

César Augusto Silvino Figueredo

**Avaliação de ligações em madeira em
estruturas de coberturas antigas por
técnica termográfica**

Belo Horizonte, MG
UFMG/MACPS
2016

César Augusto Silvino Figueredo

Avaliação de ligações em madeira em estruturas de coberturas antigas por técnica termográfica

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-graduação em Ambiente Construído e Patrimônio Sustentável, da Universidade Federal de Minas Gerais, como pré-requisito para obtenção do título de mestre em Ambiente Construído e Patrimônio Sustentável.

Área de Concentração: Bens Culturais, Tecnologia e Território.

Linha de Pesquisa: Tecnologia do Ambiente Construído

Orientador: Prof. Dr. Edgar Vladimiro Mantilla Carrasco

Co-Orientadora: Profa. Dra. Cynara Fiedler Bremer

Belo Horizonte / MG
2016

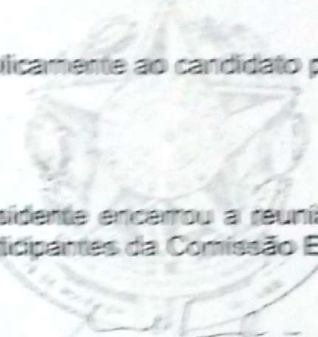
ATA DA DEFESA DE DISSERTAÇÃO DO ALUNO César Augusto Silvino Figueredo nº de matrícula 2014860195 DO CURSO DE MESTRADO EM AMBIENTE CONSTRUÍDO E PATRIMÔNIO SUSTENTÁVEL DA ESCOLA DE ARQUITETURA DA UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS. Aos nove dias do mês de maio do ano de dois mil e dezesseis, às quatorze horas e trinta minutos na sala 200 da Escola de Arquitetura, situada à Rua Paraíba, número seiscentos e noventa e sete, bairro Funcionários, na cidade de Belo Horizonte, reuniu-se a Comissão Examinadora de Dissertação para julgar o trabalho "Avaliação de ligações em madeira em estruturas de coberturas antigas por técnica termográfica" requisito final para a obtenção do grau de Mestre, na área de concentração "Bens Culturais, Tecnologia e Território". Abrindo a sessão, o orientador professor doutor Edgar Vladimiro Mantilla Carrasco após expor as Normas Regulamentares do Trabalho Final pediu para o aluno iniciar a apresentação do seu trabalho. Seguiu-se arguição pelos examinadores com a respectiva defesa do candidato. Logo após a comissão reuniu-se, sem a presença do mestrando e do público, para julgamento e expedição do seguinte resultado:

- () Aprovação
 (X) Aprovação com solicitação das revisões constantes nesta ata, no prazo de 30 dias
 () Reprovação


O resultado final foi comunicado publicamente ao candidato pelo Presidente da Comissão.

Nada mais havendo a tratar, o Presidente encerrou a reunião e lavrou a presente ata, que será assinada por todos os membros participantes da Comissão Examinadora.

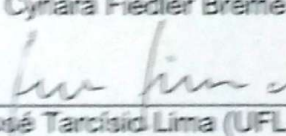
Comissão Examinadora:



 Prof. Dra. Andrea Franco Pereira (EA/UFMG)

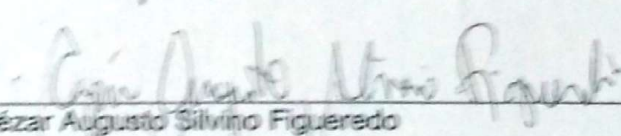


 Prof. Dra. Cynara Fiedler Breme (EA/UFMG - co-orientadora)



 Prof. Dr. José Tarcísio Lima (UFLA)

Ciente:

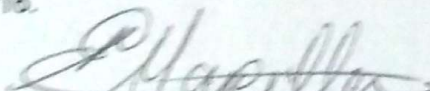


 César Augusto Silvino Figueredo

Atesto que as alterações exigidas serão cumpridas.

Belo Horizonte, 09 de maio de 2016.

Orientador:



 Prof. Dr. Edgar Vladimiro Mantilla Carrasco (EE/UFMG)

Homologado pelo Colegiado do Programa de Pós-Graduação do curso de Mestrado em Ambiente Construído e Patrimônio Sustentável em

Coordenador:

 Prof. Dra. Marieta Cardoso Maciel "ad referendum"

À memória de tia Ventina,
presença constante em meu pensamento e coração.

AGRADECIMENTOS

À **Deus**, por tudo que tem me proporcionado, proporcionará e proporcionou nessa minha vida.

À minha família, meu pai **José Figueredo**, minha mãe **Maria Auxiliadora**, meus irmãos **Ivo** e **Izadora**, força motriz desse processo, incentivadores e os primeiros a acreditarem e me incentivarem nessa jornada. Obrigado pelo amor, pela ajuda, pela paciência, pelos arquivos que me enviavam, a meu pai por me ajudar a montar os equipamentos elétricos, no ensaio no telhado e a minha mãe pelas orações constantes.

Ao meu orientador **Edgar**, toda minha gratidão pela acolhida, pelo aceite da orientação, pela construção do projeto de pesquisa, pela ajuda incessante em tudo que precisei, pelos conselhos, pela liberdade, pelos ensinamentos, por acreditar no trabalho, pela presença constante e por ter aberto tantas portas e oportunidades. Tive a sorte de ter um orientador que soube não somente guiar o trabalho mas também abrir minha cabeça pras possibilidades de pesquisa e construção do conhecimento

À minha co-orientadora **Cynara**, minha gratidão aos ensinamentos, pela acolhida no TAU, pelas disciplinas que dividimos, por ter me ensinado como é a sala de aula, as vivências didáticas, as palavras de calma nos meus momentos de desespero, os artigos chaves enviados salvando a revisão bibliográfica ainda na qualificação e as contribuições sempre benéficas ao trabalho.

À **Maria Luiza**, por ter sido meu apoio desde o início dessa jornada, me recebendo de braços abertos no TAU, confiando em mim para lecionar, ensinando os percursos da docência, sendo ombro amigo em minhas lamentações e conselheira fiel e esteio que me fez permanecer firme até o final desse caminho. Muito Obrigado por tudo Luiza.

Aos meus amigos de mestrado **Maria Leticia, Janaina, Raíssa, Tais, Valéria, Paula Cury**, por terem me proporcionado extrema alegria em meio ao turbilhão da pós-graduação. Obrigado pela gentileza, presteza, companheirismo, risadas, pasteis, coca, artigos, congressos e pelos planos de vida sempre compartilhados e

reinventados a cada nova segunda-feira. Seguramente esse trabalho só existe por conta de vocês.

Aos professores da pós-graduação, sobretudo ao professor **Marco Antônio** pela escuta sempre atenta do meu trabalho, as contribuições precisas, os livros artigos e apoio constante.

Aos meus amigos da META, sobretudo a **Juliane** e a **Silma** esse trabalho só foi possível por vocês terem entrado em minha vida assim que cheguei a Belo Horizonte. Obrigado pela amizade, carinho, dedicação, paciência, cafés na sala dos professores, caronas, lanchinhos no treinamento e as risadas mais gostosas que já tive no trabalho!

Aos Ticles, principalmente **Abílio** e **Andreia**, pela amizade, almoços, ajuda, confiança, acreditarem no meu trabalho como arquiteto, os projetos que realizamos e os que ainda vamos realizar, e por terem tornado minha vinda para Belo Horizonte algo prazeroso,

Aos companheiros de orientação e laboratório **Monica** e **Vinnicius**, os melhores companheiros que alguém poderia ter! Obrigado pela ajuda, prontidão, estímulo, caronas, risadas, mensagens trocadas, apoio irrestrito e por tornarem essa dissertação possível.

Aos meus mestres que muito antes dessa jornada iniciar já torciam por ela e durante apoiaram e foram ombro amigo. Obrigado pelas palavras de coragem e estímulo desde a graduação e durante toda a vida, **Maurício**, **Monique** e **Sulamita**.

Aos meus amigos **Marquinhos**, **Zé**, **Laiz**, **Rafa**, **Juh**, **Rindow**, **Pp** obrigado pela amizade. Sem ela, sem todos os momentos que construímos nesses últimos anos, nada disso valeria à pena. Essa dissertação só existe por que vocês existem. É a lei dos encontros...

Um oitavo flutuando, sete oitavos submersos, essa é a proporção de flutuação de um iceberg. Um contingente maior de pessoas foi necessário para esse trabalho acontecer, a vocês que não estão citados aqui diretamente, muito obrigado!

“Bom, para mim, pessoalmente, como arquiteta, arquitetura é estrutura. Quer dizer, a estrutura de um edifício é elevada ao nível da poesia, como parte da estética. Não há nenhuma diferença. Um arquiteto deve projetar a estrutura como projeta arquitetura, no sentido doméstico da palavra”

Lina Bo Bardi

RESUMO

A conservação dos elementos construtivos da cobertura é fundamental para a estabilidade e a manutenção do corpo da edificação, uma vez que o protege contra intempéries e promove a amarração estrutural das alvenarias. A cobertura também garante a segurança e integridade física dos usuários da edificação e constitui parte integrante do patrimônio cultural. Apesar de existirem manuais e cadernos técnicos importantes que se referem à restauração de estruturas de cobertura publicados é importante investigar as origens das patologias e quais métodos menos intrusivos de diagnósticos. Essa pesquisa tem como objetivo a utilização da técnica de termografia ativa como técnica não destrutiva para diagnóstico das patologias em ligações de coberturas em estrutura de madeiras em edificações antigas. Para isso foram realizados ensaios em laboratório e em campo, realizando o aquecimento da madeira antiga e seu imageamento termal. A partir dos termogramas obtidos, observou-se a heterogeneidade na temperatura superficial das peças, caracterizando indícios de patologia. Os resultados demonstraram a viabilidade da utilização da técnica como ferramenta de diagnóstico preliminar de patologias ocultas nas estruturas de madeira.

Palavras-chave: Estruturas antigas de madeira, ligações, termografia

ABSTRACT

The conservation of the constructive elements of the roof is essential for stability and maintenance of the body of the building, since that protects against weathering and promotes anchorage of structural masonry. The roof also ensures the safety and physical integrity of the users of the building and an integral part of cultural heritage. Although there are significant technical books and manuals referring to the restoration published roof structures it is important to investigate the origins of the pathology and which less intrusive diagnostic methods. This research aims to use the active thermography technique as a nondestructive test for diagnosis of pathologies on roofs in old buildings in wood structure. For that tests were carried out in the laboratory and in the field, carrying out heating of the old wood and its thermal imaging. From the obtained thermograms, we observed heterogeneity in the surface temperature of the parts, featuring pathology. The results demonstrated the feasibility of using the technique as a primary diagnostic tool of hidden pathologies in wooden structures.

Keywords: Old wooden structures , connections, thermography.

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	15
1.1 Objetivo Geral	18
1.2 Objetivo Específico	19
2 REFERENCIAL TEÓRICO	20
2.1 Conservação e Restauro	20
2.2 Concepção de Telhados	26
2.2.1 Treliça Howe	27
2.3 Ligações em Treliças	33
2.4 Degradação da Madeira	40
2.5 Termografia	43
2.5.1 Variáveis que influenciam a termografia	47
3 MATERIAIS E MÉTODOS	49
3.1 Diagnóstico de Patologias	49
3.2 Determinação da Emissividade da Madeira	52
3.3 Excitação Térmica da Madeira Utilizando Fonte de Calor	54
3.4 Realização do Imageamento Termográfico	56
3.5 Estudo Exploratório Realizado em Laboratório	59
3.6 Desenvolvimento do Trabalho de Campo	61
3.6.1 Caracterização do Objeto de Estudo	61
3.6.2 Caracterização das Variáveis Ambientais	63
4 APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DE RESULTADOS	69
4.1 Parâmetros para Análise de Resultados	69
4.2 Apresentação e Análise de Resultados do Estudo Exploratório.....	70
4.3 Apresentação e Análise de Resultados do Estudo de Campo	71
5 CONCLUSÕES	75
REFERÊNCIAS	78

LISTA DE FIGURAS

FIGURA 1 - Exemplos de tesouras que foram muito utilizadas em telhados coloniais.....	26
FIGURA 2 – Treliça Kingpost	28
FIGURA 3 – Treliça Queenpost	29
FIGURA 4 – Variação da treliça Queenpost	30
FIGURA 5 – Tesoura Howe	30
FIGURA 6 – Forma mais comum da tesoura Howe	31
FIGURA 7 - Detalhamento do madeiramento de uma tesoura de telhado	32
FIGURA 8 - Sambladura com dente simples.....	34
FIGURA 9 - Sambladura com dente simples recuado	35
FIGURA 10 - Sambladura com dente duplo.....	35
FIGURA 11 - Ligações comuns em tesouras Howe	35
FIGURA 12 - Ligação Banzo Inferior-Banzo Superior.....	36
FIGURA 13 - Ligação Banzo Superior- Diagonal	36
FIGURA 14 - Ligação Banzo Superior-Pontalete	37
FIGURA 15 - Ligação Diagonal-Pontalete	37
FIGURA 16 - Ligação Banzo Inferior-Pontalete	38
FIGURA 17 – Termograma da termografia da fachada e foto da fachada da igreja ...	45
FIGURA 18 - Propagação idealizada de um único pulso de calor em um material	46
FIGURA 19 - Ponte térmica devido à transição entre diferentes materiais e a diferenças de espessura	47
FIGURA 20 - Ensaio de determinação da emissividade da madeira em laboratório....	53
FIGURA 21 - Termograma da área coberta com fita isolante	53
FIGURA 22 - Termograma da área sem fita isolante, alterando o valor da emissividade	54
FIGURA 23 - Termograma de amostra com fissura aquecida em estufa a 70° por 30 minutos	55
FIGURA 24 - Termograma de amostra com fissura aquecida em estufa a 70° por 30 minutos	55
FIGURA 25 - Refletor para lâmpada halógena de 500W	56
FIGURA 26 - Esquema ilustrativo da disposição da fonte de calor.....	56
FIGURA 27 - Termo-higrometro com sensor externo	57
FIGURA 28 - Câmera termográfica FLIR T420	58
FIGURA 29 - Termograma obtido de amostra com furos.....	59

FIGURA 30 - Amostra deteriorada utilizada para ensaio em laboratório	60
FIGURA 31 - Temperatura e Umidade relativa do ar	60
FIGURA 32 - Termograma obtido com a amostra	61
FIGURA 33 - Vista geral da edificação.....	62
FIGURA 34 - Pormenor de um dos beirais da cobertura	63
FIGURA 35 - Vista aérea da edificação	64
FIGURA 36 - Termo-Higrometro	64
FIGURA 37 - Local onde foi realizado o ensaio de emissividade	64
FIGURA 38 - Termogramas do ensaio de emissividade	64
FIGURA 39 - Vista da tesoura	65
FIGURA 40: Fonte de calor aquecendo ligação	65
FIGURA 41: Fonte de calor aquecendo ligação	65
FIGURA 42: Fonte de calor aquecendo ligação	65
FIGURA 43: Monitoramento da temperatura da madeira	66
FIGURA 44 – Exemplo de Termograma	67
FIGURA 45 - Termograma com indicações de patologias da amostra analisada em laboratório	70
FIGURA 46: Termograma com indicações de patologias na ligação banzo superior – pontalete	71
FIGURA 47: Termograma com indicações de patologias na ligação pontalete – banzo inferior	72
FIGURA 48 - Termograma com indicações de patologias na ligação banzo superior – banz inferior	73

LISTA DE TABELAS

QUADRO 1 – Documentos específicos relacionados às metodologias de conservação e restauro (ICOMOS)	22
QUADRO 2 - Execução da manutenção preventiva	41
QUADRO 3 - Características da câmera termográfica FLIR T420	58
QUADRO 4 - Fatores Climáticos da Região	64

LISTA E ABREVIATURAS E SIMBOLOS

ICOMOS – International Council of Monuments and Sites (Conselho Internacional de Monumentos e Sítios)

IPHAN – Instituto do Patrimônio Histórico e Artístico Nacional

SPHAN – Serviço do Patrimônio Histórico e Artístico Nacional

NDT – Non Destrutivc Test (ensaio não destrutivo)

UNESCO - Organização das Nações Unidas para a Educação, a Ciência e a Cultura

°C – Graus Celcius

°F – Graus Fahrenheit

W - Watts

ε - Emissividade

1 – INTRODUÇÃO

Desde meados do século XX, sobretudo nos pós-guerras, observam-se ações de valorização e salvaguarda do patrimônio. O estabelecimento de cartas patrimoniais com orientações específicas de ações de restauro e conservação, as chancelas da Organização das Nações Unidas para a Educação, a Ciência e a Cultura (UNESCO), através do Conselho Internacional de Monumentos e Sítios (ICOMOS) elevando conjuntos urbanos e bens notáveis a “Patrimônio Mundial da Humanidade”, são alguns exemplos de iniciativas que colocaram o “patrimônio cultural” na agenda de políticas públicas nos diversos países do mundo.

No Brasil os debates e ações de preservação ganham corpo em 1937, com a criação do Serviço do Patrimônio Histórico e Artístico Nacional (SPHAN), posteriormente transformado Instituto de Patrimônio Histórico e Artístico Nacional (IPHAN). A Constituição Federal de 1988 compreende os bens de natureza material e imaterial, isolados ou em conjunto, que indicam referências à identidade, à ação e à memória dos diversos grupos formadores da sociedade.

Serão abordados especificamente o patrimônio edificado, ambiente construído e bens imóveis, que constituem o patrimônio formado por obras arquitetônicas. Importa ressaltar que os bens culturais possuem valores associados (culturais, históricos, arquitetônicos, estéticos, artísticos, arqueológicos, científicos, etnológicos ou antropológicos) que constituem sua importância de salvaguarda e garantem a transmissão desse testemunho de gerações passadas para gerações futuras. Os bens culturais imóveis possuem além desses valores, valor de uso, o que configura um processo de salvaguarda desses bens tanto na manutenção de seus valores associados, quanto na adaptação desse bem às demandas contemporâneas de uso e adequação dos espaços.

A permanência, aprendizagem, transmissão e aplicação das técnicas tradicionais de construção são fatores asseguradores da conservação do patrimônio cultural construído. O domínio dos materiais e sistemas construtivos antigos garante subsídios para o restauro, manutenção de edificações antigas e permite difundir as práticas construtivas vernáculas, salvaguardando mais que simplesmente o objeto

íntegro construído, mas a práxis, o saber-fazer, que envolve a produção desse objeto.

Essas técnicas tradicionais, seus processos criativos e sua práxis características recentemente têm chamado a atenção dos órgãos e institutos de patrimônio, dando origem a diversas ações no intuito do reconhecimento, catalogação e da preservação desse patrimônio, denominado intangível ou imaterial. Diversas ações no sentido de ensino, preservação e transmissão dessas técnicas tradicionais vêm sendo desenvolvidas.

Entre elas, a carpintaria tradicional é uma técnica que foi amplamente difundida e utilizada desde o Brasil colônia, originando um sem-número de edificações construídas a partir desse sistema construtivo. As qualidades intrínsecas da técnica saltam aos olhos quando são observados detalhes das estruturas produzidas que mantêm sua qualidade e desempenho mesmo séculos depois de terem sido construídas.

A construção civil é um processo contínuo de avanços tecnológicos e esses avanços impactaram diretamente na práxis da carpintaria. A introdução de novos materiais, novas espécies de madeira, novos tipos de ligação, a normalização técnica e os detalhamentos alteraram substancialmente o perfil do mestre-carpinteiro e as técnicas de carpintaria utilizadas.

O Brasil possui, hoje, dezenove sítios históricos considerados Patrimônio Histórico e Cultural da Humanidade, entre os mais de seiscentos eleitos pela UNESCO em todo o mundo. Dentre os sítios ressaltam: Centro Histórico de Goiás (GO), Diamantina (MG), Olinda (PE), Ouro Preto (MG), São Luís (MA) e de Salvador (BA), que possuem edificações construídas utilizando estruturas de madeira, principalmente em suas coberturas. No Brasil as coberturas em estruturas de madeira foram inseridas no período colonial, com a chegada dos primeiros portugueses. As construções nesta época utilizavam os materiais existentes na região. Parte relevante do conjunto de edificações de valor cultural que se preserva no Brasil é constituída por construções que fazem uso de estruturas de madeira, sobretudo em suas coberturas, ressaltando a importância da preservação da carpintaria tradicional, que tem nas sambladuras um elemento chave de sua característica construtiva

O conhecimento técnico do corte e do entalhe que detinham os colonizadores portugueses juntou-se à sabedoria dos indígenas quanto às características das madeiras nativas, criando uma cultura bastante específica. (GONZAGA, 2006, p.11).

A carpintaria tem no século XVII e XVIII, no Brasil, papel preponderante na construção civil, sendo técnica construtiva amplamente utilizada, sobretudo pela abundância de madeiras e por ser uma técnica relativamente fácil de ser aprendida e transmitida, dando origem a artífices da madeira, que transmitiam conhecimento de geração para geração.

A sambladura na carpintaria é a técnica de recorte ou entalhes na madeira para junção ou encaixe de duas ou mais peças. Podem ser simples ou extremamente intrincadas e complexas. Essas sambladuras têm em sua engenhosidade técnica, para solucionar encaixes estruturais na madeira, um grande valor arquitetônico e revelam o saber-fazer do mestre carpinteiro que a executou: demonstrando suas habilidades e inteligência na resolução desses nós estruturais, muitas vezes através de soluções únicas e em sua quase totalidade criadas em canteiro.

Apesar de técnica popular e de uso extensivo, há grandes dificuldades em se encontrar bibliografias que apresentem técnicas construtivas de telhados no Brasil anteriores ao período Imperial. Talvez o registro mais importante dessa técnica construtiva, seja o livro de Santos (1951), em que o autor apresenta detalhadamente com descrições e desenhos as estruturas de madeira de telhados de diversas igrejas de Ouro Preto do período Colonial.

No século XIX já são encontradas publicações de manuais em que se apresentam registradas as técnicas construtivas de carpintaria tradicional empregadas na construção de telhados em Portugal e no Brasil. Os livros do engenheiro João Emilio dos Santos Segurado apresentam o registro de detalhes executivos de vários elementos construtivos. Um livro em especial: "Trabalhos de Carpintaria Civil" apresenta detalhes de execução e elementos de madeira, sobretudo os de estruturas de telhados coloniais. Dentre as diversas informações apresentadas como dimensões e angulações do madeiramento, tipologias de tesouras, destacam-se os detalhamentos dos encaixes estruturais entre as peças de madeira dos telhados, denominadas sambladuras.

A conservação dos elementos construtivos da cobertura é fundamental para a estabilidade e a manutenção do corpo da edificação, uma vez que o protege contra intempéries e promove a amarração estrutural das alvenarias através da ligação entre alvenaria e frechais. A cobertura também garante a segurança e integridade física dos usuários da edificação e constituem parte integrante do patrimônio cultural.

A deterioração dos edifícios históricos provém, na grande maioria dos casos, da infiltração de água em seus interiores. [...] Em função disso é que o trabalho de restauração das edificações sempre se inicia pela recuperação do telhado, elemento mais importante na conservação do prédio [...] Sua estrutura complexa conjuga os sistemas de captação e condução das águas, envolvendo desde o madeiramento de sustentação das telhas até as calhas, rufos, beirais e tantos outros detalhes. Dada à importância de sua função, o telhado requer manutenção constante por parte do usuário do edifício. (DIAS *apud* ABREU, 1998, p. 69).

Em função de desempenharem um papel tão importante, e por possuírem difícil acesso à manutenção, as estruturas de cobertura são, em muitos casos, os primeiros elementos a serem degradados. Ao escolher a técnica de intervenção a ser empregada, o profissional deve estar ciente das consequências que esta escolha traz para o valor cultural do monumento. A técnica pode trazer prejuízos ou benefícios tanto na questão patrimonial do seu valor histórico e cultural, quanto na questão técnica, de durabilidade e segurança. Apesar de existirem manuais e cadernos técnicos importantes que se referem à restauração de estruturas de cobertura publicados é importante investigar as origens das patologias e quais métodos menos intrusivos de diagnósticos.

Muitas manifestações patológicas são de fácil detecção, pois são visíveis, porém, existem diversas outras que geralmente permanecem ocultas. De forma geral, a detecção das patologias é feita visualmente, ou seja, quando elas já afloraram nas superfícies da edificação. Quando há suspeita da presença de uma anomalia, executa-se um ensaio para comprovar a sua existência. Dentre os ensaios mais comuns podemos citar o de percussão, trado de incremento, ultra-som, tomografia, perfuração controlada pilodyn e resistografia. Recentemente a termografia passou a ser utilizada para a detecção de manifestações patológicas ocultas no campo da construção civil, sobretudo associadas a revestimentos e detecção de umidade.

A termografia permite identificar a temperatura da superfície a ser analisada. A partir da heterogeneidade na temperatura superficial, é possível caracterizar indícios de patologia. Por se tratar de uma técnica eficiente, não intrusiva de fácil execução, ela tem se destacado no diagnóstico de patologias ocultas em diversos campos da construção civil.

Essa pesquisa se propõe a verificar o potencial de utilização da termografia como ferramenta de diagnóstico para intervenções de restauro e conservação. Limitando seu recorte as ligações estruturais das tesouras de telhados de edificações antigas, pretende-se utilizar a técnica no diagnóstico de patologias ocultas nessas estruturas de madeira.

1.1 - Objetivo Geral

Estudar e analisar a eficácia da termografia como técnica não destrutiva para verificar manifestações patológicas ocultas em estruturas antigas de madeira.

1.2 - Objetivos Específicos

- Sistematizar ensaios não destrutivos utilizando câmera termográfica para diagnóstico e caracterização de danos e patologias ocultas nas ligações analisadas.
- Apresentar diretrizes que orientem futuros projetos de intervenção e recuperação de ligações em estruturas antigas de madeira, considerando a termografia como ferramenta de diagnóstico de patologias ocultas.

2 - REFERENCIAL TEÓRICO

2.1 - Conservação e Restauro

No campo da conservação e restauro é importante definir conceitos importantes acerca da preservação e patrimônio, campo em que essa pesquisa se insere. Esses conceitos e o entendimento das premissas da restauração estabelecidas nas cartas patrimoniais serão o mote orientador das investigações no que tange das intervenções de recuperação e restauro das ligações nas estruturas de madeira.

As cartas patrimoniais são os elementos norteadores das ações de intervenção em estruturas e edificações antigas. De tal forma que nela concentram-se manuais de procedimento e análise a serem observados nos projetos e ações de restauro.

De uma forma geral, “o restauro em arquitetura tem sido abordado tradicionalmente através dos princípios das artes visuais e da história / arqueologia”, (CASARLADE, 2007, p. 47). O autor discute essa questão do restauro para além dos critérios metodológicos, e explicita que ao se tratar de arquitetura, face à própria natureza da mesma, a qual incorpora, dentre outras, a dimensão do uso, do espaço articulado e do lugar, além de uma dimensão imaterial ligada à função social, essa abordagem ligada aos princípios das artes visuais e história se mostra deficiente. Por outro lado, no seu modo patrimônio, ela também não pode se desvincular da vida e do contexto a que serve. Nesse sentido é interessante a abordagem de Sola-Morales (2008) ao versar sobre intervenções arquitetônicas em edificações históricas, ressaltando que o caráter da intervenção altera conforme os valores culturais atribuídos à intenção da nova intervenção e ao significado daquela arquitetura histórica. Assim, formular uma doutrina de como proceder em uma intervenção torna-se contraproducente, sendo fundamental o estudo caso-a-caso das ações propostas na intervenção e suas relações e significados assumidos no momento do projeto.

Existem teóricos contemporâneos do restauro e pesquisadores investigando a restauração para além de métodos pré-concebidos ou manuais, tais como Khül (2005), Botallo (2007) e mais recentemente Muñoz-Viñas (2010), que em seu livro *Teoría contemporánea de la Restauración* compila esses novos discursos do

restauro. Mas é sabido que as bases do restauro estabelecidas nas Cartas Patrimoniais que são adotadas como critério de análise de projetos pelo IPHAN estão nos escritos do teórico Cesare Brandi.

Em seu livro *Teoria da Restauração* de 1963, Brandi suscita bases para um restauro crítico, a partir do entendimento de que as intervenções de restauro devem ser sempre reconhecíveis, sem contanto que se rompa com a unidade visual da edificação. Também aponta a necessidade da reversibilidade da intervenção, facilitando futuras ações. As retiradas de matéria original devem ser sempre justificadas e estudadas caso-a-caso. Como conceito de restauração, Brandi (2004, p.30) diz que “a restauração constitui o momento metodológico do reconhecimento da obra de arte, na sua consistência física e na sua dúplici polaridade estética e histórica, com vistas à sua transmissão para o futuro”. A respeito desses apontamentos de Brandi, um excerto em especial transmite o conceito de restauro de sua teoria:

A restauração deve visar ao restabelecimento da unidade potencial da obra de arte, desde que isso seja possível sem cometer um falso artístico ou um falso histórico, e sem cancelar nenhum traço da passagem da obra no tempo (BRANDI, 2004, p.33)

No Brasil, especificamente, o manual de elaboração de Projetos de Preservação do Patrimônio Cultural do Ministério da Cultura (2005) define restauração como o

(...) conjunto de operações destinadas a restabelecer a unidade da edificação, relativa à concepção original ou de intervenções significativas na sua história. O Restauro deve ser baseado em análises e levantamentos inquestionáveis e a execução permitir a distinção entre o original e a intervenção. (MINISTÉRIO DA CULTURA, 2005).

O entendimento desses conceitos auxilia a analisar as Cartas Patrimoniais da UNESCO, que são documentos que traçam recomendações e diretrizes sobre procedimentos de preservação do patrimônio.

A partir dessas diretrizes e princípios elencados nos documentos oficiais da UNESCO e ICOMOS, o entendimento do conceito ampliado de patrimônio cultural e suas relações diretas com o conceito de restauro e seus desdobramentos é estruturado o cerne dos pontos que serão abordados a respeito da análise de patologias, tratamentos e intervenções em ligações em telhados antigos de madeira.

É importante destacar que nos instrumentos de preservação e recomendações para intervenção em edificações históricas, em suas diferentes redações no decorrer dos anos, permanecem as diretrizes ligadas a não descaracterização dos sistemas construtivos tradicionais. Propõe-se que sejam executadas intervenções de caráter pouco intrusivo preservando sempre que possível o material e o desenho original das soluções técnicas das edificações. É fundamental que as técnicas de reparação e restauro utilizadas nas estruturas de madeira sejam reversíveis e sejam catalogadas as espécies utilizadas no caso de reforço ou substituição de peças. De forma geral faz-se importante seguir uma metodologia de análise, registro, inspeção, diagnóstico e estudo minucioso caso-a-caso das possíveis intervenções nas coberturas antigas.

O Conselho Internacional de Monumentos e Sítios (ICOMOS) apresenta três documentos específicos relacionados às metodologias de conservação e restauro da madeira.

Os quadros a seguir apresentam o resumo do conteúdo desses documentos.

QUADRO 1 – Documentos específicos relacionados às metodologias de conservação e restauro (ICOMOS)

Princípios para a preservação das estruturas históricas em madeira (ICOMOS-1999)
<p>Inspeção, registro e documentação</p> <ol style="list-style-type: none"> 1. Ressalta a importância do registro da condição da estrutura antes da intervenção e dos materiais usados nos tratamentos. Toda a documentação e amostras de partes removidas da estrutura devem ser catalogadas, com a informação sobre a tecnologia tradicional utilizada e incluir a justificativa para a escolha do material e da técnica utilizada na intervenção; 2. Documentar as causas da degradação e ruína estrutural, por meio de um diagnóstico profundo, que pode incluir evidências documentais, inspeções físicas e análises com utilização de métodos não destrutivos. Pode englobar medidas de emergência com intervenções pontuais;
<p>Intervenções</p> <ol style="list-style-type: none"> 1. O objetivo principal da preservação e conservação é manter a autenticidade histórica e a integridade do patrimônio cultural;

2. A intervenção proposta deve de preferência usar meios tradicionais, ser reversível se for tecnicamente possível ou pelo menos não prejudicar futuros trabalhos de preservação quando estes forem necessários, além de não inviabilizar o acesso às modificações incorporadas na estrutura;
3. Adotar o princípio da intervenção mínima, o que não exclui a possibilidade se necessário, de seu desmantelamento e sua posterior remontagem para sua reparação;
4. Considerar a estrutura histórica como um todo, e preservar o máximo possível de material existente, incluindo os acabamentos superficiais. Se necessário devem ser reproduzidos os materiais, técnicas e texturas originais;
5. O objetivo da restauração é conservar a estrutura histórica e sua capacidade resistente e revelar seus valores culturais, melhorando a legibilidade de sua integridade histórica, do seu estado anterior e do projeto, conforme indicado nos artigos 9-13 da Carta de Veneza. Membros removidos e outros componentes da estrutura histórica devem ser catalogados, e exemplares característicos devem ser mantidos em armazenamento como parte da documentação;

Reparação e substituição

1. Quando for necessária a substituição de peças degradadas ou danificadas, pode ser utilizada a madeira na substituição, desde que as novas peças utilizem a mesma espécie de madeira ou de melhor qualidade, devendo abranger características naturais semelhantes. A tecnologia construtiva e a manufatura devem, se possível, corresponder às originais e os pregos e materiais secundários devem ser reproduzidos;
2. Os novos membros ou partes dos membros devem ser distinguidos dos existentes. Não se deve reproduzir a degradação natural ou deformação dos membros substituídos. Métodos tradicionais ou modernos podem ser usados para aproximar a cor do antigo e do novo, desde que não prejudique ou degrade a superfície da madeira;
3. Os novos membros ou partes dos membros devem ser marcados de modo discreto com gravação na madeira para sua identificação;

Materiais e tecnologias contemporâneas

1. Os materiais contemporâneos, como resinas epóxi, e técnicas, como o reforço com aço estrutural, devem ser escolhidos e utilizados com o máximo de cuidado e apenas nos casos em que a durabilidade e o comportamento estrutural dos materiais e técnicas de construção foram satisfatoriamente comprovados para longos períodos. Instalações como de aquecimento e de sistemas de prevenção de incêndio devem ser instalados com o devido respeito à importância histórica e estética da estrutura ou do sítio;
2. O emprego de preservantes químicos deve ser cuidadosamente controlado e monitorado, e só deve ser usado quando existirem garantias de benefício, quando a segurança pública e ambiental não forem afetadas, e quando a probabilidade de eficácia a longo prazo for significativa;

Monitorização e manutenção

1. Adotar estratégia de monitorização e manutenção das estruturas históricas em madeira;

Recomendações para análise, conservação e restauração estrutural do patrimônio arquitetônico (ICOMOS-2001)

Princípios gerais:

1. A restauração estrutural em patrimônio arquitetônico não é um fim por si mesmo, mas um meio para preservação do edifício como um todo;
2. Nenhuma ação deve ser realizada sem primeiramente averiguar os possíveis benefícios e danos ao patrimônio arquitetônico, exceto em casos onde medidas urgentes de salvaguarda são necessárias para evitar o colapso iminente das estruturas. Estas medidas urgentes, contudo, devem, quando possível, evitar modificar a estrutura de maneira irreversível;
3. Estruturas deterioradas devem ser reparadas em vez de substituídas sempre que possível;

Diretrizes- Medidas corretivas na restauração estrutural em madeira:

1. As operações preliminares devem identificar as espécies, que são diferentemente suscetíveis a ataques biológicos, e avaliar a capacidade resistente dos elementos individuais;
2. Quando são introduzidos materiais de reforço ou de consolidação, sua compatibilidade com a estrutura de madeira deve ser verificada. Por exemplo, ligações de aço são susceptíveis à corrosão em associação a algumas espécies de madeira, devendo ser usados aços inoxidáveis. As intervenções não devem impedir a higroscopicidade da madeira;
3. Como muitas estruturas de madeira foram originalmente pré-fabricadas, a desmontagem parcial ou completa pode facilitar um reparo efetivo;
4. A madeira é na maioria das vezes usada para formar estruturas em pórticos ou tesouras onde os principais problemas são geralmente relacionados às falhas locais nos nós. As medidas de reparo mais comuns consistem em reforçar os nós ou adicionar elementos diagonais suplementares, quando for necessário, para melhorar a estabilidade às forças laterais;

Recomendações dos documentos ICOMOS para estruturas em madeira

1. Importância do registro e documentação;
2. Importância do diagnóstico e da inspeção;
3. Substituição com madeira igual ou de melhor qualidade-durabilidade
4. Técnicas contemporâneas devem ser utilizadas com o máximo cuidado e comprovação de durabilidade;
5. Controle de substâncias químicas preservantes com uso benéfico e eficaz;
6. Importância da manutenção e monitorização de estruturas;
7. Identificação botânica e avaliação estrutural;
8. Possibilidade de desmontagem e remontagem;
9. Avaliação de nós e da estabilidade lateral;
10. Caráter didático;

Princípios dos documentos ICOMOS para estruturas em madeira

- I. Autenticidade;
- II. Preferência ao emprego de técnicas tradicionais;
- III. Distinção harmoniosa com marcação de peças novas;
- IV. Reversibilidade;
- V. Intervenção mínima;
- VI. Compatibilização;

A atividade de Conservação e Restauração é pensada, planejada, desenvolvida e implantada para atender à necessidade de preservar a matéria e a memória daquelas obras que possuem importância histórica, artística e cultural. Segundo Brito (1995, p. 37) os objetivos das medidas de “intervenção indireta em uma obra consistem em aumentar sua vida útil, diminuir a velocidade de envelhecimento, diminuir riscos, manter características originais e manter condições físicas e funcionais.” Para que estas medidas sejam eficazes, a autora cita que isso dependerá do conhecimento das características da obra desde sua criação até a intervenção, do seu do entorno, das causas que produzem sua patologia e dos materiais e meios técnicos idôneos que evitam sua alteração.

Em se tratando de edificações históricas, estas, inevitavelmente, estarão sujeitas à passagem do tempo e à ação de agentes de degradação resultando em manifestações patológicas. A aplicação de uma metodologia correta de intervenção, o conhecimento aprofundado dos materiais e técnicas construtivas, bem como a busca da origem dos problemas são questões essenciais e determinantes para a obtenção de resultados eficientes. Para tal é necessária a interação com as diversas áreas do conhecimento envolvidas na complexidade do processo. (GUERRA; PERES, 2012, p. 52)

Dado o contexto de preservação e restauro que essa dissertação se situa, é importante apontar as questões referentes ao campo estrutural das ligações dos telhados, objeto do estudo desse trabalho.

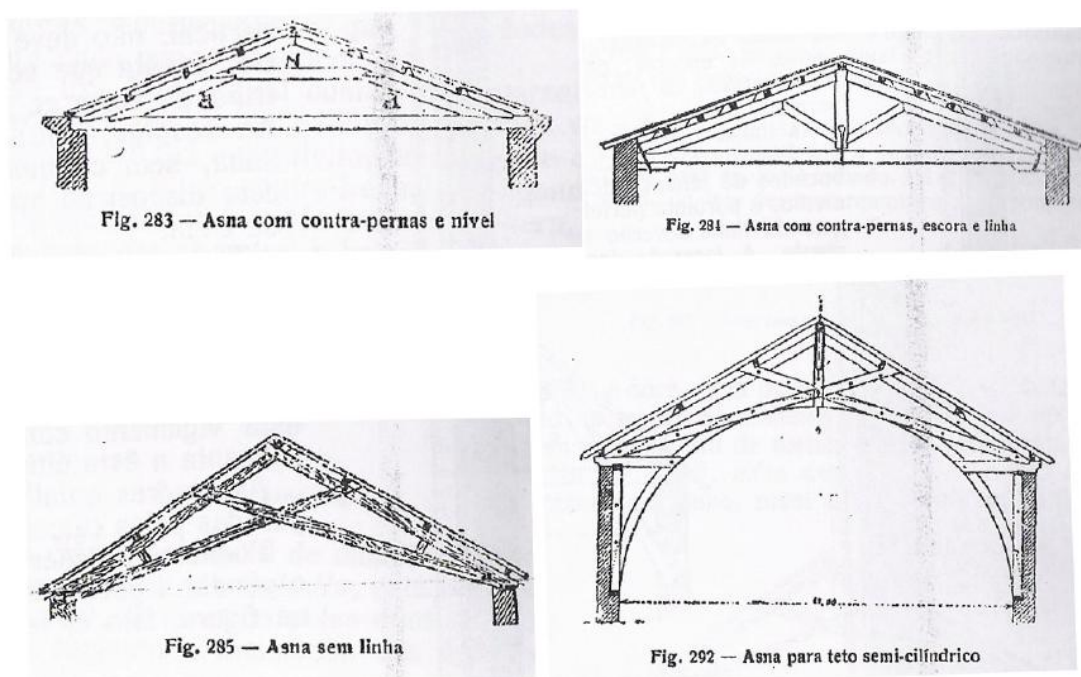
2.2 - Concepção de Telhados

A origem da técnica construtiva de telhados, tal qual os conhecemos, origina-se do “Tratado de Arquitetura” de Vitruvius. Obra datada de mais de 2.000 anos, onde o autor cita em diversas partes do seu tratado alguns elementos construtivos de arquitetura, analisando-os e exemplificando-os com seus textos.

As tesouras são o sistema estrutural mais empregado na estrutura principal de uma cobertura. Consistem em uma estrutura de treliça triangular reticulada. As tesouras suportam as cargas permanentes (peso próprio da estrutura) e as cargas acidentais.

As coberturas, que podem ser de duas, três, quatro, ou mais águas, possuem na sua estrutura principal tesouras. As tesouras são uma espécie de vigas armadas em forma triangular, constituídas por várias peças de madeira. As tesouras de madeira podem ter inúmeras configurações geométricas. A escolha da sua tipologia recai sobre vários fatores entre os quais se destacam o vão a cobrir, a natureza das ações a considerar, a inclinação da cobertura, a arquitetura e as operações de montagem e execução.

FIGURA 1 - Exemplos de tesouras, que foram muito utilizadas em telhados coloniais no país.



Essas tesouras têm origem antiga e são frutos da evolução de sistemas simplificados de estruturas triangulares travadas, que originaram as tesouras que hoje conhecemos como *Howe*.

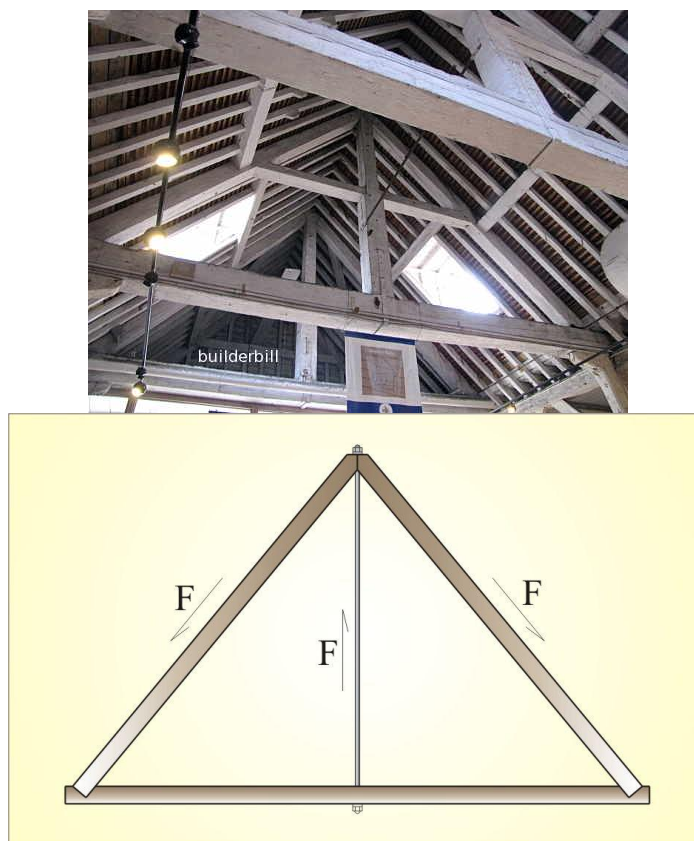
A treliça Howe com seus elementos originais sofreu variações e adaptações através dos tempos, sem no entanto perder sua conformação original. Suas peças receberam novas nomenclaturas a medida da difusão do seu uso e do contato com novas culturas.

Existem diversas tipologias de tesouras, a partir da organização geométrica dos elementos componentes das treliças. Para Cardão (1979), as tesouras de madeira são econômicas até os 12 metros pelo fato de não haver necessidade de alteração na forma original, além de serem utilizadas somente peças de seção comercial. O tipo mais comum de tesoura é aquela que apresenta dois pontaletes laterais, além do principal (ao centro). Estes pontaletes laterais transferem o carregamento que vem das outras diagonais até o pontalete principal. Este tipo de tesoura é do tipo Howe e é aplicável aos vãos até 18 metros, com afastamento máximo entre elas de até 4m.

2.2.1 - Treliça Howe

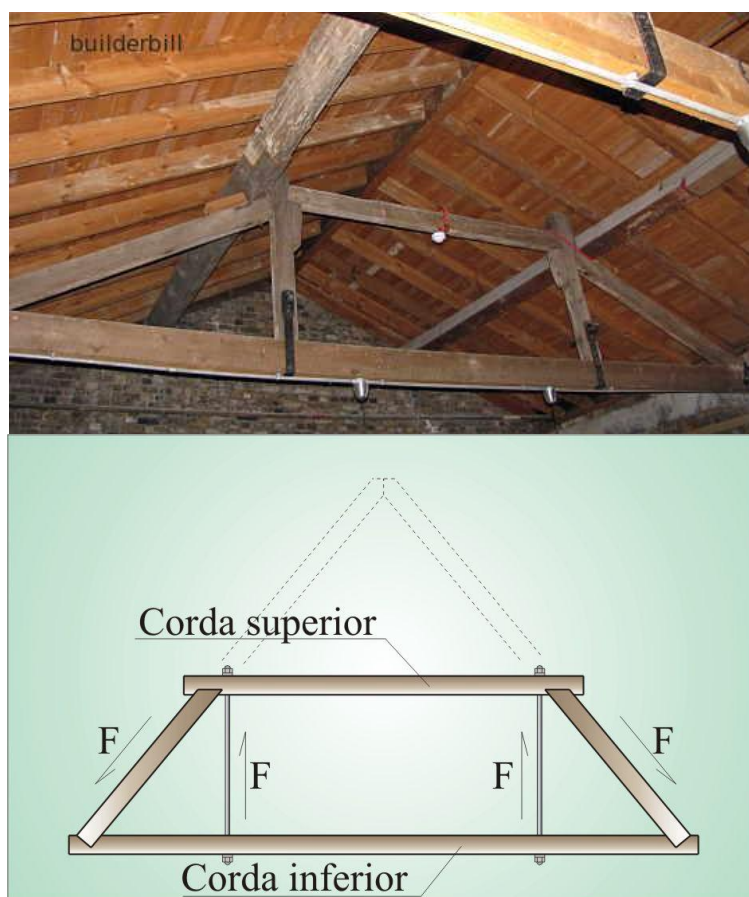
Em tempos distantes, o transporte de grandes cargas de mercadoria e matérias-primas era feito através de vagões. O peso destes carregamentos junto ao peso próprio do veículo ocasionava vibrações nas estruturas de pontes. Para suportar tais cargas, o sistema estrutural de pontes empregou inicialmente três tipos de treliças: a treliça Kingpost, a treliça Queenpost, e a treliça Howe.

A treliça de ponte mais simples e mais antiga é a Kingpost (Fig. 2). É muito eficiente ao transferir a carga do centro do banzo inferior para os limites da ponte (apoios). Sua deficiência está no fato de que enquanto o vão a ser vencido aumenta, o comprimento do banzo superior (peça de maior comprimento) também aumenta.

FIGURA 2 – Treliça Kingpost

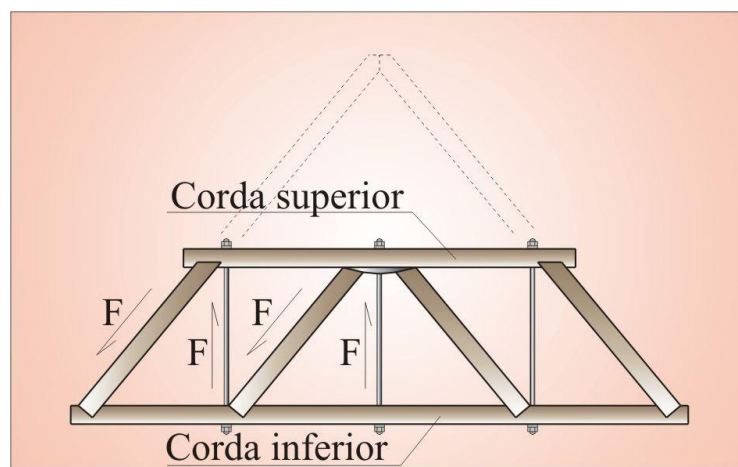
Fonte: Elaborado pelo autor, a partir do site:
<http://ths.sps.lane.edu/english/Period3/David%5FMarchant/>

Devido ao limite de comprimento das peças que dependiam das dimensões dos troncos das árvores, o sistema estrutural Queenpost foi adotado para vencer maiores vãos, substituindo o sistema Kingpost utilizado anteriormente. O sistema estrutural de treliça Queenpost (Fig.3) utiliza uma peça, aqui chamada de corda superior, que permite a utilização de banzos superiores menores, podendo vencer vãos maiores.

FIGURA 3 – Treliça Queenpost

Fonte: Elaborado pelo autor, a partir do site:
<http://ths.sps.lane.edu/english/Period3/David%5FMarchant/>

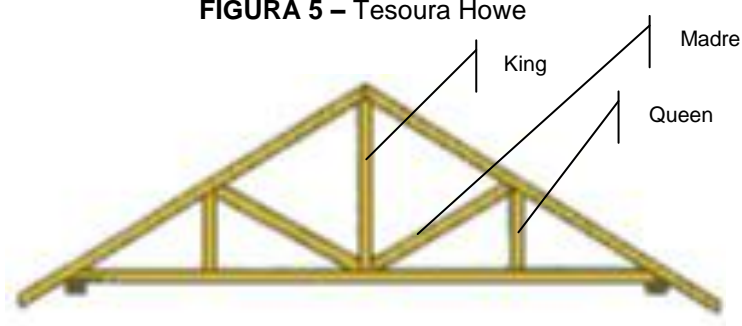
Por volta de 1840, William Howe desenvolveu mais uma variação da treliça Kingpost (Fig.4). Com este sistema estrutural, a distância do vão vencido pode aumentar simplesmente aumentando o número de montantes e diagonais com a altura permanecendo constante.

FIGURA 4 – Variação da treliça Queenpost

Fonte: Elaborado pelo autor, a partir do site:

<http://ths.sps.lane.edu/english/Period3/David%5FMarchant/>

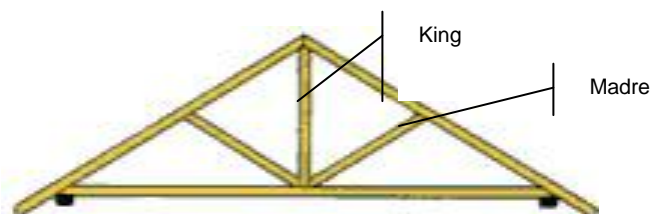
A partir dos estudos de Howe, desenvolveu-se o tipo de tesoura mais comum e amplamente usado em coberturas de pequenos vãos (Fig. 5). As tesouras do tipo Howe mesclam elementos da Kingpost e da Queenpost. Muitas vezes, devido aos pequenos vãos e cargas pequenas da estrutura, os elementos da Queenpost podem ser subtraídos, tendo como resultado uma tesoura que se assemelha muito a Kingpost (Fig. 6).

FIGURA 5 – Tesoura Howe

Fonte: Elaborado pelo autor, a partir do site:

<http://ths.sps.lane.edu/english/Period3/David%5FMarchant/>

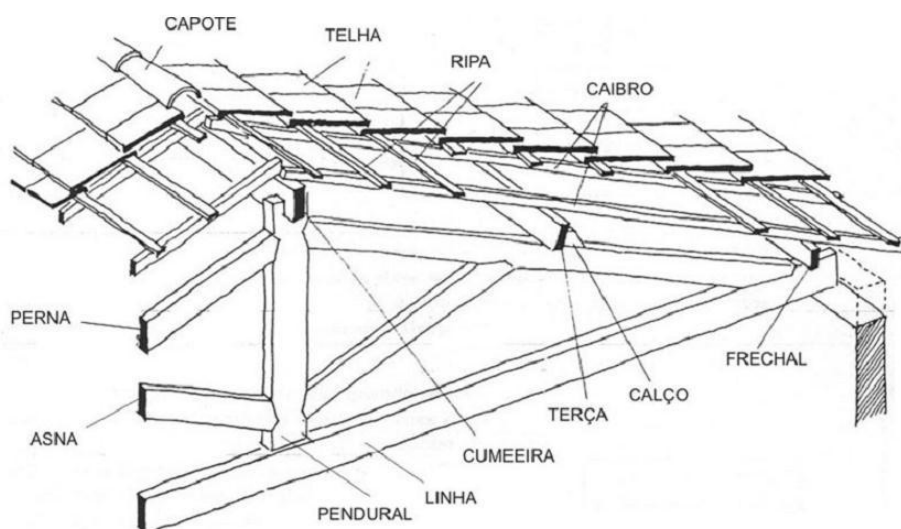
FIGURA 6 – Forma mais comum da tesoura Howe



Fonte: Elaborado pelo autor, a partir do site:
<http://ths.sps.lane.edu/english/Period3/David%5FMarchant/>

No Brasil, a bibliografia de arquitetura apresenta a tesoura com treliça Howe conforme a figura 7. As peças recebem terminologias variadas, sendo essa a mais comum:

FIGURA 7 - Detalhamento do madeiramento de uma tesoura de telhado



Fonte: ALBUQUERQUE, 2006, p. 41.

1. *Terças*- peças longitudinais apoiadas na estrutura principal sobre as quais se apóiam os caibros;
2. *Frechais*- são chamadas as terças das extremidades inferiores do telhado. Também são denominadas frechais as vigas que são posicionadas no respaldo das paredes, com a função de distribuir cargas concentradas de tesouras ou elementos estruturais de maneira uniforme para as paredes da edificação.
3. *Banzo superior, empena ou perna*- Peças que acompanham a inclinação da cobertura da cumeeira ao apoio da cobertura geralmente suportam cargas à compressão;
4. *Banzo inferior linha, tirante ou tensor*- Peças horizontais situadas na parte inferior da tesoura. Na maioria das vezes suportam cargas à tração;
5. *Pontaletes ou Montantes*- Peças verticais laterais que fazem a ligação da perna com a linha, no geral suportam cargas à tração;
6. *Pontalete ou pendural*- Mesma função dos montantes, mas localizado no centro da tesoura, ligando o cume à linha.
7. *Diagonal, escora, mão francesa* - Peças inclinadas internas que fazem a ligação entre a linha e a perna.

No campo da análise estrutural a escolha do sistema estrutural treliçado em coberturas para a construção em madeira é, provavelmente, mais comum que em qualquer outro material estrutural, devido, talvez, à longa tradição no uso da madeira para este elemento de estrutura ou, possivelmente, por causa da relativa facilidade com que formas usuais treliçadas podem ser fabricadas e montadas em madeira. (CALIL, 1997)

Entende-se por estrutura de treliça as estruturas lineares compostas de barras retas ligadas por articulações. Suas barras são ligadas umas às outras por suas extremidades e assim resultam em um conjunto rijo, isto é, desprezando-se as pequenas variações das deformações elásticas das barras, as posições relativas dos nós não podem ser alteradas (MOLITERNO, 1981). Ainda segundo o autor, na caracterização estrutural de treliças, para fins de dimensionamento e determinação dos esforços solicitantes, admitem-se as seguintes hipóteses:

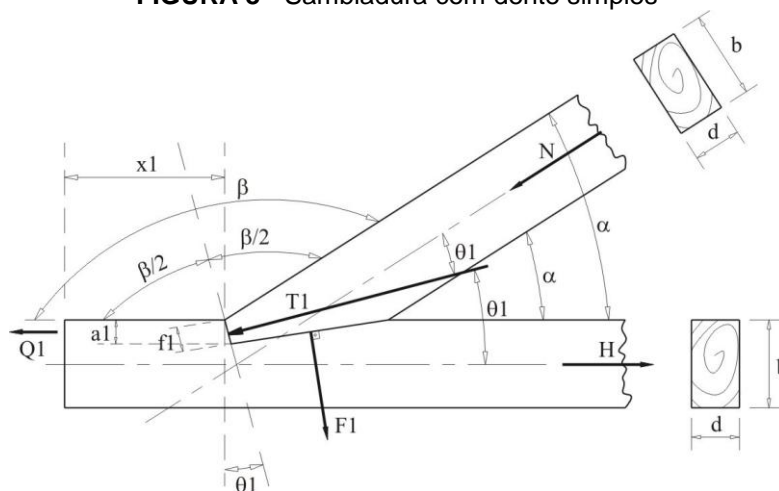
- 1) As juntas ou nós são consideradas articulações, desprezando-se o atrito;
- 2) Todas as cargas são consideradas concentradas nos nós ou juntas. Caso contrário, são consideradas vigas contínuas ou quadros;
- 3) Todas as barras são retas. Para as barras curvas deveriam ser considerados os esforços nas direções tangencial e normal;
- 4) As treliças pertencem ao plano das forças.

2.3 - Ligações em Treliças

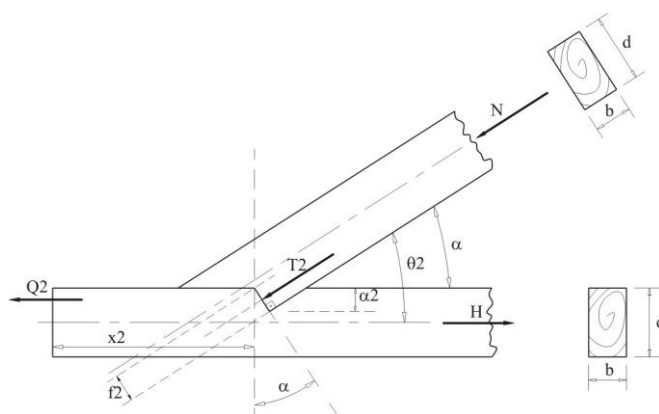
As tesouras são treliças planas verticais com os banzos superiores inclinados, projetadas para receber cargas, que atuam paralelamente a seu plano, transmitindo-as aos apoios. Essa transmissão se dá através de elementos de ligação entre suas partes.

As ligações entre os vários elementos são realizadas através de entalhes, podendo possuir mecha e respiga, executadas de forma que os esforços são transmitidos por compressão e atrito. Este tipo de entalhe pode ser efetuado com dente simples, anterior ou posterior da peça, ou dente duplo. O correto funcionamento da ligação depende, sobretudo, da sua tipologia, diretamente relacionada com o tipo e nível de ações de solicitação, bem como a perfeição e minúcia da sua execução.

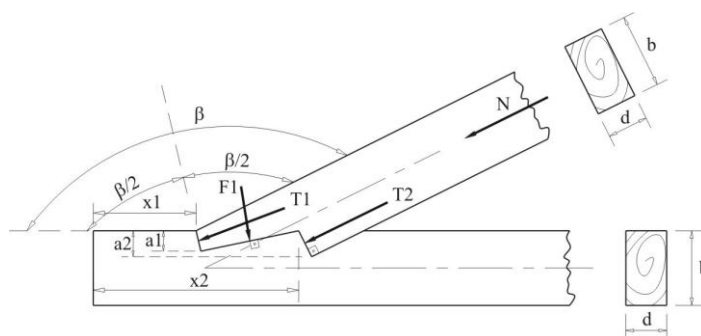
A eficiência das ligações em estruturas de madeira depende de uma série de aspectos tais como o tipo de ligação, o comportamento elasto-plástico da madeira, além da qualidade do projeto e da mão-de-obra. As ligações adequadas têm por finalidade a transmissão e distribuição correta dos esforços entre as peças a serem ligadas. O tipo de ligação será definido a partir do tipo de material, assim como da posição relativa da junção. Sempre seguindo as condições de estruturas treliçadas, ou seja, os eixos de todas as peças que concorrem em um nó devem convergir a apenas um ponto (nó teórico), além de todos os elementos componentes da tesoura estar em um mesmo plano (coplanaridade). Segundo Moliterno (1981), existem três tipos de sambladuras: com dente simples, com dente simples recuado e com dente duplo.

FIGURA 8 - Sambladura com dente simples

Fonte: ALBUQUURQUE, 2006, p. 52.

FIGURA 9 - Sambladura com dente simples recuado

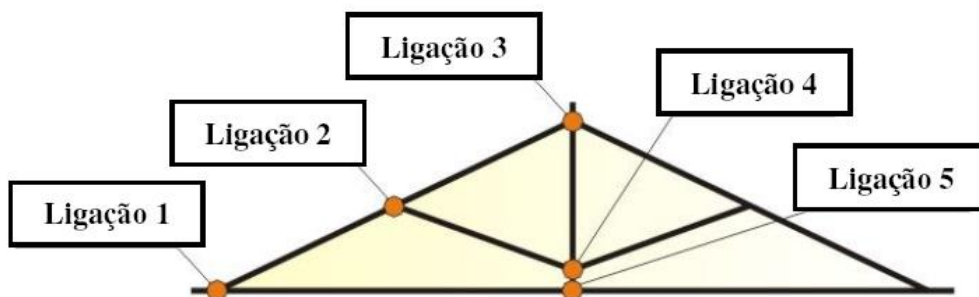
Fonte: ALBUQUURQUE, 2006, p. 52

FIGURA 10 - Sambladura com dente duplo

Fonte: ALBUQUURQUE, 2006, p. 52.

Uma tesoura Howe possui 5 tipos diferentes de ligações ilustrados a seguir:

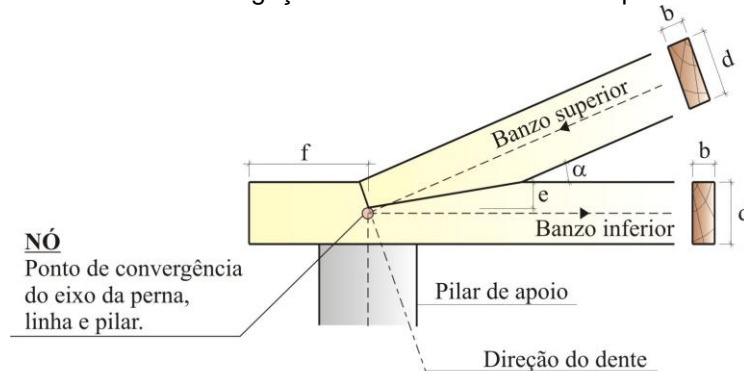
FIGURA 11 - Ligações comuns em tesouras Howe



Fonte: ALBUQUURQUE, 2006, p. 45.

LIGAÇÃO 1: Banzo Inferior-Banzo Superior

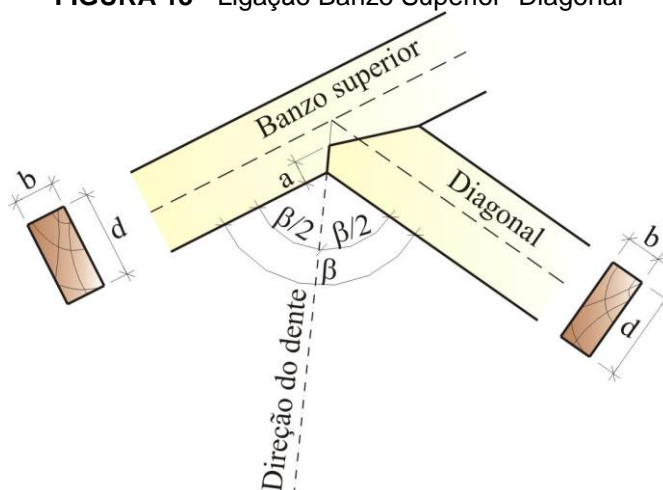
FIGURA 12 - Ligaçao Banzo Inferior-Banzo Superior



Fonte: ALBUQUURQUE, 2006, p. 45.

LIGAÇÃO 2: Banzo Superior-Diagonal

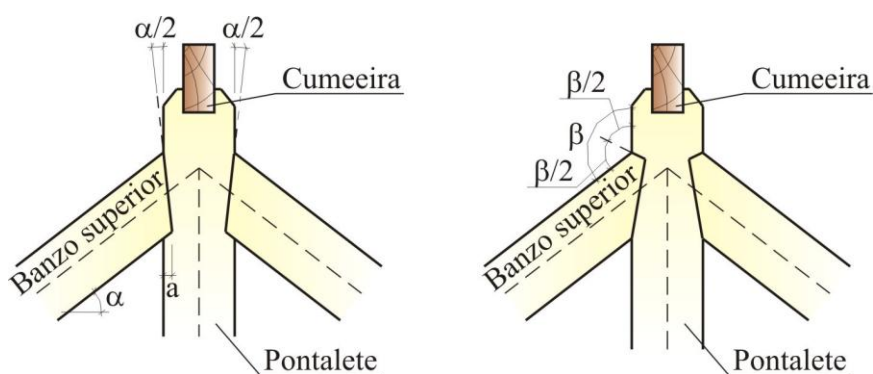
FIGURA 13 - Ligação Banzo Superior- Diagonal



Fonte: ALBUQRQUE, 2006, p. 45.

LIGAÇÃO 3: Banzo Superior-Pontaleta

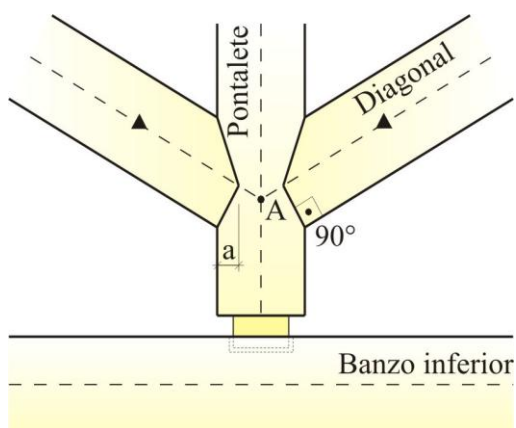
FIGURA 14 - Ligação Banzo Superior-Pontaleta



Fonte: ALBUQRQUE, 2006, p. 46.

LIGAÇÃO 4: Diagonal-Pontaleta

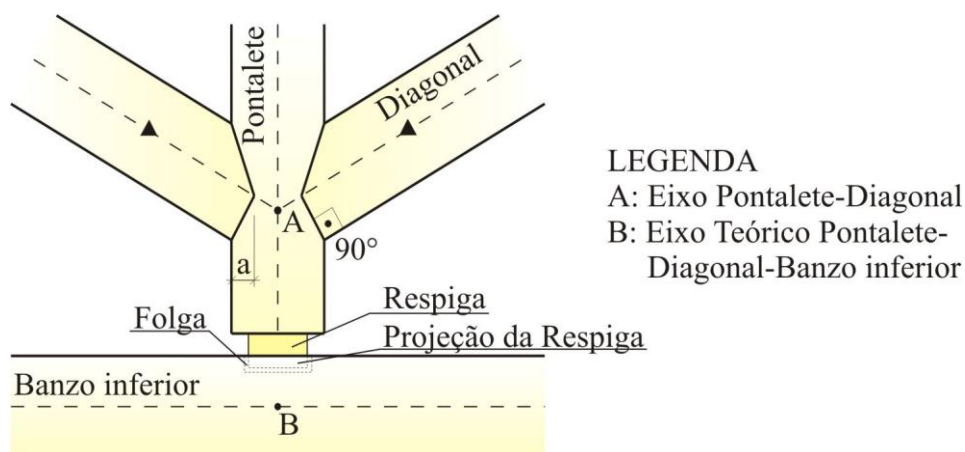
FIGURA 15 - Ligação Diagonal-Pontaleta



Fonte: ALBUQRQUE, 2006, p. 46.

LIGAÇÃO 5: Banzo inferior-Pontaletes

FIGURA 16 - Ligação Banzo Inferior-Pontaletes



Fonte: ALBUQUURQUE, 2006 p. 46.

Estudos como o de Branco *et al.* (2006) ressaltam que as ligações desempenham um papel crucial no comportamento de tesouras tradicionais de madeira. O comportamento global de uma estrutura desse tipo e a distribuição dos esforços internos pelos vários elementos depende da resistência e da rigidez das ligações, em particular, quando sujeitas a ações assimétricas e acidentais e deteriorações de origem biótica ou físico-químicas. Nestas condições, as ligações são frequentemente, submetidas a tensões que ultrapassam o limite elástico, com a consequente introdução de fenômenos não-lineares. O desconhecimento do comportamento das ligações conduz, frequentemente, à substituição de tesouras antigas de madeira, impedindo que se promova o seu reforço, restituindo os necessários níveis de segurança. O comportamento das ligações não costuma ser considerado pelos projetistas. Via-de-regra, soluções de reforço ou recuperação envolvem ou a substituição total das ligações existentes ou a alteração do tipo de ligação (inserindo ligações metálicas, por pinos ou outros tipos). Com isso há uma descaracterização da solução original de cobertura da edificação.

Por sua vez, Parisi *et al.* (2007) salientam que princípios da restauração desenvolvidos para a proteção dos monumentos estão atualmente sendo aplicados na modernização estrutural das construções tradicionais existentes, a fim de preservar a sua herança cultural. Estruturas de madeira, normalmente, presentes

nestes edifícios para apoiar telhados e pisos, foram substituídas quando os prédios foram modernizados, muitas vezes utilizando materiais novos e diferentes, e às vezes produzindo resultados insatisfatórios em termos de comportamento estrutural. A tendência atual de conservação requer o desenvolvimento de critérios para intervenções e implementação de procedimentos operacionais que cumpram os requisitos de segurança estrutural e princípios de restauração satisfatórios.

Já Palma *et al.* (2012) estudaram ligações de carpintaria estrutural para avaliar o seu comportamento rotacional e a eficácia de algumas técnicas de reforço comuns. Cada tipologia de conexão apresenta mecanismos de suporte de carga específico que ditam diferentes performances e modos de falha, que devem ser considerados quando da elaboração de um reforço.

O estudo de Tannert *et al.* (2013) sobre reforço estrutural em estruturas de madeira apresenta três casos: (I) adição de uma estrutura auxiliar (II) reforço com materiais compósitos e (III) incorporação de elementos de reforço. Nas três situações há ganho de desempenho estrutural a partir das intervenções.

Tomasi *et al.* (2010) estudaram ligações reforçadas por parafusos. O estudo propôs um método para o cálculo da capacidade de carga e rigidez dos parafusos colocados para reforçar estruturas ligadas por samblagem, em uma posição inclinada em relação ao plano de corte e sujeito a cisalhamento por compressão de carga.

Cestari *et al.* (2008, 2011, 2013), desenvolveram amplo estudo de recuperação de ligações utilizando nano compósitos de fibra de carbono. A pesquisa foi dirigida à definição e avaliação de uma metodologia de preparação e aplicação do nano-compósito com o objetivo de se verificar um aumento da resistência mecânica em comparação com os métodos tradicionais de reforço. Testes de laboratório foram realizados: o primeiro em pequenas amostras de madeira, e posteriormente em elementos de madeira com dimensão real. Os resultados obtidos a partir dos testes são promissores para futuros desenvolvimentos da aplicação destes materiais nano-compósitos.

2.4 - Degradação da madeira

A deterioração e/ou degradação da madeira pode ser proveniente de agentes bióticos ou abióticos e ainda pode ser provocada por danos estruturais, que podem atuar isoladamente ou em conjunto, comprometendo a resistência da madeira. É importante o acesso periódico às suas condições de integridade, reparando ou substituindo os membros deteriorados, a fim de se evitarem falhas estruturais (ROSS *et al.*, 2006). A avaliação da integridade estrutural resulta da coleta periódica e análise de dados relacionados às propriedades físicas e mecânicas do material, para que se possam programar as ações que serão aplicadas às partes deterioradas que podem afetar o conjunto estrutural.

No caso das obras em madeira, a inspeção envolve conhecimentos tanto de biologia quanto de engenharia. Cruz *et al.* (2004) afirmam que um profissional nesse ramo deve ter domínio sobre: identificação de espécies de madeira, avaliação da durabilidade dos elementos de madeira nas condições presente (de acordo com espécies de madeira, distribuição do cerne, condições ambientais etc.), atendimento de qualquer necessidade de tratamento preservativo para assegurar a durabilidade desejada e avaliação do desempenho estrutural das peças de madeira.

Alguns estudos se destacam no que tange a análises de degradação e patologias estruturais da madeira. Faria (2002) apresenta uma metodologia de avaliação e intervenção em estruturas antigas. Uma vez que a reabilitação de edificações antigas é conduzida diversas vezes através de pequenas obras ao longo do tempo, o autor propõe uma metodologia de intervenção analisando as possibilidades de substituição integral dos elementos estruturais, substituição parcial e reforço com tecnologias contemporâneas. Também são analisados os principais fatores de degradação da madeira. Arêde (2002) também estuda a inspeção e diagnóstico de patologias estruturais em estruturas antigas de madeira, e propõe uma metodologia para avaliação da degradação. Por sua vez, Lopes *et al.* (2009) elencam soluções de reabilitação de estruturas de madeira a partir da análise de problemas estruturais recorrentes em coberturas antigas e a proposição de intervenções estruturais para mitigar efeitos de perda de capacidade resistente das ligações em tesouras de madeira antiga.

Estudos específicos em patologias de coberturas em estrutura de madeira apresentam dados a essa discussão sobre patologias como o quadro a seguir elaborado por La Pastina Filho (1999), para manutenção e conservação periódica das coberturas em madeiras. No manual de conservação de telhados do IPHAN, La Pastina Filho (1999) organiza por meio de quadros os agentes de deterioração dos telhados e suas consequências.

QUADRO 2 - Execução da manutenção preventiva

AGENTES DE DETERIORAÇÃO DOS TELHADOS		
Agentes de deterioração	Estruturas / Armação	Medidas e procedimentos
1 – FORÇAS FÍSICAS DIRETAS (choques, vibrações, ventos, raios, circulação sobre o telhado) ⇒ provocam rupturas, deformação, desabamento.	<ul style="list-style-type: none"> • Abala os nós ou vínculos • Deformação • Desabamento total ou parcial 	<ul style="list-style-type: none"> • Aumentar segurança • Instalação de pára-raios • Controlar o acesso de pessoas ao telhado
2 – VANDALISMO (objetos atirados sobre telhado, rojões, balões)	<ul style="list-style-type: none"> • Risco de incêndio 	<ul style="list-style-type: none"> • Aumentar vigilância
3 – INFILTRAÇÃO DE ÁGUAS PLUVIAIS OU OUTRAS DECORRENTES DE VAZAMENTO ⇒favorecem a proliferação de agentes patológicos.	<ul style="list-style-type: none"> • Apodrecimento de peças • Deformação • Desabamento 	<ul style="list-style-type: none"> • Restaurar revestimento das telhas, impedindo infiltrações • Inserir sistema de captação e escoamento de águas de infiltração • Sanar problemas nas instalações hidráulicas
4 – PRESENÇA DE VEGETAÇÃO, INSETOS, MICRO ORGANISMOS E OUTROS ANIMAIS (pássaros, morcegos, roedores, cupim, brocas, fungo, mofo) ⇒ causam obstrução do sistema de escoamento de águas. ⇒ atacam e destroem as peças de madeira.	<ul style="list-style-type: none"> • Infestação e perda de seção útil • Perda da eficiência dos nós. • Ruptura • Deformação • Desabamento 	<ul style="list-style-type: none"> • Remoção de vegetação e de animais vivos ou mortos • Instalar sistema de proteção para impedir a entrada de animais • Estabelecer programa de eliminação e controle de pragas

Fonte: La Pastina Filho (1999)

O manual de conservação preventiva para edificações do *Programa Monumenta* (2006) possui um roteiro de inspeções de acordo com possíveis problemas na cobertura. Os problemas indicados são:

- Telhas quebradas ou deslocadas;
- Presença de vegetação na cobertura;
- Presença de galerias de cupim subterrâneo;
- Presença de resíduos que indicam a presença de cupins;
- Presença de resíduos e de pequenas perfurações circulares que indicam a presença de brocas;
- Excremento de pombos ou de outros animais;
- Presença de fungos de podridão (alteração de cor, mofo, cheiro forte e amolecimento);
- Falha nos encaixes;
- Calhas, condutores e reservatórios entupidos/ com vazamentos;
- Fiação elétrica inadequada (fios fora de eletrodutos, sem isolamento);
- Inclinação incorreta do telhado (ver se há estagnação de águas pluviais);
- Falta ou deficiência na amarração de telhas;
- Peças arqueadas;
- Presença de rachaduras na argamassa de assentamento de cumeeira/rufos;
- Falta de ventilação no desvão do telhado;
- Rufos danificados;

É possível ressaltar, portanto, pontos relevantes a serem observados no que tange à degradação de madeiras. Dias (1998) salienta que a deterioração dos edifícios históricos provém, na maioria dos casos, da infiltração de água em seus interiores. É importante observar que as pesquisas sobre degradação da madeira no Brasil estão essencialmente ligadas à presença elevada de umidade (característica do clima tropical úmido e subtropical úmido, em que se encontra a maior parte do território brasileiro). Quando é observada a presença dos agentes de degradação biológica como fungos e bactérias, em sua maioria, eles necessitam da presença de umidade para se desenvolver. De maneira geral é importante atentar-se a presença de umidade nas estruturas antigas como indício da existência de agentes patológicos de degradação da madeira, de tal forma que as inspeções e análises de patologias devem ser realizadas com o intuito de se diagnosticar a existência de condições que favoreçam o aparecimento dos agentes de deterioração ora listados.

2.5 - Termografia

Toda e qualquer intervenção para conservação ou requalificação em coberturas de edificações antigas deve começar pela análise do estado de conservação do madeiramento do telhado. O ideal é que sejam usadas técnicas não destrutivas e pouco intrusivas, de forma a não causar ou agravar danos à estrutura. O uso deste tipo de técnica não-destrutiva que abrange, entre outros, o uso de termografia é relativamente novo e pouco usado, seja pelo alto custo dos equipamentos de análise ou por sua dificuldade de aplicação prática. Esta dissertação lança olhar no estudo das possibilidades de utilização de termografia Infravermelha como técnica de análise NDT (Nondestructive Testing). Na construção civil, esta técnica tem sido empregada para a detecção de vazamentos, inspeção térmica de entorno de novas obras e testes térmicos para conservação de edificações. A proposta é utilizar a técnica para mapear patologias nas ligações por entalhes nas tesouras de uma edificação antiga, promovendo um novo uso para a termografia no patrimônio edificado e gerando uma forma de diagnóstico de patologias pouco intrusivo e confiável.

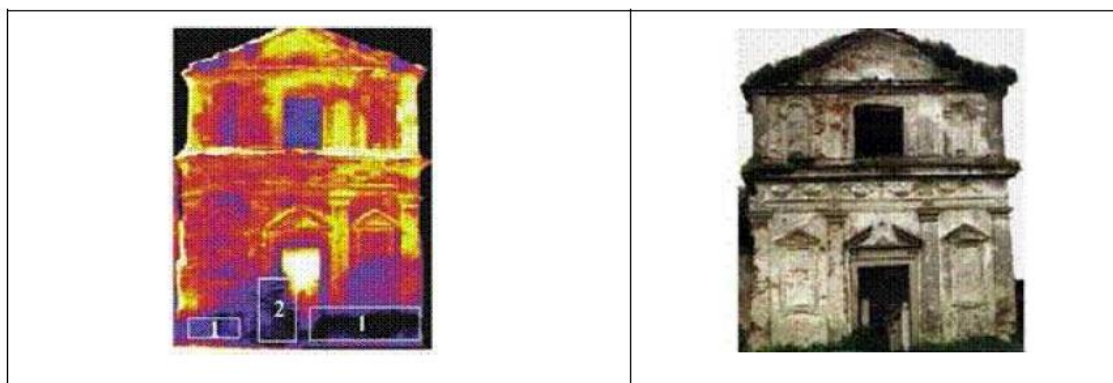
A técnica de termografia consiste no imageamento por escalas de cores da percepção da temperatura superficial de um corpo, uma vez que todo corpo com temperatura acima do Zero Absoluto emite radiação térmica. Através desse imageamento é possível detectar alterações de temperatura que indicam possíveis problemas patológicos.

A termografia tem como principais vantagens a detecção de objetos não visíveis, não necessitando de contato físico, ensaio é realizado em tempo real, pode ser executado em larga escala e é uma técnica não destrutiva (BARREIRA, 2004, p. 27). Além disso, o manual técnico da Flir (2009, p. 160) cita as seguintes vantagens: “não requer um realojamento temporário dos residentes, apresentação visual ilustrativa dos resultados e o método confirma os pontos de falha e as vias de migração da umidade”. O mesmo manual aponta como desvantagem que o método detecta apenas diferencial de temperatura na superfície, ela não consegue penetrar nas paredes, não detectando danos abaixo da superfície, isto é, presença de fungos ou danos estruturais. A maioria das patologias dos materiais e componentes presentes

nas edificações estão associadas à temperatura. Assim a medição desta poderá auxiliar na compreensão dos fenômenos que estão na origem das anomalias.

Maldague (2001) apresenta duas técnicas para o método não destrutivo de imageamento termal: passiva e ativa. Técnica Passiva é aquela na qual os materiais já contem armazenamento interno de energia térmica ou são estimulados por uma fonte natural de calor (energia solar). Técnica Ativa é aquela que envolve o aquecimento ou resfriamento dos materiais para causar o fluxo de calor e o gradiente térmico necessário. De acordo com Maldague (2001), a termografia passiva tem mais o caráter qualitativo, pois apresenta indicativos de anormalidades, enquanto o processo de excitação térmica tende a um caráter de resultados quantitativos, pela possibilidade de mensurar e controlar os eventos (fonte, tempo, intensidade e distância). Em análises de edificações é mais comum o uso do método passivo, primeiro pela dificuldade de uma fonte artificial capaz de excitar grandes superfícies e também pelo risco de deterioração de camadas pictóricas e de revestimento pelo uso exagerado de calor. A figura 17 apresenta um exemplo de termograma.

FIGURA 17 – Termograma da termografia da fachada e foto da fachada da igreja



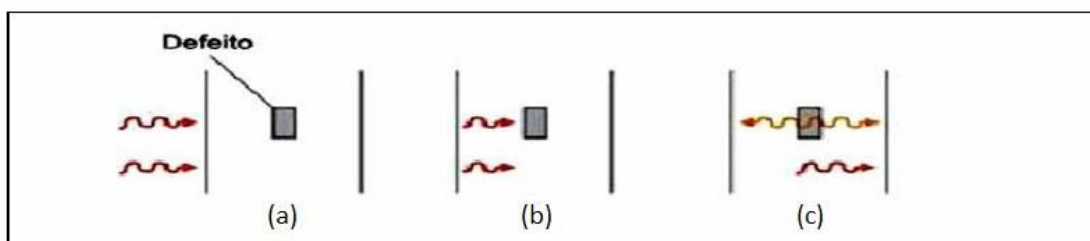
Fonte: MALDAGUE, 2001, p. 642.

A termografia pode ser entendida como a percepção da temperatura superficial de um corpo pelo mecanismo de transferência de calor (radiação), uma vez que todo corpo com temperatura acima do Zero Absoluto emite radiação térmica. Segundo Holst (2000), deverá haver um diferencial de temperatura entre o alvo e o meio, pois somente neste caso será possível ocorrer uma diferenciação entre o alvo e o meio.

De acordo com Barreira (2004, p. 35), “os corpos emitem ou absorvem radiações eletromagnéticas através da agitação interna da matéria”. Quando uma radiação incide sobre os corpos reais, uma parcela é absorvida e o restante é refletido ou transmitido.

As radiações emitidas pelo corpo proporcionam informações das características das matérias que constituem o mesmo e a condição em que se encontra (MONCÓ, 2002 p. 21). Os equipamentos de termografia captam esta radiação infravermelha, transformam-na em sinais elétricos e geram uma imagem térmica (termograma) do corpo apresentando cores diferentes para temperaturas diferentes (BARREIRA, 2004, p. 27). Holst (2000) apresenta uma ilustração onde é possível visualizar como é a propagação do calor no interior do corpo quando este apresenta um defeito (Figura 18).

FIGURA 18 - Propagação idealizada de um único pulso de calor em um material



(a) um impulso de energia é aplicado à superfície; (b) o pulso de calor viaja dentro do material e encontra um defeito; (c) o defeito reflete parcialmente e transmite parcialmente o pulso.

Fonte: HOLST, 2000

Uma das principais condições para a proliferação de agentes patológicos na madeira é presença de umidade. De acordo com Maldague (2001), na construção civil, uma variação de temperatura de 1°C até 2°C é geralmente um indicativo ou uma suspeição de existência de problemas. A partir de 4°C pode-se afirmar a existência de anormalidade no corpo.

No Brasil, Cortizo (2007) realizou trabalho pioneiro produzindo uma tese em que abordava o uso da termografia no diagnóstico de patologias no patrimônio histórico. Na literatura internacional alguns trabalhos relevantes realizados utilizando a termografia foram de Carlomagno *et al.* (2001), Clark *et al.* (2003), Dorrego *et al.* (2003), Grinzato *et al.* (1998), (2001),](2002), Maldague (2000), Rosina (2001).

Esses trabalhos analisaram o uso de termografia como ferramenta de diagnóstico de patologias ocultas em edificações. Cavalin *et al.* (2006), Lemaster (2007), Lo *et al.* (2006) e Meinlschmidt (2005), estudaram a utilização de termografia para a detecção de problemas em madeiras, objetivamente buscando falhas ou presença de nós ou outras

2.5.1 – Variáveis que influenciam a termografia

Segundo Barreira (2004), a técnica de termografia infravermelha parece ser de fácil procedimento, porém existem diversos fatores que influenciam na análise dos resultados e podem gerar conclusões erradas se não se tomarem precauções antes e durante a realização do ensaio. De acordo com o mesmo autor, na análise dos termogramas é elevado o risco de confundir defeitos do objeto com irregularidades na temperatura superficial devido a fatores externos, tais como:

- Condições térmicas do objeto e do meio em que se encontra, antes e durante o ensaio;
- Presença de fontes externas (sombra, reflexão, superfícies com diferentes acabamentos, etc.);
- Condições de medição (emissividade adotada, temperatura do ar, distância entre a câmera e o objeto, ângulo de observação, etc.).

Um dos principais fatores que influencia a medição é a emissividade. A emissividade (ϵ) de uma superfície é a razão entre a radiância dessa superfície e a radiância do corpo negro. Este fator depende do comprimento de onda, da direção de observação em relação à superfície em estudo e da temperatura dessa superfície, conforme Barreira (2004, p. 42). Objetos não metálicos apresentam uma emissividade total normalmente superior a 0,80.

O fluxo óptico é a grandeza medida pelos detectores de infravermelhos, que depende da emissividade e da temperatura do objeto. Para medir os valores reais de temperatura é preciso conhecer o valor efetivo da emissividade do objeto em questão. Para isto existem diversos métodos simplificados que podem determinar este valor (BARREIRA, 2004, p. 46).

Um método para obter a emissividade efetiva é medir a temperatura da superfície utilizando, por exemplo, um termômetro pontual de infravermelhos ou um termopar. Apontando o equipamento de infravermelhos ao ponto cuja a temperatura é conhecida, altera-se o valor de emissividade no equipamento até que a temperatura obtida coincida com a temperatura determinada anteriormente (BARREIRA, 2004, p. 47).

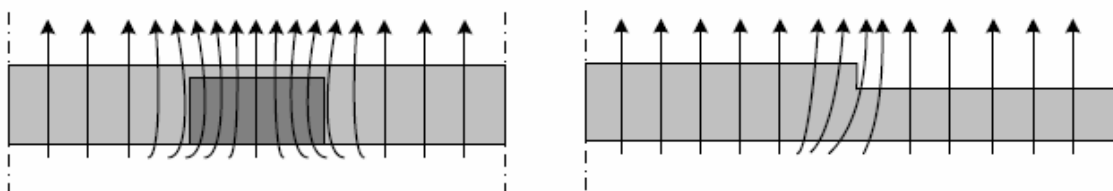
Outro método, utilizado em objetos com temperatura inferiores a 260° C, é colar uma fita isolante sobre uma parte da superfície do objeto, a área ocupada pela fita deve preencher o campo de visão do equipamento. A temperatura da fita é igual a da superfície do objeto. Mede-se a temperatura da fita utilizando uma emissividade de 0,95. Posteriormente, mede-se a temperatura da área adjacente ao objeto e ajusta a emissividade até obter a mesma temperatura. Esta é a emissividade do material (ROMIOTTO, 2011, p. 1; BARREIRA, 2004, p. 47). Este método é conhecido como método do corpo negro e foi o método escolhido para os experimentos desta dissertação.

Outro fator de importante destaque dentre as variáveis que influenciam a termografia são as pontes térmicas

Com os diferentes tipos de materiais que podem constituir as ligações de tesouras e as diferentes geometrias das peças, os mecanismos de transmissão de calor e a direção em que ocorrem são diferentes. Essa transmissão de calor é chamada de pontes térmicas (CORVACHO, 1998, p 67). Segundo Valério (2007, p. 11), além do tipo de material, a geometria ou a ordem estrutural podem originar pontes térmicas. Os casos mais comuns são:

- Transição entre materiais com diferentes condutibilidades térmicas;
- Alterações na espessura de um elemento;
- Diferenças entre áreas internas e externas.

FIGURA 19 - Ponte térmica devido à transição entre diferentes materiais e a diferenças de espessura



Fonte: VALÉRIO, 2007, p. 11

O fluxo de calor segue a trajetória que despende menos energia, ou seja, o caminho com menor resistência térmica. Como as pontes térmicas apresentam maiores taxas de perdas de calor, a temperatura superficial nesta região é alterada, originando heterogeneidade na distribuição das temperaturas no interior dos elementos. (VALÉRIO, 2007, p. 11).

Segundo Corvacho (1998, p. 68), a existência de pontes térmicas tem diversas implicações negativas como:

- a) Acréscimo de perda térmica para o exterior;
- b) Agravamento do risco de condensação superficial conseqüente umidade;
- c) Possibilidade de desenvolvimento de bolor;
- d) Alterações diferenciadas de tintas e revestimentos;
- e) Eventual fissuração.

Ao serem observadas diferenças de temperatura na superfície das estruturas, essa diferença indica a presença de uma ponte térmica cuja causa está associada a um indicativo de patologia no interior da peça. Como Maldague (2001) afirma, diferenças de temperatura a partir de 4°C indicam anormalidades

Portanto é importante controlar as variáveis que interferem na termografia durante a execução dos ensaios. Assim, é preciso realizar rigoroso controle das condições térmicas do meio em que será realizado o ensaio (temperatura e umidade relativa do ar). Também é importante antes de se iniciar o imageamento realizar a determinação da emissividade do material. Isso feito, ao realizar o a leitura termográfica do objeto, atentar-se as heterogeneidades de temperatura na superfície

da peça que são indicativos de pontes térmicas, e por conseqüência patologias internas.

3 - MATERIAIS E MÉTODOS

3.1 - Diagnóstico de Patologias

A primeira parte do processo de reabilitação de uma estrutura é o diagnóstico e inspeção. De forma geral, ao inspecionar uma estrutura de madeira alguns aspectos são fundamentais:

“identificação e avaliação da qualidade da madeira; avaliação de alterações e danos; determinação de características físico-mecânicas relevantes, tais como umidade, densidade e módulo de elasticidade; sua localização e função estrutural, assim como a avaliação da seção residual resistente” (FEIO; LOURENÇO, 2005, p.3).

De acordo com Råberg *et al.* (2007), a falta de utilização de métodos rápidos e eficazes para detectar e quantificar deteriorações em madeira é um dos fatores que retardam o prognóstico em estruturas. Segundo os autores, a chave para o sucesso desses métodos seria a análise das características mensuráveis de uma deterioração e suas relações com a resistência do material.

As características estruturais da madeira devem ser totalmente compreendidas para a prática de conservação ou restauração. Por isso, são de suma importância informações a respeito do seu estado original e inicial, sobre as técnicas utilizadas na sua construção, sobre as alterações posteriores e seus efeitos, sobre os fenômenos físicos, químicos e biológicos que tenham ocorrido e sobre seu estado atual. De acordo com Arêde (2002), as inspeções devem ser acompanhadas de um levantamento histórico que permita datar a estrutura, analisar a sua trajetória, as alterações e outras intervenções sofridas no tempo, de modo à melhor compreender o seu estado atual. Esse levantamento inclui visitas ao local, conversas com os proprietários e/ou pessoas ligadas à edificação, busca de elementos históricos ou registros fotográficos e consultas de especialistas.

Um mapeamento da integridade da madeira da estrutura de uma construção permite o conhecimento de suas áreas deterioradas e possibilita a avaliação do grau de comprometimento da estrutura. Assim, pode-se estudar a viabilidade do uso de

reforços ou de pequenas substituições, antes de sua substituição completa (VALLE *et al.*, 2006, p.2).

A respeito desta dissertação, utilizou-se a termografia como ferramenta de inspeção, detectando por diferença de temperatura patologias e áreas de possível comprometimento das ligações estruturais nas coberturas, a fim de verificar a sua eficiência como técnica não destrutiva para efeito de diagnóstico.

Para avaliação do uso da termografia, aplicou-se uma metodologia de análise dividida em 3 (três) etapas. Cada uma das etapas forneceu dados para as etapas subsequentes. Inicialmente realizaram-se testes em laboratório, com controle de variáveis e utilizando madeiras degradadas reproduzindo a condição de uma estrutura real, avaliando os dados do ensaio. Na sequência realizou-se um experimento em campo, em uma cobertura madeira do final do século XIX com indícios de danos e patologias. Esse experimento em campo teve como objetivo verificar qualitativamente a possibilidade de utilização do imageamento termográfico como técnica de inspeção e diagnóstico de estruturas.

As etapas metodológicas foram assim divididas:

1. Determinação da emissividade da madeira a ser analisada
2. Excitação térmica da madeira utilizando fonte de calor
3. Realização do imageamento termográfico

A seguir será apresentada a descrição dos procedimentos adotados em cada uma dessas etapas.

3.2 - Determinação da Emissividade da Madeira

Apesar de existirem tabelas com valores de emissividades para diversos materiais, estes valores devem ser usados apenas como referência (FLIR, 2009, p. 265). Assim, para obter a emissividade da madeira foi utilizado um ensaio por meio do método de corpo negro utilizando fita isolante e técnica passiva de aquecimento.

O procedimento para determinação da emissividade iniciou-se com a escolha da área da madeira em que foi realizado o teste. Determinou-se um ponto que não

apresentasse som cavo e que não houvesse superfície úmida. Uma vez definida uma área, colocou-se na superfície da madeira fita isolante de cor preta demarcando uma área de pequena extensão (Fig. 20). Enquanto aguardou-se estabilizar a temperatura entre a fita e a madeira (aproximadamente 30 minutos exposto ao sol), configurou-se a câmera termográfica com os seguintes parâmetros:

- a) distância aproximada entre a madeira com a fita e a câmera;
- b) temperatura ambiente (medida utilizando-se um termômetro);
- c) valor de emissividade da fita (0,85).

FIGURA 20 - Ensaio de determinação da emissividade da madeira em laboratório.



Fonte: Produzido pelo autor

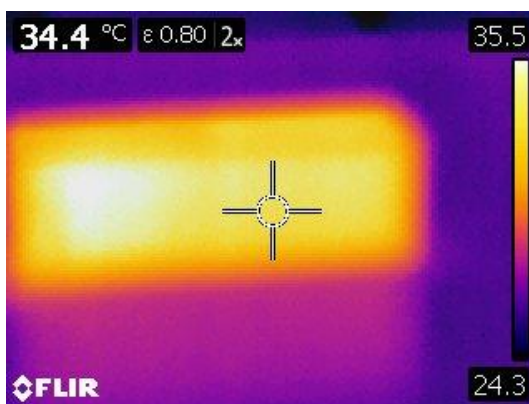
Transcorridos os 30 minutos de exposição ao calor solar mediu-se a temperatura superficial na região de fita isolante (Fig. 21). Em seguida, fez-se uma medição com a câmera apontada na região sem a fita isolante. Alterou-se o valor de emissividade na câmera até obter o mesmo valor aproximado de temperatura da zona com fita isolante (Fig. 21 e 22).

FIGURA 21 - Termograma da área coberta com fita isolante.



Fonte: Produzido pelo autor

FIGURA 22 - Termograma da área sem fita isolante, alterando o valor da emissividade.



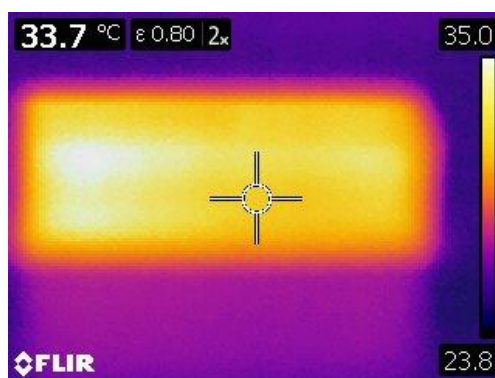
Fonte: Produzido pelo autor

Ao se determinar um valor de emissividade onde a temperatura da madeira é a mesma da do corpo negro, esse valor será adotado como a emissividade da madeira. Esse valor de emissividade foi utilizado na sequência do ensaio como parâmetro definido para aquela amostra.

3.3 - Excitação Térmica da Madeira Utilizando Fonte de Calor

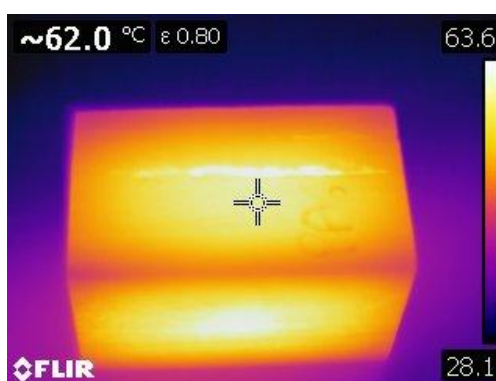
A fim de se realizar o imageamento termográfico para análise qualitativa das amostras, optou-se pela utilização da termografia pelo método ativo (com excitação térmica). Apesar de mais comum a utilização do método passivo, os pré-testes realizados em laboratório demonstraram que ao se aquecer uniformemente a madeira a temperaturas acima de 100°C a visualização de defeitos e patologias por contraste de temperatura melhora sensivelmente (Fig. 23 e 24).

FIGURA 23 - Termograma de amostra com fissura a temperatura ambiente.



Fonte: Produzido pelo autor

FIGURA 24 - Termograma de amostra com fissura aquecida em estufa a 70° por 30 minutos.



Fonte: Produzido pelo autor

Portanto para fins de realização do experimento foi necessária a utilização de uma fonte contínua de calor, capaz de ser transportada e de fácil manuseio. Após alguns

testes com fontes irradiantes de calor, optou-se pela utilização de um refletor com lâmpada halógena de 500W (Fig. 25). Com a utilização de um conector para tomadas, o refletor apresentou-se portátil, leve de fácil manuseio e capaz de irradiar calor, chegando à temperatura de aproximadamente 250°C em sua superfície.

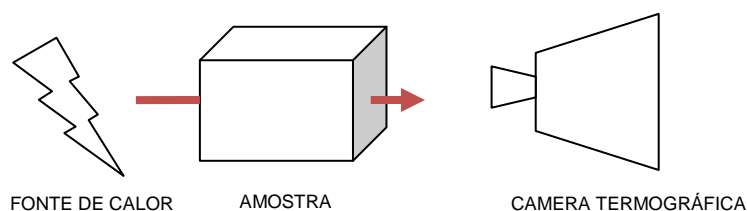
FIGURA 25 - Refletor para lâmpada halógena de 500W.



Fonte: Produzido pelo autor

Para a realização dos experimentos, a fonte de calor deveria ficar atrás da amostra a ser irradiada, de forma que o calor penetrasse na amostra, perpassasse seus defeitos internos e rebatesse essas alterações da onda de calor na superfície a ser imageada, conforme figura 26.

FIGURA 26 - Esquema ilustrativo da disposição da fonte de calor.



Fonte: Produzido pelo autor

3.4 - Realização do Imageamento Termográfico

Para a realização do imageamento termográfico é necessária a determinação de 3 (três) variáveis a fim de se garantir a correta configuração do equipamento. São as variáveis:

- A. Emissividade do material;
- B. Temperatura ambiente;
- C. Umidade relativa do ar.

A determinação da emissividade consiste no primeiro passo desta metodologia. A determinação da temperatura ambiente e da umidade relativa do ar foi realizada utilizando um termo-higrômetro (Fig. 27).

FIGURA 27 - Termo-higrômetro com sensor externo.



Fonte: Produzido pelo autor

Uma vez determinadas essas três variáveis é possível configurar-las na câmera termográfica a fim de se obter termogramas corretos.

O equipamento utilizado no experimento foi uma câmera termográfica, FLIR T420, como mostrada na figura 28. A câmera funciona em faixas pré-determinadas de distância entre amostra e observador. Existem faixas até 2 metros, 2 a 5 metros e acima de 5 metros. Cabe ressaltar que em distâncias superiores a 2 metros, é

importante observar as condições de atenuação atmosférica e possíveis interferências dos ventos na leitura dos termogramas. Essas variáveis não são objetos dessa dissertação, neste estudo foram efetuadas leituras com distâncias de no máximo 2 metros. Como já explicitado, a câmera termográfica capta os raios infravermelhos e, utilizando os valores de entrada, fornece como resposta a temperatura superficial. Ele opera em uma faixa de temperatura que varia entre -20°C e 1200°C. A câmera termográfica gera imagens (termogramas) que apresentam as temperaturas superficiais através de cores. O aparelho possui uma mira laser, para identificar o ponto do objeto que está sendo analisado. As demais características do equipamento são apresentadas no quadro 3.

FIGURA 28 - Câmera termográfica FLIR T420.



Fonte: Produzido pelo autor

QUADRO 3 - Características da câmera termográfica FLIR T420

Faixa de temperatura	-20°C a 1200°C
Precisão	2°C
Campo de visão/dist. mín. do foco	25° X 19°/0,4m
Foco	manual/automático
Faixa espectral	7,5 a 13µm
Taxa de enquadramento	30Hz
Sensibilidade térmica	<0,05°C a 30°C
Tipo de detector	matriz plano focal (FPA), microbolômetro sem resfriamento
Modos de imagem	térmica/visual/fusão
Lentes	25°
Emissividade	ajuste 0,1 a 1,0

Fonte: FLIR, 2009, p. 215

O procedimento experimental portanto, consistiu no pré –aquecimento das amostras durante o tempo determinado de 30 minutos¹ e em sequência seu imageamento termográfico. A partir do contraste de temperaturas expressos nos termogramas foi possível detectar pontos de possíveis patologias das peças, como exemplifica a figura 29, realizada em ensaio de pré-teste em laboratório. Foi possível perceber que as áreas com furos aqueceram mais que as áreas da amostra que estavam íntegras.

FIGURA 29 - Termograma obtido de amostra com furos.

Fonte: Produzido pelo autor

¹ O tempo de 30 minutos foi determinado a partir da pesquisa bibliográfica dentre os diversos autores: CARLOMAGNO *et al* (2001), CLARK *et al* (2003), DORREGO *et al* (2003), GRINZATO *et al* (1998), (2001), (2002), MALDAGUE (2000), ROSINA (2001), utilizaram em seus experimentos exposições a fontes de calor com tempo médio de 30 minutos.

3.5 – Estudo Exploratório Realizado em Laboratório

Para fins de estudo exploratório e teste da metodologia proposta, foi realizado uma série de ensaios em laboratório, reproduzindo condições de análise que poderiam ser encontradas em experimentos de estruturas in loco. Assim selecionou-se uma amostra de madeira antiga, obtida de uma viga retirada de uma obra de reforma de assoalho de uma edificação histórica. A amostra encontrava-se bastante deteriorada (Fig. 30).

FIGURA 30 - Amostra deteriorada utilizada para ensaio em laboratório.



Fonte: Produzido pelo autor

Foram aferidas emissividade $\varepsilon = 0,80$, temperatura do ambiente 24°C e umidade relativa do ar 31% (Fig. 31).

FIGURA 31 - Temperatura e Umidade relativa do ar.



Fonte: Produzido pelo autor

Com esses dados foi realizado o imageamento termográfico da amostra (Fig. 32).

FIGURA 32 - Termograma obtido com a amostra.



Fonte: Produzido pelo autor

Esse estudo exploratório permitiu ratificar a metodologia apresentada e viabilizar sua utilização para um estudo em campo em uma edificação histórica.

3.6 – Desenvolvimento do Trabalho de Campo

3.6.1 – Caracterização do Objeto de Estudo

O ensaio de campo foi realizado em Itabirito, em uma residência. Buscou-se uma edificação autoconstruída², que preservasse sua cobertura original e que tivesse valor patrimonial. Foi escolhida uma edificação datada do final do século XIX, característica da urbanização que ocorreu na cidade a partir de 1882, com a criação da estação rodoviária central e do primeiro Alto Forno da América Latina, na Usina Queiroz Júnior em 1888 (PATARO, 2010). A arquitetura da edificação é influenciada pelo ecletismo e imóveis que reproduziam o estilo colonial. A edificação traz características do conjunto arquitetônico das casas das vilas dos funcionários da siderúrgica, e incorpora elementos que se repetem nas demais edificações do ciclo da siderurgia na cidade, depois incorporado entre os anos 1920 e 1950 em algumas edificações *art-deco* como o frontão/platibanda que oculta o telhado, os ornamentos e ressaltos em argamassa da fachada, o alpendre de entrada e a base em pedra. A edificação em tela fica localizada dentro da área de influência de edificações tombadas pelo IPHAN e tem demandado dos conselhos de patrimônio e órgãos públicos da cidade iniciativas diversas no sentido de proteção do bem imóvel.

² Podemos definir autoconstrução como construção de unidades habitacionais de baixo custo por seus próprios usuários, sem participação de um técnico, arquiteto ou engenheiro e suas ferramentas: como projetos, planilhas e diagramas.

FIGURA 33 - Vista geral da edificação.



Fonte: Produzido pelo autor

É possível observar que a passagem do tempo e a pouca ou nenhuma manutenção dada na cobertura produziu avarias e danos que combinados a ação de intempéries, umidade e microorganismos criou ambiente favorável ao surgimento de patologias.

IGURA 34 - Pormenor de um dos beirais da cobertura.



Fonte: Produzido pelo autor

Na figura 34 é possível observar apodrecimento e bolores nas madeiras e perda de seção pela deterioração e ataque de microorganismos e insetos xilófagos.

3.6.2 – Caracterização das Variáveis Ambientais

A edificação tem fachada orientada a nordeste (Fig. 35), recebendo incidência direta de sol durante todo o dia em sua cobertura, além disso, a cobertura encontra-se exposta às intempéries, com iluminação e ventilação natural, conforme quadro' Quadro 4.

FIGURA 35 - Vista aérea da edificação.



Fonte: Google Maps 2016

QUADRO 4 - Fatores Climáticos da Região.

Fatores climáticos da região

Clima: Temperado de inverno suave			
Temperatura média anual	19,5°C	Período de 1983 a 1990	
Umidade relativa média	74,5%		
Precipitação	No verão	Precipitação	1.709,1 mm de chuva anual
	No inverno	Seco	
Período de maior volume de precipitação:		Dezembro (média 454,1mm)	
Insolação total média anual:		2.049, 6 horas de sol	
Período de maior índice de insolação anual:		Inverno seco	
Vento	Velocidade média	Baixa (1,0 m/s)	
	Direção:	SE (quase todo o período anual)	

Fonte: Produzido pelo Autor

O experimento foi realizado no dia 31/03/2016. Iniciou-se as 08h16min e durou até as 16h54min. Nesse dia o tempo permaneceu estável, com sol sob algumas nuvens, sem chuva e com baixa amplitude térmica durante o dia. As medições de temperatura e umidade relativa do ar acusaram uma constância de 36% e temperatura de 27°C (Fig. 36)

FIGURA 36 - Termo-Higrometro.

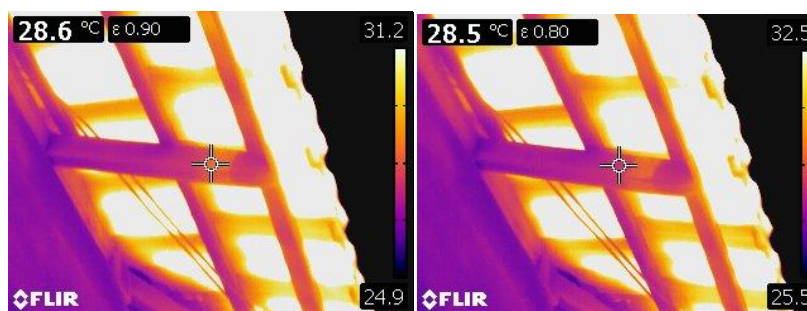
Fonte: Produzido pelo Autor

Foi realizado ensaio de corpo negro por técnica passiva para determinação da emissividade da madeira a ser analisada. Uma parte de um caibro, localizado na parte externa do telhado, foi envolvida com fita isolante. Procedeu-se o aquecimento passivo por radiação solar da peça por 30 minutos. Após esse período foi lida a temperatura na região da fita, com emissividade de 0,95. Em seguida foi lida a temperatura na parte do caibro sem fita e ajustada a emissividade até obter a mesma temperatura aproximada da região da fita. Foi obtido valor de emissividade $\epsilon = 0,80$ (Fig. 37 e 38)

FIGURA 37 - Local onde foi realizado o ensaio de emissividade.

Fonte: Produzido pelo Autor

FIGURA 38 - Termogramas do ensaio de emissividade.

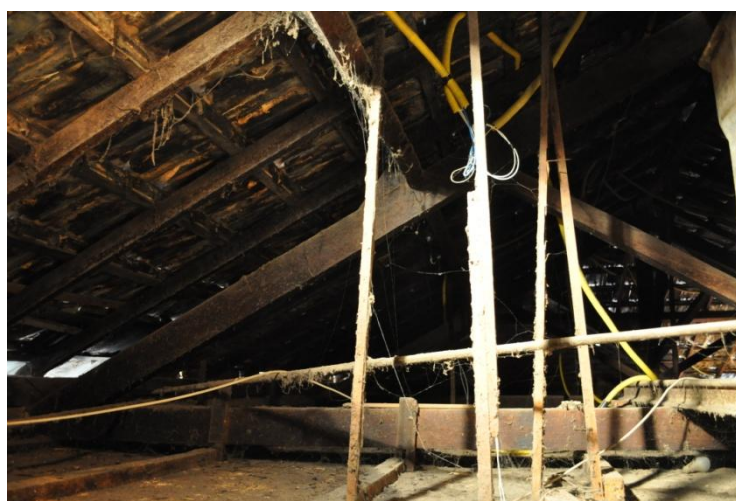


Fonte: Produzido pelo Autor

Para o imageamento termográfico foi selecionada uma tesoura do tipo Howe existente no telhado (Fig. 39) e analisadas suas principais ligações:

1. Banzo Superior-Pontalete,
2. Banzo Inferior – Pontalete,
3. Banzo Inferior – Banzo superior,

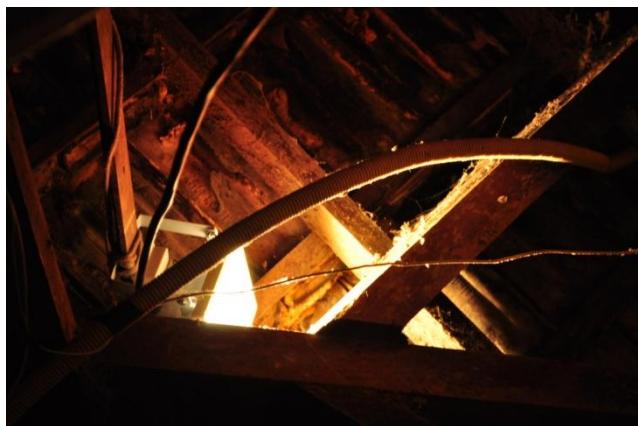
FIGURA 39 - Vista da tesoura.



Fonte: Produzido pelo Autor

O aquecimento foi realizado com projetor para lâmpada halógena 500 w com tempo cronometrado de 30 minutos (Fig. 40 a 42)

FIGURA 40: Fonte de calor aquecendo ligação.



Fonte: Produzido pelo Autor

FIGURA 41: Fonte de calor aquecendo ligação.



Fonte: Produzido pelo Autor

FIGURA 42: Fonte de calor aquecendo ligação.



Fonte: Produzido pelo Autor

Durante este experimento, especificamente, devido à dificuldade de acesso e precaução com o risco de superaquecer a ligação antiga e gerar algum tipo de combustão, durante o processo de aquecimento eram tomadas medidas da superfície da madeira com um termômetro laser, a fim de monitoramento (Fig. 43)

FIGURA 43: Monitoramento da temperatura da madeira.



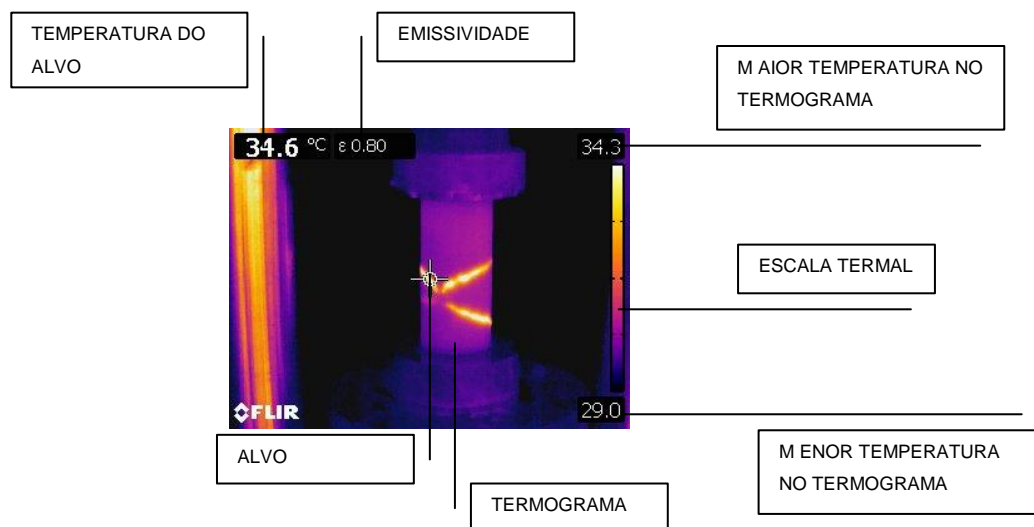
Fonte: Produzido pelo Autor

A leitura dos termogramas se dá através dos dados expostos nas imagens. Todos os dados foram obtidos por leitura dos equipamentos. Os resultados de temperatura estão listados em graus Celsius (°C). Os termogramas disponibilizam informações sobre a temperatura nos locais selecionados e apresentam a imagem visual da distribuição da temperatura nas ligações. Pode-se obter uma leitura da distribuição comparando as cores da imagem com as cores da escala térmica do termograma.

Nos termogramas foram assinalados com números os pontos de alteração de temperatura que indicam possíveis locais de patologia.

A figura 44 apresenta um exemplo de termograma onde estão assinaladas as informações que se obtém da leitura.

FIGURA 44: Exemplo de termograma.



Fonte: Produzido pelo Autor

A escala termal é feita por gradiente de cores onde o preto representa a temperatura mais baixa e o branco a mais alta no termograma. É possível observar que a escala possui 3 marcações de divisão, indicando 4 intervalos de temperatura. Essas marcações indicam intervalos iguais de aumento de temperatura, a partir da divisão da amplitude térmica no termograma. No termograma da figura 44, a amplitude térmica é de $5,3^{\circ}\text{C}$ ($34,3 - 29,0 = 5,3$). Portanto cada intervalo representa o aumento de $1,325^{\circ}\text{C}$ ($5,3 / 4 = 1,325$).

Com isso é possível, por comparação das cores no termograma e na escala termal, saber a temperatura aproximada de uma determinada região com mesma cor. Dessa forma estabeleceu-se a diferença de temperatura entre os pontos analisados das ligações, buscando identificar pontos que apresentassem diferenças de temperatura significativas que representassem indícios de manifestações patológicas.

4 – APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DE RESULTADOS

4.1 - Parâmetros para Análise de Resultados

A análise dos termogramas utilizou como princípio a diferença de temperaturas na superfície para assinalar patologias internas da madeira. De acordo com Holst (2000) os locais mais quentes na superfície indicam áreas com algum tipo de patologia interna, enquanto os mais frios ou com temperatura mais homogênea representam áreas onde não há perda de material interna na madeira. Isso é explicado pelos mecanismos de transmissão de calor. Sendo aquecida homogeneamente durante o mesmo período de exposição a uma fonte de calor, a madeira íntegra, sem falhas, apresenta aumento de temperatura homogêneo em toda superfície. Do contrário, a heterogeneidade do aquecimento, aponta a existência de áreas de pontes térmicas. Essas são provocadas por alteração de seção, existência de materiais com maior capacidade de condutividade térmica ou algum motivo oculto. De forma geral essas pontes térmicas aumentam a velocidade do aquecimento da superfície a ela conectada, deixando mais quente as áreas com menos material, vazias preenchidas por ar ou água. Esses pontos mais quentes da superfície, portanto determinam áreas sob ação de agentes patológicos.

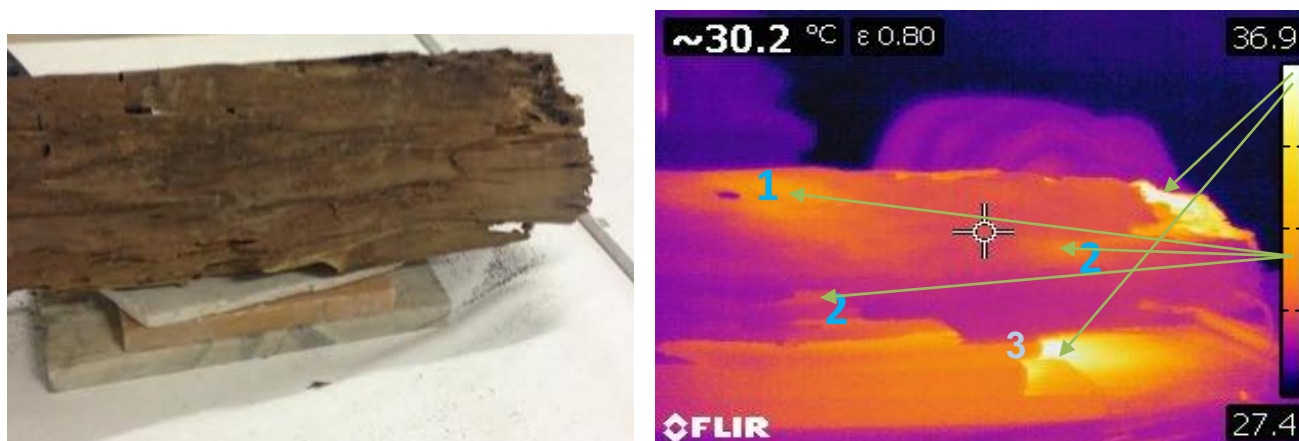
De acordo com Maldague (2001), na construção civil, uma variação de temperatura de 1°C até 2°C é geralmente um indicativo ou uma suspeição de existência de problemas. A partir de 4°C pode-se afirmar a existência de anormalidade no corpo.

As análises apresentadas são qualitativas e visuais tendo como dado quantitativo a diferença de temperatura. As análises prezam por identificar áreas de possíveis patologias e observar o comportamento geral da madeira no experimento.

4.2 – Apresentação e Análise de Resultados do Estudo Exploratório

Será iniciada a apresentação e análise dos termogramas pelo estudo exploratório realizado no laboratório (Fig. 45).

FIGURA 45 - Termograma com indicações de patologias da amostra analisada em laboratório.



Fonte: Produzido pelo Autor

A amplitude térmica do termograma é de 9,5°C. Os intervalos de temperatura assinalados na escala termal estão a cada 2,375°C. As setas relacionam as regiões com heterogeneidade de temperatura do termograma a escala termal, e foram numeradas para análise.

As áreas 1 e 2 apresentam diferença de temperatura superior a 2°C em relação a temperatura da amostra (30,2°C na área do alvo), de acordo com sua localização na escala termal.

A área 3 encontra-se na região da escala termal com diferença de temperatura cima de 4°C em relação a temperatura da amostra.

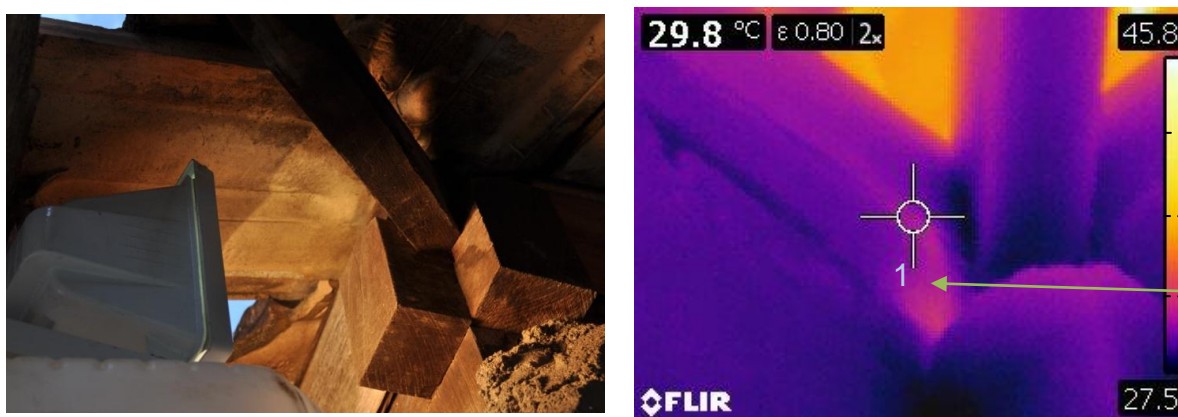
A área 1 indica a parte da amostra com maior perda de material por ataque xilófago. Observa-se que ela possui temperatura mais elevada que das áreas circundantes. As áreas indicadas com o número 2 apresentam locais onde é possível presumir que houve perda de material por degradação da madeira. Essas áreas possuem temperaturas superiores ao restante da peça. A área indicada com o número 3 indica a superfície da mesa sob a amostra que foi aquecida por condução, através da fonte de calor.

4.3 – Apresentação e Análise de Resultados do Estudo de Campo

O estudo de campo gerou termogramas diferentes para cada uma das ligações. Logo apresentaremos os termogramas explicitando qual a ligação da tesoura está sendo analisada.

1. Ligação banzo inferior – banzo superior

FIGURA 46: Termograma com indicações de patologias na ligação banzo inferior – banzo superior



Fonte: Produzido pelo Autor

A amplitude térmica do termograma é de 18,3°C. Os intervalos de temperatura assinalados na escala termal estão a cada 4,575°C. A seta relaciona a região com heterogeneidade de temperatura do termograma a escala termal, e foi numerada para análise.

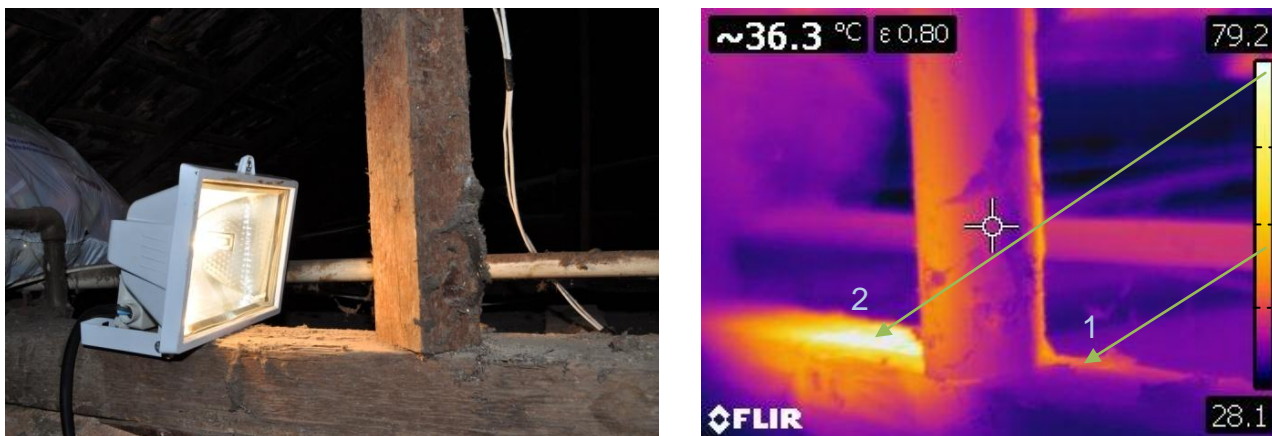
A área 1 encontra-se na região da escala termal com diferença de temperatura próxima de 4°C em relação a temperatura da amostra. No alvo a temperatura é de 29,8°C

A área 1 apresenta temperatura superior às demais áreas da ligação. O contraste de temperatura indica que esse local apresenta indícios de patologia interna na peça

estrutural, que podem representar perda na capacidade resistente da estrutura nesse local.

2. Ligação pontalete – banzo inferior

FIGURA 47: Termograma com indicações de patologias na ligação pontalete – banzo inferior.



Fonte: Produzido pelo Autor

A amplitude térmica do termograma é de 51,1°C. Os intervalos de temperatura assinalados na escala termal estão a cada 12,775°C. As setas relacionam as regiões com heterogeneidade de temperatura do termograma a escala termal, e foram numeradas para análise.

A área 1 apresenta diferença de temperatura superior a 36°C em relação a temperatura da amostra (36,3°C na área do alvo), de acordo com sua localização na escala termal.

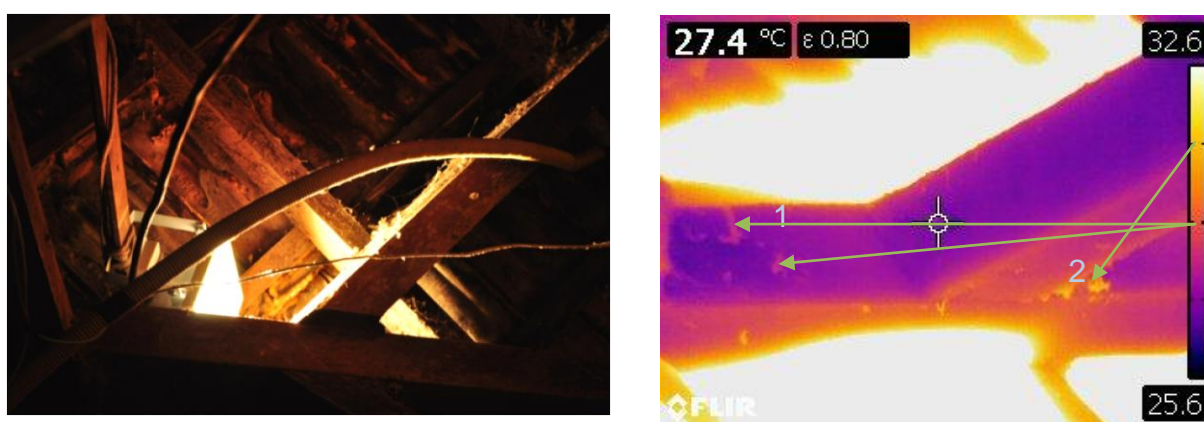
A área 2 encontra-se na região da escala termal com diferença de temperatura acima de 12°C em relação a temperatura da amostra.

A ligação pontalete - banzo inferior apresenta a peça do pontalete colocada com um giro (Fig. 47), isso fez que as arestas expostas à fonte de calor aquecessem mais que as demais. Porém o termograma apresenta homogeneidade no aquecimento, tanto das partes mais expostas e das mais distantes. A área 1 determina uma área com indicação de patologia. No banzo inferior houve um aquecimento de superfície em um local após a ligação do pontalete. Esse aquecimento pontual representa

indício de patologia no banzo inferior. A Área 2 apresenta alta temperatura pelo contato direto com a fonte de irradiação de calor, apesar da temperatura elevada, o aquecimento homogêneo da área indica que não há patologia oculta.

3. Ligação banzo superior – pontalete

FIGURA 48 - Termograma com indicações de patologias na ligação banzo superior – pontalete.



Fonte: Produzido pelo Autor

A amplitude térmica do termograma é de 7°C. Os intervalos de temperatura assinalados na escala termal estão a cada 1,75°C. As setas relacionam as regiões com heterogeneidade de temperatura do termograma a escala termal, e foram numeradas para análise.

A área 1 apresenta diferença de temperatura superior a 2°C em relação a temperatura da amostra (27,4°C na área do alvo), de acordo com sua localização na escala termal.

A área 2 encontra-se na região da escala termal com diferença de temperatura cima de 4°C em relação a temperatura da amostra.

A área 1 indica aquecimentos pontuais na superfície da ligação. Esses pontos de aquecimento indicam áreas propensas a manifestações patológicas no interior da peça estrutural. A Área 2 apresenta aquecimento muito superior às demais. Esse

aquecimento é indicativo de patologia interna na área de ligação estrutural analisada.

De forma geral é possível observar que as ligações apresentam indícios de manifestação patológica. Observa-se que a madeira possui aquecimento uniforme, tendo as superfícies analisadas temperaturas com variações entre 1°C a 3°C. Com isso a diferença de temperatura entre os pontos de patologia e as áreas sãs, também obtiveram alterações de temperatura entre 2°C e 12°C.

Essa diferença de temperatura indica que as ligações analisadas possuem manifestações patológicas ocultas em seu interior. É possível associar essa informação obtida pela termografia à análise visual das peças do telhado. Como já explicitado algumas peças apresentam degradação e ataques de agentes patológicos que foram identificados por diagnóstico visual.

Apesar da existência dos indícios de manifestação patológica, a ocorrência das áreas de heterogeneidade de temperatura nos termogramas são pontuais, o que leva a crer que as ligações ainda apresentam peças com grandes partes íntegras. O ensaio não permitiu diagnosticar qual o agente patológico causador das falhas, porém permitiu a localização dos pontos mais críticos. Isso enfatiza o caráter qualitativo da análise e seu potencial como ferramenta de diagnóstico.

A utilização do ensaio de termografia por técnica ativa, como técnica não destrutiva para diagnóstico de patologias em ligações estruturais em coberturas antigas de madeira, demonstrou-se eficaz provendo dados para uma análise preliminar do estado de conservação das ligações e da integridade do interior das madeiras. O ensaio demonstrou-se uma alternativa viável para análises não-intrusivas, identificando as áreas que apresentam maior possibilidade de ocorrência de patologias ocultas no interior das peças estruturais da ligação.

5 – CONCLUSÕES

Finda a pesquisa é possível levantar pontos relevantes, assimilar conclusões e alguns avanços obtidos com este trabalho, tanto no campo teórico quanto no campo experimental, além das vantagens, desvantagens e dificuldades encontradas no método. Também é possível elencar dados que representam um aporte ao estado da arte do tema, gerando possibilidades de novos caminhos de pesquisa a partir deste trabalho.

Inicialmente o trabalho se debruçou no desenvolvimento teórico-conceitual do aporte de conhecimentos necessários a condução da pesquisa. Essa etapa que cumpre um papel fundamental na sustentação teórica dos passos metodológicos foi também importante para situar o trabalho no campo patrimonial. Além de compreender o sentido de preservação e conservação do patrimônio dentro da contemporaneidade, a pesquisa contribuiu para colocar a termografia no campo de técnicas não destrutivas capazes de serem utilizadas no diagnóstico de patologias. Em paralelo o recorte escolhido para análise - as ligações estruturais em tesouras - explicita a importância das coberturas como elemento estrutural nas edificações antigas. Além da relevância de sua conservação para ao patrimônio material (a integridade das edificações antigas), essas ligações no campo imaterial preservam o legado do artefazer dos carpinteiros que produziram essas intrincadas soluções de ligações estruturais em tempos onde não se existia normatização técnica, tampouco profissionais disponíveis para dimensionar e detalhar essas ligações.

A partir deste referencial teórico e o entendimento dos princípios da termografia foi possível desenvolver os passos metodológicos para os experimentos de diagnóstico e análise qualitativa das patologias nas ligações em tesouras antigas de madeira. Essa metodologia é uma contribuição dessa pesquisa ao estado da arte dos experimentos em termografia, sendo desenvolvida em dois eixos complementares: testes em laboratório e análise em campo, avaliando a possibilidade de uso da técnica. Em ambos os casos o desenvolvimento dos experimentos obteve resultados que demonstraram um potencial real de aplicação da termografia na inspeção e diagnóstico do estado de conservação das estruturas. Importante ressaltar que essa

aplicação, no caso desta pesquisa, limitou-se a seu aspecto qualitativo – sua capacidade de gerar indícios de ataques patológicos na estrutura através do contraste de temperatura, onde áreas mais quentes, com diferenças de temperatura superior a 2°C indicaram locais de possíveis manifestações de patologias.

A execução dos ensaios também apresentou uma série de fatores a serem observados no momento da aplicação da termografia como ferramenta de diagnóstico. Os fatores mais relevantes recaem sobre o acesso as áreas de análise. A metodologia requer que a área de análise seja acessível, para a montagem da fonte de irradiação de calor próxima da estrutura e a obtenção dos termogramas a uma distância inferior a 2 metros de distância do local analisado. Portanto é importante o estudo do local do experimento a fim de verificar essa condicionante. Outro ponto importante é o monitoramento do aquecimento da madeira. Tratando-se de madeiras antigas, e um refletor que aquece a 250°C é importante o controle para evitar superaquecimento da área irradiada, que pode levar a combustão da madeira.

Outros fatores importantes, que são variáveis que devem ser determinadas antes do início do ensaio são:

- a) Condições térmicas do local, antes e durante o ensaio (temperatura do ambiente e umidade relativa do ar);
- b) Emissividade aferida através do método do corpo negro.

A termografia aplicada às ligações em coberturas antigas de madeira constituiu um ensaio não destrutivo eficaz e bastante rápido. Além disso, permitiu a realização de ensaios em tempo real, possibilitou a detecção de possíveis locais falhas internas na estrutura, e pôde ser aplicada na edificação em funcionamento.

Embora a câmera termográfica tenha um alto custo inicial, ela é uma ferramenta rápida e permite realização dos ensaios em larga escala. Se combinada com outros ensaios, como ultra-som, tomografia, pilodyn ou resistografia³ é possível a

³ Os ensaios listados são também considerados não destrutivos, e largamente empregados no campo de análise de madeiras, porém tratam-se de ensaios intrusivos, que demandam realização de interferências diretas nas madeiras, como furos.

construção de análises quantitativas das manifestações patológicas internas da madeira.

A partir destas conclusões é possível elencar novos estudos a serem realizados a partir das contribuições desta pesquisa, a saber:

- Execução de ensaios conjuntos com outras técnicas não destrutivas para construção de matrizes quantitativas e qualitativas dos ataques patológicos,
- Estudo de um método matemático com as variáveis de atenuação atmosférica para utilização da câmera termográfica a grandes distâncias,
- Estudo da utilização dos termogramas para análise da capacidade de carga das estruturas antigas a partir da dissipação de calor nos apoios,
- Estudar e catalogar a emissividade de madeiras brasileiras e sua relação com a caracterização das mesmas,
- Estudar a relação dos termogramas, estabilidade dimensional e energia de ruptura para estruturas de madeira.
- Estudo de patologias ocultas em sistemas construtivos antigos que façam uso de madeiras (pau-a-pique, taipa, etc.)

Esses são alguns horizontes possíveis da continuidade da pesquisa no campo da termografia aplicada a madeiras e edificações antigas. Os estudos não se findam, se retroalimentam e constroem campos cada vez mais amplos e interdisciplinares dos saberes.

REFERÊNCIAS

ALBUQUERQUE, Renata Braga de. **Sambladuras em tesouras de madeira tipo Howe**, 2006. 110 f. Dissertação (Mestrado em Estruturas) – Departamento de Engenharia Civil, Faculdade de Engenharia da Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte 2006.

ALBUQUERQUE, Renata Braga de; PEREIRA, Sebastião Salvador Real; CHAUD, E. . Sambladuras em telhados com estrutura de madeira tipo Howe em Belo Horizonte. **Revista Madeira**, v. 1, p. 1-14, 2007.

ARÊDE, A; COSTA, A. Inspeção e diagnóstico estrutural de construções históricas. In: A INTERVENÇÃO NO PATRIMÔNIO. PRÁTICAS DE CONSERVAÇÃO E REABILITAÇÃO, 2002, Porto. **Atas do seminário...** Porto: FEUP, 2002

BARREIRA, E. S. B. M. **Aplicação da termografia ao estudo do comportamento higrotérmico dos edifícios**. 2004. 196 f. Dissertação (Mestrado em Construção de Edifícios) – Departamento de Engenharia Civil, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Porto 2004.

BRANCO, J.M., PIAZZA, M. e CRUZ, P.J.S, Experimental evaluation of different strengthening techniques of traditional timber connections. **Engineering Structures**, v. 2011, 3, p. 2259-2270.

BRANDI, Cesare. **Teoria da Restauração**. 2 ed. São Paulo: Ateliê Editorial. 2005.

CALIL JR, Carlito; DIAS, Antônio Alves. Utilização da madeira em construções rurais. **Rev. Bras. Eng. Agríc. Ambiental**, Campina Grande, v. I, p.71-77, 1997.

CARLOMAGNO, G. M., MEOLA, C. Infrared thermography in the restoration of cultural properties. In: CONFERENCE 4360; THERMOSENSE XXIII, 2001, Orlando (FL). **Proceedings of Spie ...** Bellingham, Washington: SPIE –The International Society for Optical Engineering, 2001

CASTRIOTA, Leonardo B. O Registro dos Mestres Artífices: Preservação do saber fazer da construção tradicional. In: _____. **Mestres Artífices da Construção Tradicional**. Minas Gerais: IPHAN / Monumenta, 2010. p. 23-36.

CAVALIN, P.; OLIVEIRA, L. S.; KOERICH, A. L.; BRITTO Jr., A. S.. Wood Defect Detection using Grayscale Images and an Optimized Feature Set. In: ANNUAL CONF. OF THE IEEE INDUSTRIAL ELECTRONICS SOCIETY, 32., 2006, Paris. **Proceedings IEEE Press...** Paris: IEEE, 2006. p. 3408-3412

CLARK, M.; McCANN, D. M.; FORDE, M. C. Application of infrared thermography to the non-destructive testing of concrete and masonry bridges. **NDT&E International**, London, v. 36, p. 265-275, 2003.

CORTIZO, Eduardo Cabaleiro. **Avaliação da técnica de termografia infravermelha para identificação de estruturas ocultas e diagnóstico de anomalias em edificações**: ênfase em edificações do patrimônio histórico. Belo Horizonte: UFMG, 2007

CORVACHO, M. H. Pontes térmicas: importância da existência de um catálogo. In. JORNADAS DE CONSTRUÇÃO CIVIL, 6., 1998, Porto. **Anais...** Porto: FEUP, 1998.

CRUZ, I.P.; PRESA, E. P.; OLIVEIRA, M. M. de. Restauração em edificações antigas no centro histórico de Salvador. In: ENCONTRO BRASILEIRO EM MADEIRAS E EM

ESTRUTURAS DE MADEIRA, 9., 2004, Cuiabá. **Resumos...** Cuiabá: EDUFMT, 2004. v.1; p 254.

DOBERSTEIN, Arnaldo Walter. Praça da Matriz em Porto Alegre: ganhos e perdas nas intervenções patrimoniais. In: FERREIRA, Mario dos Santos; BREGATTO, Paulo Ricardo; KOTHER, Maria Beatriz Medeiros (Org.). **Arquitetura e Urbanismo: Posturas, tendências e reflexões.** Porto Alegre: EDIPUCRS, 2008. v. 2

DORREGO, J.; LUXÁN, M. P. ; DORREGO, F.. Damage detection and localization of reinforcement elements in historic buildings with infrared thermography. In: **ADVANCES in concrete structure.** Xuzhou Jiangsu (China): ACI – RILEM – NNSF, 2003. p. 1 – 9.

FARIA, J. Reabilitação de Estruturas de Madeira em Edifícios Históricos. **Património: Estudos**, n. 3, p. 8-13, 2002

FEIO, A.O.; LOURENÇO, P.B. Possibilidades e aplicações de ensaios não destrutivos. In: ENCONTRO SOBRE A MADEIRA E SUAS APLICAÇÕES NOBRES "BEM UTILIZAR A MADEIRA", 1., 2005, Lisboa. **Anais...** Lisboa: ISISE, 2005. 1 CD-ROM.

FLIR SYSTEMS. **Manual do utilizador.** São Paulo: Flir Systems, 2009

GIORLEO, G.; MEOLA, C. Comparison between pulsed and modulated thermography in glass-epoxy laminates. **NDT&E International**, London, v. 35, p. 287-292, 2002.

GONZAGA, Luiz A. **Madeira: Uso e Conservação.** Brasília: Programa Monumenta, 2005. (Cadernos Técnicos do Programa Monumenta)

GRINZATO, E. *et al.* Capturing the building history by quantitative IR thermography. In: INTERNACIONAL CONGRESS ON SCIENCE AND TECHNOLOGY FOR THE SAFEGUARD OF CULTURAL HERITAGE IN THE MEDITERRANEAN BASIN, 3, Hálcalà de Henares. **Anais...** Spain, 2001. p.393.

GRINZATO, E. *et al.* Monitoring of the Scrovegni Chapel by IR thermography: Giotto at infrared. **Infrared Physics & Technology**, Exeter (GB), v. 43, p. 165-169, 2002.

GRINZATO, E. *et al.* NDE of frescoes by infrared thermography and lateral heating. In: EUROTHERM SEMINAR, 60. **QIRT 98...** Lodz (Poland), 1998. p.64-67

GRINZATO, E. *et al.* Non-destructive testing of wooden painting by IR thermography. In: ECNDT, 8, 2002. **Proceedings...** Barcelona, 2002.

GRINZATO, E.; BISON, P. G.; MARINETTI, S. Monitoring of ancient buildings by thermal method. **Journal of Cultural Heritage**, [S.l.], n. 3, p. 21-29, 2002.

GRINZATO, E.; ROSINA, E. Infrared and thermal testing for conservation of historic building. In: MOORE, Patrick O. **Infrared and thermal testing**. 3. ed. Columbus (OH): American Society for Nondestructive Testing, 2001. Chapter 18, part.5.

GUERRA, Fernanda Lamego; PERES, Rosilena Martins. Biodeterioração em Edificação Histórica. Estudo do Ataque de Fungos Filamentosos. In: Anais do XIII ENPOS, 2012.

HOLST, Gerald C. **Common Sense approach to thermal imaging**. Winter Park (FL): JCD Publishing, 2000. 377p.

INSTITUTO DO PATRIMONIO HISTORICO E ARTISTICO NACIONAL (IPHAN/BRASIL). **Cartas patrimoniais**. 3. ed., rev. e aum. Brasília: IPHAN, 2004. (Edições do Patrimônio).

KÜHL, Beatriz Mugayar. Notas sobre a evolução do conceito de restauração. In: ARQUITETURA do Ferro e Arquitetura Ferroviária em São Paulo. Reflexões sobre a sua preservação. São Paulo: Ateliê Editorial, 1998.

LEMASTER RL: The use of advanced lighting techniques to detect localized and biological surface defects in wood. In: INTERNATIONAL WOOD MACHINING SEMINAR, 18, 2007, Vancouver. **Proceedings...** Canada, 2007. p. 257–267

LO TY, Choi KTW. Building defects diagnosis by infrared thermography. **Struct Surv**, n. 22, p. 259 – 263, 2004.

LO TY, Choi KTW. Building defects diagnosis by infrared thermography. **Struct Surv**, n. 22, p. 259 – 263, 2004.

LOPES, M. C.; FARIA, J. A. Tipificação de soluções de reabilitação de estruturas de madeira em coberturas de edifícios antigos. In: PATORREB: ENCONTRO SOBRE PATOLOGIA E REABILITAÇÃO DOS EDIFÍCIOS, 3., 2009. **Anais...** Porto: FEUP, 2009. p. 403-408.

MALDAGUE, X. Applications of infrared thermography in non destructive evaluation. In: TRENDS in optical nondestructive testing (invited chapter). [S.l.]: Pramod Rastogi, 2000. p. 591-609.

MALDAGUE, X. **Infrared and Thermal testing**: Nondestructive testing handbook. 3. ed, Columbus, OH: Patrick O. Moore, 2001.

MALDAGUE, X.; LARGOUET, Y.; COUTURIE, J. A study of defect depth using neural networks in pulsed phase thermography: modelling, noise, experiments. **Revue Générale de Thermique**, Paris, v. 37, p. 704-717, 1998.

MALDAGUE, X.; MARINETTI, S. Advances in pulse phase infrared thermography. **Infrared Physics & Technology**, Exeter (GB), v. 43, p. 175-181, 2002.

MALDAGUE, X.; MARINETTI, S. Pulse phase infrared thermography. **Journal of Applied Physics**, New York, v. 79, p. 2694 - 2698, 1996.

MARTINS, Sandra C. F.; ROSSIGNOLO, João A. Deterioração em madeiras de Patrimônio Histórico: técnicas não destrutivas. **Complexus: Engenharia, arquitetura e design**, a. 1, n. 02, p. 128-142, 2010.

MEINLSCHMIDT, P. Thermographic detection of defects in wood and wood-based materials. In: 14th International Symposium of Nondestructive Testing of Wood, 14., 2005, Hannover. **Anais...** Germany: [s.e.], 2005.

MOLITERNO, Antonio. **Caderno de projetos de telhados em estruturas de madeira**. São Paulo: E. Blucher, 1981.

MONCÓ, E. G. **La humedad como causa de patologias em monumentos: desarrollo de nuevas técnicas de análisis no destructivo basadas em termografia infrarroja**. 2002. 212 f. Tese (Doutorado em Ciências Físicas) – Departamento de Materiais, Universidade Complutense de Madrid, Madrid, 2002.

PALMA P., GARCIA H., FERREIRA J., et al. Behaviour and repair of carpentry connections – Rotational behaviour of the rafter and tie beam connection in timber roof structures. **Journal of Cultural Heritage**, a. 2012, v. 13, p. 64-73. DOI: 10.1016/j.culher.2012.03.002

PARISI, Maria A.; PIAZZA, Maurizio. **Mechanics of plain and retrofitted traditional timber connections**, Journal of Structural Engineering-asce, v. 2000 1, p. 126-138. DOI: 10.1061/(ASCE)0733-9445(2000)126:12(1395)

PATARO, Bianca. **A história que é contada pelas pedras da cidade**. <http://www.vitruvius.com.br/revistas/read/minhacidade/11.121/3512> Vitruvius, 2010.

RÅBERG, U.; TERZIEV, N.; LAND, C.J. **Early soft rot colonization of Scots sapwood pine in above-ground exposure**. International Biodeterioration & Biodegradation, Birmingham, v.63, n.2, p.236-240, Mar. 2007.

ROSINA, E.; GRINZATO, E. **Infrared and thermal testing for conservation of historic buildings**. American Society for Nondestructive Testing Journal, v. 59, n. 8, 2001.

ROSS, R.J.; BRASHAW, B.K.; WANG, X. **Structural condition assessment of in-service wood**. Forest Products Journal, Madison, v.56, n.6, p.4-8, June 2006.

SANTOS, Paulo F. **A arquitetura religiosa de Ouro Preto**. Rio de Janeiro: Kosmos, 1951.

SEGURADO, João Emílio dos Santos. **Trabalhos de Carpintaria Civil**. 7 ed. Lisboa: Imprensa Portugal-Brasil, [S.D.].

SOLÁ, Ignasi de; RUBIÓ, Morales. **Do contraste à analogia: novos desdobramentos do conceito de intervenção arquitetônica**. In: NESBITT, Kate (org). Uma nova agenda para a Arquitetura: antologia teórica 1965-1995. São Paulo: Cosac Naify, 2008.

TANNERT T., BRANCO J., RIGGIO M. RILEM TC **Reinforcement of Timber Elements in Existing Structures**. Advanced Materials Research v. 2013, 778, p. 1041-1048. DOI: 10.4028/www.scientific.net/AMR.778.1041

TOMASI R, CROSATTI A., PIAZZA M. **Theoretical and experimental analysis of timber-to-timber joints connected with inclined screws**, Construction and Building Materials, v. 2010, 24, p. 1560-1571. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2010.03.007

VALÉRIO, J. G. M. A. P. **Avaliação do impacto das pontes térmicas no desempenho térmico e energético de edifícios residenciais correntes**. 2007. 87 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Instituto Técnico Superior, Universidade Técnica de Lisboa, Lisboa.

VALLE, Â, BRITES, R.D, LOURENÇO, P. **Uso da perfuração controlada na avaliação de degradação da madeira em edificações antigas – estudo de caso**. Anais do 10º encontro brasileiro em Madeiras e Estruturas em Madeira- EBRAMEM, São Paulo, 2006.

WILLIAMS, J. H. Jr.; MASOURI, S. H.; LEE, S. S. **One-dimensional analysis of thermal nondestructive detection of delamination and inclusion flaws**. British Journal of Non-Destructive Testing, Leigh-On-Sea (GB), v. 22, may 1980