem térmica obtida traduz a distribuição da temperatura superficial ocorrida na superfície do elemento ensaiado.

Inicialmente, a amostra de viga foi ensaiada termograficamente à temperatura ambiente de laboratório, onde a viga se encontrava guardada há oito meses. O termograma resultante deste ensaio está apresentado na Figura 7.

É importante referir que é necessário indicar previamente alguns valores de parâmetros térmicos na câmara termográfica antes de se dar início ao ensaio. Estes valores são a temperatura ambiente, a humidade relativa, a

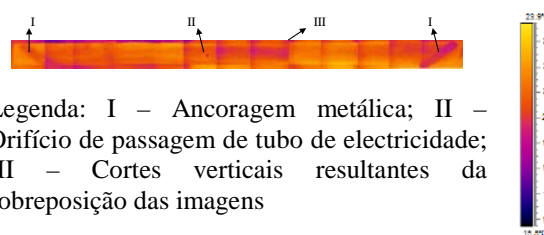
Jorge Pinto, Marcos Teixeira, Cunha VMCF, António Arede, João Miranda Guedes, Sandra Cunha, Artur Feio, Humberto Varum. Correlação entre ensaios com câmara termográfica e resistógrafo na avaliação da integridade de vigas antigas de madeira. 9º congresso nacional de mecânica experimental. CNME 2014. Universidade de Aveiro. 15-17 outubro 2014.

temperatura de referência e a emissividade. Neste caso, a temperatura ambiente de laboratório era de 19.5°C e a humidade relativa era de 45%. Quanto à emissividade e à temperatura de referência, os respectivos valores são fornecidos no livro técnico de apoio que acompanha a câmara termográfica. Tratando-se de madeira de castanho, o valor da emissividade considerado foi de 0.90 e a temperatura de referência foi de 20°C.

Como a viga a ensaiar era de grandes dimensões (5.64 m de comprimento) foi necessário captar as imagens termográficas faseadamente. Deste modo, a captação decorreu em vários troços de modo a ser mais perceptível a identificação de qualquer heterogeneidade material existente ao longo da viga. De modo a facilitar o posterior tratamento de dados recolhidos, ou seja, a sobreposição das várias imagens térmicas obtidas, foram usadas umas peças de metal auxiliares colocadas no pavimento do laboratório junto à face superior da viga. Como estas peças auxiliares tinham uma temperatura inferior à da viga, eram facilmente identificáveis posteriormente nas imagens termográficas, funcionando, deste modo, como bitola. Este detalhe é visível na imagem termográfica apresentada na Figura 7 e que é correspondente à sobreposição das várias imagens termográficas sequenciais obtidas para cada troço da viga.

Através do termograma obtido, Figura 7, verifica-se que existe uma coloração quase uniforme ao longo da viga e entre a viga e o pavimento do laboratório, o que indica que estes dois elementos apresentavam uma temperatura superficial muito próxima, em que a quantidade de calor irradiado, e que é a grandeza medida pela câmara termográfica, era muito semelhante. Deste modo, não parece ser possível perceber se existem patologias no interior da peça de madeira e que sejam imperceptíveis pelo exterior. Contudo é possível distinguir-se as ancoragens metálicas (I, Figura 7) assim como identificar a existência de um pequeno orifício a cerca de um terço do comprimento da viga (II, Figura 7) que foi feito em obra para a passagem de um tubo

de electricidade. De acordo com a escala de temperatura, uma zona que apresente uma cor mais escura significa que está a uma temperatura inferior. É importante também referir que os traços verticais (III, Figura 7) que se identificam na Figura 7 não se tratam de qualquer anomalia na madeira mas sim, resultam do processo de sobreposição das várias imagens termográficas adoptado e tal como descrito anteriormente.



Legenda: I – Ancoragem metálica; II – Orifício de passagem de tubo de electricidade; III – Cortes verticais resultantes da sobreposição das imagens

Figura 7: Termograma da viga sem pré-aquecimento

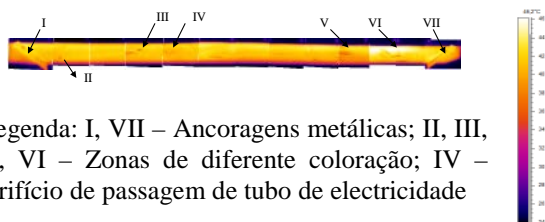
De acordo com Tanaka (2001), concluiu-se que efectuando um pré-aquecimento prévio do elemento a ensaiar poder-se-á mais facilmente identificar patologias em elementos de madeira através do ensaio da termografia. Neste mesmo artigo, também é referido que o ensaio que foi realizado consistiu na colocação prévia de amostras de madeira a ensaiar numa estufa.

Como neste caso, a amostra de viga é de grandes dimensões, não era viável esta solução de procedimento experimental de colocação da amostra em estufa. Optou-se por isso em se expor a viga directamente ao sol, durante o período do dia mais quente, aumentando-se desta forma a temperatura da mesma. O período do dia escolhido foi entre as 11 horas e as 15 horas. Um termómetro foi colocado na viga de forma a ser possível registar a temperatura máxima e a temperatura mínima ocorridas durante esse período de tempo de exposição ao sol e que permitiu ter uma noção do gradiente térmico a que a viga esteve sujeita. Durante o período de exposição ao sol, a temperatura superficial máxima atingida na viga foi de 45°C. Depois, a viga foi colocada no interior do laboratório onde decorreu o ensaio de termografia. Antes de se proceder à captação das imagens termográficas optou-se por se esperar



Jorge Pinto, Marcos Teixeira, Cunha VMCF, António Arede, João Miranda Guedes, Sandra Cunha, Artur Feio, Humberto Varum. Correlação entre ensaios com câmara termográfica e resistógrafo na avaliação da integridade de vigas antigas de madeira. 9º congresso nacional de mecânica experimental. CNME 2014. Universidade de Aveiro. 15-17 outubro 2014.

previamente cerca de 15 minutos de modo a que a viga pudesse começar a irradiar o calor absorvido e de modo a ser possível obter imagens termográficas mais conclusivas (Figura 8). A temperatura ambiente de laboratório era de 26.6°C e a humidade relativa era de 37%.



Legenda: I, VII – Ancoragens metálicas; II, III, V, VI – Zonas de diferente coloração; IV – Orifício de passagem de tubo de electricidade

Figura 8: Termograma da viga com pré-aquecimento

Para as condições do ensaio com pré-aquecimento, verifica-se através do termograma da Figura 8 que a temperatura superficial, relacionada com a irradiação de calor do corpo da viga, também era bastante uniforme ao longo da viga. Neste caso, esta grandeza até era praticamente similar entre a madeira e o aço da ancoragem. Observa-se também que existe um maior contraste entre a temperatura superficial da viga e a do pavimento e porque a viga foi pré-aquecida naturalmente. Também se identificam algumas zonas muito localizadas ou circunscritas da viga que denotam uma coloração ligeiramente distinta à coloração observada na maior parte da viga. Essas zonas são referentes aos pormenores de I a VII da Figura 8. É sabido que os pormenores I e VII são relativos à cabeça do parafuso metálico de ligação e que o pormenor IV é relativo a um furo que atravessa a totalidade da espessura da viga. Correspondem então a zonas da viga cuja capacidade de irradiação de calor é maior ou, por outras palavras, a capacidade de arrefecimento é maior. Tendo em conta que as zonas da viga relativas aos pormenores II, III e V apresentam uma coloração análoga à identificada nos pormenores I e VII então pensa-se que correspondam a saliências circunscritas existentes na face da viga que foi ensaiada e que correspondiam a zonas que tenderam a arrefecer mais rapidamente.

Em relação ao pormenor II, e depois de uma análise visual da viga, não se verificou corresponder a qualquer saliência, furo ou conector metálico. Quanto ao pormenor III, este correspondeu a uma pequena saliência existente na face da viga. Por sua vez, na zona do pormenor V existiam uns pequenos orifícios resultantes da pregagem de elementos metálicos que serviam de suporte aos tarugos em cruz do pavimento existentes nesta zona, o que poderá ter sido a causa da diferente coloração ocorrida nesta zona e que foi detectada no termograma.

Paralelamente, e de acordo com o termograma obtido, na zona do pormenor VI parece ter existido uma coloração mais clara e distinta da coloração geral da viga. Neste caso, essa informação poderá ter indicado que eventualmente a viga fosse menos densa nessa zona. O facto de poder ser menos densa poderá ser resultante de uma heterogeneidade natural do material ou da existência de um maior número de vazios devido ao ataque dos agentes xilófagos. Esta possibilidade não era visível pelo exterior e, como tal, poderá ter existido no interior da peça. Neste caso, o ar que preenchia esses vazios e que se encontrava retido poderá ter retardado o processo de arrefecimento da viga nesta zona, traduzindo-se no termograma pelo aparecimento de uma mancha de cor mais clara. Também é visível neste termograma os pontos referentes à bitola usada como auxílio do processo de sobreposição de imagens termográficas.

Face ao exposto, conclui-se que o termograma resultante do ensaio que contemplou um pré-aquecimento prévio da vida de madeira (Figura 8) parece ser mais conclusivo do que o resultante do ensaio termográfico directo. Deste modo, estes resultados corroboram a conclusão expressa em Tanaka (2001) de que há vantagem em pré-aquecer previamente um elemento de madeira a ensaiar termograficamente. Os resultados obtidos também permitem concluir que a técnica de pré-aquecimento proposta neste trabalho de investigação relativa à exposição directa aos raios



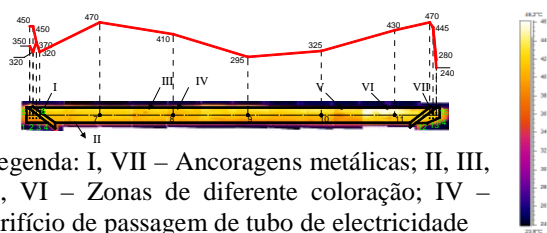
Jorge Pinto, Marcos Teixeira, Cunha VMCF, António Arede, João Miranda Guedes, Sandra Cunha, Artur Feio, Humberto Varum. Correlação entre ensaios com câmara termográfica e resistógrafo na avaliação da integridade de vigas antigas de madeira. 9º congresso nacional de mecânica experimental. CNME 2014. Universidade de Aveiro. 15-17 outubro 2014.

solares, para além de ser expedita e económica também funciona. Embora, a sua aplicação seja condicionada para elementos de madeira em obra.

Também se concluiu que a viga de madeira ensaiada termograficamente não parece apresentar um estado patológico acentuado porque não foram identificadas zonas muito distintas em termos de irradiação de calor. Outra conclusão importante a ressaltar prende-se com o facto de ser conveniente processar o ensaio em poucos minutos após a fase de pré-aquecimento e porque parece corresponder às condições ideais para a identificação de heterogeneidade material de peças de madeira.

## 5 – CORRELAÇÃO DE ENSAIOS

Nesta secção pretende-se estabelecer uma comparação entre os resultados obtidos pelo ensaio do resistógrafo e pela termografia, e de modo a tentar perceber se existe alguma correlação possível entre estes dois tipos de ensaios. Tal como foi referido anteriormente, o ensaio de termografia realizado após o pré-aquecimento, foi aquele que permitiu obter informação mais clara em relação à existência de possíveis heterogeneidades materiais na viga, pelo que se optou pelo respectivo termograma (Figura 8) na comparação e na correlação com os resultados obtidos pelo ensaio do resistógrafo (Figura 6). Deste modo, sobrepondo os referidos resultados é possível obter o diagrama apresentado na Figura 9.



Legenda: I, VII – Ancoragens metálicas; II, III, V, VI – Zonas de diferente coloração; IV – Orifício de passagem de tubo de electricidade

Figura 9: Sobreposição do diagrama do resistógrafo e do termograma

Tendo em conta a descrição dos resultados obtidos em cada um destes ensaios e proferida anteriormente, o diagrama de sobreposição de resultados da Figura 9 reforça a ideia da existência de uma vincada uniformidade material ao longo de toda a viga. De facto, ambos os resultados corroboram este facto e, por isso, é possível afirmar que parece existir uma possível correlação entre estes dois tipos de ensaios não destrutivos e que valida de certa forma a aplicabilidade da técnica da termografia no estudo de peças de madeira.

É claro que a heterogeneidade material detectada termograficamente nos pormenores de II a VI da Figura 8 não é facilmente identificável através do ensaio do resistógrafo e porque não se procedeu a nenhuma perfuração localizada exactamente nesses pontos. Contudo, a resistência aferida no ponto de perfuração 9 apresenta um valor significativamente inferior em relação à generalidade dos valores da resistência medidos nos restantes pontos e o resultado obtido pela termografia não detectou nenhuma heterogeneidade material nessa zona da viga. Este facto poderá traduzir que a possível existência de uma correlação entre estes dois tipos de ensaios será sempre limitada. É importante lembrar que o facto de se ter estado a ensaiar uma peça de madeira também dificulta a análise de resultados e que o facto de ser uma viga de madeira antiga ainda dificulta mais este processo. Um maior número de amostras de peças de madeira deveria ter sido considerado neste estudo de forma a aumentar a representatividade e a validar as conclusões proferidas.

## 6 – CONSIDERAÇÕES FINAIS

A heterogeneidade material em peças de madeira poderá estar relacionada com a natureza do próprio material ou com eventuais patologias. Esta informação poderá ser valiosa na aferição da integridade material de elementos estruturais de madeira.

Jorge Pinto, Marcos Teixeira, Cunha VMCF, António Arede, João Miranda Guedes, Sandra Cunha, Artur Feio, Humberto Varum. Correlação entre ensaios com câmara termográfica e resistógrafo na avaliação da integridade de vigas antigas de madeira. 9º congresso nacional de mecânica experimental. CNME 2014. Universidade de Aveiro. 15-17 outubro 2014.

Neste trabalho de investigação, a heterogeneidade material de uma viga antiga de madeira foi analisada com recurso ao ensaio do resistógrafo e à termografia. Ambos os ensaios são correntemente aplicados em obra neste contexto e o facto de serem de simples aplicação, económicos e não destrutivos justificam este facto.

Com a experiência adquirida ao longo deste trabalho de investigação, concluiu-se que: um pré-aquecimento prévio da amostra poderá beneficiar o ensaio da termografia em elementos de madeira; a relação entre as direcções das fibras da madeira e da penetração da agulha assim como o tipo de secção transversal da peça de madeira são dois factores que poderão influenciar significativamente os resultados do resistógrafo; os dois ensaios estudados apresentam uma correlação com algumas limitações; o ensaio do resistógrafo poderia ter sido realizado após a realização do ensaio da termografia e porque deste modo teria havido a possibilidade de identificação prévia de pontos a perfurar em locais de descontinuidade e identificados pelo ensaio da termografia.

Trabalho futuro a desenvolver neste contexto e que contemple o ensaio de uma quantidade maior de vigas de madeira permitiria alcançar conclusões mais representativas.

## REFERÊNCIAS

Feio, A., Inspeção e diagnóstico de estruturas históricas de madeira: Correlação com métodos não destrutivos e comportamento estrutural. Tese de Doutoramento, Guimarães: Universidade do Minho, 2006.

Lourenço, Feio, A., Machado, J., Chestnut wood in compression perpendicular to the grain: Non-destructive correlations for test results in new and old wood. *Construction and Building Materials* 21, Elsevier, 2007, pp. 1617–1627.

Pinto, J., Gülay, G., Vieira, J., Meltem, V., Varum, H., Bal, İ., Costa, A., Save the tabique construction. *Structural rehabilitation of old buildings. Building Pathology and Rehabilitation. Volume 2.* 2014. Springer Berlin Heidelberg. ISBN: 978-3-642-39685-4 (Print) 978-3-642-39686-1 (Online). Pp. 157-185.

Tanaka, T., Wood inspection by thermography. 12th International Symposium on Nondestructive Testing of Wood, Hungria, 2001.