

UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS

ESCOLA DE ARQUITETURA

**PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM AMBIENTE CONSTRUÍDO
E PATRIMÔNIO SUSTENTÁVEL**

**AVALIAÇÃO DA INTEGRIDADE DA TESOURA DE CAIBRO
-ARMADO DE MADEIRA DO SÉCULO XIX ATRAVÉS DE ENSAIOS
NÃO-DESTRUTIVOS.**

Larissa Camilo de Souza Lima e Silva

Belo Horizonte – MG

2019

LARISSA CAMILO DE SOUZA LIMA E SILVA

**AVALIAÇÃO DA INTEGRIDADE DE TESOURAS DE CAIBRO
ARMADO DE MADEIRA DO SÉCULO XIX ATRAVÉS DE ENSAIOS
NÃO-DESTRUTIVOS.**

Tese apresentada ao curso de Doutorado da Escola de
Arquitetura da Universidade Federal de Minas Gerais
como requisito parcial para obtenção do título de
Doutor em Ambiente Construído e Patrimônio
Sustentável.

Área de concentração: Tecnologia do Ambiente
Construído.

Orientador: Professor Doutor Edgar V. Mantilla
Carrasco.

Coorientadora: Professora Doutora Eduarda Vieira.

Belo Horizonte – MG

2019

FICHA CATALOGRÁFICA

S586a Silva, Larissa Camilo de Souza Lima e
Avaliação da integridade da tesoura de caibro-armado de madeira do século XIX através de ensaios não-destrutivos [manuscrito] / Larissa Camilo de Souza Lima e Silva. – 2019.
131 f. : il.

Orientador: Edgar Vladimiro Mantilla Carrasco.

Tese (doutorado) – Universidade Federal de Minas Gerais, Escola de Arquitetura.

1. Madeira – Estrutura – Teses. 2. Patrimônio cultural- Teses. 3. Patrimônio histórico – Teses. 4. Testes não-destrutivos – Teses. I. Carrasco, Edgar Vladimiro Mantilla. II. Universidade Federal de Minas Gerais. Escola de Arquitetura. III. Título.

CDD 620.12

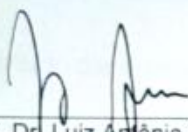
Ficha catalográfica: Biblioteca Raffaello Berti, Escola de Arquitetura/UFMG

Larissa Camilo de Souza Lima e Silva

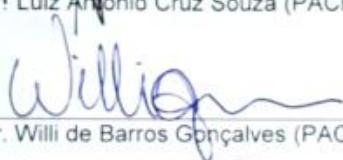
"Avaliação da integridade de tesouras de caibro-armado de madeira do século XIX através de ensaios não destrutivos"

Tese apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Ambiente Construído e Patrimônio Sustentável da Escola de Arquitetura da Universidade Federal de Minas Gerais

Comissão Examinadora:



Prof. Dr. Luiz Antônio Cruz Souza (PACPS/UFMG)



Prof. Dr. Willi de Barros Gonçalves (PACPS/UFMG)



Prof. Dr. Tito Flávio Rodrigues de Aguiar (UFOP)



Profa. Dra. Rejane Costa Alves (UFES)



Prof. Dr. Edgar Vladimiro Mantilla Carrasco (PACPS/UFMG - orientador)

Belo Horizonte, 25 de fevereiro de 2019.

AGRADECIMENTOS

Primeiramente agradeço a Deus por ter me guiado e auxiliado até aqui. Agradeço ao meu Amor Rafael por toda a paciência, compreensão, companheirismo e amor em todos os momentos da minha caminhada.

Ao meu orientador Professor Dr. Edgar por me acolher como sua orientanda. A minha coorientadora Professora Dra. Eduarda pelo incentivo e parceria.

Ao Professor Luiz Souza e toda a equipe do CECOR da Escola de Belas Artes da UFMG por todo o auxílio e orientação na minha tese.

Aos Professores João Miranda – NCREP –, da Universidade do Porto e Jorge Branco, da Universidade do Minho pela acolhida e ensinamentos juntamente com a Engenheira Esmeralda Paupério – FEUP – Instituto da Faculdade de Engenharia do Porto, em minha curta estadia em Portugal.

Agradeço a toda aos IC's que estiveram comigo junto ao Laboratório de Pesquisas Tecnológicas – LPT – da Escola de Arquitetura da UFMG.

Agradeço aos órgãos IPHAN e IEPHA pela disponibilidade em atender-me e conceder-me acesso ao meu estudo de caso.

Agradeço ao Programa de Pós-graduação em Ambiente Construído e Ambiente Sustentável – PACPS – pela oportunidade e acolhida na minha formação.

O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – Brasil (CAPES) – Código de Financiamento 001.

RESUMO

As tecnologias utilizadas nos sistemas de cobertura do período colonial brasileiro são heranças da engenharia desenvolvida nos países colonizadores. Portugal como principal país colonizador do Brasil, aportou na então colônia, tecnologias construtivas que aproximaram ainda mais as duas culturas. A composição da simetria e volumetria das edificações das cidades de Braga, Porto e Guimarães assemelham-se com as cidades de Ouro Preto, Mariana e São João Del Rey. Fato se dá a imigração de engenheiros, arquitetos e militares da região norte portuguesa a então região de exploração das minas. Dentre os conhecimentos construtivos herdados pelos mestres de obra, as tipologias de cobertura tiveram destaque. As asnas de nível foram adaptadas ao regionalismo mineiro como tesouras de caibro-armado, o que de fato determinou a exuberante execução dos forros e ornatos no interior das edificações religiosas. Entretanto a madeira, como material orgânico e heterogêneo, necessita de inspeções minuciosas para determinação dos métodos mais adequados a manutenção de seus elementos. Metodologias não destrutivas são essenciais para as ações de preservação do patrimônio cultural edificado pois permitem a aplicação de métodos de inspeção sem a degradação do material. Neste contexto, a elaboração de uma metodologia de inspeção que englobe variáveis físicas e mecânicas das coberturas antigas considerando o difícil acesso aos elementos de madeira, a instabilidade da tipologia, a historicidade do sistema construtivo e o frágil estado da arte das construções são de exímia importância para a preservação das edificações históricas. Com isso, esta tese apresenta uma metodologia não destrutiva utilizando os métodos de termografia ativa, tomografia acústica e raio-x na inspeção da integridade de uma tesoura da Igreja do Santíssimo Sacramento da cidade de Jequitibá, Minas Gerais, investigando a historicidade do sistema construtivo de caibro-armado e suas raízes portuguesas.

Palavras-chave: Madeira; Patrimônio material; Tesoura de caibro-armado; Ensaio não-destrutivo; Métodos de inspeção.

ABSTRACT

The technologies used in the coverage systems of the Brazilian colonial period are inheritances of the engineering developed in the colonizing countries. Portugal as the main colonizing country of Brazil, contributed in the then colony constructive technologies that brought the two cultures closer together. The composition of the symmetry and volumetry of the buildings of the cities of Braga, Porto and Guimarães are similar to the cities of Ouro Preto, Mariana and São João Del Rey. The immigration of engineers, architects and military personnel from the north of Portugal mining region. Among the constructive knowledge inherited by the work masters, the types of coverage were highlighted. The level donkeys were adapted to the regionalism of Minas Gerais as armor-sheared scissors, which in fact determined the exuberant execution of the linings and adornments inside the religious buildings. However, wood, as organic and heterogeneous material, requires careful inspections to determine the most appropriate methods for the maintenance of its elements. Non-destructive methodologies are essential for the preservation actions of the built cultural patrimony, since they allow the application of methods of inspection without the degradation of the material. In this context, the elaboration of an inspection methodology that includes physical and mechanical variables of the old roofs considering the difficult access to the wood elements, the instability of the typology, the historicity of the constructive system and the fragile state of the art of constructions are of great importance for the preservation of historic buildings. This thesis presents a non-destructive methodology using the methods of active thermography, acoustic tomography and x-ray in the inspection of the integrity of a scissors of the Church of the Blessed Sacrament of the city of Jequitibá, Minas Gerais, investigating the historicity of the constructive system of armed bandit and its Portuguese roots.

Keywords: Wood; Material wealth; Armored shear scissors; Non-destructive testing; Methods of inspection.

Lista de Figuras

Figura 1: Hipotética evolução das habitações de madeira no período Neolítico: (a) Solução inicial, mas propícia a deterioração das fundações; (b) Solução mais duradoura, onde a estrutura de madeira era sustentada em fundações de pedra, evitando o contato direto da madeira com o solo.....	17
Figura 2: Gaiola Pombalina.	17
Figura 3: Estrutura autônoma de madeira da Igreja Matriz do Santíssimo Sacramento em Jequitibá, Minas Gerais.	17
Figura 4: Proposta de classificação das coberturas mudéjares em Portugal.....	19
Figura 5: Estrutura de cobertura formada pela alvenaria de sustentação, estribo e fileira.	20
Figura 6: Tesoura de asna de nível.	20
Figura 7: Elementos básicos da armação de <i>par y nudillo</i>	21
Figura 8: Tesoura de asna de nível com rincão singelo.....	21
Figura 9: Tipologias de tesouras comumente encontradas nas coberturas das igrejas da cidade de Ouro Preto.	22
Figura 10: Reforço estrutural em ferro fundido na nave da Igreja de São José em Ouro Preto, Minas Gerais.	23
Figura 11: Tesoura de linha alta.	23
Figura 12: Tesoura tipo canga de porco com linha baixa.	24
Figura 13: Tesoura de caibro-armado.....	24
Figura 14: Tesouras de caibro-armado em planta baixa.	24
Figura 15: (a) Fachada da Igreja de São Pedro de Balsemão; (b) Tesouras de caibro-armado. Lamego, Portugal.....	25
Figura 16: (a) Fachada frontal da Sé de Braga; (b) Fachada posterior da Sé de Coimbra.	26
Figura 17: (a) Fachada frontal da Sé de Lamego; (b) Fachada frontal da Sé de Lisboa.	26
Figura 18: Fachada frontal da Capela da Senhora de Piedade de Quintã.....	27
Figura 19: (a) Fachada da Igreja de Santo Isidoro de Canaveses; (b) Tesouras de caibro-armado com vão de 7,40 metros.....	27
Figura 20: (a) fachada frontal da Igreja de São Gens de Boelhe; (b) tesouras de caibro-armado da cobertura com reforço estrutural em madeira fixado nas alvenarias.	28

Figura 21: (a) fachada frontal da Igreja do Salvador de Cabeça Santa; (b) tesouras de caibro armado da cobertura com vão de 8,5 metros.	28
Figura 22: (a) Fachada frontal da Igreja São Mamede de Vila Verde; (b) Tesouras de caibro-armado com vão de 8,5 metros.	29
Figura 23: (a) Fachada frontal da Igreja de São Dinis; (b) Tesouras de caibro-armado da cobertura.	29
Figura 24: (a) Fachada da Capela da Senhora da Piedade; (b) Tesouras de caibro-armado com vão de 6,70 metros.	29
Figura 25: Entalhe na ligação superior das pernas da tesoura de caibro-armado da Igreja do Santíssimo Sacramento de Jequitibá, Minas Gerais.	30
Figura 26: Principais tipos de ligações do caibro-armado.	31
Figura 27: Degradação por fungos de podridão marrom na extremidade da cambota da cobertura da Igreja do Santíssimo Sacramento. Jequitibá, Minas Graís.	34
Figura 28: (a) Podridão castanha; (b) Podridão branca ou fibrosa; (c) Podridão branda;	35
Figura 29: Degradação biótica causada por insetos xilófagos em um dos pilares na Igreja do Santíssimo Sacramento em Jequitibá, Minas Gerais.	36
Figura 30: Detalhamento da ligação entre o caibro-armado e o frechal.	39
Figura 31: Efeito do <i>nudillo</i> na flexão dos caibros.	39
Figura 32: Efeito da tração no <i>nudillo</i>	40
Figura 33: Fendilhamento da linha alta em uma tesoura de caibro-armado da Igreja do Santíssimo Sacramento.	41
Figura 34: Metodologia para avaliação de intervenções em estruturas histórica de madeira.	43
Figura 35: Fases a considerar na análise de estruturas de madeira:	45
Figura 36: Tirantes metálicos fixados nas alvenarias da Igreja da Misericórdia em Guimarães, Portugal.	55
Figura 37: Consolidação da ligação de apoio da perna.	55
Figura 38: Representação da fixação dos tirantes metálicos na tesoura de <i>par y nudillo</i>	56
Figura 39: Representação da fixação do tirante com a chapa metálica no <i>nudillo</i>	56
Figura 40: Vista da fachada lateral esquerda da Igreja Matriz do Santíssimo Sacramento. Jequitibá-MG.	59
Figura 41: Tesoura de caibro-armado alocada no LPT-UFGM.	60

Figura 42: Fracionamento métrico nos elementos da tesoura de caibro-armado no LPT.	60
Figura 43: Lupa eletrônica com aumento mínimo de 50 vezes.	62
Figura 44: Raspagem da superfície transversal para identificação macroscópica da peça.	62
Figura 45: Medidor de Umidade TCS-75.	63
Figura 46: Câmera infravermelha FLIR T450.	65
Figura 47: Ensaio de corpo negro.	66
Figura 48: Excitação térmica do método ativo realizado com o refletor de lâmpada alógena.	67
Figura 49: Tomógrafo acústico.	68
Figura 50: Posição dos transdutores na seção transversal no <i>software ArborSonic 3D</i> .	69
Figura 51: Fixação dos transdutores na seção transversal do cabro 1.	69
Figura 52: Gráfico de leitura das velocidades dos pulsos entre os transdutores do tomógrafo.	70
Figura 53: Procedimentos para a montagem do equipamento de raio-x: (a) nivelamento do equipamento; (b) posicionamento da chapa; (c) equipamento de raio-x Gilardoni®.	71
Figura 54: Scanner GE CRx 25P realizando a leitura da chapa de raio-x.	72
Figura 55: Concentração de umidade na região 2 no caibro 1.	77
Figura 56: Ataque dos insetos xilófagos no caibro 1.	77
Figura 57: Podridão castanha e fibrosa na madeira na ligação inferior do caibro 2.	77
Figura 58: Áreas da tesoura inspecionadas com dos métodos não-destrutivos.	78
Figura 59: Registro fotográfico macroscópico do caibro 1.	78
Figura 60: (a) Imagem macroscópica caibro 2. (b) Imagem macroscópica linha alta 1.	79
Figura 61: Lâminas de identificação da espécie <i>Paratecoma peroba</i> do IPT.	79
Figura 62: Região sadia eleita através da inspeção visual para comparativo com as demais regiões inspecionadas; (a) registro fotográfico termográfico, (b) registro fotográfico.	82
Figura 63: Reigão 1 do caibro 1.	84
Figura 64: Resultado do ensaio termográfico da região 1.	84
Figura 65: Resultado do ensaio de tomografia acústica da região 1.	84
Figura 66: Radiografia-x da região 1.	85
Figura 67: Regiões 2a e 2b do caibro 1 respectivamente.	85

Figura 68: Resultado do ensaio termográfico das regiões 2a e 2b respectivamente.	86
Figura 69: Resultado do ensaio de tomografia acústica das regiões 2-a e 2-b.	86
Figura 70: Radiografia das regiões 2-a e 2-b.	87
Figura 71: Região 3.	87
Figura 72: Resultado do ensaio termográfico da região 3.	87
Figura 73: Resultado do ensaio de tomografia acústica da região 3.	88
Figura 74: Radiografia da região 3.	89
Figura 75: Região 4 onde encontra-se o entalhe da ligação entre o caibro 1 e a linha alta 1.	89
Figura 76: Resultado do ensaio termográfico da região 4.	90
Figura 77: Resultado do ensaio de tomografia acústica da região 4.	90
Figura 78 Radiografia do entalhe da ligação entre o caibro 1 e a linha alta 1.	91
Figura 79: Região 5.	91
Figura 80: Resultado do ensaio termográfico da região.	92
Figura 81: Resultado do ensaio da tomografia acústica da região 5.	92
Figura 82: Resultado radiográfico da região 5.	93
Figura 83: Ligação mão-de-amigo do caibro 1.	93
Figura 84: Resultado do ensaio termográfico da região 6.	93
Figura 85: Resultado do ensaio da tomografia acústica da região 6.	94
Figura 86: Radiografia da região 6.	94
Figura 87: Entalhe da ligação mão-de-amigo da região 7.	95
Figura 88: Resultado do ensaio termográfico da região 7.	95
Figura 89: Resultado do ensaio a tomografia acústica da região 7.	96
Figura 90: Radiografia da região 7.	96
Figura 91: Região 8.	97
Figura 92: Resultado termográfico da região 8.	97
Figura 93: Resultado do ensaio da tomografia acústica da região 8.	97
Figura 94: Radiografia da região 8.	98
Figura 95: Região 9 onde localiza-se a ligação entre o caibryo 2 e a linha alta 1.	98
Figura 96: Resultado termográfico da Região 9.	99
Figura 97: Resultado da tomografia acústica da região 9.	99
Figura 98: Radiografia da região 9.	100
Figura 99: Região 10.	100
Figura 100: Resultado termográfico da região 10.	101

Figura 101: Resultado da tomografia acústica da região 10.....	101
Figura 102: Radiografia da região 10.	101
Figura 103: Região 11.	102
Figura 104: Resultado termográfico da região 11.	102
Figura 105: Resultado da tomografia da região 11.....	103
Figura 106: Radiografia da região 11.	103
Figura 107: Ligação bona-de-lobo da região 12.....	104
Figura 108: Área 12; Resultado termográfico da região 12.	104
Figura 109: Resultado tomográfico da região 12.	104
Figura 110: Resultado da radiografia da região 12.....	105
Figura 111: Ligação direita entre a linha alta 1 e o caibro 2.	105
Figura 112: Resultado termográfico da ligação entre a linha alta 1 e o caibro 1.....	106
Figura 113: Resultado da radiografia da ligação entre a linha alta e o caibro 2.....	106
Figura 114: Regiões da linha alta 1: (a) ligação entre a linha alta 1 e o caibro 1; (b) região central da linha 1.....	107
Figura 115: Resultado termográfico: (a) ligação entre a linha alta 1 e o caibro 1; (b) região central da linha alta 1.....	107
Figura 116: Resultado da tomografia acústica da linha alta 1.	108
Figura 117: Resultado da Radiografia da região central da linha alta 1.	108
Figura 118: Configuração estrutural da tesoura de caibro-armado.....	109
Figura 119: Configuração estrutural proposta para a tesoura de caibro-armado.....	110

Lista de Tabelas

Tabela 1: Valores de atenuação do raio-x aplicado a madeira	82
---	----

Lista de Quadros

Quadro 1: Agentes de degradação das estruturas de madeira.....	32
Quadro 2: Resumo dos problemas/soluções para peças de madeiras antigas.....	53

Sumário

AGRADECIMENTOS	iii
RESUMO	iv
ABSTRACT.....	v
1 INTRODUÇÃO	13
1.1 Objetivos	14
1.1.1 Objetivo Geral.....	14
1.1.2 Objetivos Específicos	14
1.2 Importância e Justificativa	15
1.3 Estrutura do trabalho.....	16
02 REFERENCIAL BIBLIOGRÁFICO	17
2.1 A tesoura de caibro-armado: as suas origens e influências no Brasil	17
2.1.1 A influência Ibérica na tesoura de caibro-armado brasileira.....	24
2.1.2 Quanto às ligações na tesoura de caibro-armado	30
2.2 Patologias em tesouras de madeira antigas	31
2.2.1 Aspectos Gerais.....	31
2.2.2 Patologias de origem bióticas.....	33
2.2.3 Patologias de origem abióticas	37
2.3 Metodologias de inspeção das estruturas de madeira antiga.....	42
2.3.1 Ensaio não-destrutivo aplicado a estruturas de madeiras antigas.....	46
2.4 Terapias de reabilitação para tesouras de caibro-armado	52
2.5 Considerações finais	56
3 MATERIAIS E MÉTODOS	58
3.1 Materiais	58
3.1.1 Estudo de Caso	58
3.2 Inspeções visuais.....	60
3.2.1 Identificação macroscópica da madeira	61

3.2.2 Mapeamento de Danos	63
3.2.3 Medição do teor de umidade	63
3.2.4 Termografia infravermelha ativa reflexiva.....	64
3.3 Terapias de reabilitação da tesoura de caibro-armado	72
3.3.1 Terapia para agentes bióticos	73
3.3.2 Terapia para agentes abióticos	74
4 RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	76
4.1 Inspeção Visual.....	76
4.2 Identificação Macroscópica da Madeira.....	78
4.3 Resultados dos métodos de inspeção de termografia, tomografia acústica e raio-x	81
4.7 Proposta de terapia para reabilitação estrutural.....	109
5 CONCLUSÕES FINAIS	110
5.1 Sugestões para futuros trabalhos.....	112
6 REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	113
Glossário	128

1 INTRODUÇÃO

O início da construção portuguesa na América teve início em 1532 e influenciou diretamente as construções brasileiras até o século 1870. Custódio (2011) delimita o período colonial brasileiro entre os anos de 1500 (chegada de Pedro Álvares Cabral ao Brasil) a 1822 (Independência do Brasil) e ainda afirma que a arquitetura deste período possui características europeias, quase que totalmente portuguesas, com traços de outras influências, como a moura, francesa, germânica e italiana. Miguel (2017), afirma que a produção arquitetônica do século XVIII foi motivada pelas promissoras descobertas de ouro nas regiões das minas, fazendo com que houvesse um processo migratório intenso para Vila Rica e arredores. Entre esses imigrantes haviam arquitetos, engenheiros militares e construtores advindos da Península Ibérica e da Europa Central. Com o regionalismo ocasionado pelas limitações geográficas, disponibilidade de materiais e mão de obra especializada Minas Gerais edificou suas construções com adaptações ao cenário brasileiro interiorano. Andrade (1993), citado por Natal (2007, p. 197), afirma que a arte desenvolvida em Minas Gerais era genuína devido ao isolamento e a distância das cidades mineiras em relação aos centros litorâneos, germinando nestas terras a “mais característica arte religiosa do Brasil.” (ANDRADE. 1993, p. 78).

As tipologias construtivas luso-brasileiras de cobertura eram geometricamente simples, destacando-se entre elas a tesoura de caibro-armado, onde o elemento estrutural principal é o caibro, tendo em dois terços a linha alta e na extremidade inferior as ligações realizadas sobre a linha dos frechais. Santos (1951), afirma que nas estruturas de cobertura das edificações religiosas de Ouro Preto era comum o uso dos troncos roliços como caibros e que em quase todas as capelas não se empregavam outros, e concluiu que, mediante a singularidade destas coberturas, se fazia necessário a preservação da técnica construtiva. Pereira (2007) nomeia, em seu levantamento sobre as coberturas das igrejas de Pernambuco, a mesma tipologia por *canga-de-porco*, já Sarrazola *et al.* (2013) denominam a tesoura em Portugal como asna de nível e descreve o sistema construtivo “*onde as pernas apoiavam-se sobre frechais, unidas a cerca de dois terços da altura por olivéis, também conhecidos por níveis ou aspas*”.

Tinoco (2007) pondera que, dependendo do emprego dos materiais, técnica e sistema construtivo em uma intervenção de restauro, são inúmeras as deteriorações

consequentes em uma edificação. O autor ainda afirma que, há dois momentos agravantes para as patologias por intervenções de restauro nos telhados das edificações de origem luso-brasileiros, sendo o primeiro no início da década de 1970, onde as intervenções negligenciavam as técnicas, materiais e sistemas construtivos do passado. O segundo dá-se ao final da década de 1990, com o Programa Monumenta/BID, ao qual foram injetadas grandes quantidades de recursos financeiros sem a devida capacitação do corpo técnico mediante a demanda das obras.

Os métodos que utilizam os ensaios não-destrutivos para inspeção de estruturas antigas são alternativas eficazes para a investigação da integridade dos materiais. Barbosa *et al.* (2013) afirma que um ensaio não-destrutivo, geralmente, não danifica a capacidade estrutural da madeira, sendo de fácil execução, rapidez e relativo baixo custo. Entretanto o sucesso dos métodos não-destrutivos em madeiras de estruturas antigas depende da implementação de uma metodologia de inspeção minuciosa, criteriosa e prática. Trabalhos como o de Barbosa *et al.* (2013), Bernardo (2014), Oliveira e Magalhães (2007) e Valle *et al.* (2004) apresentam uma metodologia de inspeção generalizada a sistemas construtivos antigos, o que de fato contribuiu para as boas práticas na preservação do patrimônio edificado. Contudo, os sistemas construtivos que empregam a madeira como principal material estrutural necessitam de critérios mais rigorosos e assertivos, pois envolvem, além da estabilidade construtiva, a historicidade da edificação e suas influências colonizadoras.

Neste contexto, a elaboração de uma metodologia de inspeção da integridade que investigue a origem construtiva e preserve o estado da arte das tesouras de caibro-armado e aplique o critério da intervenção mínima é fundamental na prática de preservação da historicidade dos sistemas construtivos patrimoniais luso-brasileiros que apresentem em sua cobertura esta técnica construtiva.

1.1 Objetivos

1.1.1 Objetivo Geral

O objetivo geral é validar uma metodologia de inspeção da integridade da tesoura de caibro-armado com a utilização dos métodos de ensaio não-destrutivos (MND).

1.1.2 Objetivos Específicos

- A tesoura de caibro-armado: origem e influência no Brasil.
- Propor uma metodologia para avaliação do estado fitossanitário das tesouras.

- Aplicação de métodos não-destrutivos para avaliação das características físicas e fitossanitárias dos elementos estruturais das tesouras.
- Terapias de reabilitação da tesoura de caibro-armado.

1.2 Importância e Justificativa

As coberturas de madeira do Brasil colônia apresentam características singulares em sua concepção de caráter artesanal. Várias são as influências arquitetônicas europeias que acrescentaram conhecimento ao “modo de se fazer” brasileiro da época, sendo elas a cultura holandesa, francesa, espanhola e a portuguesa. O estado de Minas Gerais, situado na região sudeste do país, sofreu grande influência portuguesa devido a colonização lusitana, vindo a destacar-se pela grande semelhança em sua arquitetura com a região ao norte de Portugal.

O precário estado de preservação das edificações históricas brasileiras advém da falta de uma cultura de conservação e manutenção dos nossos edifícios. A carência de políticas e estratégias voltadas para a conservação e manutenção dos edifícios resultam em graves consequências como as soluções paliativas inadequadas realizadas pelas comunidades do entorno da edificação, amputações dos sistemas construtivos, remoções, substituição de materiais sem estudos prévios, alterações na simetria e volumetria a fim de solucionar o dano e etc.

Nunes (2005) afirma que a preservação de uma edificação histórica está diretamente relacionada à manutenção de sua cobertura. Os projetos de restauração comumente não contemplam pesquisas que investiguem o estado da integridade, o comportamento estrutural e a análise do material, optando, em sua grande maioria, pela substituição total do madeiramento. Em 2005 o Programa Monumenta publicou o Caderno de Encargos com as diretrizes para intervenção em um monumento histórico, ao qual no item 09.00.00.00 – Coberturas e Beirais, recomenda que as estruturas de madeira devam ser executadas de acordo com o projeto executivo e normas da ABNT. O fato desta publicação não destacar a importância em manter-se o sistema estrutural original e sugerir ensaios apenas as novas madeiras que serão utilizadas durante a restauração, não indicando os materiais que foram originalmente utilizados e nem a identificação botânica das espécies vegetais encontradas, representa a carência na preservação das estruturas que não são aparentes na construção, fazendo com que os sistemas estruturais históricos fiquem a sombra dos estilos arquitetônicos quando se trata do quesito preservação da historicidade.

Para proporcionar uma inspeção assertiva e que evite o descarte de elementos estruturais que ainda apresentem desempenho mecânico, os ensaios não-destrutivos (END) aplicados as coberturas de madeiras antigas são ferramentas de inspeção que respeitam a integridade do material na investigação do estado de conservação da estrutura.

Neste contexto esta tese visa contribuir para a preservação da história da construção luso-brasileira através da elaboração de uma metodologia qualitativa sobre o estado de conservação da tesoura de caibro-armado da Igreja Matriz do Santíssimo Sacramento do século XIX na região central do Estado de Minas Gerais.

1.3 Estrutura do trabalho

- No **Capítulo 1** é feita uma introdução a tese, suas motivações e principais objetivos.
- No **Capítulo 2** num primeiro momento é apresentada a revisão bibliográfica sobre a origem e influências sobre a tesoura de caibro-armado na Península Ibérica e sua influência no Brasil. Na sequência são apresentados os agentes patológicos bióticos e abióticos que atacam as estruturas de madeiras antigas. Por fim são apresentadas as revisões das metodologias de inspeção, métodos de ensaios não-destrutivos aplicados as obras de intervenção em edificações históricas.
- No **Capítulo 3** são apresentados materiais e métodos não-destrutivos para o desenvolvimento do estudo de caso da tesoura de caibro-armado e a elaboração da metodologia de inspeção a ser proposta.
- No **Capítulo 4** são apresentados os resultados obtidos nos ensaios experimentais do estudo de caso e as discussões.
- O **Capítulo 5** é apresentada a conclusão final da tese e sugestões para futuros trabalhos.
- O **Capítulo 6** é apresentado às referências bibliográficas utilizadas neste trabalho.

02 REFERENCIAL BIBLIOGRÁFICO

2.1 A tesoura de caibro-armado: as suas origens e influências no Brasil

A evolução das construções em madeira advém do período Neolítico onde, segundo Brites (2011), os colonos viviam em pequenas casas individuais de madeira e barro com pilares cravados no solo e barras horizontais de paus roliços unidos entre si por fibras naturais (fig. 1). Este tipo de sistema construtivo muito se aproxima do que hoje conhecemos como gaiola pombalina (fig. 2) em Portugal e pau-a-pique no Brasil (fig. 3)

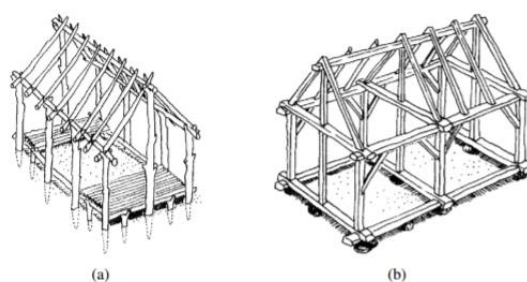


Figura 1: Hipotética evolução das habitações de madeira no período Neolítico: (a) Solução inicial, mas propícia a deterioração das fundações; (b) Solução mais duradoura, onde a estrutura de madeira era sustentada em fundações de pedra, evitando o contato direto da madeira com o solo.

Fonte: Brites, 2011.



Figura 2: Gaiola Pombalina.

Fonte: Lopes, 2012.



Figura 3: Estrutura autônoma de madeira da Igreja Matriz do Santíssimo Sacramento em Jequitibá, Minas Gerais.

Fonte: Autora, 2017.

Para Brites (2011) foram as técnicas construtivas da Arquitetura Clássica Grega que influenciaram de forma mais incisiva as soluções de cobertura dos períodos posteriores no ocidente. A substituição de materiais leves – como folhagens – por telhas de terracota nas coberturas exigiu estruturas de suporte mais robustas, o que resultou em edificações mais sólidas.

Vitruvius (1860) descreve os cuidados na elaboração das coberturas pelos povos greco-romanos, principalmente ao que se dizia respeito aos grandes vãos que se adotava nos templos. A tesoura de madeira simples era composta pela linha, caibros, pendural e diagonais. O autor ainda alerta a importância do prolongamento das coberturas para além das paredes externas, visando assim proteger as alvenarias do contato direto com as intempéries, prática que já era adotada desde a antiga Mesopotâmia.

Segundo Fitchen (1986), até o século XIX, a madeira era o único material que permitia uma melhor trabalhabilidade na concepção das estruturas de cobertura, uma vez que seu bom desempenho a flexão e baixo peso próprio, permite a concepção de elementos estruturais com maior facilidade.

Com a escassez de materiais e a necessidade de se alcançar maiores vãos, as novas soluções construtivas na Europa a partir do século XV influenciaram a arquitetura de suas futuras colônias. O arquiteto francês Philibert de L'Orme descreve em seu livro "*Nouvelles inventions pour bien bâtir et à petit frais*" – primeiro tratado construtivo publicado no Renascimento francês (1894) – há transposição da técnica habitual de construção de arcos e abobadas em pedra para a madeira, facilitando assim o alcance de maiores vãos. O sistema construtivo descrito pelo arquiteto consiste na ligação de tábuas de madeira de pequenas dimensões, niveladas conforme a confecção dos arcos, permitindo o uso do espaço que anteriormente estava ocupado pelas estruturas das tesouras tradicionais.

Martins (2008) apresenta uma proposta de classificação das coberturas de madeira em Portugal, considerando a evolução em termos de complexidade (fig. 4). Esta sequência na evolução da tipologia de cobertura de duas águas realizada pelo autor apresenta o acréscimo de elementos estruturais a fim de se obter maior estabilidade, uma vez que a complexidade estrutural da edificação exigia maior rigidez dos seus elementos.

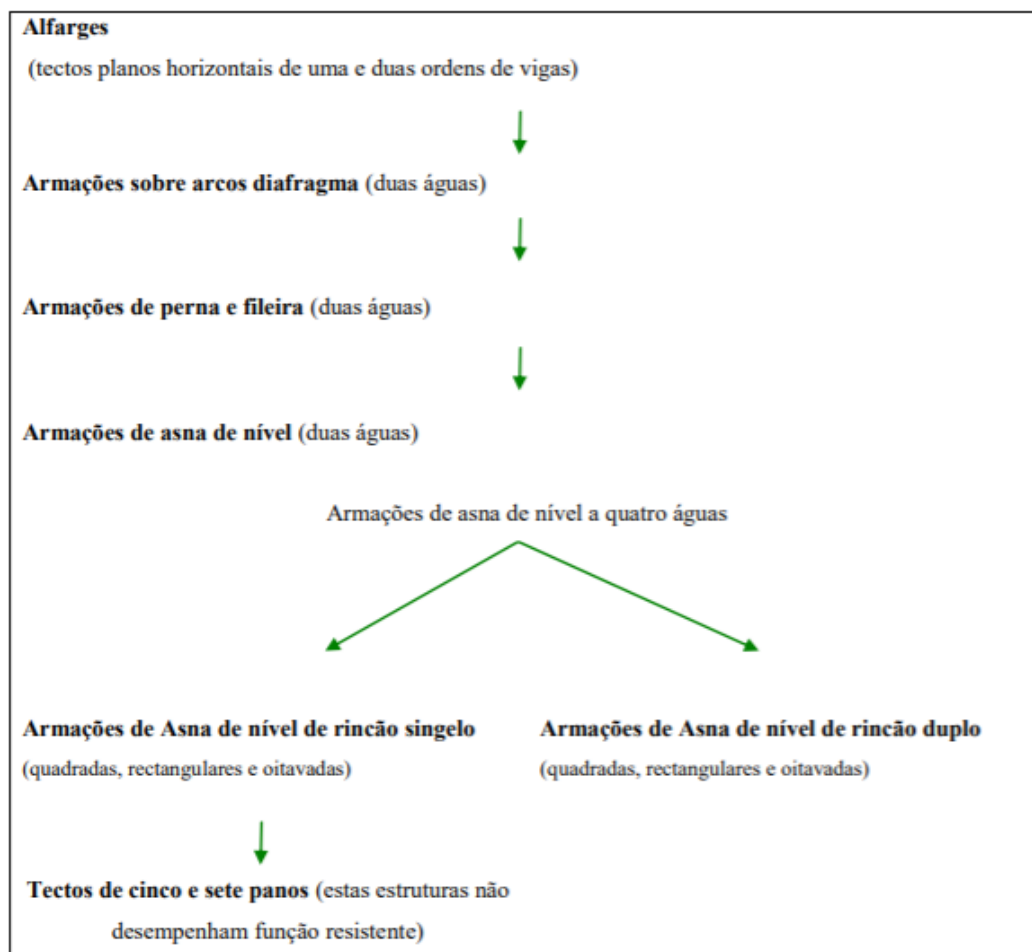


Figura 4: Proposta de classificação das coberturas mudéjares em Portugal.
Fonte: Martins, 2008.

Segundo Moreira (2010), tradicionalmente na arquitetura portuguesa, eram usadas estruturas de cobertura do tipo asna, razão pelo qual existe uma grande diversidade de estudos sobre este tipo de estrutura, que possibilita a construção de uma variedade de tipologias decorativas de tetos, auxiliadas por armações de pernas e armações de nível. O autor ainda descreve a armação de perna e fileira (fig. 5) como a forma mais simples de cobrir vãos, constituída por pernas (caibros) apoiadas em frechais ou em uma cinta de reforço, unidas superiormente à fileira ou pau de fileira (cumeeira), conferindo assim, maior estabilidade transversal ao conjunto da estrutura.

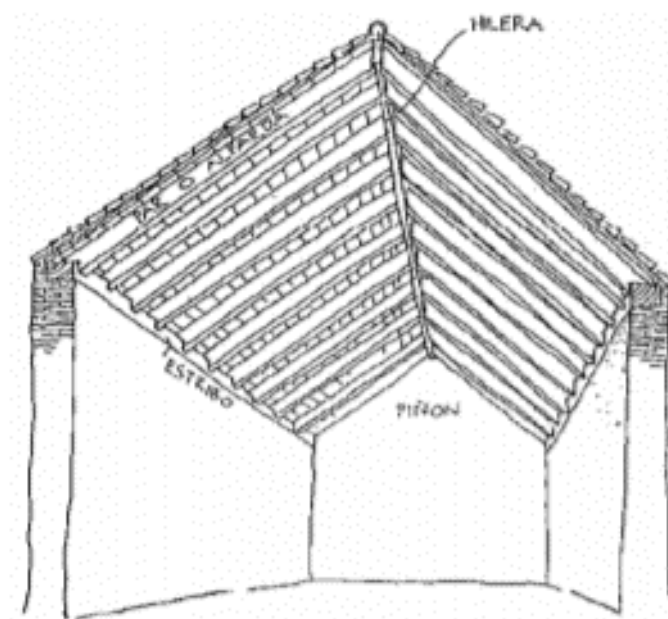


Figura 5: Estrutura de cobertura formada pela alvenaria de sustentação, estribo e fileira.

Fonte: Matauco, 2008.

Martins (2008) afirma que as tesouras de perna e nível de duas águas eram utilizadas nos edifícios românicos. Na Espanha, segundo o autor, foram estudadas armações de tesoura até o século XII, sendo estas as precursoras das estruturas mudéjares na Península Ibérica. Entretanto, foram as soluções mais simples e leves que conduziram o surgimento das tesouras de perna e fileira e seguidamente a evolução para as tesouras de asnas de nível.

Matauco (2008) descreve que a peça nível foi inserida na tesoura de perna e fileira para garantir a estabilidade da estrutura. O elemento é fixado a aproximadamente dois terços da altura das pernas, impedindo a sua deformação, respondendo de forma adequada a esforços assimétricos, como os originados pela ação do vento (fig. 6).

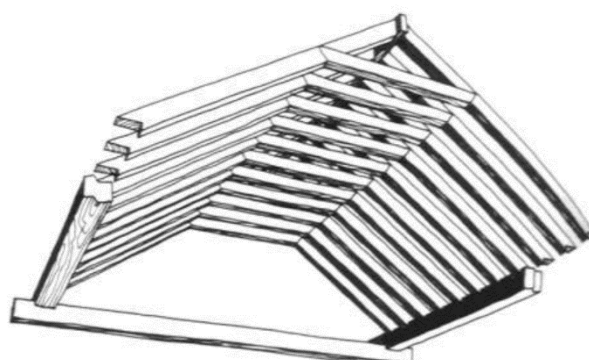


Figura 6: Tesoura de asna de nível.

Fonte: Matauco, 2008.

Os autores Matauco (2008), Miguel (2008) e Moreira (2010) apresentam em seus trabalhos a evolução das nomenclaturas destas tesouras na Península Ibérica. A então

tesoura de perna e fileira, com a inserção do nível, foi denominada asna de nível, em Portugal, já na Espanha a mesma tesoura foi nomeada *par y nudillo* (fig. 7).

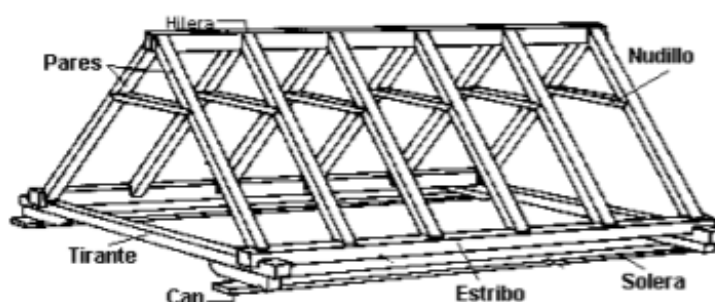


Figura 7: Elementos básicos da armação de *par y nudillo*.

Fonte: Miguel, 2008.

A tesoura de asna de nível com rincão singelo (fig. 8) é uma evolução da anterior visto a inserção do rincão como elemento estrutural, o que permite a construção de coberturas de quatro águas (MATAUCO, 2008).

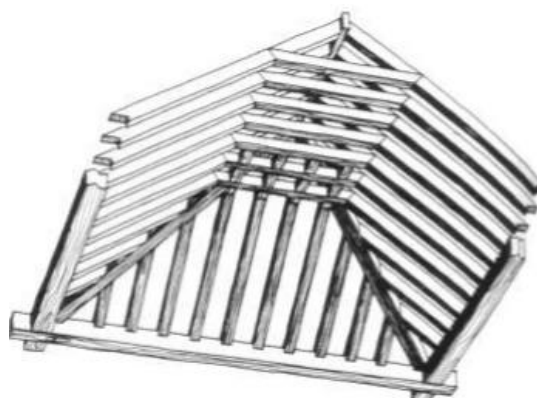


Figura 8: Tesoura de asna de nível com rincão singelo.

Fonte: Matauco, 2008.

Telles (1987) relata que durante todo o período colonial brasileiro, as técnicas empregadas nas construções civis e militares mantiveram-se praticamente as mesmas, embora tenha havido considerável evolução artística, as técnicas derivaram-se diretamente do que se fazia em Portugal naquela época.

Santos (1951) descreve que as estruturas de telhados das Igrejas de Ouro Preto eram bastante diferentes das que atualmente conhecemos: empregavam-se tesouras com pontaletes, com linha alta no terço médio da altura, ou com linhas cruzadas, chamadas também de aspas francesas, com peças grandes rusticamente esquadrejadas e as peças menores eram em geral simples paus roliços. Arranjos geométricos (fig. 9) foram tentativas de estabilizar o sistema, que sofre grandes deslocamentos devido aos empuxos transmitidos as paredes de apoio e efeitos de flexão na parte das pernas sem tirante. O autor em seu estudo de caso sobre as igrejas de Ouro Preto, afirma que “não só pela

semelhança dos sistemas, como pela nomenclatura tecnológica, é lícito afirmar-se que a influência lusa sobre a técnica construtiva adotada nas coberturas dos templos mineiros é absolutamente certa” (SANTOS, 1951, p. 93).

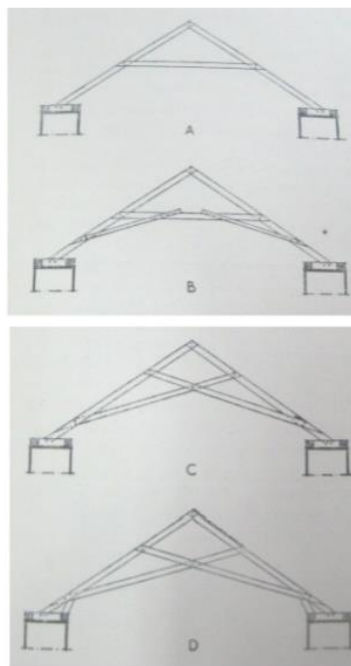


Figura 9: Tipologias de tesouras comumente encontradas nas coberturas das igrejas da cidade de Ouro Preto.

Fonte: Santos, 1951.

Nunes (2005) descreve que as primeiras estruturas utilizadas no Brasil, nomeadas tesouras de linha alta, eram deformáveis e transmitiam empuxos aos apoios, fazendo com que o construtor adotasse alvenarias mais grossas capazes de resistirem às estas forças. Montenegro (1984), observa que a percepção da ocorrência do empuxo causado por este tipo de estrutura e suas consequências na edificação provocou a colocação de tirantes.

Lopes (2014) descreve que, para este tipo de tesoura, quanto maior o vão, maior será a força horizontal resultante do deslocamento das ligações dos caibros nos frechais, com isso, medidas paliativas foram adotadas nas edificações para retardar o surgimento dos deslocamentos horizontais nas alvenarias (fig. 10).



Figura 10: Reforço estrutural em ferro fundido na nave da Igreja de São José em Ouro Preto, Minas Gerais.

Fonte: Autora 2017.

As tesouras de linha alta, também denominadas por canga de porco ou cangalha, possuem as terças sobre os nós entre a linha alta e as pernas (fig. 11), já o caibro-armado não apresenta terças em sua composição, as ripas são fixadas diretamente sobre os caibros chanfrados e não apresentam linha baixa em nenhuma de suas variações (fig. 13) (LEITE, 2010, p. 68).

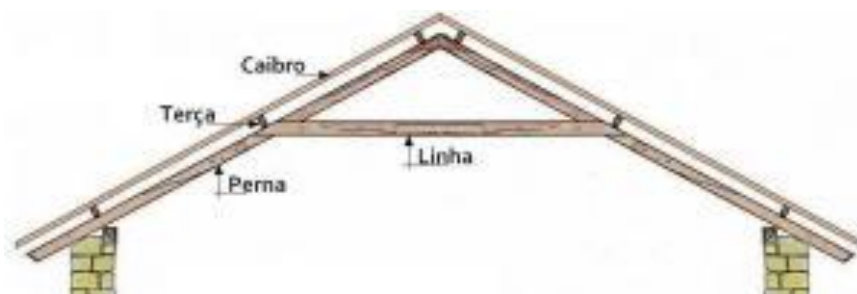


Figura 11: Tesoura de linha alta.

Fonte: Colin, 2010.

Leite (2010), afirma que a tesoura de linha alta é mais eficiente que o caibro-armado quando há presença da linha baixa, conhecida também por tirante ou tensor, que absorve os reforços de tração e equilibra o sistema, evitando a introdução de forças direcionadas para fora do plano da parede de suporte (fig. 12) (LEITE, 2010, p. 69).

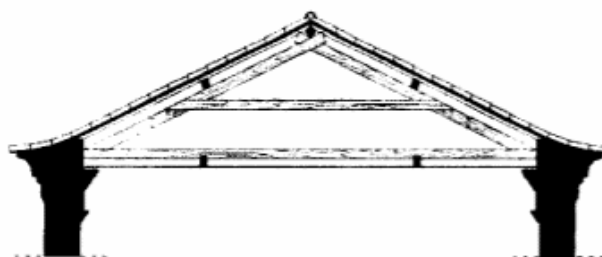


Figura 12: Tesoura tipo canga de porco com linha baixa.
Fonte: Leite, 2010.

Nunes (2005), afirma que as estruturas de caibro-armado foram constantemente utilizadas nas construções antigas apresentando seções avantajadas e eliminando as terças e cumeeiras. Neste caso as tesouras têm pequenas distâncias entre si e as ripas são mais robustas (fig. 14).

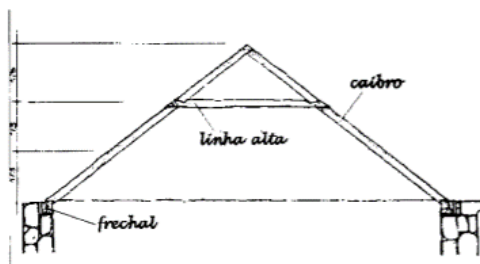


Figura 13: Tesoura de caibro-armado.
Fonte: Leite, 2010.

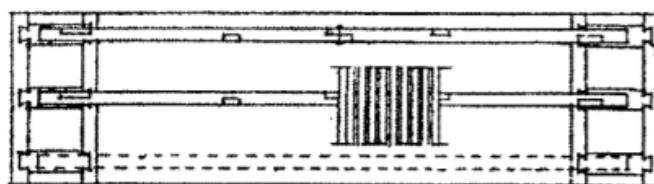


Figura 14: Tesouras de caibro-armado em planta baixa.
Fonte: Santos, 1951.

2.1.1 A influência Ibérica na tesoura de caibro-armado brasileira

Com a notória influência Ibérica na história da construção brasileira realizou-se para esta tese um estágio investigativo em Portugal a fim de se obter dados sobre o uso da tesoura de caibro-armado em edificações anteriores e/ou contemporâneas as igrejas da região central do estado de Minas Gerais no período colonial.

Como apresentado anteriormente, a arquitetura desenvolvida em Minas Gerais muito se assemelha as edificações do norte de Portugal devido ao intercambio de trabalhadores da construção civil entre estas duas regiões e partindo deste pressuposto, para o levantamento do uso da tesoura de caibro-armado, optou-se por investigar a técnica na região norte portuguesa.

Para a identificação das edificações religiosas que detêm a tesoura de caibro-armado realizou-se o levantamento das construções mais antigas de Portugal e seus

sistemas construtivos¹, com isso, identificou-se que as edificações do período românico apresentavam a tipologia de cobertura muito semelhante ao caibro-armado e, dentre as edificações religiosas românicas, a Igreja de São Pedro de Balsemão (fig. 15), localizada na cidade de Lamego, era o exemplar edificado mais antigo.

Santos (200?) afirma que a Igreja de São Pedro de Balsemão foi edificada no século VII e possui origem visigótica (pré-românica). Com este levantamento histórico foi realizada a visita na edificação em janeiro/2019 onde constatou-se a presença da tesoura de caibro armado. Entretanto, é importante destacar que a edificação passou por intervenções ao longo dos séculos e o caibro-armado pode ter sido inserido na cobertura neste ínterim, mas, contudo, a edificação hoje é o exemplar mais antigo da arquitetura românica portuguesa o que concede a elegibilidade para a partir dela realizar o levantamento cronológico histórico deste trabalho uma vez que as edificações subsequentes também apresentam o caibro-armado.



Figura 15: (a) Fachada da Igreja de São Pedro de Balsemão; (b) Tesouras de caibro-armado. Lamego, Portugal.

Fonte: Autora, 2019.

De acordo com Dangelo (2006) o período Românico estruturou a formação arquitetônica do Reino de Portugal, que floresce tardiamente, ao final do século XI, em comparação a arquitetura românica do restante da Europa. Ainda de acordo com o autor, a influência da arquitetura românica portuguesa deve-se à escola francesa da Abadia de Cluny e aos monges beneditinos que comboiaram a campanha de D. Afonso Henriques pelo território português o que, segundo o autor, explica, em parte, a influência do

¹ No levantamento histórico do sistema construtivo de caibro-armado em Portugal foi fundamental a contribuição dos Professores João Miranda, do NCREP – Consultoria em Reabilitação do Edificado e Património, Lda. - Universidade do Porto, e Jorge Branco, da Universidade do Minho. Contou-se também com o auxílio da Engenheira Esmeralda Paupério, do Instituto da Construção da Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto – FEUP. Os referidos Professores e a Engenheira disponibilizaram todo o embasamento para os levantamentos dos sistemas construtivos das edificações históricas portuguesas e apresentaram as intervenções em suas coberturas.

Românico borgonhês sobre o Românico português, seguido das influencias de igrejas de origem espanhola e italiana do período.

Dangelo (2006) afirma que na história da arte portuguesa há dois grupos de arquitetura religiosa românica em Portugal: o primeiro grupo está ligado a uma arquitetura mais erudita e monumental, tendo como exemplares as grandes catedrais portuguesas de Braga (fig. 16-a), Coimbra (fig.16-b), Lamego (fig. 17-a), Lisboa (fig. 17-b) e Évora, e o segundo grupo que apresenta uma arquitetura popular de soluções construtivas de fachadas simples e coberturas funcionais de duas águas. Estas edificações religiosas românicas vernaculares encontram-se mais ao norte do país como por exemplo a Capela da Senhora de Piedade de Quintã, caracterizada como uma ermida devido ao seu contexto construtivo, edificada num local ermo, a capela foi construída em duas fases distintas, iniciando-se com a capela-mor, podendo ser daí a sua função ermida e, numa segunda fase, a construção final do edifício. A data de construção da capela é imprecisa, entretanto, há referências sobre o edifício desde os anos de 1600 (BOTELHO, 2014).



(b)

Figura 16: (a) Fachada frontal da Sé de Braga; (b) Fachada posterior da Sé de Coimbra.

Fonte: Autora, 2019.



(a)

(b)

Figura 17: (a) Fachada frontal da Sé de Lamego; (b) Fachada frontal da Sé de Lisboa.

Fonte: Autora, 2019.



Figura 18: Fachada frontal da Capela da Senhora de Piedade de Quintã.

Fonte: Instituto da Construção da Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, 2019.

Segundo Dangelo (2006) as igrejas brasileiras mineiras em sua maioria conservaram a formação românica das construções portuguesas do segundo grupo. Com apenas uma nave, as edificações tinham o conceito de fachada-templo bastante popular na tradição arquitetônica românica portuguesa. Este conceito construtivo é uma expressão arquitetônica que traduz no exterior da edificação a disposição interna do edifício. Neste contexto realizou-se o levantamento das edificações da Rota do Românico² em Portugal, identificando as seguintes edificações:

- Igreja de Santo Isidoro de Canaveses: localizada no Conselho Marco de Canaveses, sua construção data do século XIII (VALSOUSA, 2008).



(b)

Figura 19: (a) Fachada da Igreja de Santo Isidoro de Canaveses; (b) Tesouras de caibro-armado com vão de 7,40 metros.

² A Rota do Românico é um roteiro turístico, paisagístico e patrimonial localizado nas terras dos vales do Sousa, Douro e Tâmega, ao Norte de Portugal. Esta rota possui um conjunto de 58 monumentos românicos, um estilo que perdurou, em Portugal, entre os séculos XI e XIV. Esse conjunto patrimonial encontra-se estruturado na Rota do Românico, criado em 1998, entre os conselhos que integram a VALSOUSA — Associação de Municípios do Vale do Sousa – Castelo de Paiva, Felgueiras, Lousada, Paços de Ferreira, Paredes e Penafiel, sendo aumentada em 2010 com os demais municípios da NUT III – Tâmega e Sousa (Amarante, Baião, Celorico de Basto, Cinfães, Marco de Canaveses e Resende), unindo num projeto supramunicipal um legado histórico e cultural. Acesse em: < <https://www.rotadoromanico.com> .

Fonte: Instituto da Construção da Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, 2019.

- Igreja de São Gens de Boelhe: localizada na freguesia de Boelhe, conselho de Penafiel, distrito do Porto, esta Igreja possui fundação no século XIII (VALSOUSA, 2008).

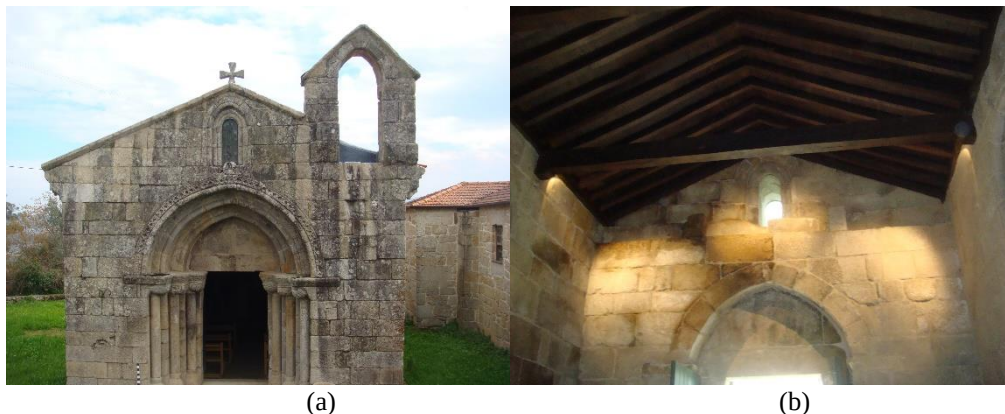


Figura 20: (a) fachada frontal da Igreja de São Gens de Boelhe; (b) tesouras de caibro-armado da cobertura com reforço estrutural em madeira fixado nas alvenarias.

Fonte: Instituto da Construção da Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, 2019.

- Igreja do Salvador de Cabeça Santa: localizada no Concelho de Penafiel, esta Igreja foi edificada no segundo quartel do século XIII (VALSOUSA, 2008).



Figura 21: (a) fachada frontal da Igreja do Salvador de Cabeça Santa; (b) tesouras de caibro armado da cobertura com vão de 8,5 metros.

Fonte: Instituto da Construção da Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, 2019.

- Igreja São Mamede de Vila Verde: localizada no Conselho de Figueiras, esta Igreja possui fundação no século XIII (VALSOUSA, 2008).



Figura 22: (a) Fachada frontal da Igreja São Mamede de Vila Verde; (b) Tesouras de caibro-armado com vão de 8,5 metros.

Fonte: Instituto da Construção da Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, 2019.

- Igreja São Dinis de Vila Real: localizada no Conselho de Vila Real foi edificada no século XIII (VALSOUSA, 2008).

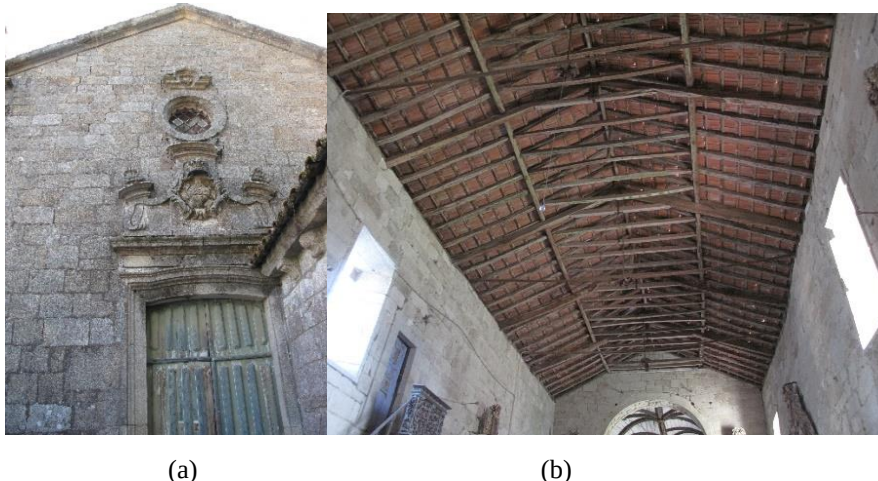


Figura 23: (a) Fachada frontal da Igreja de São Dinis; (b) Tesouras de caibro-armado da cobertura.

Fonte: Instituto da Construção da Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, 2019.

- Capela da Senhora da Piedade de Quintã: localizada no Concelho de Paredes a Capela possui referencias datadas desde o século XV (VALSOUSA, 2008).



Figura 24: (a) Fachada da Capela da Senhora da Piedade; (b) Tesouras de caibro-armado com vão de 6,70 metros.

Fonte: Instituto da Construção da Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, 2019.

Segundo a Engenheira Esmeralda Paupério, a técnica de caibro-armado foi amplamente utilizada em Portugal no período românico ao qual as edificações possuíam dimensões menores, sendo substituídas por tesouras mais complexas de acordo com a maior amplitude das construções das edificações. É importante destacar que o uso da técnica de caibro-armado apresenta indícios pré-românicos na Península Ibérica, podendo ser uma influência romana, o que ainda não se pode comprovar de fato.

2.1.2 Quanto às ligações na tesoura de caibro-armado

Para Silva *et al.* (2014) os telhados são sistemas relativamente complexos e que as zonas de ligação e remate são não só os pontos mais vulneráveis como os que apresentam maior risco quando mal confeccionados ou quando já não executam suas funções corretamente.

As ligações utilizadas na confecção das tesouras de caibro-armado são, em sua grande maioria, entalhadas e fixadas por cravos (fig. 25). Também há o sistema apenas por entalhes, onde não é utilizado nenhum elemento metálico para o travamento da estrutura. Estas são mais raras nas tesouras de caibro-armado devido aos grandes deslocamentos e aos grandes vãos.



Figura 25: Entalhe na ligação superior das pernas da tesoura de caibro-armado da Igreja do Santíssimo Sacramento de Jequitibá, Minas Gerais.

Fonte: Autora, 2017.

Nunes (2005) afirma que as ligações por entalhe devem ser executadas de forma que evitem grandes cortes na madeira, o que tornaria a ligação mais fraca devido a redução da seção transversal local. Para os elementos metálicos o autor sugere que os furos para a colocação da cavilha e parafusos não devem ser em quantidade elevada e nem possuir grandes diâmetros, tais aberturas e inserção de elementos dividem as fibras longitudinais da madeira o que resulta na diminuição de resistência da ligação.

Há ausência de cavilhas, metálicas ou de madeiras, nas ligações limita a transmissão de esforços em compressão e cisalhamento, sendo que estes esforços são transmitidos principalmente através do contato direto entre os elementos nas faces dos entalhes e dentro de cada peça através da mobilização de superfícies sujeitas a tensões de compressão, de cisalhamento e de tração. A utilização de elementos do tipo cavilha, de

madeira ou metálicos, nas ligações tradicionais aumentou a complexidade de sua confecção e das tesouras, consentindo acomodar mais facilmente esforços de tração e permitindo o desenvolvimento de outros arranjos estruturais (PALMA, 2009).

Os tipos de ligações mais comuns a tesoura de caibro armado são os demonstrados na Figura 26, onde observa-se três os tipos de conexões: a ligação superior entre os caibros, a ligação do caibro com a linha alta e a ligação do caibro com o frechal.

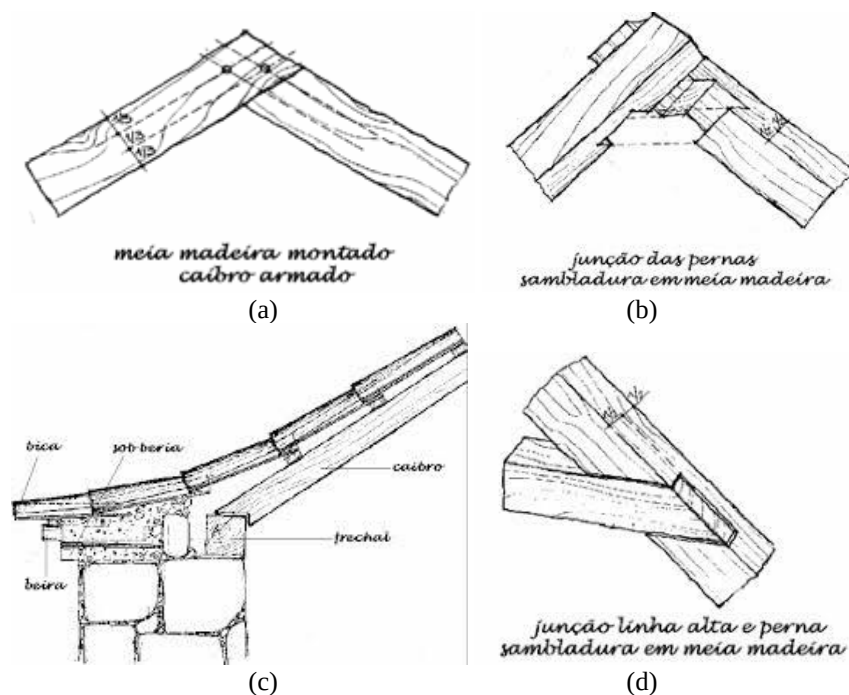


Figura 26: Principais tipos de ligações do caibro-armado.
Fonte: IPHAN, 1999.

Para o caibro-armado, as ligações de meia madeira, entre a linha alta e os caibros, e a ligação de boca-de-lobo, entre o caibro e o frechal, são as mais utilizadas. Entretanto não há uma catalogação técnica e científica dos tipos de ligações em estruturas de madeiras do período colonial, o que torna a identificação dos tipos de ligações das tesouras do período colonial empíricas.

2.2 Patologias em tesouras de madeira antigas

2.2.1 Aspectos Gerais

Martins e Fioroti (2016) descrevem a madeira como um material biológico sujeito à deterioração pela ação de fungos, insetos xilófagos, perfuradores marinhos, descoloração, agentes químicos, intemperismo, catástrofes naturais e incêndios.

Przybysz e Machado (2013) definem que a durabilidade biológica ou natural da madeira é a capacidade inerente e específica de cada espécie em resistir a ação dos agentes deterioradores. As anomalias em tesouras antigas de madeira evidenciam as patologias ocasionadas pela ação do tempo, desgaste biológico do material, degradação devido à

falta de manutenção periódica, erros de projeto e execução, causas acidentais e/ou ataques biológicos.

Para Branco (2008), as patologias mais comuns em coberturas de madeiras antigas são: de origem biótica e abiótica. No qual divide a abiótica em duas, falta de resistência das peças à ação atuante e dimensionamento inadequado. Ainda de acordo com o autor, os casos bióticos ocorrem quando a peça de madeira é atacada por agentes xilófagos, mais comuns em peças úmidas em decorrência de alguma infiltração no sistema construtivo.

Para Ritter e Morrell (1990) a deterioração da madeira é um processo contínuo, na maioria dos casos, fruto de um arranjo concomitante entre dois ou mais agentes que degradam e alteram as propriedades da madeira. Ainda segundo os autores são diversas as manifestações patológicas que alteram a resistência das tesouras de madeiras antigas, cada uma delas está relacionada com o agente que as originam e ao local onde está situada a estrutura.

Cameira e Faria (2009) classificam de uma forma simplificada os problemas estruturas das em: Seção insuficiente; deformações excessivas; falhas nas uniões ou ruptura das ligações; rupturas pontuais dos elementos; rotações dos apoios; escorregamento das ligações; inexistência ou deficiências de contraventamento; perda da seção resistente (degradação); empenamento; encurvamento; pormenores construtivos, mal concebidos ou executados.

La Pastilha Filho (2015) no “*Manual de Conservação de Telhados*” elaborou de forma didática no Quadro 1 abaixo:

Quadro 1: Agentes de degradação das estruturas de madeira.

AGENTES DE DETERIORAÇÃO DOS TELHADOS

Agentes de Deterioração	Revestimento de Telhados	Estruturas/Armação	Forros	Beirais	Medidas e Procedimentos
1 – FORÇAS FÍSICAS DIRETAS (choques, vibrações, ventos, raios, circulação sobre o telhado) – Provocam rupturas, deformação, desabamento.	- Quebra de telhas - Escorregamento de telhas - Desabamento total ou parcial;	- Abala os nós ou vínculos - Deformação - Desabamento total ou parcial	- Ruptura - Deformação - Desabamento total ou parcial	- Ruptura - Deformação - Desabamento total ou parcial	- Aumentar a segurança - Instalação de para-raios - Controlar o acesso de pessoas ao telhado
2 – VANDALISMO (objetos atirados sobre o telhado, rojões, balões)	- Quebra de telhas - Escorregamento -Entupimento de calhas, canais e condutores	- Risco de incêndio	- Ruptura - Risco de incêndio	- Ruptura -Deformação -Desabamento total ou parcial	- Aumentar a vigilância patrimonial

3 – INFILTRAÇÃO DE ÁGUAS PLUVIAIS OU OUTRAS DECORRENTES DE VAZAMENTO – Provocam apodrecimento de peças, favorecem a proliferação de agentes patológicos		- Apodrecimento de peças - Deformação - Desabamento	- Apodrecimento de peças da estrutura de sustentação e do revestimento - Deformação - Desabamento	- Desagrega o sistema de sustentação - Deformações - Desabamento parcial ou total	- Restaurar o revestimento das telhas, impedindo infiltrações - Inserir sistema de captação e escoamento de águas de infiltração - Sanar problemas nas instalações hidráulicas
4 – PRESENÇA DE VEGETAÇÃO, ANIMAIS, INSETOS E MICRORGANISMOS (pássaros, morcegos, roedores, cupim, brocas, fungo, mofo) – Causam obstrução do sistema de escoamento de águas; atacam e destroem as peças de madeira;	- Ruptura de telhas - Deslocamento de telhas - Entupimento de canais e sistema de escoamento de água	- Infestação e perda de seção útil - Perda da eficiência dos nós - Ruptura - Deformação - Desabamento	- Infestação e perda de seção útil - Perda da eficiência dos nós - Ruptura - Deformação - Desabamento	- Perda da seção útil - Instabilidade dos encaixes - Deformações - Desabamento parcial ou total	- Remoção da vegetação e de animais vivos ou mortos - Instalar sistema de proteção para impedir a entrada de animais - Estabelecer um programa de eliminação e controle de pragas

Fonte: Adaptado de LA PASTINA FILHO, 2005, p. 69.

La Pastina Filho (2005) relaciona de forma classificatória as degradações em telhados com os agentes patológicos encontrados em cada região de uma cobertura, propondo por fim um método de intervenção para cada caso. Entretanto, apesar de objetivo, as descrições do Quadro 1 sobre os agentes atuantes no desenvolvimento de patologias são abrangentes e carentes de informações sobre o quanto cada agente pode contribuir para o desenvolvimento de outros agentes e suas respectivas patologias. Esta superficialidade nas descrições dos agentes pode contribuir para a imprecisão da origem patológica, o que resulta numa má intervenção.

Contudo há autores que segregam as patologias para maior detalhamento das mesmas, como Arriaga *et.al* (2002) que descrevem os danos detectados em uma determinada estrutura como sendo de origens: agentes bióticos, agentes abióticos e oriundos de anomalias estruturais, e Machado *et. al* (2009) que expande ainda mais este conceito acrescentando os agentes atmosféricos como causas distintas aos agentes abióticos.

2.2.2 Patologias de origem bióticas

Broto (2015) caracteriza agentes bióticos como organismos vivos que degradam a madeira e a utilizam como alimento e/ou moradia. O autor ainda afirma que os organismos vivos degradantes se desenvolvem à uma umidade da madeira e temperatura ambiental relativamente alta, acima de 15% e 15 – 30°C, respectivamente. Para a identificação dos agentes bióticos presentes nas tesouras de madeiras antigas faz-se

necessário a inspeção das condições ambientais ao qual a tesoura está inserida. Fatores como umidade ambiental, temperatura, incidência de radiação solar e intensidade das chuvas podem ser fatores abióticos que interferem diretamente no surgimento e proliferação dos agentes bióticos. Com isso destaca-se os seguintes agentes bióticos nas madeiras antigas:

- Fungos

Moreschi (2011) destaca os fungos como os agentes bióticos que atacam a madeira em maiores proporções, pois se propagam por todos os nichos ecológicos onde a madeira é utilizada. A degradação dos fungos como agentes causadores da patologia se dá pela produção de substâncias fibrosas, através de fissuras em fases, iniciando a sua degradação com aparecimento de machas e finalizando com decomposições e apodrecimentos que resultam nas perdas das áreas das seções das peças (fig. 27).



Figura 27: Degradação por fungos de podridão marrom na extremidade da cambota da cobertura da Igreja do Santíssimo Sacramento. Jequitibá, Minas Gerais.

Fonte: Autora, 2017.

Pra Worral (2013) os fungos são os principais agentes apodrecedores da madeira, definindo a decomposição da madeira ocasionada por estes agentes como uma biodegradação originária por atividades enzimáticas de microrganismos. Pereira (2009) destaca que os fungos de podridão podem ser divididos em três tipos:

- Podridão marrom: conduz a fratura dos elementos em formas cúbicas, variando sua intensidade de degradação devido as condições ambientais e espécie da madeira;
- Podridão branca: aparência fibrosa e uma coloração ligeiramente mais clara não existem a fratura cúbica como nas podridões castanhas, mais comuns nas folhosas porque possuem maior quantidade de lenhina;

➤ Podridão branca: decompõe a celulose das paredes das células secundárias, evidenciando a coloração mais clara e o aspecto esponjoso;



Figura 28: (a) Podridão castanha; (b) Podridão branca ou fibrosa; (c) Podridão branca;
Fonte: Pereira, 2009.

Oliveira *et al.* (2005), descreve que os ataques dos fungos acarretam alterações na composição química, redução da resistência mecânica, diminuição de massa, modificação da cor natural, aumento da permeabilidade, redução da capacidade acústica, aumento da inflamabilidade, diminuição do poder calorífico e maior propensão ao ataque de insetos, comprometendo, dessa forma, a sua qualidade e inviabilizando a sua utilização para fins tecnológicos.

- Bactérias

As bactérias, assim como os fungos, são responsáveis pela decomposição da madeira, sendo seres unicelulares de elevada resistência e reprodução, alimentam-se da decomposição da celulose, podendo provocar descoloração, oxidação, destruição do parênquima, processos fotossintéticos. Segundo Brites (2011), existe mais de 1000 espécies de bactérias documentadas, sendo comum a “cooperação” entre as bactérias e fungos, o que ocasionaria uma degradação ainda mais intensa.

- Insetos

Broto (2005) define que existem três tipos de insetos em relação a degradação biótica da madeira, sendo estes:

- Xilófagos: se alimentam das substâncias nutritivas da madeira;
- Parasitários: parasitam os insetos xilófagos em sua fase larvária, podendo parasitá-los também em sua fase adulta;
- Moradores: são os que habitam na madeira, normalmente, em decomposição;

Pereira (2009) afirma que os insetos xilófagos são os agentes biológicos mais frequentes nas estruturas de madeira, tendo o duplo propósito de se alimentarem e abrigarem, atacando a madeira em sua desde a sua fase larval a adulta, alimentando-se do material lenhoso. Na fase adulta perfuram a madeira, construindo extensas galerias,

reduzindo assim a seção resistente, beneficiando a permeabilidade e aumento da umidade nas peças. As espécies xilófagas em destaque são:

- Cupins: São capazes de atacar qualquer espécie de madeira, degradando as peças de madeira no sentido das fibras, deixando pequenas lâminas entre as galerias criadas – bem menores do que as realizadas pelos carunchos -. Alimentam-se de celulose e encontram condições favoráveis de reprodução em madeiras de tonalidades mais claras. Sendo exemplares as espécies de térmitas-de-madeira, térmitas-de-solo e térmitas-arborícolas.

- Carunchos, carcomas ou besouros: os ataques destes agentes provocam elevada degradação mecânica, atacando o borne, formando galerias no interior das peças de madeira. Nota-se sua presença devido a produção de serrim, como a formação de orifícios visíveis a olho nu, que resultam da saída dos insetos adultos ao fim da fase larvária. Os ataques, em sua grande maioria, acontecem em árvores vivas ou recém cortadas (fig. 29).

- Formigas, abelhas e vespas: são incluídas na ordem *Hymenoptera*. Em destaque as formigas-carpinteiras e abelhas-carpinteiras que usam a madeira para abrigos e ninhos ao invés de alimentos.

Para Martins (2009), os danos provocados pelas térmitas são devastadores, podendo levar os elementos em madeira ao colapso. Na grande maioria das vezes os danos não são aparentemente visíveis, e quando detectados, já estão em situações de níveis de deterioração mais graves, como perdas de seção.



Figura 29: Degradação biótica causada por insetos xilófagos em um dos pilares na Igreja do Santíssimo Sacramento em Jequitibá, Minas Gerais.

Fonte: Autora 2017.

➤ Vegetação

Segundo Mendes *et al.* (2010) as sementes trazidas pelos pássaros dão origem ao crescimento da vegetação de pequeno porte nas fissuras ou falhas das telhas nas coberturas. A presença de vegetação na cobertura acarreta deslocamentos das telhas favorecendo o aumento de umidade e patologias de infiltração não só na cobertura como nos forros.

2.2.3 Patologias de origem abióticas

As patologias de origem abióticas são derivadas de agentes relacionados as intempéries, erros projetuais e/ou executivos, físicos (radiação solar, chuvas, vento e etc.), químicos (interação com contaminantes e outros materiais) e ainda podem surgir através de anomalias estruturais (excesso de vibração das vias, seções insuficientes das peças, mau dimensionamento da ligação e etc.). Rodrigues e Sales (2013) afirmam que há exemplos de alterações das características físicas e químicas que podem ser detectados e acompanhados pela degradação superficial da madeira como o apodrecimento, mudança de cor da superfície exposta as intempéries, empenamento, dilatações e retrações.

Para uma análise assertiva das patologias do caibro-armado do estudo de caso optou-se nesta tese pela realização do referencial teórico dos danos abióticos que são comumente encontrados na tipologia. Com isso destaca-se os seguintes agentes:

➤ Agentes abióticos de origem estrutural na tesoura de caibro-armado

Cruz (2011) define alguns defeitos estruturais comuns as coberturas de madeira de edificações históricas, sendo estes a geometria inadequada, excentricidade nos apoios e elementos estruturais posicionados longe dos nós das asnas. Já Branco *et al.* (2008) aponta como o principal agente abiótico em estruturas de madeiras antigas a alteração das funções da construção ao longo da vida útil da edificação. A adição de cargas de serviço ao longo do tempo na estrutura superior ao previsto, vibrações excessivas, ausência de contraventamento, deficiente dimensionamento das ligações, presença de defeitos locais nas peças e umidade geram patologias que podem vir a arruinar a edificação. Contudo é importante destacar que, as intervenções realizadas nas edificações visando a reabilitação, restauração ou conservação são também agentes patológicos quando a falta de conhecimento técnico subjuga as técnicas históricas.

Para Motta (2010) muitas vezes a degradação mecânica das madeiras antigas é o resultado da fadiga, provocada por ações de origem dinâmica, pelo aumento das tensões instaladas e por redistribuição dos esforços devido à cedência de outros elementos.

Segundo Pereira (2007) as principais causas da flexão em peças que compõem a cobertura são:

- Seções transversais das peças insuficientes;
- Adição de cargas extras no conjunto da estrutura;
- Deterioração da peça por fungos e cupins;
- Dimensionamento inadequado das ligações;
- Sobrecarga dos forros;

Apesar de Pereira (2007) afirmar que a insuficiência das seções transversais acarreta flexão nas peças, considera-se nesta tese que a maior patologia estrutural do caibro-armado se encontra no arranjo geométrico de sua tipologia. A liberdade do vão abaixo da linha alta proporciona maior do uso do pé direito, entretanto a falta da linha baixa permite deslocamentos horizontais que desestabilizam não só o sistema construtivo em si, como também os forros e alvenarias. Estes deslocamentos são detalhados por Pereira (2007) como produtos das forças horizontais (H) resultantes das ações das cargas permanentes, do peso próprio dos materiais da cobertura, e das ações das cargas variáveis, sobrecargas de vento e intempéries. Estas ações provocam nas alvenarias deslocamentos e, conseqüentemente, um momento de giro na base da alvenaria como apresentado na equação abaixo:

$$M = H \times h \quad (1)$$

Onde:

- H é o força horizontal gerada pelo deslocamento da tesoura;
- h é altura da alvenaria;

Observa-se que o momento resultante, denominado aqui empuxo lateral, é um produto das cargas e da distância do apoio da tesoura sobre o frechal até a base da alvenaria, com isso nota-se que quanto maior a esbeltez das alvenarias maior será o empuxo.

Almeida (19-) detalha os esforços sobre a parede (fig. 30) e destaca que as ligações, geralmente rígidas aos deslocamentos horizontais, também são responsáveis pelo momento devido à restrição dos graus de liberdade.

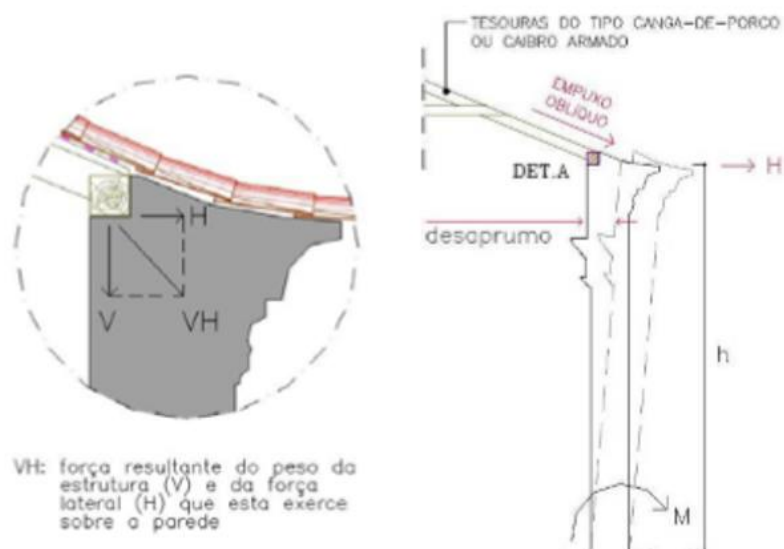


Figura 30: Detalhamento da ligação entre o caibro-armado e o frechal.

Fonte: Almeida [19-].

Para a tesoura de *par y nudillo*, análoga a tesoura de caibro-armado no Brasil como já demonstrado anteriormente, Martitegui *et al.* (2002) afirma que o *nudillo* permite a redução da flexão dos caibros causada por forças gravitacionais, fazendo com que esta peça trabalhe a compressão quando solicitada apenas a este esforço (fig. 31). O autor ainda complementa que são as ações do vento que deslocam horizontalmente a tesoura, fazendo com que o *nudillo* trabalhe a tração (fig. 32).

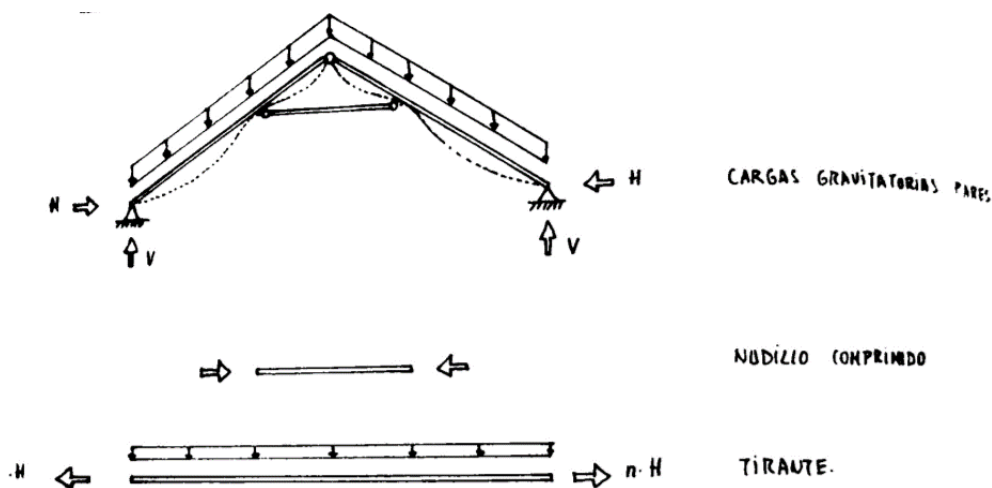


Figura 31: Efeito do *nudillo* na flexão dos caibros

Fonte: Martitegui *et al.*, 2002.

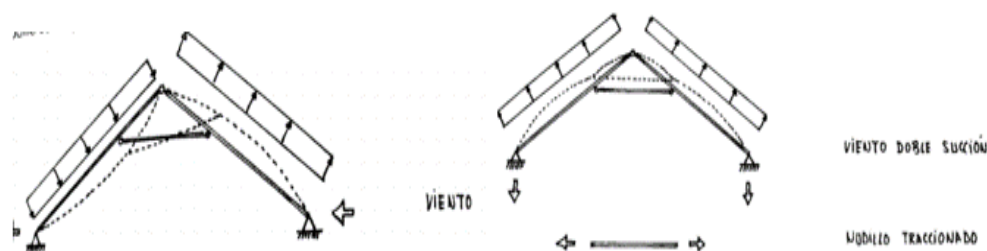


Figura 32: Efeito da tração no nudillo.
Fonte: Martitegui *et al.*, 2002.

➤ Degradação devido às intempéries

Segundo Carrasco e Azevedo Júnior (2003) a madeira, por natureza, é um material higroscópico, capaz de interagir com o meio ambiente absorvendo ou perdendo umidade. A umidade, como agente patológico, proporciona um ambiente favorável a proliferação biótica, afetando a durabilidade natural das peças e alterando o desempenho das tesouras ao sofrer constante retração e inchamento.

Pereira (2011) define que a umidade pode estar presente na madeira através da água de constituição molecular (umidade de equilíbrio da peça com o ambiente), umidade accidental, de condensação (ocasionada por falta de ventilação) e por absorção e penetração da água da chuva.

Para Motta (2010) a ação direta da água da chuva e os ciclos repetidos de umedecimento e secagem, acrescido da exposição às radiações ultravioleta, provocam, com o passar do tempo, alterações cromáticas, apodrecimento e destacamento das peças de madeira.

Para Rodrigues (2004), o apodrecimento da madeira nas coberturas é comum, com destaque para o apodrecimento das ligações entre elementos e os apoios, resultando na diminuição da capacidade de suporte da estrutura.

Feio e Lourenço (2005) afirmam que com a variação de umidade as retrações e inchamentos são responsáveis por tensões internas na madeira, resultando em aberturas e fendas (fig. 33) progressivas no processo de secagem. Os danos ocasionados pelas fendas na resistência de estruturas de madeira variam com a sua extensão, profundidade e seção da peça onde ocorrem. Os autores ainda afirmam que os ciclos associados a variação de umidade conduzem, em geral, na perda da rigidez das ligações mecânicas, que resulta no aumento de flexibilidade e de deformações de todo o conjunto estrutural.



Figura 33: Fendilhamento da linha alta em uma tesoura de caibro-armado da Igreja do Santíssimo Sacramento.

Fonte: Autora, 2017.

Segundo Lopes (2007) as falhas nas impermeabilizações das coberturas, principalmente nas zonas de encontro dos elementos do telhado, proporcionam a entrada de água por intempéries, procedendo a uma eventual retenção da mesma. Estas condições ambientais nas coberturas criam ambientes favoráveis a proliferação não só agentes abióticos como também agentes bióticos o que resulta em patologias associadas. O autor ainda destaca que a ausência de ventilação, assim como o excesso dela, também são ações que resultam na proliferação dos agentes abióticos nas coberturas. A ausência de ventilação dificulta a secagem dos elementos gerando zonas de condensações, já o excesso de ventilação acarreta os deslocamentos das telhas, o que para Tinoco (2007), estimula a rápida proliferação das goteiras, acelerando a deterioração dos elementos estruturais das coberturas.

➤ Incêndio

Araújo *et al.* (2005) afirmam que, quanto a natureza da carga de incêndio, a madeira é o material combustível predominante, pois participa da composição da estrutura dos pisos, forros e telhados em edificações históricas. Fatores como o mal estado de conservação e manutenção das instalações elétricas, aplicação de produtos inflamáveis para combater a infestação xilófaga e a carência de ações e projetos preventivos podem proporcionar condições favoráveis a situações de risco de incêndio.

Souto *et al.* (2016) citam que, com relação aos incêndios, apesar da madeira ser um material combustível, em uma situação de incêndio, uma peça robusta (com seções acima de 10 x 10 cm) conserva a temperatura de seu interior mantendo assim suas propriedades mecânicas por mais tempo.

Em relação a transmitância térmica Gouveia (2006, p. 37) afirma que “o desnível dos telhados, quando permite o contato das chamas oriundas de uma edificação com a

empena de outra vizinha, pode levar ao aquecimento das estruturas de madeira e a propagação do fogo” e ainda complementa que “ o estado de conservação dos telhados é, em geral, bastante precário, o que facilita as trocas de calor por meio de mecanismos combinados de radiação, convecção e condução”.

2.3 Metodologias de inspeção das estruturas de madeira antiga

As metodologias de reabilitação de edifícios históricos antigos devem ser antecedidas por inspeções preliminares minuciosas, indo ao encontro de informações históricas desde a construção, intervenções, possíveis alterações no uso e estudo do entorno da edificação. Para Milani e Kripka (2012) somente um diagnóstico adequado possibilitará esclarecer todos os aspectos do estado da integridade das peças de madeiras antigas.

Sousa *et al.* (2014) estabelecem que para a avaliação de elementos de madeira em construções históricas devem ser seguidos os seguintes passos:

- 1) Inspeção Visual;
- 2) Identificação da espécie da madeira;
- 3) Caracterização Geométrica;
- 4) Medição da umidade da madeira;
- 5) Avaliação de propriedades mecânicas de referência;

Neste contexto Sousa *et al.* (2014) elaboraram uma metodologia de inspeção aplicada a madeiras antiga (fig. 34) em três etapas, onde observa-se que os autores evidenciam a importância do acesso as estruturas através dos detalhamentos, principalmente das ligações, para à assertividade da inspeção.

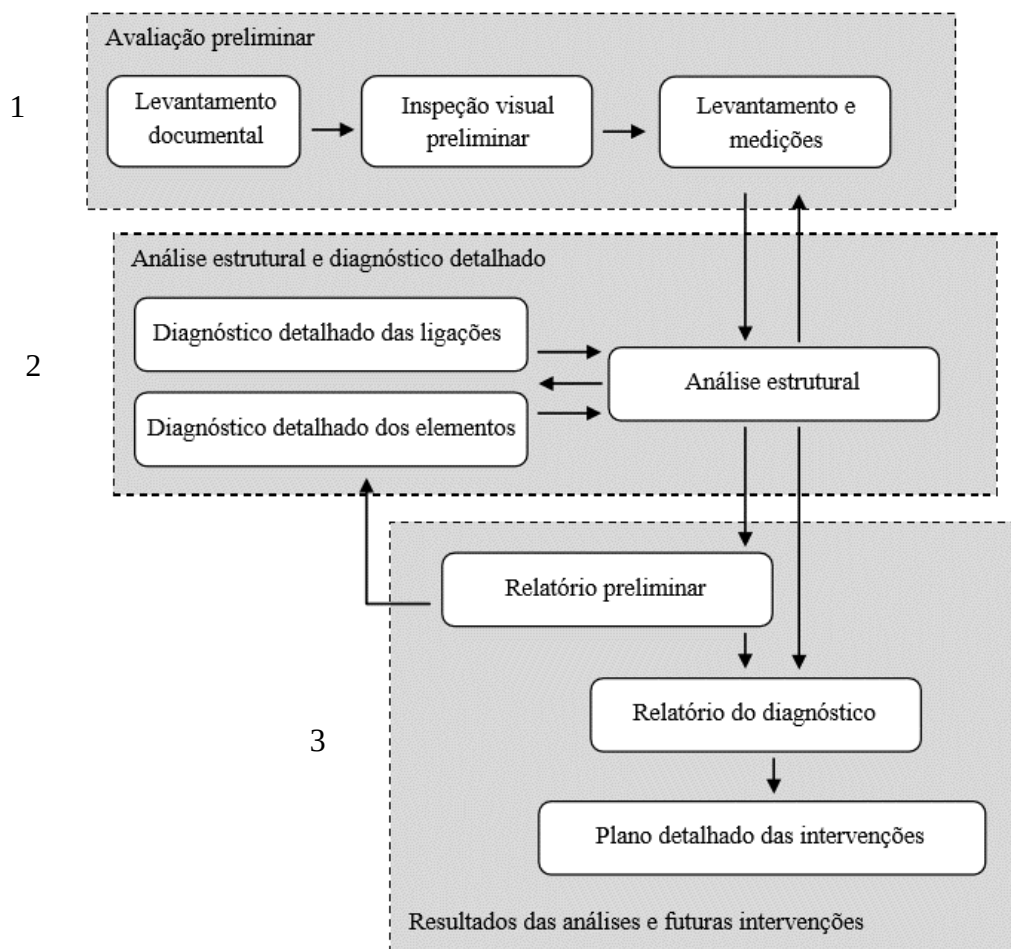


Figura 34: Metodologia para avaliação de intervenções em estruturas histórica de madeira.
Fonte: Sousa *et al.*, 2014.

Melo Junior (2012) afirma que o processo de deterioração das estruturas arquitetônicas em madeira implica a adoção de políticas e ações de restauro para a conservação do patrimônio histórico edificado. A correta utilização das madeiras e sua respectiva aplicação estão correlacionadas às propriedades físicas e mecânicas.

Apresenta-se abaixo os procedimentos desenvolvidos por Faria (2002) a serem aplicados nas intervenções em estruturas de madeira:

- I. Verificar o funcionamento global da edificação, estabilidade e nível de degradação dos sistemas construtivos;
- II. Evitar o desmonte dos elementos estruturais em madeira: a futura montagem irá solicitar esses elementos em diferentes estados de tensão como resultado das novas ligações;
- III. Adotar coeficientes de segurança mais elevados que os projetados inicialmente;
- IV. Realizar inspeções periódicas as estruturas, controlando os fatores como a temperatura, umidade, taxa de renovação de ar, teor de água na madeira,

deformações, defeitos dos elementos estruturais etc. Melhorar o desempenho das condições de serviço das pelas de madeira;

- V. Permitir a acessibilidade, após a cada obra de restauro, as estruturas, possibilitando os exames mais minuciosos do estado de conservação delas;
- VI. Adotar sempre peças de substituição de madeira que atendam as solicitações das estruturas já existentes.
- VII. Assegurar a ventilação adequada dos sistemas de cobertura a fim de evitar acúmulo de umidade nas ligações; evitar revestir os elementos estruturais em madeira como forma de acabamento;

Machado e Feio (2014) consideram três comportamentos para a avaliação de estruturas de madeira:

- 1) Comportamento dos elementos estruturais;
- 2) Comportamento das ligações;
- 3) Estado de conservação da estrutura;

Os autores ainda afirmam que há duas fases consideráveis na avaliação de estruturas de madeira, onde a primeira consiste na inspeção visual, com o uso de equipamentos para a medição de umidade e realização do ensaio de perfuração controlada, e a segunda, que visa a interpretação dos resultados e a elaboração de metodologias de intervenção adequadas ao estado da arte da estrutura (fig. 35).



Figura 35: Fases a considerar na análise de estruturas de madeira:

Fonte: Machado e Feio, 2014.

Para aplicabilidade satisfatória de toda metodologia de inspeção em estruturas de madeiras antigas Cruz (2011) afirma que é necessário levar em consideração qualquer indício de má conservação dos elementos de madeira, mesmo quando estes estiverem ocultos.

Teobaldo (2007) afirma que algumas terminologias citadas na nomenclatura brasileira como a salvaguarda, conservação, restauração, preservação e reconstrução, são descritas nas cartas patrimoniais, e conclui que, as metodologias de intervenção mais frequentes no Brasil são a preservação, reabilitação, restauração, reconstrução, conservação, reciclagem, requalificação, reutilização e a revitalização.

Para Cameira *et al.* (2009) as metodologias de reabilitação de estruturas de edifícios antigos devem englobar também a definição do âmbito e dimensão da intervenção, a análise das substituições e interface das novas técnicas com as antigas.

Tinoco (2014) descreve que é através do diário de obra que se registra todos os atos e fatos ocorridos durante as obras de intervenção nos edifícios históricos (sejam as intervenções a nível de manutenção, conservação, restauração, reforma e construção). A documentação através dos registros escritos salvaguarda a integridade do edifício e

garante ao profissional, que irá atuar em intervenções futuras no bem, o conhecimento das técnicas e materiais construtivos que foram usados na construção, evitando erros na compatibilização e desempenho dos materiais. Para as intervenções em coberturas de madeiras antigas tal documento se faz extremamente importante visto as alterações físicas que as tesouras podem sofrer ao longo do tempo como a alteração da inclinação das águas, alteração das dimensões das telhas, retirada ou inserção de elementos não previstos em projeto etc.

Para uma completa de inspeção Lopes (2007) identificou as regiões mais sensíveis e críticas que precisam ser prioridade nas análises das peças:

- Topos de peças (vigas, linhas e pernas de asnas) apoiadas em/dentro de paredes;
- Topos de peças que coincidem com uma zona de risco elevado (junto a fachadas, remates de cobertura, zonas de lavagens, com condensações, ou pouco ventiladas);
- Topo das peças expostas às intempéries;
- Ligações: as uniões entre peças são zonas de fácil retenção de água. Frequentemente as uniões têm rebaixos e encaixes onde se acumula água, o que consequentemente facilita o início da degradação;
- Zonas inferiores dos suportes verticais; na zona de arranque de alvenarias que servem de base a pilares ou em pilares isolados no exterior. No caso de pilares expostos a chuva, a água escorre pelas faces do pilar e vai depositar-se na base, no caso de esta não facilitar a evacuação da água, esta favorece o início da degradação;

2.3.1 Ensaios não-destrutivos aplicados a estruturas de madeiras antigas

Targa *et al.* (2005) afirmam que os ensaios não-destrutivos são os procedimentos realizados em materiais para verificar a existência ou não de descontinuidades ou defeitos, por meio de princípios físicos definidos, sem alterar suas características físicas, químicas, mecânicas ou dimensionais e sem intervir em seu uso posterior.

Para Paula *et al.* (2016) a avaliação não destrutiva da madeira reúne técnicas que inferem informações sobre a caracterização tecnológica da madeira embasadas em métodos de menor custo, rápidos e práticos sem alterar a integridade do material.

Já Oliveira *et al.* (2005) definem que os ensaios não-destrutivos, geralmente, não danificam a capacidade estrutural da madeira, apresentado vantagens como rapidez de execução e relativo baixo custo, mapeamento das áreas danificadas em uma estrutura e a

avaliação da integridade, proporcionando ao profissional competente uma decisão mais precisa sobre a técnica de manutenção ou reabilitação a ser adotada na intervenção.

Contudo Vale *et al.* (2004) afirmam que é fundamental avaliar qual ensaio não-destrutivo será ideal para cada situação de inspeção visto que o acesso ao elemento em análise, condições climáticas e a estabilidade estrutural são condições que interferem na escolha do método e nos resultados esperados.

Feio e Lourenço (2015) definem que os métodos de inspeção aplicados as estruturas de madeiras mais usuais são:

➤ Inspeção Visual

Para Abreu *et al.* (2013) a inspeção visual é o método não-destrutivo mais simples de investigação, com a qual se verificam sinais de danos externos, indicadores de defeitos e ataques internos. Os autores ressaltam que, as deteriorações internas devem ser avaliadas por outros métodos, como emissão de ondas de tensão e perfurações controladas.

Valle *et al.* (2004) afirmam que através da inspeção visual é possível avaliar a qualidade do estado da integridade das peças de madeira, defeitos naturais, como nós e fibras inclinadas, detecção de ruptura mecânica, deformações excessivas e manchas danosas ao material.

Feio e Lourenço (2005) ressaltam que a acessibilidade a estrutura é de grande importância para a realização das inspeções. Para as inspeções visuais os autores sugerem a prática de registros fotográficos do estado da integridade do elemento, este procedimento deverá ser adotado também no acompanhamento das demais etapas das inspeções e intervenções pois todas as técnicas deverão ser bem documentadas. Ainda segundo aos autores a utilização de equipamentos como bússola, medidores de temperatura e umidade relativa do ar, podem revelar-se de grande valia para delimitação dos problemas a serem considerados nas inspeções visuais e nos ensaios não-destrutivos.

De acordo com Abreu *et al.* (2013) a inspeção visual é o método não-destrutivo mais simples de exame, pois com ele as hipóteses dos possíveis danos são geradas e com elas a escolha dos próximos métodos de inspeção. Entretanto, assim como Valle *et al.* (2004), os autores não recomendam a técnica para inspeções de deteriorações internas.

Entretanto, é importante destacar que a inspeção visual pode ser realizada concomitante ao ensaio de percussão, que segundo Carrasco (2016), consiste no uso de um martelo, ou equipamento similar, com o qual se aplicam golpes a fim de obter o ruído produzido pelos vazios decorrentes dos processos de biodegradação. Ainda segundo o

autor, o martelo e o formão são duas ferramentas essenciais no apoio à observação visual pois os sons dos golpes do martelo no elemento de madeira podem indicar zonas de degradações quando se ouve um som oco, enquanto um som forte como o eco confirma um bom estado de conservação, já o formão, ou o palhete, utilizam-se para raspagem da superfície da madeira, ou para penetrar o elemento com o intuito de se investigar a profundidade do dano e definir a zona de degradação.

Valle *et al.* (2004) afirma que a limitação deste método está na aplicação a seções inferiores a nove centímetros de espessura, concluindo ainda que os erros podem ser induzidos pela variação do som emitido devido ao teor de umidade, o que dificulta a identificação da extensão da deterioração ou qualidade da peça.

➤ Identificação Macroscópica da Madeira

Segundo Junior (2013) a identificação macroscópica das propriedades organoléticas e a disposição dos vasos e parequemas possui grande valor prático, uma vez que requer instrumentos simples, de baixo custo, além de poder ser realizada em qualquer lugar utilizando-se uma lupa conta fios e um instrumento perfurante.

Zenid e Ceccantini (2007) descrevem o método para a realização do ensaio de macroscópica da madeira, que se inicia com o polimento da superfície transversal da peça por uma lâmina cortante bem afiada. Realizado este procedimento faz-se a leitura da área com uma lupa de, no mínimo, 10 vezes de aumento. Após a leitura e identificação da disposição dos raios parenquimáticos, parênquima axial e vasos há averiguação da compatibilidade com as lâminas disponibilizadas pelo Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo³ (IPT) para identificação da espécie.

Na identificação macroscópica da madeira são observadas características que requerem pouco aumento. Estas características são divididas em dois grupos: as organolépticas e as anatômicas. As características organolépticas, ou sensoriais, englobam a identificação da cor, brilho, odor, gosto, grã, textura, densidade, dureza e desenhos, já as características anatômicas compreendem as análises das camadas de crescimento, tipos de parênquima, poros (vasos) e raios. Os materiais utilizados neste tipo de inspeção são lupas de aumento (acima de 10 vezes), estiletes (para limpeza da superfície de topo) e luvas. Entretanto, alguns aspectos da anatomia da madeira (como a composição dos raios, presença ou ausência de células oleíferas, tipos de placa de

³ O IPT é um instituto vinculado a Secretaria de Desenvolvimento Econômico, Ciência, Tecnologia e Inovação do Estado de São Paulo. Acesse em: <<https://www.ipt.br/institucional>>.

perfuração e fibras separadas) não podem ser observados através da técnica macroscópica. A extração de pequenos filetes do material, através de lâminas metálicas perfurantes, é necessária para a realização da técnica de microscopia da madeira. As lâminas da madeira a serem analisadas em laboratório devem ser de boa qualidade, retirada de regiões seccionadas da peça (BARBOSA *et al.* 2010).

Para os elementos de cobertura inspecionados *in loco* a técnica de identificação macroscópica da madeira é muito eficiente, pois proporciona ao profissional a identificação das espécies utilizadas na edificação e suas propriedades físicas e mecânicas. Em geral, a identificação de madeiras antigas por práticas populares é realizada levando-se em consideração somente as características organolépticas, envolvendo, este caso, uma ou mais características de valor diagnóstico, como por exemplo, a cor, cheiro, densidade etc. (BOTOSSO, 2009).

Zenid e Ceccantini (2007) afirmam que em caso de dúvidas sobre a espécie, deve-se colher amostras da madeira e encaminhar a um laboratório especializado em identificação de madeiras. Sugere ainda que a amostra pode ter 25 mm de largura, 50 mm de comprimento e 10 mm de espessura.

➤ Determinação da umidade nas peças de madeira

De acordo com Jankowsky e Galina (2013) o teor de umidade expressa a proporção entre a massa de água contida na madeira e a massa dessa madeira totalmente sem água. Ainda segundo os autores, à medida que a madeira perde água (dessorção) ela se retrai, ao contrário do que acontece quando ocorre o ganho de água (absorção), o que caracteriza o inchamento.

Segundo Pertuzzatti *et al.* (2017) as propriedades mecânicas da madeira aumentam com o decréscimo do teor de umidade, o que se explica pelo aumento do adensamento e da rigidez das paredes celulares, bem como da porcentagem de material lenhoso, causado pela perda de água e concentração da madeira. Nesta mesma narrativa Silveira *et al.* (2013) complementam que o teor de umidade é inversamente proporcional a densidade da madeira, os autores ainda afirmam que quanto maior a quantidade de água, menor a quantidade dos outros elementos químicos da madeira como a celulose, hemicelulose e a lignina.

A aferição da umidade nas peças de madeiras antigas é de grande importância para a aplicação de outras metodologias de investigação do estado de conservação das peças. Para Oliveira & Sales (2005), há uma forte relação entre velocidade de propagação de

ondas e a umidade, pois, a presença da umidade altera a velocidade de propagação de onda de dois modos: no efeito intrínseco da rigidez e na densidade da madeira.

Valle *et al.* (2004) afirmam que existem dois métodos de inspeção mais usuais, os resistivos e indutivos. O primeiro método, segundo os autores, baseia-se na resistência elétrica da madeira, que varia de acordo com o teor de umidade nela contida. A medição acontece através da inserção de duas agulhas na madeira, gerando um campo elétrico entre elas. No segundo método, não há necessidade de inserção de sondas na madeira, um campo magnético é gerado realizando a medição da variação do campo em função do teor de umidade e da densidade da madeira. Para os autores, em ambos os casos, obtém-se resultados quantitativos bastante confiáveis, mas que poderão sofrer desvios caso o local tenha sido umedecido recentemente, ou ainda, devido ao acabamento ou preservante da madeira. A grande utilidade dos aparelhos higrômetros é a identificação de focos de condensação de umidade que aumentam o risco de ataques biológicos nas peças.

➤ Termografia

Cortizo *et al.* (2008) definem a termografia como sendo a técnica de um método não-destrutivo, sem contato com o objeto ou sistema, de identificação visual do gradiente térmico superficial de um corpo em condições ambientais. Figueiredo *et al.* (2017) descrevem que a técnica de termografia consiste no imageamento por escalas de cores da percepção da temperatura superficial de um objeto, sendo possível através desse registro termográfico detectar alterações de temperatura que identifiquem potenciais problemas patológicos.

Lima *et al.* (2007), afirmam que a técnica de análise por termografia é capaz de identificar algumas falhas e/ou intervenções não visíveis ao olho humano ou que estejam situadas em pontos de difícil acesso em edificações históricas. Para estruturas de madeiras antigas as análises termográficas facilitam o diagnóstico da estrutura *in loco*, não havendo a necessidade de remoção e transporte das peças para análise em laboratório.

Maldague (2001) afirma que há duas técnicas para o método não-destrutivo de termográfico: a passiva e a ativa. Ainda segundo o autor a técnica passiva consiste no armazenamento interno de energia pelos materiais quando estimulados por uma fonte natural de energia. Já a técnica ativa consiste na incidência de uma fonte artificial de calor sobre a superfície onde há o aquecimento ou o resfriamento dos corpos, que resultam em um fluxo de calor, gerando um gradiente térmico.

A excitação térmica no material analisado ocorre através de fontes indutoras de calor artificiais simples (lâmpadas, flashes, jatos de ar quente) ou sofisticadas (pulsos

ultrassônicos, radiação infravermelha, micro-ondas, laser). A fonte de calor pode ser incidida tanto sobre a superfície frente a câmera, correspondendo a uma inspeção por reflexão, ou oposta a ela, estabelecendo assim um fluxo térmico por transmissão (GARCIA, 2014).

Os ensaios termográficos permitem análises qualitativas e quantitativas na interpretação dos resultados. As análises qualitativas, caracterizadas por serem abordagens mais simples, devem ser utilizadas sempre que se pretende uma caracterização superficial do problema, obtendo termogramas que serão interpretados apenas visualmente. Na análise quantitativa se faz necessário a utilização de parâmetros de medição, como a temperatura do ambiente, umidade relativa, distancia e emissividade real da superfície (GARCIA, 2014).

Figueiredo *et al.* (2017) afirmam que cada material possui seu próprio valor de emissividade (ϵ) e que, apesar de existirem tabelas com valores de emissividade para diversos materiais, o ideal seria utilizar esses valores apenas como referência após a realização do ensaio de corpo negro. Os autores descrevem os procedimentos adotados para a realização do ensaio de corpo negro:

- a) Definição de uma área sadia da peça de madeira através da inspeção visual;
- b) Fixação de um material adesivo fosco negro na região eleita como sadia;
- c) Espera de 30 minutos de exposição ao sol do material a fim de se estabilizar a temperatura entre o material adesivo e a madeira;
- d) Determinação da distância entre a madeira com o material adesivo e a câmera;
- e) Determinação da temperatura ambiente e umidade relativa do ar através de um equipamento termo higrômetro.
- f) Apuração do valor de emissividade do corpo negro (na região onde há a fixação do material adesivo sobre a madeira) através da calibragem da câmera termográfica.

➤ Inspeção por ondas de tensão

De acordo com Candian e Sales (2009) o método de ondas de tensão consiste em analisar a velocidade de propagação de uma onda de tensão induzida e sua respectiva atenuação no material. Os autores ainda descrevem que:

Ao aplicar um impacto em uma de suas extremidades, gera-se uma onda que se movimenta ao longo da barra, excitando as partículas da extremidade que recebeu o impacto, enquanto as partículas da extremidade livre se encontram em repouso. A onda se propaga a uma velocidade constante ao longo da barra e, logo após caminhar por todo o comprimento, é refletida pela extremidade

livre da barra, retomando a seu ponto de origem. (CANDIAN e SALES, p. 85, 2009).

Segundo Del Menezzi *et al.* (2010) o método de ondas de tensão pode ser utilizado para vários tipos de investigação não-destrutiva como a estimativa de propriedades mecânicas, avaliação do grau de ataque biológico, classificação de lâminas e de madeiras.

Silva (2006, p.17) afirma que a “a propagação de ondas de tensão na madeira é influenciada pelas propriedades anatômicas, físicas e mecânicas do material. A autora ainda afirma que além destas propriedades, a propagação de ondas de tensão na madeira é influenciada pela direção de propagação e por defeitos encontrados no material.

Alves *et. al* (2012) afirmam que a tomografia acústica aplicada a elementos de madeira permite que seja determinada a integridade da seção transversal por meio do princípio físico de emissão de ondas de tensão em um meio material.

➤ Radiografia-x

De acordo com Siqueira (2004), através da técnica de densitometria de raios-x é possível analisar estruturas de materiais, entre eles a madeira. Tomazello *et al.* (2008) afirmam que a literatura registra o uso do raio-x na inspeção qualitativa de peças de madeira desde a década de 1960.

Valle *et al.* (2004) descrevem que os raios-x são feixes de alta energia que tem a capacidade de passar através de materiais, com intensidade variável de acordo com a densidade do material. Esta técnica aplicada quando aplicada a madeira antiga inspeciona, qualitativamente, a perda de densidade por agentes bióticos e abióticos ao longo do tempo, identificando, além da superfície externa da peça, o mapeamento de áreas frágeis. A limitação desta técnica é a necessidade de acesso ao elemento que deverá ser inspecionado em todas as suas faces, o que para estruturas de cobertura antigas chega a ser inviável.

Chagas *et. al* (2005) descrevem que o filme radiográfico é exposto a uma fonte de raios-x com a passagem da radiação através da amostra da madeira. Com este procedimento obtém-se uma imagem da estrutura transversal da madeira. Os autores ainda afirmam que com a utilização da técnica é possível realizar medições das variações de densidade em pequenas zonas dos elementos de madeira, como variações intra e inter em anéis de crescimento, sendo possível medir a largura dos lenhos inicial e tardio, a largura do anel de crescimento e ainda determinar a porcentagem do lenho tardio.

2.4 Terapias de reabilitação para tesouras de caibro-armado

As terapias de reabilitação da integridade das estruturas de madeiras antigas são demasiadamente simples, onde busca-se através da inserção de elementos metálicos ou

de madeira, uma maior rigidez do sistema estrutural. O que se deve avaliar a cada caso são as metodologias a serem utilizadas no aumento desta rigidez que deve sempre seguir o princípio da intervenção mínima explanado em documentos patrimoniais como a Carta de Restauro de 1972 e a Carta de Cracóvia de 2000.

Lourenço e Mendes (2014) afirmam que o projeto de conservação e reabilitação exige uma abordagem multidisciplinar “com uma organização e análise em etapas semelhantes às utilizadas na medicina”. Os autores concluem que a terapia tem por objetivo tratar as causas das degradações e envolve intervenções na estrutura que deverão ser avaliadas de acordo com a complexidade da intervenção.

Dias *et al.* (2009) afirmam que podem ser considerados diversos níveis de intervenção sendo estes as ações que priorizem a manutenção e reabilitação e um edifício. As terapias aplicadas às estruturas de madeiras antigas são métodos de reabilitação que prolongam a vida útil das peças, preservam os sistemas construtivos e impedem a remoção e o descarte das peças que, por carência de investigações fitossanitárias adequadas, seriam substituídas na obra.

Cameira e Faria (2009) correlacionaram os problemas e soluções (quadro dois) das peças em madeira de coberturas antigas, aplicando de forma generalista, o conceito de terapia estrutural.

Quadro 2: Resumo dos problemas/soluções para peças de madeiras antigas.

PROBLEMAS	SOLUÇÕES
- Seção insuficiente (com eventual ruptura de elementos e deformações excessivas) para as solicitações e cargas atuantes ou devido ao aumento das cargas originais; - Rupturas pontuais em elementos devidas a defeitos locais, (por exemplo, existência de nós);	- Reforço de elementos de madeira por aumento de seção com nova madeira; - Reforço por aplicação de entalhes que proporcionem a união e prolongamento das peças; - Reforço de elementos de madeira através de aplicação de resinas epóxis; - Reforço com armaduras longitudinais com laminados de fibra de carbono ou chapas de aço; - Reforço com perfis e chapas metálicas; - Reforço com tirantes metálicos; - Substituição de madeira por perfis metálicos; - Execução de novos elementos estruturais em madeira; - Recuperação por substituição de elementos estruturais;
- Deformações excessivas (devidas ao efeito da fluência (principalmente em peças colocadas ainda verdes), ou a seção insuficiente, e consequentes rupturas ao longo prazo)	- Colocação de novas estruturas de suporte a cobertura; - Aplicação de tirantes metálicos; - Recuperação por reforço dos elementos estruturais; - Recuperação por substituição de elementos estruturais;
- Falhas nas uniões (ou ruptura das ligações devido a um mau dimensionamento ou desenho ou execução incorreta destas que também podem dar origem a deformações. Ruptura por esmagamento por compressão sobre os elementos metálicos de fixação, ou por esforço de corte nos entalhes e ligações);	- Recuperação/reforço dos nós de ligação por técnicas tradicionais; - Consolidação dos nós estruturais por reforço com peças de madeiras coladas; - Consolidação de ligações com resinas de epóxi e chapas metálicas; - Consolidação de ligações com resinas epóxi e tirantes de aço;
- Problemas nos apoios; - Rotações;	- Introdução de novo apoio sobre o frechal; - Reforço dos apoios com perfis metálicos;

	- Soluções com recurso de uma nova madeira a ser inserida na estrutura; - Próteses de argamassa de epóxi e tirantes de reforço; - Substituição de partes de elementos por próteses; - Consolidação dos nós nas estruturas de madeira com reforço de barras coladas.
- Deficiências de contraventamentos (ou inexistência nos planos da cobertura, e eventuais afastamentos insuficientes entre asnas);	- Cruzes de Santo André; - Escoras de boneca; - Execução de elementos adicionais de aço;
- Empenamento e fendas (devidas a retração da madeira após a secagem, a assimetria de cargas, aos efeitos induzidos das vigas e dos elementos de apoio);	- Reparação de fendas com parafusos; - Reparação de fendas por meio de fixação de cintas metálicas; - Selagem e injeção de resina epóxi; - Repaginação de fendas com adesivo epóxi e tirantes; - Reforço com barras inclinadas;
- Encurvatura (dos elementos comprimidos originada pelo excesso de esbelteza das peças de madeira, ou por solicitações excessivas e não previstas)	- Substituição de toda a peça de madeira por uma nova; - Reforço de elementos com acréscimo de peças de madeira; - Cruzes de Santo André; - Execução de elementos adicionais de aço;

Fonte: Adaptado de Cameira e Faria, 2009.

Para Pereira (2007) nas coberturas das edificações em que se optou pela tesoura de caibro-armado a rigidez das peças é o fator principal para estabilidade do sistema global da edificação.

Segundo Miranda (2019)⁴ para o aumento de rigidez nos elementos da tesoura há soluções simples como a fixação de um tirante metálico abaixo da linha alta, que apesar de interferir na estética, é uma intervenção reversível e de fácil manutenção. Para a execução deste método o tirante metálico é fixado nas alvenarias ou nos próprios caibros opostos entre si enrijecendo o sistema estrutural. Contudo há de se realizar a manutenção da protensão deste tirante devido a deformação por flexão do mesmo. Ainda segundo Miranda (2019) para este mesmo método há também a possibilidade de fixação deste tirante nas alvenarias e, com a perfuração e alocação do elemento de proteção nas fachadas externas, minimizar o impacto visual causado pela inserção dos novos elementos. Entretanto, devido aos recortes e remoções do sistema construtivo de alvenaria para locação externa da protensão, é considerado um método mais evasivo e de baixa reversão comparado ao anterior. O que se deve considerar para a eficácia deste método é a protensão do tirante, que senão adequada, em nada acrescenta a rigidez da tesoura.

⁴ Dados obtidos em entrevista realizada com o Professor João Miranda do NCREP – Universidade do Porto em janeiro de 2019.



Figura 36: Tirantes metálicos fixados nas alvenarias da Igreja da Misericórdia em Guimarães, Portugal.
Fonte: Autora, 2019.

Há outras possibilidades de baixo impacto visual e intervenção mínima a reabilitação da tesoura como as apresentadas por Arriaga *et al.* (2002, p. 171), que propõe uma solução para a degradação das ligações entre a perna e a alvenaria (fig. 37), consolidando o apoio através de uma prótese confeccionada com material epóxi conectados a parte sã da madeira através de barras metálicas. Para enrijecer a tesoura de *par y nudillo*, o autor apresenta duas soluções para o sistema, a primeira proposta é a utilização de tirantes metálicos fixados nas ligações do *nudillo* com as pernas e das pernas com o frechal (fig. 38), a segunda proposta é mais robusta e evita o cruzamento dos tirantes metálicos colocando uma chapa metálica que fixa o tirante ao *nudillo* (fig. 39).

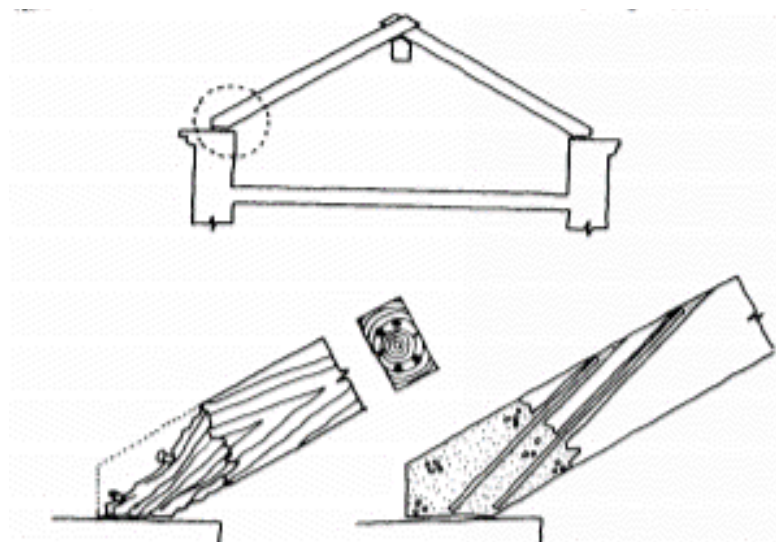


Figura 37: Consolidação da ligação de apoio da perna.
Fonte: Arriaga *et al.*, 2002.

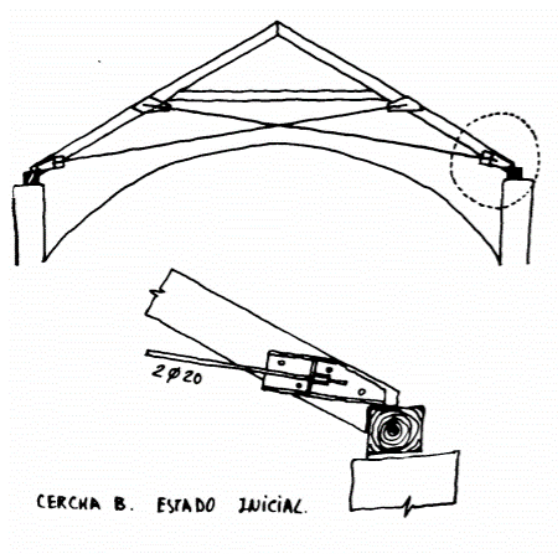


Figura 38: Representação da fixação dos tirantes metálicos na tesoura de *par y nudillo*.
Fonte: Arriaga *et al.*, 2002.

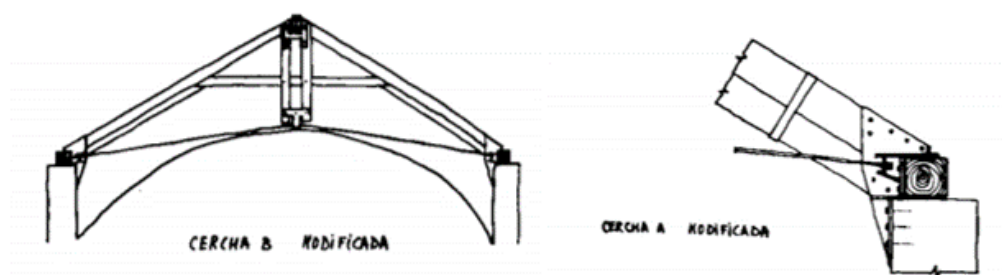


Figura 39: Representação da fixação do tirante com a chapa metálica no *nudillo*.
Fonte: Arriaga *et al.*, 2002.

2.5 Considerações finais

Com o referencial teórico citado neste trabalho pode-se afirmar que a influência Ibérica na arquitetura colonial brasileira é a principal referência construtiva de nosso país. As estruturas de madeiras históricas são influências diretas das construções realizadas em Portugal e na Espanha, apesar das nomenclaturas distintas, os elementos estruturais são correlatos, como exemplo, a tesoura de caibro-armado brasileira e suas precursoras, a tesoura de asna de nível portuguesa e a de *par y nudillo* espanhola. Estas tesouras são caracterizadas pelo vão livre abaixo da linha alta, instabilidade estrutural e pela simples composição geométrica.

Os sistemas construtivos estão à margem da preservação histórica no Brasil pois estão ocultos ao primeiro contato visual com a edificação. As intervenções priorizam a preservação da estética ao invés de ações conjuntas de manutenção com os sistemas construtivos históricos. Para os sistemas de cobertura os descartes das peças são ainda

mais prejudiciais pois permitem a movimentação não só dos elementos de cobertura como das alvenarias subjacentes, por isso devem ser prioritariamente evitados em uma obra.

A elaboração de metodologias que apliquem métodos não-destrutivos as inspeções nos materiais e sistemas construtivos históricos evitam alterações, remoções e descartes que porventura possam causar deslocamentos e até o arruinamento da edificação.

Trabalhos desenvolvidos por Feio e Lourenço (2005), Gatto *et al.* (2012), Machado e Feio (2014) e Garcia (2014) apresentam metodologias de inspeção de madeiras antigas através de métodos pontuais de ondas acústicas e perfuração controlada para a avaliação da integridade do material. Entretanto para abordar adequadamente os métodos de ensaios não-destrutivos em coberturas de madeiras antigas em uma edificação histórica, é preciso uma abordagem global do sistema construtivo.

A objeção na elaboração de metodologias de análise do estado de conservação das tesouras de madeiras antigas no Brasil reside no fato de não existir ainda no país critérios de boas práticas dedicados a inspeção de madeiras antigas e seus agentes de degradação. Contudo, um estudo mais abrangente foi desenvolvido por Valle *et al.* (2004) para inspeções de patologias em estruturas de madeiras em edifícios históricos no Brasil. Foram estabelecidos critérios e métodos não-destrutivos para as análises em estruturas de madeiras, entretanto sem a abordar as tipologias construtivas do Brasil colonial.

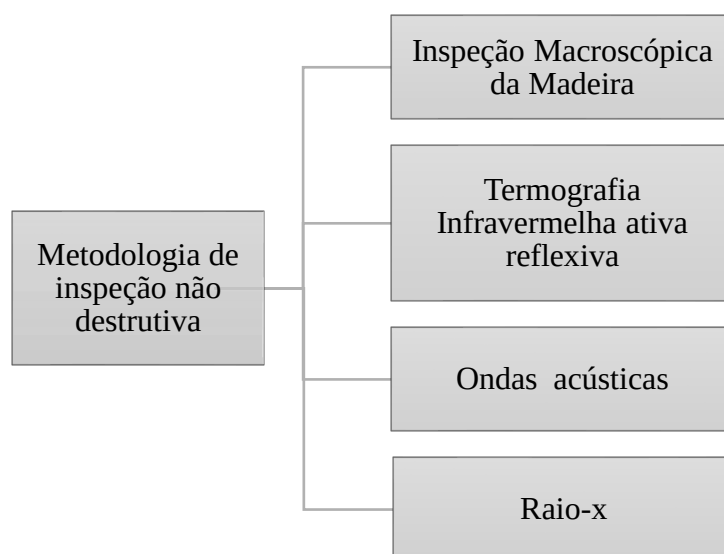
Em seu estudo de caso MUÑOZ *et al.* (2013) sugerem a remoção dos elementos degradados da tesoura de caibro-armado da cobertura da Capela de Santana do Miradouro e a inserção da cinta de travamento em concreto armado acima das paredes, e ainda sugere um vergalhão de aço CA 25 com diâmetro de 16 mm. O que de fato não soluciona dos deslocamentos horizontais da tesoura de caibro-armado além de descaracterizar o sistema construtivo do período colonial. A norma NBR 7190:2010 mostra-se insatisfatória, seja pelo redimensionamento das cargas atuantes na cobertura, visto a substituição dos materiais ao longo dos anos, seja pela análise de tesouras históricas, o que de fato generaliza os elementos de madeiras sem considerar as peculiaridades dos sistemas construtivos, como por exemplo as ligações por entalhe, além de questões como a preservação da integridade do material na determinação de densidades, básica e aparente, sem a degradação do elemento.

Como produto de uma inspeção adequada os métodos de reabilitação de estruturas antigas de madeira são satisfatórios e prolongam a vida útil e a integridade do material. Trabalhos como Martitegui (2002), Cameira e Faria (2009), Brito (2014) e Lourenço e

Mendes (2014) apresentam metodologias de terapias reabilitação das estruturas de coberturas que preservam os sistemas construtivos sem a necessidade de descarte dos elementos, entretanto muitos destes métodos descaracterizam as tipologias, não preservando por tanto a historicidade.

3 MATERIAIS E MÉTODOS

Neste capítulo são apresentados os métodos utilizados para a elaboração da metodologia de inspeção não-destrutiva aplicados a tesoura de caibro-armado. Foram adotados os métodos de investigação macroscópica da espécie da madeira da tesoura, inspeção por ondas acústicas, termografia infravermelha e raio-x. Com uma metodologia assertiva é possível a aplicação de terapias de reabilitação que respeitem a historicidade dos sistemas construtivos e, como consequência, a preservação da integridade da edificação através da intervenção mínima. O fluxograma abaixo apresenta a os métodos desenvolvidos nesta tese:



Os métodos aqui apresentados foram sequenciados de acordo com a disponibilidade dos equipamentos, uma vez que todos os procedimentos respeitam a integridade do material, podendo serem reiterados quando necessário.

3.1 Materiais

3.1.1 Estudo de Caso

Para averiguação do uso da técnica construtiva de caibro-armado em Minas Gerais realizou-se um levantamento das tipologias de cobertura das igrejas edificadas entre os

séculos XVIII e XIX, limitando-se a região central do estado devido a amplitude das amostras. A identificação da localização das edificações religiosas se deu através da revisão bibliográfica nos acervos do escritório do Instituto de Patrimônio Histórico Artístico Nacional (IPHAN) e ao Instituto Estadual de Patrimônio Histórico e Artístico de Minas Gerais (IEPHA) em Belo Horizonte. Foram coletadas as informações sobre início das construções, influências arquitetônicas, projetos arquitetônicos e intervenções.

Com o levantamento teórico dos sistemas construtivos de cobertura, constatou-se que a Igreja Matriz do Santíssimo Sacramento⁵ (fig. 40), situada na cidade de Jequitibá, possuía a tesoura de caibro-armado e disponibilidade de acesso a sua cobertura devido ao a intervenção que a edificação estava sofrendo quando os dados foram coletados. Com isso elegeu-se a referida edificação religiosa como estudo de caso desta tese.



Figura 40: Vista da fachada lateral esquerda da Igreja Matriz do Santíssimo Sacramento. Jequitibá-MG.
Fonte: Autora, 2017.

Para as análises não destrutivas e validação da metodologia foram coletadas as peças selecionadas para o descarte na obra de restauro da Igreja Matriz do Santíssimo Sacramento. Todo este procedimento de coleta das amostras foi autorizado e acompanhado pela empresa SEPRES e IEPHA, órgão estadual responsável pela Matriz desde 1979, ano de seu tombamento pelo Decreto nº 19.872. As peças da tesoura de caibro-armado foram transportadas e remontadas (fig. 41) no Laboratório de Pesquisa

⁵ A Igreja Matriz do Santíssimo Sacramento foi edificada no ano de 1818. A igreja apresenta o estilo arquitetônico característico das edificações religiosas mineiras do início dos oitocentos. (IEPHA, 1979).

Tecnológica, o LPT, na Escola de Arquitetura da UFMG, a fim de se aplicar a metodologia de inspeção não destrutiva nos elementos de madeira.



Figura 41: Tesoura de caibro-armado alocada no LPT-UFMG.
Fonte: Autora, 2017.

3.2 Inspeções visuais

A justificativa para a realização das inspeções visuais em madeiras antigas advém da necessidade de conhecimento do estado de conservação atual do material. Por isso, para o sucesso das etapas seguintes, é necessário um trabalho minucioso nesta fase de investigação. Para este método foram utilizados os equipamentos de segurança como as luvas, lupa e lâmina metálica perfurante.

Após a remontagem da tesoura de caibro-armado no laboratório LPT/EA/UFMG, realizou-se o levantamento métrico dos elementos. Optou-se por fracionar toda a extensão das peças em pequenas áreas de 15 x 10 x 30 cm (base x altura x comprimento) para delimitação da amplitude dos ensaios não-destrutivos (fig. 42).



Figura 42: Fracionamento métrico nos elementos da tesoura de caibro-armado no LPT.
Fonte: Autora, 2017.

Com a realização do levantamento métrico da tesoura obteve-se os seguintes dados:

- Caibro 1: 10,23 metros de comprimento, 0,15 metros de largura e 0,10 metros de altura.

- Caibro 2: 10,72 metros de comprimento, 0,15 metros de largura e 0,09 metros de altura.

- Linha alta 1: 6,64 metros de comprimento, 0,13 metros de largura e 0,10 metros de altura.

Após a coleta de dados dos elementos da tesoura iniciou-se as inspeções visuais adotando-se os seguintes procedimentos:

- i. Limpeza de sujidades da tesoura com uso de um pincel de cerdas grossas;
- ii. Averiguação da presença de insetos xilófagos na madeira;
- iii. Identificação das regiões com concentração de umidade;
- iv. Inspeção da profundidade dos danos causados pelos ataques bióticos com o uso de uma lâmina metálica;
- v. Identificação de regiões de esfarelamento e podridão do material;
- vi. Inspeção acústica através de pequenos golpes com uso de um martelo de borracha para identificação de regiões que apresentem som cavo na peça.

3.2.1 Identificação macroscópica da madeira

As edificações históricas possuem intervenções que, em sua maioria, não são catalogadas as espécies de madeira encontradas nas estruturas de cobertura. A carência desta caracterização do material no memorial descritivo das edificações históricas contribui para o aumento dos danos estruturais advindos da incompatibilidade mecânica entre as espécies substituídas e pré-existentes, diferentes índices de absorção de umidade e retrações devido à falta de conhecimento prévio sobre a madeira e suas características físicas e mecânicas. Com isso, optou-se nesta tese pela identificação macroscópica da madeira visto a praticidade e precisão deste método, que pode facilmente ser aplicado no canteiro de obras. Com a identificação da espécie *in loco* tem-se o conhecimento das reais propriedades físicas médias do material.

Adotando a metodologia de identificação macroscópica apresentada por Zenid e Caccantini (2007), foram utilizados os seguintes materiais na aplicação do método:

- i. Lâmina metálica cortante;
- ii. Lupa com capacidade de 50 vezes de aumento (fig. 43);
- iii. Equipamentos de segurança: luvas e óculos protetores;



Figura 43: Lupa eletrônica com aumento mínimo de 50 vezes.
Fonte: Autora, 2018.

Foram realizadas as seguintes etapas para a identificação da espécie:

- i. Raspagem de uma pequena região da superfície de topo da peça (fig. 44);
- ii. Leitura da área lesionada com o uso da lupa;
- iii. Registro fotográfico da área;
- iv. Análise do resultado fotográfico da composição dos vasos e parequemas da espécie com as lâminas disponibilizadas pelo Instituto de Pesquisa Tecnológica através da apostila de Identificação Macroscópica de Madeiras;



Figura 44: Raspagem da superfície transversal para identificação macroscópica da peça.
Fonte: Autora, 2017.

É importante destacar que a justificativa para a raspagem na superfície de topo deve-se ao fato que somente na seção transversal da madeira há identificação macroscópica dos vasos e dos parequemas.

3.2.2 Mapeamento de Danos

As inspeções para o mapeamento de danos realizado nesta tese obtiveram como método principal a identificação dos danos através do mapeamento a percussão que, através de pequenos golpes proferidos com um martelo, obteve-se a inspeção acústica do material.

3.2.3 Medição do teor de umidade

A madeira apresenta variações em suas características físicas e resistências mecânicas de acordo com os fatores ambientais ao qual se encontra. A umidade ambiental é um dos fatores externos que influencia diretamente as propriedades da madeira, a importância deste fator faz-se presente no dimensionamento estrutural da norma NBR: 7190 ao qual, tanto a umidade aparente quanto a ambiental são consideradas nos cálculos. Métodos que inspecionem a umidade ambiental e interna da madeira se fazem incontestáveis nas investigações do estado da integridade do material, pois sua presença exacerbada, ou em baixos índices, podem proporcionar condições favoráveis ao desenvolvimento de outros agentes patológicos, dentre eles a proliferação de agentes bióticos.

Para a inspeção da umidade das peças da tesoura foi utilizado o equipamento TCS-75 da empresa SULTECH, pertencente ao LPT/EA/UFGM (fig. 45).



Figura 45: Medidor de Umidade TCS-75.
Fonte: Autora, 2018.

O método para a medição da umidade através do equipamento TCS-75 possui as seguintes etapas (SULTECH, 2018):

- i. Ligar o instrumento e verificar se a mensagem “LOBAT” não aparece no canto superior esquerdo do visor.
- ii. Selecionar o grupo de madeira.
- iii. Zerar o equipamento.
- iv. Colocar os sensores sobre a peça a ser medida e ler o valor medido no visor.

O potenciômetro de seleção do grupo da madeira é utilizado para preparar o aparelho para à aferição, indicando ao seu circuito interno características elétricas da espécie. Utilizando o potenciômetro ZERO procura-se obter no visor o valor mais próximo de zero (0 a +/- 0,2%). O ajuste zero sempre deve ser feito com os sensores distantes de qualquer objeto, principalmente o metálico (SULTECH, 2017).

A empresa SULTECH oferece ao final do manual uma tabela das espécies de madeira e as respectivas classificações para calibração do equipamento TCS-75. Ajustes para tipos de madeiras não incluídos nesta tabela poderão ser feitos pelo método de secagem até o peso constante, de modo a encontrar a umidade da amostra e sua densidade, que é um dos fatores principais na definição do grupo (SULTECH, 2017).

3.2.4 Termografia infravermelha ativa reflexiva

A determinação do método termográfico a ser escolhido para investigação do estado da integridade do material depende de fatores externos, como por exemplo a incidência solar, e fatores internos, como por exemplo a resistência do material a combustão. O ensaio passivo, onde a radiação solar é a principal fonte de calor incidida sobre o material, possui restrições devido a dependência direta do clima, a disponibilidade de acesso a região do ensaio, aquecimento uniforme do material e higienização adequada da superfície. Já o ensaio ativo, onde há utilização de uma fonte de calor artificial, possibilita o ensaio em ambientes internos, entretanto expõe o material a uma fonte de calor que, se não monitorada, pode ocasionar a combustão do mesmo.

Com o transporte da tesoura para o ambiente interno do LPT – UFMG o método escolhido para a realização dos ensaios termográficos infravermelhos na tesoura foi o método ativo. Para a aplicação do método ativo quantitativo de termografia infravermelha, é crucial conhecer as condições ambientais onde o ensaio seria realizado, uma vez que estas afetam diretamente os resultados obtidos. Os equipamentos utilizados na aplicação do método foram:

- i. Para a coleta dos dados ambientais adotou-se o equipamento Thermo-Hygro PM 500 da empresa POLIMED⁶.
- ii. A câmera utilizada para o ensaio foi a FLIR T450 séries (fig. 46), pertencente ao departamento de Tecnologia da Arquitetura e do Urbanismo da Escola de Arquitetura - UFMG.
- iii. Papel adesivo preto fosco para a confecção do corpo negro na madeira;



Figura 46: Câmera infravermelha FLIR T450.
Fonte: FLIR, 2009.

Com isso realizou-se o ensaio de corpo negro do material seguindo as seguintes etapas:

- i. Através da inspeção visual de percussão elegeu-se duas áreas sadias do material que não apresentaram som cavo ou outras degradações como desprendimento, desagregação ou restos de fezes de insetos xilófagos;
- ii. Em umas das áreas eleitas para o ensaio realizou-se a limpeza da superfície para melhor aderência do papel adesivo de cor preta fosco;
- iii. Após a limpeza da superfície fixou-se na madeira sadia o papel adesivo fosco de cor preta com dimensões de 6cm x 6cm, esperando-se cinco minutos para estabilizar a temperatura entre o papel adesivo e a madeira (fig. 47). Nota-se que é de grande importância a adoção de um material de revestimento preto fosco para o ensaio de corpo negro, uma vez que, quaisquer reflexos podem alterar o resultado da emissividade.

⁶ Termo-higrômetro digital modelo PM 500 com sonda de alta precisão com faixa de temperatura 10 °C a 50 °C (interno) e de 50 °C a 70 °C (externo) e faixa de higrométrica de 25% RH a 98 % RH [17].



Figura 47: Ensaio de corpo negro.

Fonte: Autora, 2017.

Outros critérios que também foram adotados para a aplicação do método:

- Distância aproximada entre a madeira com o papel adesivo e a câmera;
- Aferição da temperatura ambiente;

Com a estabilidade térmica entre o papel adesivo e a madeira realizou-se a leitura da emissividade do corpo negro, direcionando a lente da câmera para a região do papel adesivo e armazenando na câmera o valor da emissividade emitida pelo corpo negro. Logo após realizou-se a aferição da emissividade na região sadia da madeira sem o papel adesivo, alterando a emissividade na câmera até obter o mesmo valor área com o papel adesivo preto fosco.

Logo após o ensaio de corpo negro aplicou-se o método termográfico ativo utilizando os seguintes equipamentos:

- Refletor com lâmpada alógena de 500 W (fig. 48);
- Régua para medição da distância entre o refletor e a amostra;

Como procedimento padrão a todos os ensaios termográficos realizados para a tesoura em análise, adotou-se uma distância de 20 centímetros entre o material e o refletor, justifica-se tal medida a fim de se evitar a combustão da madeira pois os valores de aquecimento do refletor podem ultrapassar os 230°C.



Figura 48: Excitação térmica do método ativo realizado com o refletor de lâmpada alógena.
Fonte: Autora, 2017.

A termografia ativa apresenta duas possibilidades de leitura do aquecimento da peça: a reflexiva e a transmissiva. Para a obtenção dos resultados optou-se pelo imageamento reflexivo visto a espessura do material, que apesar da variação de espessura da seção transversal visto as patologias presentes, não apresentou transmitância térmica satisfatória. Entretanto há de se considerar os resíduos de aquecimento, o que pode gerar alteração na leitura dos resultados ocasionados pelos reflexos de temperatura que não condizem com o real estado de degradação da madeira. Com isso sugere-se a realização de um teste ativo reflexivo em uma região sadia da madeira a fim de se obter dados sobre a absorção térmica da madeira.

3.2.5 Ondas Acústicas

O método de ondas acústicas aplicado a estruturas de madeiras antigas é usado para inspecionar além da camada superficial do material, localizando com precisão zonas internas que possuem alguma anomalia estrutural. Patologias como podridão, perda de densidade e fraturas nas fibras são detectadas pelas ondas acústicas, e através do software *ArborSonic 3D*⁷, são compiladas em matrizes e gráficos que apresentam as velocidades

⁷ O tomógrafo acústico *ArborSonic 3D* é capaz de detectar o tamanho da localização das regiões decaídas ou vazias no tronco de forma não destrutiva. Ele funciona com base em medições de velocidade do som entre vários sensores ao redor do tronco. O princípio de medição básico é que a velocidade do som cai se houver um furo entre dois sensores. Copyright © Fakopp Enterprise Bt. 2017.

de propagação das ondas. A aplicação do método com o uso do tomógrafo acústico consiste nas seguintes etapas:

- I. Medição da seção transversal a ser inspecionada;
- II. Fixação dos transdutores na superfície da madeira usando um martelo de borracha. Os transdutores devem apresentar espaçamento uniforme na seção transversal da madeira;
- III. Inserção dos dados de medição entre os transdutores no *software*;
- IV. Tocar cada transdutor com um martelo de borracha para gerar ondas acústicas. O *ArborSonic 3D* realiza as medições de tempo dos comprimentos de onda transmitida entre os transdutores em microssegundos;



Figura 49: Tomógrafo acústico.

Fonte: Fakopp, 2017.

O método de tomografia acústica aplicado a elementos de madeiras antigas investiga a perda de densidade interna das peças, através de pulsos acústicos aplicados aos transdutores. Os gráficos gerados pelo programa apresentam resultados através de uma escala de cores, indicando partes saudáveis (cor verde escuro) a áreas ocas (cor azul claro).

Para a inspeção da seção transversal optou-se por fixar 8 transdutores a cada ensaio (fig. 50) sendo que cada ensaio foi realizado a uma distância de noventa centímetros na seção longitudinal as fibras, mapeando assim as áreas que através da inspeção visual apresentaram anomalias de cor, textura e som cavo. É de suma importância a precisão dos posicionamentos métricos dos transdutores na peça inseridos no *software ArborSonic 3D* para evitar emissões e leituras distorcidas pelo equipamento.

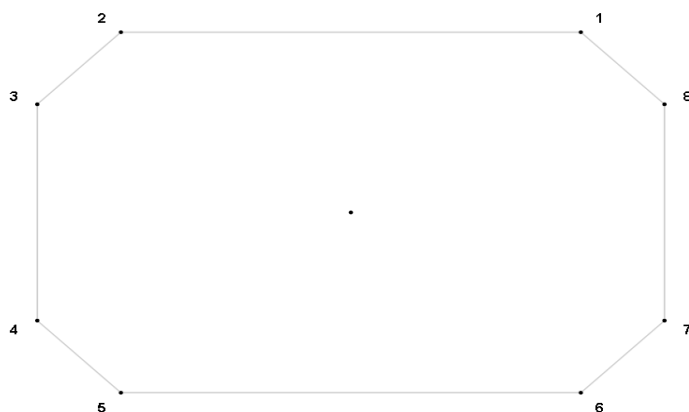


Figura 50: Posição dos transdutores na seção transversal no *software ArborSonic 3D*.

Fonte: Autora, 2018.

Após a fixação dos transdutores em ordem crescente (fig. 51), conectou-se o equipamento ao computador para a realização do ensaio através do *software ArborSonic 3D*. Foram proferidos leves golpes com um pequeno bastão de borracha nos transdutores para as emissões dos pulsos. O tomógrafo possui alta sensibilidade a recepção dos pulsos, por isso não é necessário aplicação de golpes fortes nos transdutores, o que pode gerar danos no equipamento como também ruídos de pulso nos ensaios.



Figura 51: Fixação dos transdutores na seção transversal do cabo 1.

Fonte: Autora, 2018.

Para a idoneidade do ensaio acústico é importante a inserção adequada no *software* das informações geométricas do elemento e das propriedades físicas da espécie. Com isso a prévia identificação macroscópica da madeira é imprescindível, pois cada espécie apresenta características físicas específicas. O *software ArborSonic 3D* disponibiliza um

banco de dados de espécies de madeira que possibilita caracterizar o ensaio com as propriedades físicas reais, proporcionando resultados validos e assertivos.

É importante destacar que a aleatoriedade na ordem de fixação dos transdutores deve ser evitada pois resulta em leituras errôneas dos gráficos, uma vez que os pulsos emitidos através dos golpes são captados pelos transdutores em ordem crescente (fig. 52). Os valores das velocidades da propagação do pulso entre os transdutores são medidos pelo *software ArborSonic 3D*, que caracteriza regiões sadias e degradadas através de velocidades maiores e menores respectivamente.

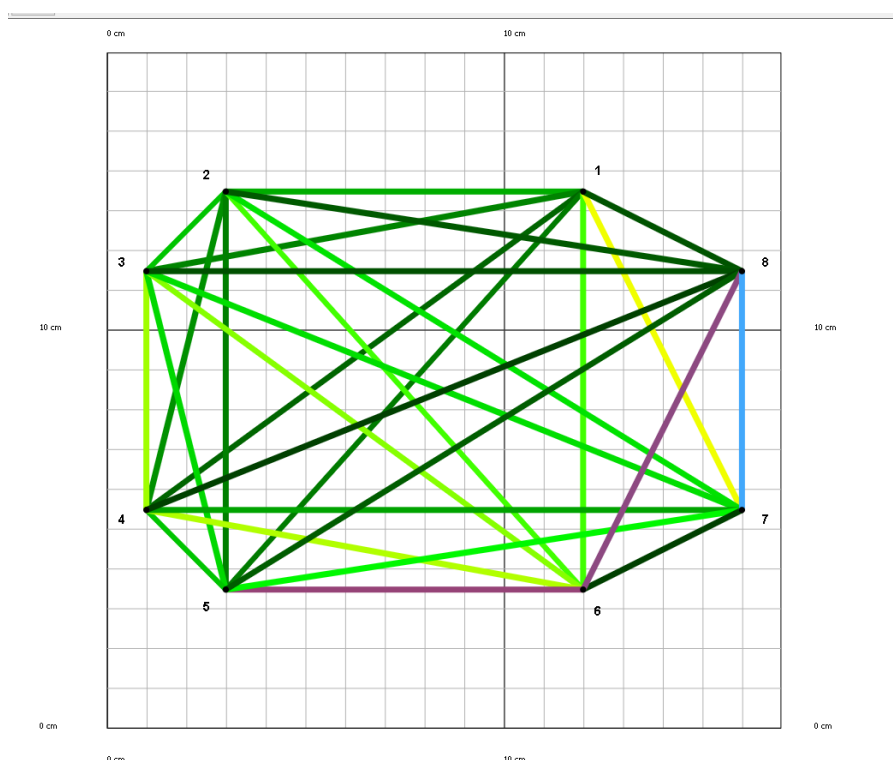


Figura 52: Gráfico de leitura das velocidades dos pulsos entre os transdutores do tomógrafo.

Fonte: Autora, 2018.

3.2.7 Radiografia-x

Para os ensaios realizados através do método de radiografia-x foram adotados os procedimentos do equipamento de radio-x portátil, cedido pelo Laboratório de Ciência da Conservação (EBA/UFGM), cujo Professor Dr. Luiz A. C. Souza é responsável. A instrumentação do equipamento foi realizada pelo Professor Luiz e pelo técnico Cláudio Nadalin mediante visita agendada ao LPT/EA/UFGM, tal protocolo é seguido mediante os riscos inerentes ao manuseio do equipamento.

Para o ensaio de raio-x foram utilizados os seguintes equipamentos (fig. 53):

- i. Equipamento de raio-x Gilardoni®, modelo ART GIL, potência 0,6 KVA, tensão 80 Kv e corrente 5 mA;
- ii. Prumo;

- iii. Chapa para raio-x;
- iv. Scanner portátil de radiografia computadorizada GE® CRx 25P;
- v. *Software* da GE *ImageQaunt TL 8.2*;

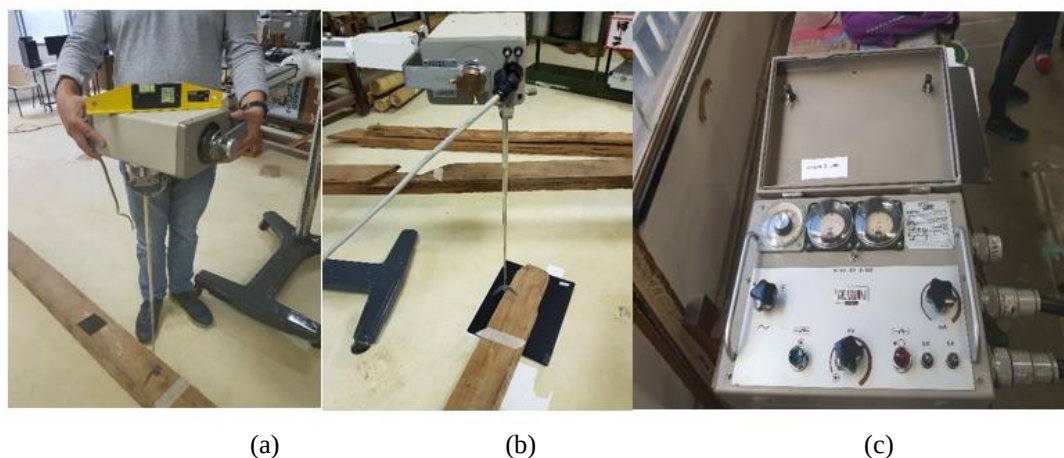


Figura 53: Procedimentos para a montagem do equipamento de raio-x: (a) nivelamento do equipamento; (b) posicionamento da chapa; (c) equipamento de raio-x Gilardoni®.

Fonte: Autora, 2018.

Para a instrumentação correta do equipamento, adotou-se o procedimento de evacuação das dependências acima e abaixo do laboratório LPT na Escola de Arquitetura, evitando assim que a radiação do equipamento atingisse algum usuário da edificação no ato do ensaio. Com isso foram adotados os seguintes procedimentos:

- i. Montagem e posicionamento em prumo do equipamento;
- ii. Posicionamento da peça sobre a chapa de raio-x;
- iii. Direcionamento do equipamento sobre a região da peça ser inspecionada;
- iv. Captação da imagem em raio-x;

A amplitude dos ensaios ficou limitada ao tamanho das chapas de raio-x, por isso realizou-se o experimento a cada noventa centímetros longitudinais nos três elementos da tesoura.

Deve-se posicionar de forma precisa e cuidadosa o equipamento de raio-x sobre a área a ser ensaiada e eleger para o ensaio chapas que estejam em perfeito estado de conservação a fim de se evitar ruídos nas imagens capturadas. Após o ensaio as imagens foram digitalizadas através do scanner GE® CRx 25P (fig. 54) e tratadas no *software ImageQaunt TL 8.2*.

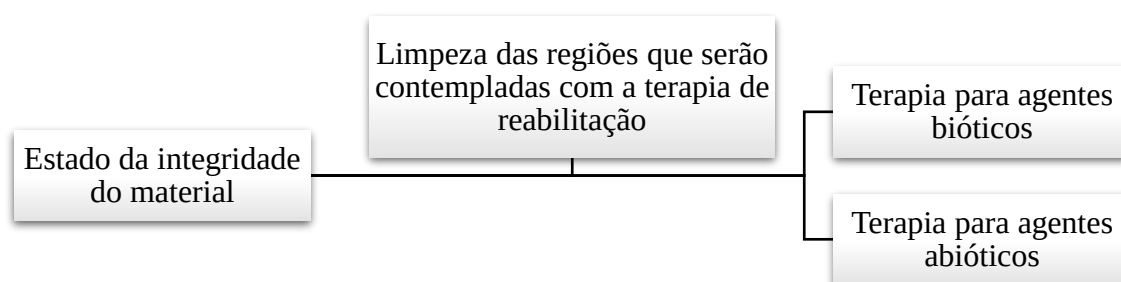


Figura 54: Scanner GE CRx 25P realizando a leitura da chapa de raio-x.

Fonte: Autora, 2018.

3.3 Terapias de reabilitação da tesoura de caibro-armado

Para a implementação das terapias de reabilitação estabeleceu-se nesta tese as seguintes etapas:



Entretanto, antes de qualquer intervenção, há sempre que se higienizar as regiões a serem intervencionadas, pois a sujidade e os resquícios de material inerte prejudicam a identificação da dimensão real do dano a ser reparado bem como a aderência dos novos materiais a serem aplicados na reabilitação. Tal limpeza mecânica pode ser realizada através de materiais não abrasivos como estopas, broxas ou instrumentos que contenham cerdas que higienizem a seco a superfície do material sem degradar o mesmo.

A metodologia apresentada nesta tese foi elaborada mediante observação das soluções adotadas nas edificações vistoriadas, propondo assim uma melhoria aos métodos já existentes respeitando o preceito da intervenção mínima indicados na Carta do Restauro de 1972.

Outro fator a ser esclarecido nesta metodologia é o enfoque nas soluções destinadas aos danos da tesoura. É evidente que o bom estado de conservação dos elementos de vedação, como as telhas, rufos, beirais e etc., interferem na preservação da integridade da tesoura, uma vez que são esses elementos que impedem a passagem das intempéries e consequentemente a formação de regiões de concentração de umidade. Portanto esta metodologia não está a desconsiderar a importância destes elementos, entretanto foca nas soluções a serem apresentadas as anomalias da tesoura de caibro-armado.

3.3.1 Terapia para agentes bióticos

Os tratamentos das madeiras antigas contra os agentes bióticos são em sua grande maioria químicos. Procura-se a extinção dos agentes bióticos e, por vezes, são utilizados compostos químicos inflamáveis que, aliados as instalações elétricas precárias, expõem o imóvel as situações de risco de incêndio.

Há dois tipos de tratamentos fitossanitários⁸ que podem ser aplicados a madeira, o térmico e o químico. Entretanto, em ambos os tratamentos é imprescindível a avaliação e identificação prévia das espécies bióticas degradadoras, visto a pluralidade de agentes xilógrafos, fungos e bactérias que atacam a madeira.

Os tratamentos térmicos exigem o transporte da madeira a unidades de tratamento removendo assim as peças dos seus locais originais, causando instabilidade no sistema construtivo e sendo assim, não contemplam o preceito de intervenção mínima. Com isso, dando sequência a metodologia não destrutiva desta tese, sugere-se o método químico, onde há possibilidade de aplicação da câmara de lona expurgo, geralmente produzidas em PVC⁹ ou Polietileno leve, moldada a estrutura *in loco*. Como a lona é flexível há possibilidade de adaptabilidade a regiões de difícil acesso na estrutura abrangendo áreas maiores a cada aplicação do composto, o que otimiza o processo. Mesmo sendo a fumigação um tratamento eficaz, há necessidade da aplicação de uma solução inseticida para evitar a reinfestação na peça tratada.

⁸ O Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento brasileiro descreve as duas modalidades de tratamentos fitossanitário na madeira como: Modalidade química fitossanitária: Brometo de Metila (MB) – O gás é inserido no invólucro do tratamento e permanece agindo sobre a madeira e suas pragas 24 horas. Modalidade térmica fitossanitária: Tratamento Térmico (HT) – Realizado em estufa de aquecimento, por um processo no qual o cerne da madeira deve atingir 56°C e permanecer a esta temperatura durante, pelo menos, 30 minutos. Disponível em: < <http://www.agricultura.gov.br>>. Acesso em: 08 jan. 2019.

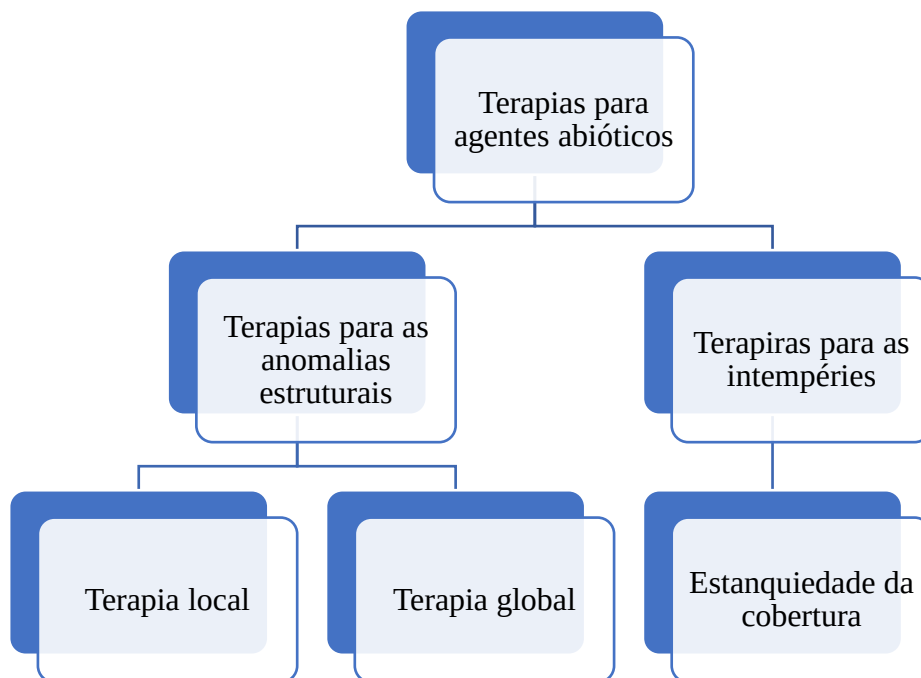
⁹ Policloreto de polivinila.

Há opções mais simples e pontuais para aplicação dos inseticidas como as seringas, pincelamento ou aspersão. Dentre as possibilidades citadas a injeção é a que contempla maior eficácia visto a profundidade de aplicação na peça. Os orifícios realizados pelos insetos são utilizados para a aplicação das injeções e, quando necessário, realizam-se orifícios com furadeiras para auxiliar o maior alcance do produto na peça.

Danos ocasionados pela infestação das coberturas por vegetação, aves e roedores, sugere-se para esta metodologia a limpeza química da vegetação, uma vez que a remoção mecânica das raízes pode causar fraturas, deslocamento e desprendimento do material ao qual se encontra fixada, e a dedetização e fixação de telas finas para evitar a entrada e a morada de animais. A presença destes agentes biológicos no telhado pode resultar em deslocamento dos elementos de vedação expondo as estruturas subjacentes a áreas de concentração de umidade e as intempéries, o que por sua vez conduzem ao afloramento de outras patologias na cobertura.

3.3.2 Terapia para agentes abióticos

As patologias abióticas são degradações que englobam desde os danos advindos de intempéries até as anomalias estruturais. Para uma abordagem completa dos agentes e suas respectivas convergências elaborou-se o fluxograma abaixo:



Observa-se que há inevitabilidade de distinção entre os dois tipos de anomalias abióticas visto que, apesar de pertencerem a mesma categoria de dano, não possuem a mesma classificação de degradação. Contudo, vale ressaltar que, o trânsito entre os tipos de danos e a relação entre as degradações não são fixas.

Degradações ocasionadas pela exposição das ligações da tesoura as intempéries podem resultar em uma fragilidade na estabilidade estrutural assim como o empuxo característico desta tesoura pode resultar em deslocamentos dos elementos de vedação da cobertura expondo a madeira as intempéries e ocasionando regiões de concentração de umidade na madeira. Entretanto é fundamental distinguir as terapias visto a peculiaridade da tesoura de caibro-armado e seu deslocamento característico, denominado aqui por empuxo lateral horizontal. Para efeito cronológico sugere-se que as terapias para as anomalias estruturais sejam realizadas primeiro, pois uma vez que o telhado se encontra estabilizado, a identificação da das regiões fragilizadas pelas intempéries e concentrações de umidade será assertiva.

I. Terapias para as anomalias estruturais ocasionadas pelo empuxo

As anomalias estruturais podem ser subdivididas em globais ou locais considerando-se o nível dos deslocamentos causados pelo empuxo da tesoura, as flexões dos caibros e o estado de conservação das ligações. Em ambos os casos se faz necessário a consolidação da estrutura com escoras e/ou elementos que deem suporte e evitem os deslocamentos provenientes das intervenções. Após a etapa de consolidação da estrutura, realiza-se a limpeza das áreas a serem reabilitadas.

As intervenções podem ser reversíveis ou irreversíveis de acordo com o método da terapia escolhida. Os métodos reversíveis, que contemplam os preceitos da intervenção mínima, são as terapias que quando aplicadas a tesoura não alteram a concepção estrutural original, preservando a historicidade do sistema construtivo. Já os métodos irreversíveis alteram a concepção estrutural original da tesoura, com o acréscimo de novos elementos, visando uma maior rigidez e rearranjo das cargas estruturais.

Optando-se por intervenções reversíveis e que atendam os preceitos das intervenções mínimas destaca-se três tipos de terapias:

i. Fixação das próteses: este método aplica-se quando a fratura ocasiona perda de resistência mecânica do elemento em regiões pontuais. A prótese tem a função de reforçar e consolidar os elementos da tesoura com seção reduzida face os esforços aplicados. Entretanto, quando a amputação de parte do elemento se faz necessária, o reforço é realizado mantendo-se a parte da madeira sã e substituindo a parte deteriorada da peça por madeira nova, introduzindo peças auxiliares de reforço como pregos, parafusos, cintas ou cavilhas;

ii. Inserção de enxertos: este método aplica-se nos casos onde há a possibilidade de recomposição de massa da área degradada e reabilitação da resistência

mecânica com novos materiais (geralmente resinas epóxis e/ou fibras de carbono em comunhão com elementos metálicos e até mesmo de madeira) introduzidos nos elementos. É um método de menor percepção visual, para as coberturas é preferencialmente aplicável as pernas, madres e linhas. Entretanto é uma técnica de custo elevado e que exige uma mão-de-obra especializada;

iii. Reforço com tirantes metálicos: este método aplica-se aos casos onde visa-se a redução das deformações globais da tesoura, aumentando assim a capacidade de carga. Um dos métodos mais comuns de fixação dos tirantes no caibro-armado é abaixo da linha alta onde o elemento é fixado nas alvenarias impedindo o deslocamento;

É importante destacar que nas três terapias apresentadas acima, a introdução de materiais diferentes dos originais altera a distribuição dos esforços e rigidez dos elementos e da estrutura da tesoura de forma global. Por isso é fundamental a avaliação da aplicação das terapias caso a caso, o pleito generalizado de apenas um método é um erro hediondo na preservação deste sistema construtivo.

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Neste capítulo serão apresentados os resultados e discussões dos métodos não-destrutivos de inspeção aplicados a tesoura de caibro armado da cobertura da Igreja Matriz do Santíssimo Sacramento de Jequitibá, Minas Gerais.

4.1 Inspeção Visual

A inspeção visual foi realizada mapeando as patologias bióticas e abióticas. Foram utilizados os recursos de inspeções visuais de percussão, variação de cor e textura da superfície das peças de madeira. Com as inspeções foram identificadas patologias de concentração de umidade (fig. 55), ataque de insetos xilógrafos (fig. 68) e podridão castanha e fibrosa (fig. 57).



Figura 55: Concentração de umidade na região 2 no caibro 1.
Fonte: Autora, 2017.



Figura 56: Ataque dos insetos xilófagos no caibro 1.
Fonte: Autora, 2017.



Figura 57: Podridão castanha e fibrosa na madeira na ligação inferior do caibro 2.
Autora: 2017.

As patologias identificadas na inspeção visual possuem causa e origem na falta de manutenção e conservação da cobertura visto que os ataques bióticos e abióticos são evidenciados quando não há medidas protetivas de inspeção a degradação da madeira. Entretanto vale ressaltar que, apesar dos danos encontrados, as peças de madeira ainda detinham regiões sadias. As regiões que mantiveram as características organoléticas da espécie identificada macroscopicamente foram eleitas como sadias o que permitiu a comparação destas regiões com as demais identificadas como degradadas.

Com a identificação dos danos optou-se por fracionar a tesoura em regiões para serem realizados os ensaios como demonstrado na Figura 58.

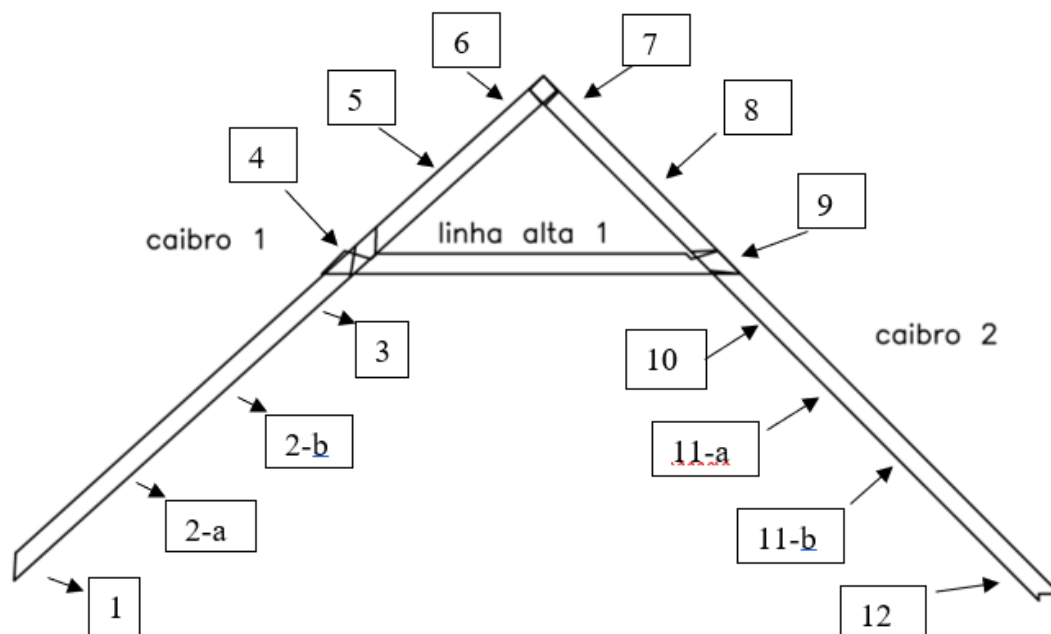


Figura 58: Áreas da tesoura inspecionadas com dos métodos não-destrutivos.
Fonte: Autora, 2017.

4.2 Identificação Macroscópica da Madeira

Com os procedimentos metodológicos adotados para identificação macroscópica da espécie da madeira, obteve-se o registro da Figura 59 a seguir:



Figura 59: Registro fotográfico macroscópico do caibro 1.
Fonte: Autora, 2018.

Foram adotados os mesmos procedimentos de identificação macroscópica para o caibro 2 e a linha alta 1 (fig. 60), após a coleta das imagens foram comparados os resultados com as lâminas do IPT (Instituto de Pesquisa Tecnológica do Estado de São Paulo), instituto ao qual mantém em seu acervo uma relação de lâminas de identificação macroscópica de espécies de árvores brasileiras.

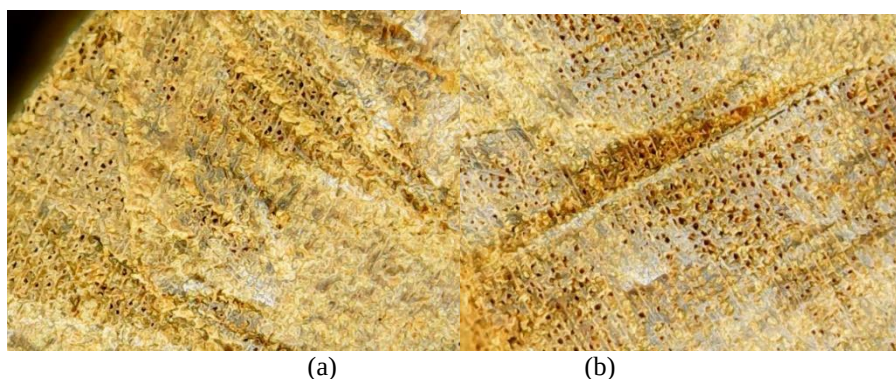


Figura 60: (a) Imagem macroscópica caibro 2. (b) Imagem macroscópica linha alta 1.

Fonte: Autora, 2018.

A opção pelo uso de uma determinada espécie de madeira em uma construção está condicionada a fatores como por exemplo o custo, resistência mecânica e transporte até o canteiro de obras. Apesar de que não se pode afirmar o real motivo da escolha da espécie em questão pode-se, entretanto, destacar espécies que eram bastante utilizadas no período colonial brasileiro sendo estas o Mogno, Peroba Rosa, Jacarandá, Braúna, Jatobá e as demais madeiras consideradas legalizadas para o comércio. Entretanto, para o referido estudo de caso, optou-se pela identificação macroscópica a fim de obter um indicativo da espécie adotada.

Dentre as madeiras utilizadas na época, e com a identificação macroscópica das peças em laboratório, foi possível chegar à identificação da madeira como sendo *Paratecoma peroba*, conhecida popularmente como Peroba-de-campos (fig. 61). As propriedades organolépticas de cor, odor e grã também auxiliaram na identificação da espécie uma vez que a espécie em análise apresentou características sensoriais como cerne variando de amarelo-acastanhado, cheiro e gosto imperceptíveis e grã direita a ondulada.



Figura 61: Lâminas de identificação da espécie *Paratecoma peroba* do IPT.

Fonte: IPT, 2018.

A espécie de Peroba-de-campos é facilmente encontrada nos estados da Bahia, Espírito Santo, Minas Gerais e Rio de Janeiro, o que favorece seu uso na construção civil mineira devido a sua disponibilidade. A variação da coloração das peças da tesoura em relação a lâmina do IPT deve-se a duas variáveis: ao brilho ocasionado pela câmera de registro macroscópico e a exposição das peças as intempéries, favorecendo a proliferação de fungos e sujidade.

Com a identificação da espécie obteve-se os seguintes dados físicos e mecânicos do material (IPT, 2018):

- a) Densidade aparente a 15% de umidade (ρ_{ap}): 730 kg/m³;
- b) Trabalhabilidade: A madeira de peroba-de-campos é considerada de trabalhabilidade fácil;
- c) Durabilidade natural: é considerada de durabilidade satisfatória quando em condições favoráveis ao apodrecimento;
- d) Flexão:
 - Resistência (f_M):
 - Madeira verde: 97,1 Mpa;
 - Madeira a 15% de umidade: 116,3 Mpa;
 - Limite der proporcionalidade:
 - Madeira verde: 41,0 Mpa;
 - Módulo de Elasticidade:
 - Madeira verde: 12150 Mpa;
- e) Compressão paralela às fibras:
 - Resistência (f_{co}):
 - Madeira verde: 45,0 Mpa;
 - Madeira a 15% de umidade: 54,0 Mpa;
 - Coeficiente de influência de umidade: 3,4%;
 - Limite de proporcionalidade:
 - Madeira verde: 34,9 Mpa;
 - Módulo de elasticidade:
 - Madeira verde: 12150 Mpa;
- f) Outras propriedades:
 - Cisalhamento:
 - Madeira verde: 11,7 Mpa;

- Dureza janka paralela:

Madeira verde: 6394 N;

- Tração normal às fibras:

Madeira verde: 7,3 Mpa;

- Fendilhamento:

Madeira verde: 0,85 Mpa;

Não foram considerados ensaios microscópicos para a investigação da espécie de madeira devido a metodologia deste trabalho visar a aplicação *in loco* dos métodos de inspeção não-destrutivos, uma vez que, a identificação macroscópica aplicada as peças se mostraram satisfatória.

4.3 Resultados dos métodos de inspeção de termografia, tomografia acústica e raio-x

Para as análises das inspeções não-destrutivas optou-se por agrupar os resultados dos métodos aplicados nas regiões para a comparação dos dados obtidos. Entretanto os métodos possuem particularidades que devem ser consideradas na obtenção dos resultados, sendo estas:

- Termografia Ativa Reflexiva:

As imagens termográficas apresentam leituras pontuais de temperaturas (Sp) e as amplitudes térmicas dos ensaios através da escala térmica a direita das figuras. Após o ensaio de corpo negro a câmera termográfica foi calibrada para a realização dos ensaios com os seguintes dados:

- Emissividade do material: $\varepsilon = 0.93$;
- Temperatura do material: $27,1^\circ \text{C}$;
- Umidade relativa do ar: $U_{amb} = 55\%$;
- Temperatura do ambiente: 28°C ;

Inicialmente optou-se por realizar o ensaio termográfico em uma região sadia da linha alta 1 para obter um parâmetro de variação térmica dos ensaios. Como pode-se observar na Figura 62-a a região sadia da madeira apresenta baixa variação de temperatura (sendo $Sp2$ a região mais aquecida variando $0,5^\circ \text{C}$ com o ponto $Sp1$).

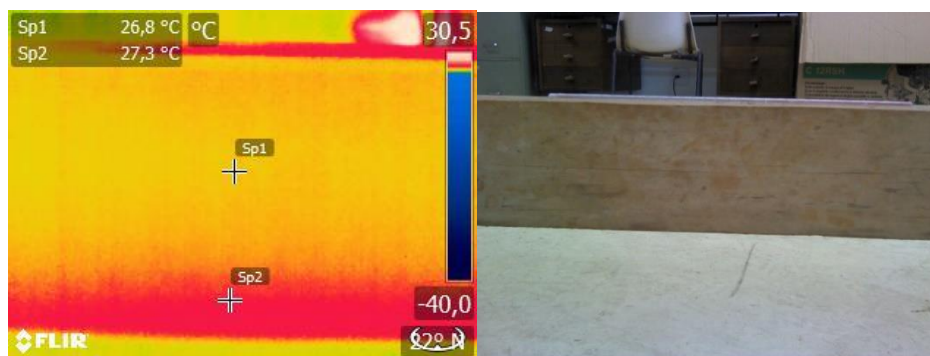


Figura 62: Região sadia eleita através da inspeção visual para comparativo com as demais regiões inspecionadas; (a) registro fotográfico termográfico, (b) registro fotográfico.

Fonte: Autora, 2017.

Após este procedimento realizaram-se os ensaios termográficos ativos para as regiões que apresentavam danos mediante inspeção visual. Observou-se nos ensaios que as regiões da madeira que não sofreram alterações consideráveis na integridade absorvem calor com menor intensidade, entretanto notou-se que nas regiões que apresentavam danos o aquecimento térmico ocorreu com maior intensidade, a ocorrência deste maior aquecimento se dá pela maior presença de espaços vazios e degradação do material uma vez que a integridade da densidade da madeira foi afetada.

- Tomógrafia Acústica:

Para as análises dos resultados obtidos com o método da tomografia acústica optou-se por agrupar as áreas 2 e 11 por causa da homogeneidade dos resultados obtidos. Como já citado anteriormente, os ensaios foram realizados a cada 90 centímetros nas seções transversais das peças excluindo as ligações devido a geometria destas áreas. Após a instrumentação do equipamento como indicado na metodologia foram obtidos os resultados através do *software ArborSonic 3D*.

- Raio-x:

Realizados os procedimentos para obtenção dos resultados radiográficos adotou-se a variação dos níveis de cinza para as análises dos resultados. Faz-se importante destacar que a análise dos níveis dos tons de cinza para os resultados radiográficos aqui apresentados são fundamentais para o entendimento do nível de degradação do material. Para isso elaborou-se a Tabela 1 abaixo que apresenta a associação entre a integridade do material, nível de absorção de fótons e intensidade dos níveis de cinza:

Tabela 1: Valores de atenuação do raio-x aplicado a madeira

Densidade da Madeira	Valores de atenuação	Imagem no filme
Meio de Contraste	+ 100 a 1000	Branca brilhante
Madeira íntegra	100	Branca

Madeira com algum processo de degradação	0 a 100	Cinza médio
Madeira degradada	-60 a -100	Cinza escuro
Ar	-120 a -1000	Preto

*Os valores de atenuação foram retirados da Escala Hounsfield¹⁰.

Fonte: Adaptado de Pereira (201-?).

Para as análises dos resultados associou-se os valores de atenuação elaborados por Hounsfield em relação a densidade da madeira visto que a escala direciona a maior absorção de fótons a um material mais denso e íntegro e uma menor absorção de fótons a maior presença de ar. Tal associação é possível de ser realizada visto que as análises são qualitativas e em ambas as situações, seja em radiografia em madeira seja em um corpo, a absorção de fótons determina a integridade do material.

Com os procedimentos adotados obteve-se os seguintes resultados:

- Região 1:

A região 1 da Figura 63, através da inspeção visual, apresentou danos de deslocamento longitudinal do material, alteração da coloração e ataque de insetos xilófagos. Nesta região da peça localiza-se a ligação boca-de-lobo entre o caibro e o frechal da cobertura e por isso o deslocamento resultante do empuxo lateral ocorreu com maior intensidade nesta ligação (desgaste por atrito característico nesta extremidade da peça como indicado na Figura 63).



¹⁰ A Escala Hounsfield é assim chamada devido ao seu criador Godfrey Hounsfield. “O coeficiente de atenuação é uma medida arbitrária criada por Hounsfield para quantificar a atenuação do feixe de raio-x após atravessar o corpo. A representação de cada tecido na Escala de Hounsfield (EH) varia de acordo com o quanto este absorveu de fótons de raio-x. Tecido muito denso como os ossos, absorvem mais fótons que tecido pouco densos como o ar nos pulmões. Por convenção – para manter correspondência com a Radiologia – valores altos de atenuação (ossos) são representados em branco e valores baixos (ar, gordura) em preto. A EH varia de -1000 (ar) a +1000 (osso)”. PEREIRA, Ricardo. Apostila de Tomografia Computadorizada do Curso de Ciências Biológicas da Universidade Estadual de Goiás, [201?], p. 7.

Figura 63: Reigão 1 do caibro 1.
Fonte: Autora, 2017.

Através da termografia ativa (fig. 64) observou-se há heterogeneidade no aquecimento e uma amplitude térmica de $3,1^{\circ}\text{C}$ na região o que caracteriza variação densidade do material. O ponto de maior aquecimento (Sp1) encontra-se interno visto que na superfície do material não há nenhuma fratura que ocasione este maior aquecimento do ar.

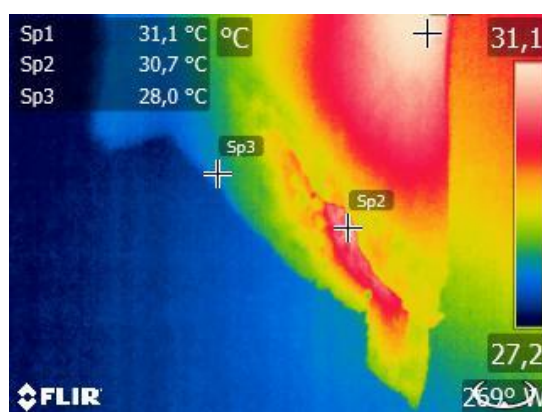


Figura 64: Resultado do ensaio termográfico da região 1.
Fonte: Autora, 2017.

Com o tomógrafo acústico observou-se que as regiões indicadas como ocas (cor azul claro) através da escala ao lado esquerdo da Figura 65 indicam as mesmas regiões que absorveram maior temperatura da Figura 64. Entretanto a tomografia acústica apontou uma maior fragilidade da ligação que a termografia pois o indicativo de material oco concentrou-se no entalhe da peça.

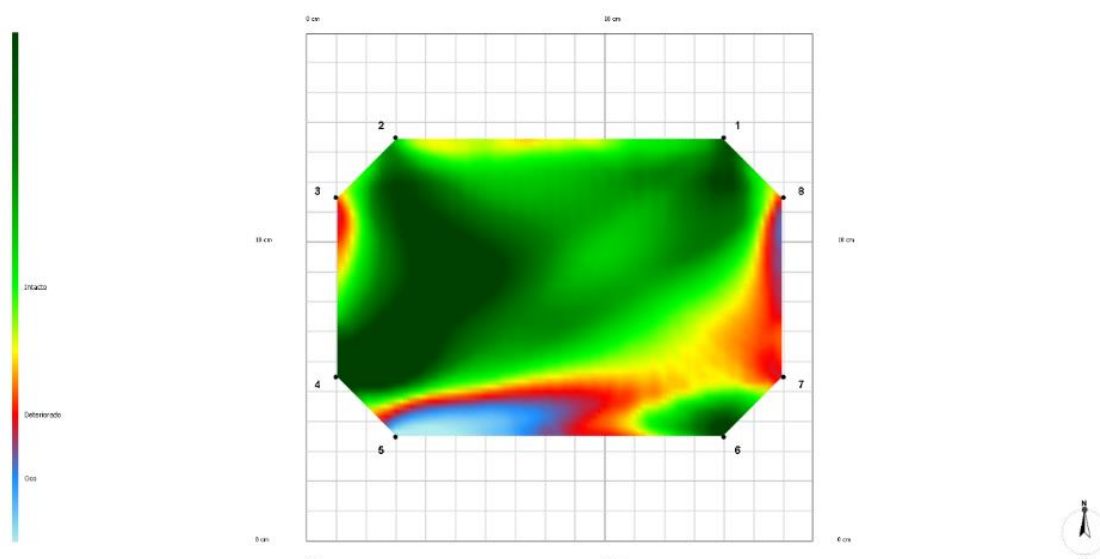


Figura 65: Resultado do ensaio de tomografia acústica da região 1.
Fonte: Autora, 2018.

Dentre os três métodos aplicados a região 1(fig. 66) o resultado obtido com o método de raio-x foi o que apresentou maior detalhamento da profundidade e localização

dos danos pois apresentou em conjunto os mesmos resultados que a termografia e tomografia apresentaram separadamente.

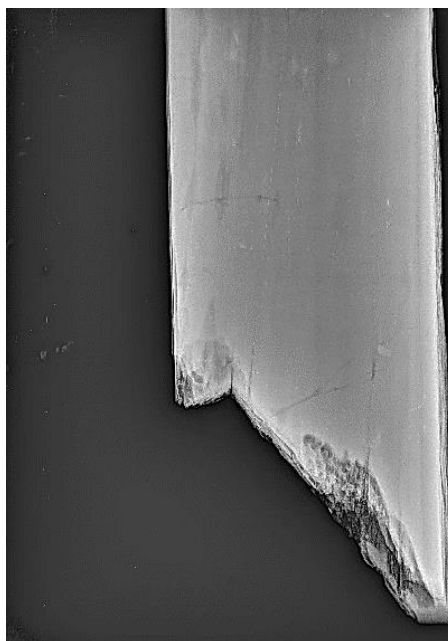


Figura 66: Radiografia-x da região 1.
Fonte: Autora, 2018.

- Regiões 2-a e 2-b:

Na Figura 67-a e 67-b observou-se através das inspeções visuais que os fendilhamentos longitudinais são os danos mais decorrentes, estas patologias podem ter sido causadas pela fixação de elementos metálicos.



(a) (b)
Figura 67: Regiões 2a e 2b do caibro 1 respectivamente.
Fonte: Autora, 2017.

Na inspeção termográfica observou-se que onde os elementos metálicos foram fixados, as aberturas são maiores e mais profundas, visto ao maior aquecimento nestas regiões. Entretanto, a patologia de alteração da coloração da superfície da madeira não apresentou nenhuma interferência para este resultado. O aquecimento na região 2-b mostra-se mais heterogêneo que na sua antecessora a 2-a. Apesar da amplitude térmica

ser ligeiramente menor, a área 2-b não apresenta regiões de aquecimento uniforme o que caracteriza a oscilação da densidade da madeira.

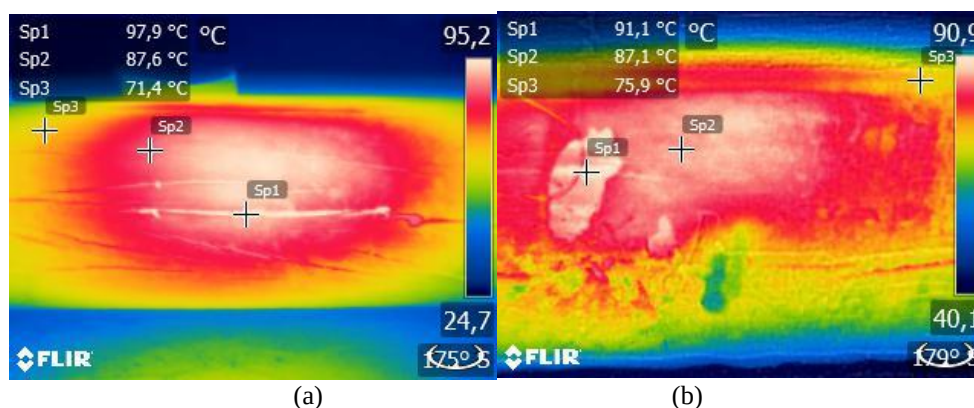


Figura 68: Resultado do ensaio termográfico das regiões 2a e 2b respectivamente.
Fonte: Autora, 2017.

Com os resultados obtidos na tomografia acústica da Figura 69 observou-se que as faces onde concentram-se as regiões ocas são as mesmas onde na termografia foram indicadas as maiores absorções térmicas. Com isso pode-se afirmar que os danos encontrados na inspeção dos dois métodos convergem entre si.

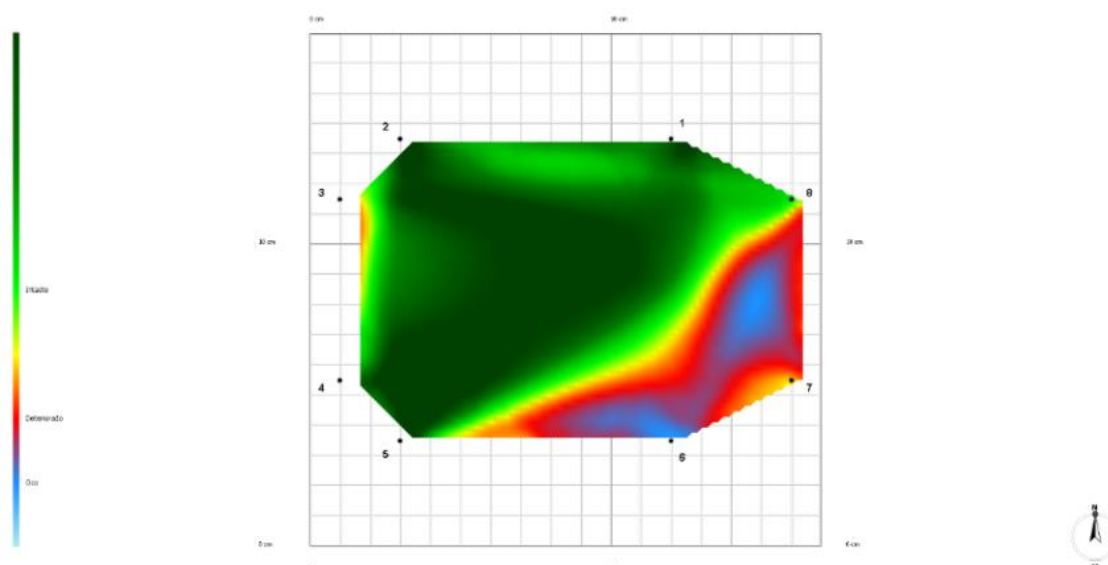


Figura 69: Resultado do ensaio de tomografia acústica das regiões 2-a e 2-b.
Fonte: Autora, 2018.

Na Figura 70 a radiografia apresentou com maior precisão onde concentram-se os danos na região. As áreas degradadas indicadas na termografia e tomografia acústica são na verdade patologias causadas por agentes bióticos que confeccionaram galerias no interior da peça.

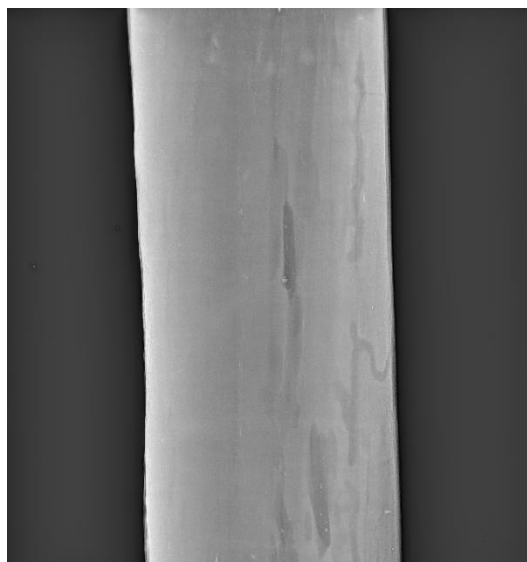


Figura 70: Radiografia das regiões 2-a e 2-b.
Fonte: Autora, 2018.

- Região 3:

Por inspeção visual identificou-se danos de podridão marrom, concentração de umidade, sujidade e fendilhamento longitudinal. Antes da realização dos ensaios a superfície do material foi higienizada.



Figura 71: Região 3.
Fonte: Autora, 2018.

Na região indicada na Figura 72 a degradação por fungos de podridão marrom pode ter alterado a absorção térmica do material. Os fendilhamentos obtiveram destaque neste resultado pois é aonde encontram-se as maiores amplitudes térmicas.

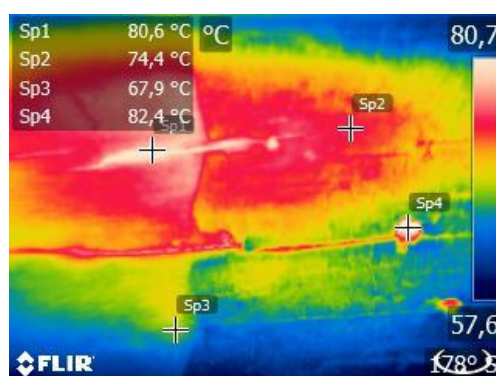


Figura 72: Resultado do ensaio termográfico da região 3.

Fonte: Autora, 2017.

Os resultados obtidos com o tomógrafo acústico não apresentaram danos expressivos na madeira. A Figura 73 apresenta uma pequena área de degradação indicada por colorações amarela e vermelha na região superior da tomografia, demonstrando assim divergência entre o resultado obtido com a termografia.

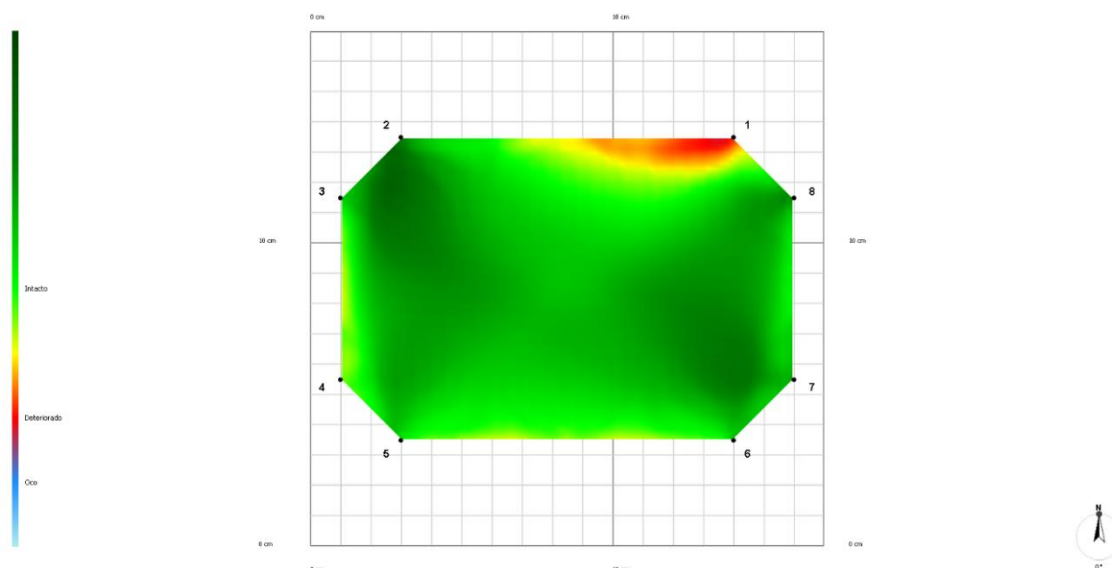


Figura 73: Resultado do ensaio de tomografia acústica da região 3.

Fonte: Autora, 2018.

O detalhamento proporcionado pela radiografia apresenta os resquícios da oxidação deixados pelos elementos metálicos como indicado na Figura 74. Como a radiografia analisa todas as faces da madeira, foram identificados também outros danos como as galerias realizadas pelos insetos xilófagos e áreas de perda de densidade devido à baixa absorção de fótons.

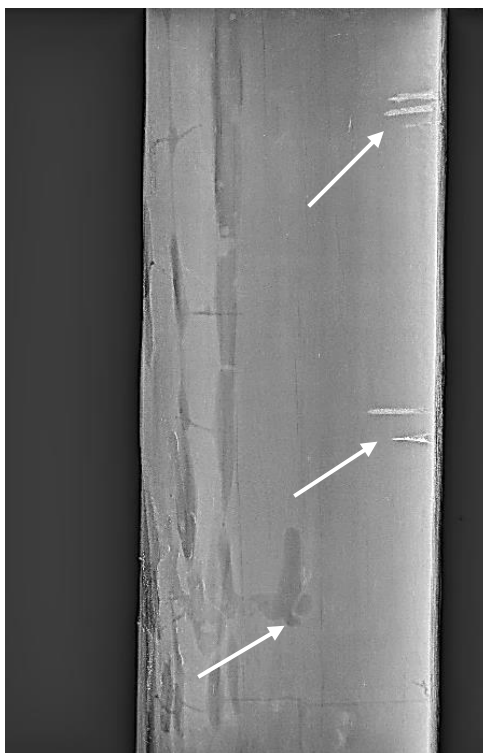


Figura 74: Radiografia da região 3.
Fonte: Autora, 2018.

Na região 3 os resultados que mais se aproximaram foram entre a termografia e a radiografia uma vez que as áreas de maior aquecimento da Figura 72 concentram-se nas aberturas realizadas para a fixação dos elementos metálicos da face direita da Figura 74. Entretanto a tomografia não convergiu com nenhum dano encontrado nos dois outros ensaios, tal divergência pode ter ocorrido devido ao posicionamento dos transdutores.

- Região 4:

A região 4 indicada na Figura 75 é onde localiza-se o entalhe da ligação entre o caibro 1 e a linha alta 1 da tesoura. Através da inspeção visual identificou-se patologias abióticas de sujidade e fendilhamento longitudinal, apesar do entalhe e consequente redução da seção transversal, a ligação não apresentou patologias decorrentes do desgaste por atrito e deslocamento da tesoura ocasionado pelo empuxo lateral. Na inspeção visual não foram identificados danos de origem biótica nesta região.



Figura 75: Região 4 onde encontra-se o entalhe da ligação entre o caibro 1 e a linha alta 1.
Fonte: Autora, 2017.

Apesar da amplitude térmica indicada na escala térmica da Figura 76 há homogeneidade de absorção de calor na região onde encontra-se o entalhe para ligação entre o caibro 1 e a linha alta. A amplitude térmica de 39, 5°C ocorreu por causa da captação por parte da câmara de outros materiais que estavam em torno da madeira. Na região central da imagem há pequenos pontos de maior aquecimento devido as aberturas realizadas para a fixação dos elementos metálicos, contudo, não há variações térmicas na madeira que caracterizem alterações da integridade nesta região.

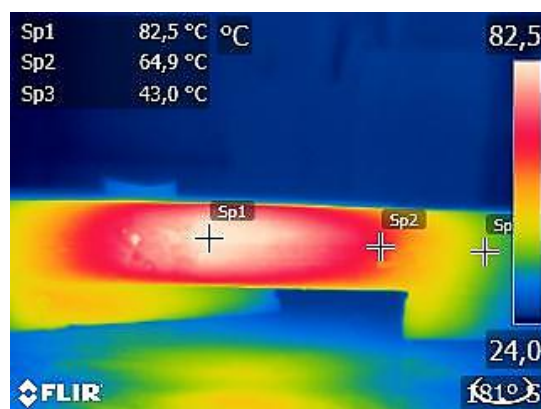


Figura 76: Resultado do ensaio termográfico da região 4.
Fonte: Autora, 2017.

O resultado da tomografia acústica da região 4 apresentado na Figura 77 apresentou uma pequena degradação localizada na região inferior da seção transversal. A região onde há este indicativo de degradação era onde havia o contato do entalhe do caibro 1 com a linha alta. Apesar da tomografia não indicar degradação causada pela fixação dos elementos metálicos, o resultado obtido é condizente com o obtido junto a termografia onde a integridade do material é indicada na pela homogeneidade térmica e na tomografia pela homogeneidade das velocidades das ondas acústicas.

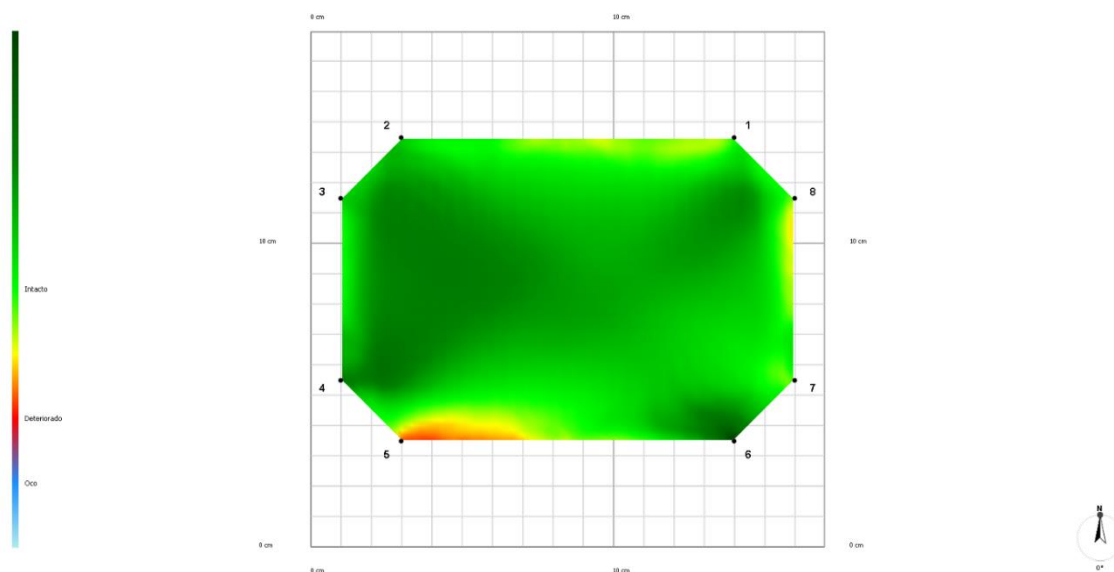


Figura 77: Resultado do ensaio de tomografia acústica da região 4.

Fonte: Autora, 2017.

O resultado obtido junto a radiografia apresentada na Figura 78 maior detalhamento da integridade da ligação onde há, no interior da peça, patologias de origem bióticas. Os insetos xilófagos realizaram orifícios que não foram identificados pela termografia ativa e tomografia acústica, com isso, para este ensaio, a radiografia mostrou-se mais eficiente.

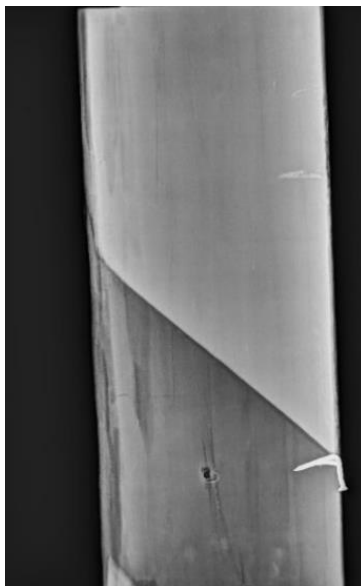


Figura 78 Radiografia do entalhe da ligação entre o caibro 1 e a linha alta 1.

Fonte: Autora, 2018.

As ineficiências dos ensaios devem ter ocorrido devido a integridade da superfície da madeira (para a termografia) e posicionamento dos transdutores na seção transversal (para o tomógrafo).

- Região 5:

Com a inspeção visual da região 5 apresentada na Figura 79 observou-se a presença de sujidade, fendilhamento longitudinal e orifícios realizados para a fixação dos elementos metálicos. Não foram encontrados indícios de ataques bióticos nesta região.



Figura 79: Região 5.

Fonte: Autora, 2017.

Com a inspeção termográfica observou-se que o fendilhamento ao centro da Figura 80 apresenta maior aquecimento que sua dimensão física o que indica uma maior abertura interna do que a observada superficialmente. Com a remoção da sujidade para a realização do ensaio não houve alteração na absorção térmica devido a esta degradação. A termografia detectou resquícios de oxidação dos elementos metálicos que foram removidos anteriormente da madeira.

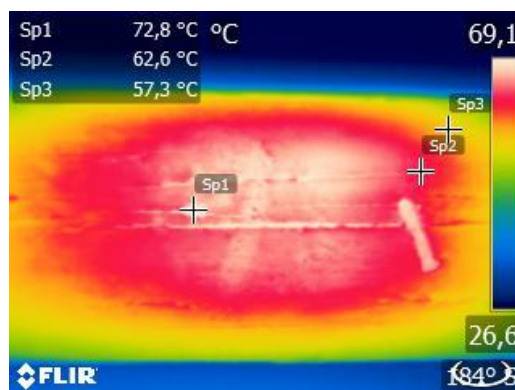


Figura 80: Resultado do ensaio termográfico da região.

Fonte: Autora, 2017.

A inspeção por ondas acústicas apresentada na Figura 81 não apresentou degradações, indicando que a região 5 não apresenta danos internos.

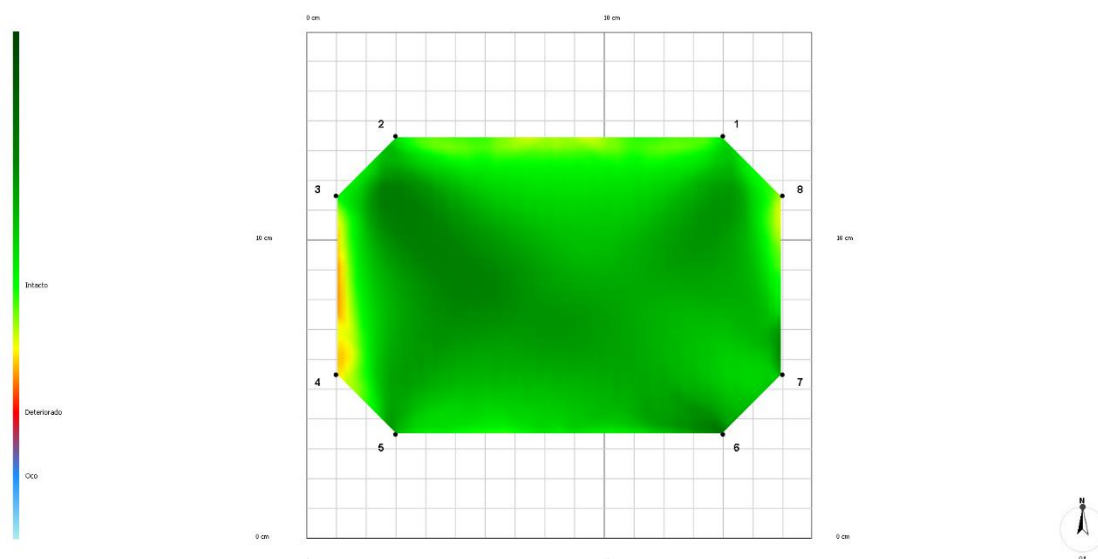


Figura 81: Resultado do ensaio da tomografia acústica da região 5.

Fonte: Autora, 2018.

A inspeção radiográfica apresentada na Figura 82 demonstrou com maior precisão onde localizaram-se os danos na região 5. Observa-se que há degradações bióticas, fendilhamentos e resquícios de oxidação dos elementos de fixação metálicos no interior da madeira.

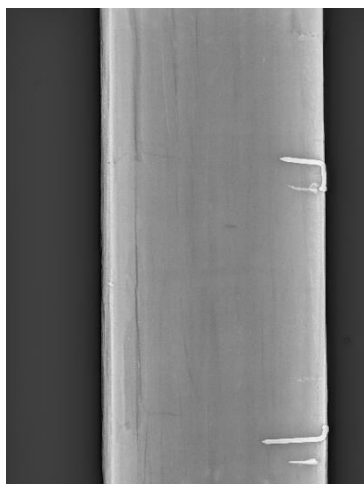


Figura 82: Resultado radiográfico da região 5.
Fonte: Autora, 2018.

- Região 6:

Na inspeção visual realizada na região 6, indicada na Figura 83, a ligação por entalhe de mão-de-amigo apresenta patologias de fendilhamento e sujidade. Não foram identificados danos por atrito no entalhe.



Figura 83: Ligação mão-de-amigo do caibro 1.
Fonte: Autora, 2017.

Com a inspeção termográfica da Figura 84 observou-se que não há alteração da absorção térmica onde há alteração da coloração, indicando assim sujidade apenas. A termografia indica que os fendilhamentos longitudinais são maiores próximos aos elementos metálicos, indicando assim uma má execução desta ligação.

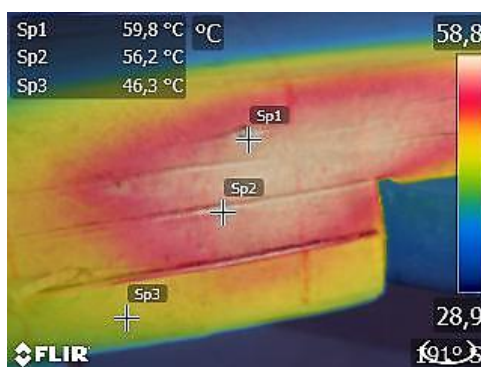


Figura 84: Resultado do ensaio termográfico da região 6.
Fonte: Autora, 2017.

O resultado obtido com a tomografia acústica da região 6 apresentou degradações ao lado direito da Figura 85 onde na termografia os fendilhamentos encontravam-se mais evidentes. O cerne da peça encontrou-se intacto apesar do dano.

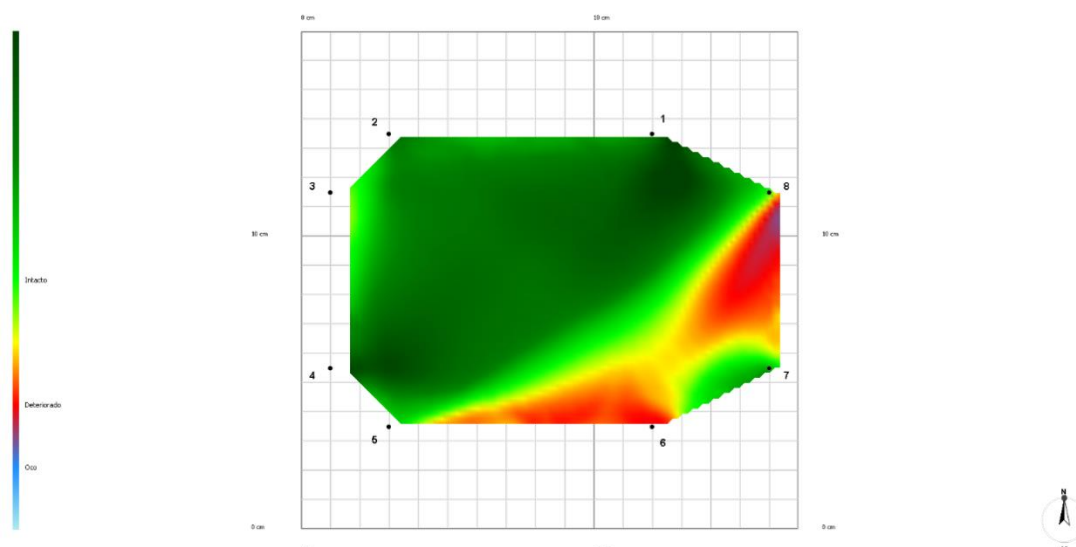


Figura 85: Resultado do ensaio da tomografia acústica da região 6.

Fonte: Autora, 2018.

O resultado obtido com a radiografia constatou-se que os fendilhamentos concentram-se próximos aos resquícios de oxidação e do elemento metálico que ainda se encontra na peça. Tal resultado radiográfico muito aproxima-se do resultado termográfico devido o indicativo de fendilhamento longitudinal em ambos os ensaios. Entretanto a tomografia apresentou velocidades diferentes na região direita da Figura 85, indicando assim danos nas fibras desta seção transversal.

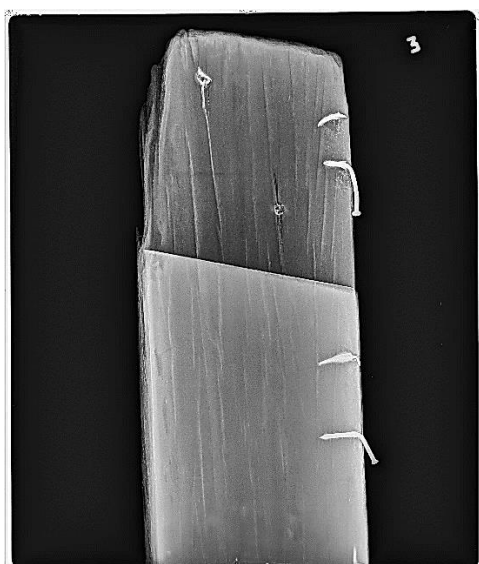


Figura 86: Radiografia da região 6.

Fonte: Autora, 2018.

- Região 7:

Com a inspeção visual realizada na região 7 constatou-se a presença de danos de origem abiótica, como os fendilhamentos, sujidade e concentrações de umidade, e de origem biótica devido a presença de fungos de podridão marrom na face inferior da peça como indicado na Figura 87.

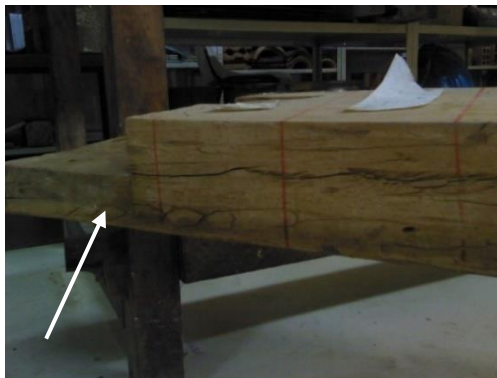


Figura 87: Entalhe da ligação mão-de-amigo da região 7.
Fonte: Autora, 2017.

Com a inspeção termográfica apresentada na Figura 88 constatou-se maior heterogeneidade térmica nas linhas de fendilhamento longitudinal. A sujidade da superfície não causou alteração na absorção térmica. As presenças de fungos de podridão marrom alteraram a absorção térmica da região onde foram detectados como indicado na Figura 88.

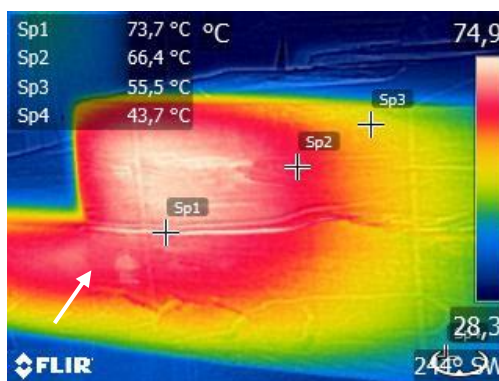


Figura 88: Resultado do ensaio termográfico da região 7.
Fonte: Autora, 2017.

Com o resultado obtido com a tomografia acústica constatou-se que a podridão identificada na inspeção visual e termográfica de fato degradou o material, sendo indicado pela região azul claro da Figura 89.

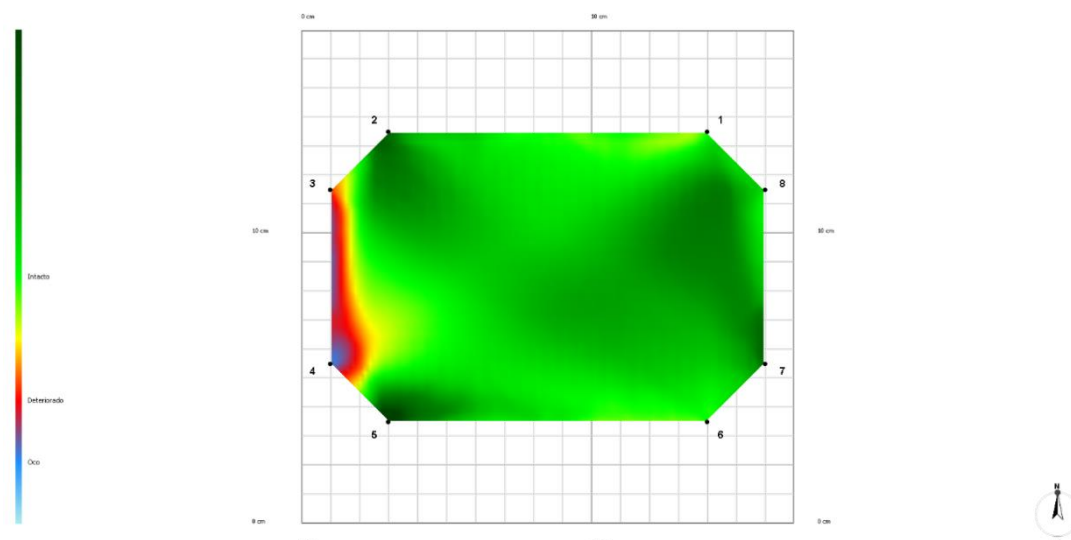


Figura 89: Resultado do ensaio a tomografia acústica da região 7.

Fonte: Autora, 2018.

Com o resultado obtido pela radiografia não se constatou a degradação causada pelo fungo de podridão marrom na mesma região que os ensaios anteriores, entretanto, observou-se manchas de tonalidade clara no lenho, fendilhamento e resquícios de oxidação dos elementos metálicos. Contudo, devido a amplitude do ensaio, identificou-se um dano biótico na madeira possivelmente causado por um agente biótico hospedeiro como indicado na Figura 90.

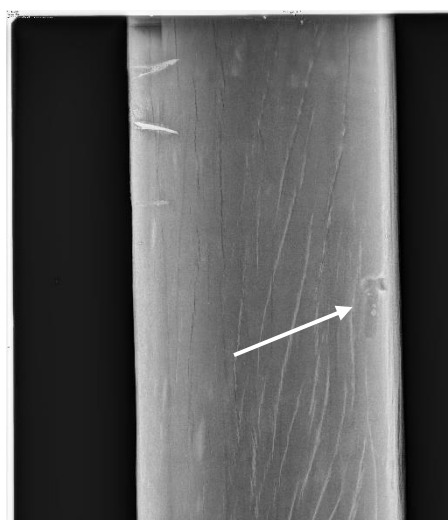


Figura 90: Radiografia da região 7.

Fonte: Autora, 2018.

As manchas de tonalidade clara apresentadas na figura acima são um indício de degradação, uma vez que, a absorção dos fótons pela amostra foi alterada.

- Região 8:

Com a inspeção visual da região 8 constatou-se a presença de agentes bióticos de podridão marrom e agentes abióticos como a sujeira, concentração de umidade e fendilhamentos longitudinais (fig. 91).



Figura 91: Região 8.

Fonte: Autora, 2018.

Através da termografia ativa constatou-se na Figura 92 houve heterogeneidade na absorção térmica em toda a amostra. As fendas não apresentaram maior profundidade do que inspecionado visualmente.

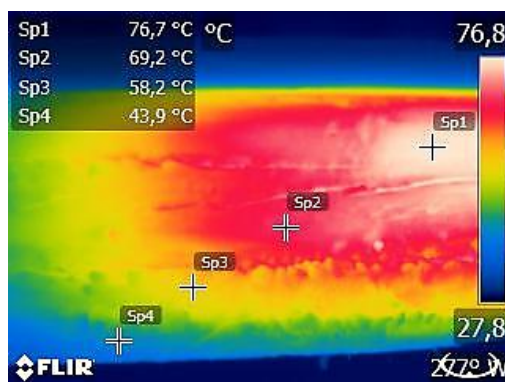


Figura 92: Resultado termográfico da região 8.

Fonte: Autora, 2017.

A tomografia acústica apresentada na Figura 93 indicou danos nas extremidades da peça sendo a face esquerda a mais degradada. Indicada como oca, a parte azul do tomograma, confirma o dano indicado pelo ponto Sp1 da Figura 92, onde houve maior absorção térmica do material.

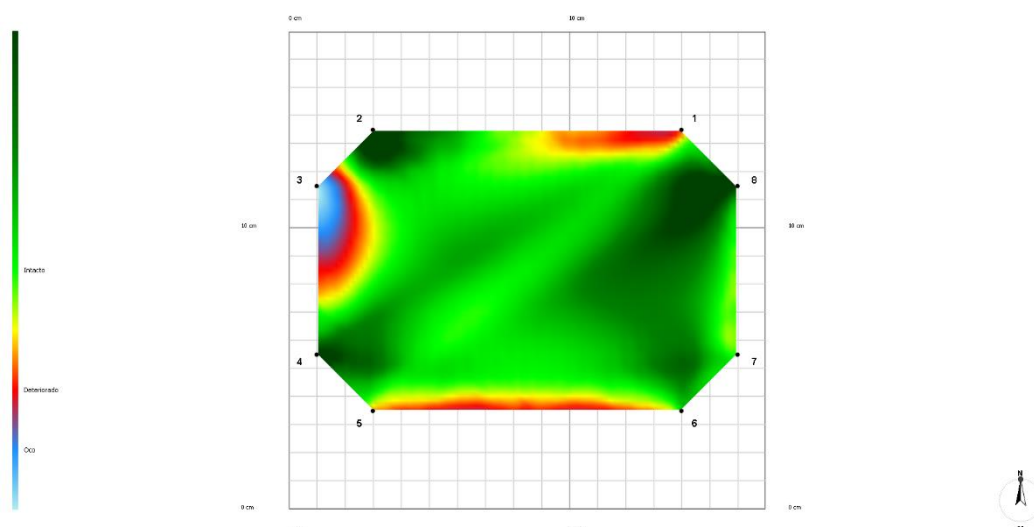


Figura 93: Resultado do ensaio da tomografia acústica da região 8.

Fonte: Autora, 2018.

O resultado obtido com a radiografia observou-se que, além dos fendilhamentos já indicados nos ensaios anteriores, a peça apresenta uma anomalia de desenvolvimento das fibras nesta região como indicado na Figura 94.

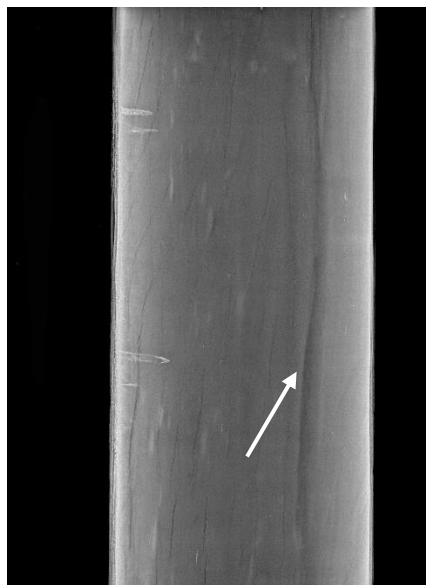


Figura 94: Radiografia da região 8.
Fonte: Autora, 2018.

Observou-se também a ocorrência de manchas claras na madeira assim como os resquícios de oxidação dos elementos metálicos.

- Região 9:

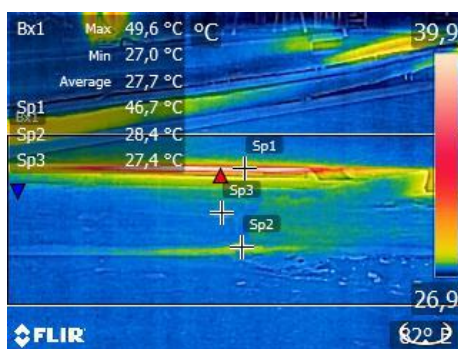
A região da Figura 95 apresentou danos de origem biótica de podridão marron e ataques de insetos xilófagos, e danos de origem abiótica de concentração de umidade, instabilidade estrutural (proveniente da podridão das fibras), sujidade e fendilhamento longitudinal das fibras. Os danos nesta região se mostraram mais intensos que nas demais visto o esfarelamento e forte odor que apresentou. Tal fato pode ter se intensificado devido a exposição da madeira nesta região as intempéries causadas por alguma fratura e/ou deslocamento de telhas na cobertura. A região 9 apresenta o entalhe da ligação entre a linha alta 1 e o caibry 2 o que torna-a ainda mais frágil devido a redução da seção transversal.



Figura 95: Região 9 onde localiza-se a ligação entre o caibry 2 e a linha alta 1.

Fonte: Autora, 2017.

A região 9 encontra-se dentro do retângulo indicado na Figura 76 que apesar da homogeneidade térmica apresentou maior temperatura na face superior (Sp1) onde não houve aquecimento ativo. Em comparativo aos outros ensaios, a amplitude térmica do resultado termográfico da região 9 é menor, entretanto, a região de maior absorção termal não sofreu excitação térmica direta indicando uma transferência de calor dentro do material.



(a) (b)

Figura 96: Resultado termográfico da Região 9.

Fonte: Autora, 2017.

O resultado obtido com o tomógrafo acústico apresentou uma área oca dentro do material na face oposta ao aquecimento termográfico o que confirma a degradação já indicada no ensaio anterior.

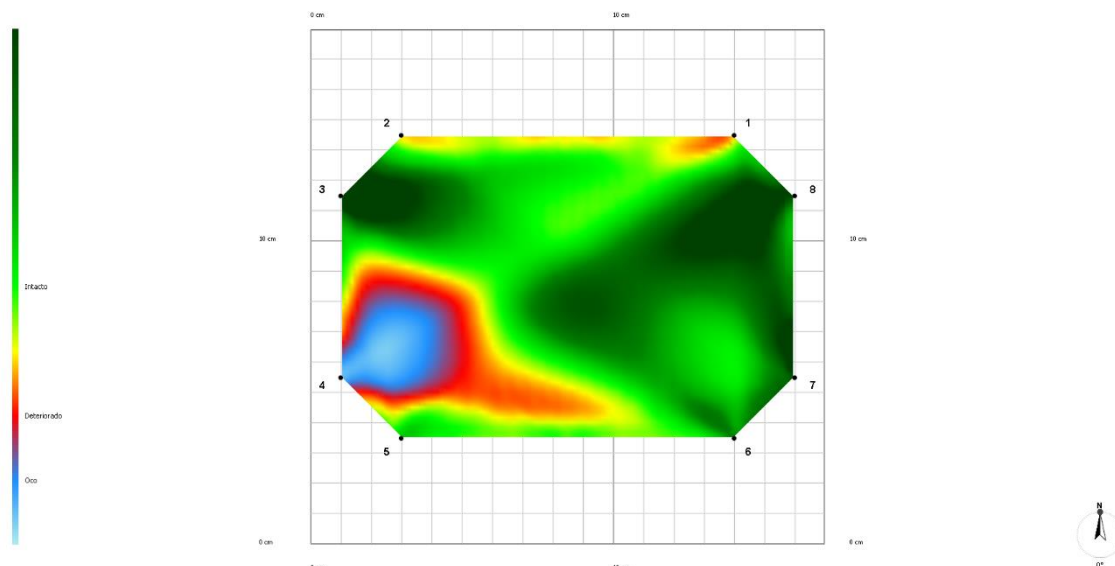


Figura 97: Resultado da tomografia acústica da região 9.

Fonte: Autora, 2018.

O resultado obtido através da radiografia concluiu que havia degradação no local indicado pelos outros métodos aplicados. Com a precisão do método de radio-x observou-se que não só a ligação se encontrava fragilizada, mas como toda a extensão da região 9 da Figura 98.



Figura 98: Radiografia da região 9.
Fonte: Autora, 2018.

- Região 10:

Na inspeção visual realizada na região 10 observou-se danos de origem abiótica de fendilhamento longitudinal as fibras e executivo. A má modelagem da peça gerou fraturas e afundamento nos pontos indicados na Figura 99.

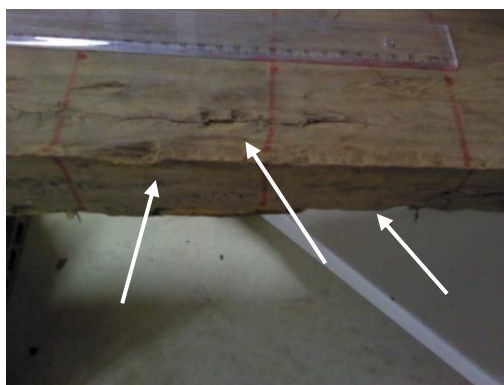


Figura 99: Região 10.
Fonte: Autora, 2017.

Na Figura 100 apresenta uma região de aquecimento longitudinal Sp1 que indica danos internos além dos fendilhamentos longitudinais citados anteriormente. Os danos de ordem executiva não foram perceptíveis a termografia.

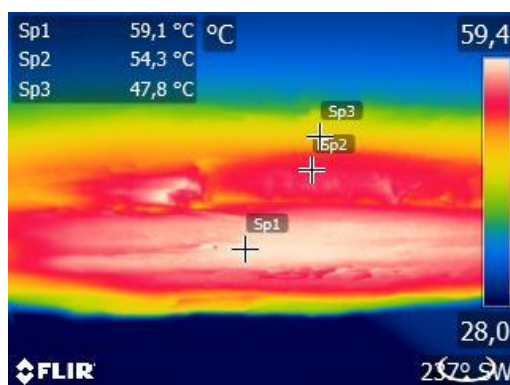


Figura 100: Resultado termográfico da região 10.

Fonte: Autora, 2017.

O resultado tomográfico confirmou que havia danos internos na região 10 pois foram identificadas regiões ocas dentro do material nas mesmas regiões de aquecimento identificadas pela termografia, como apresentado pela Figura 101.

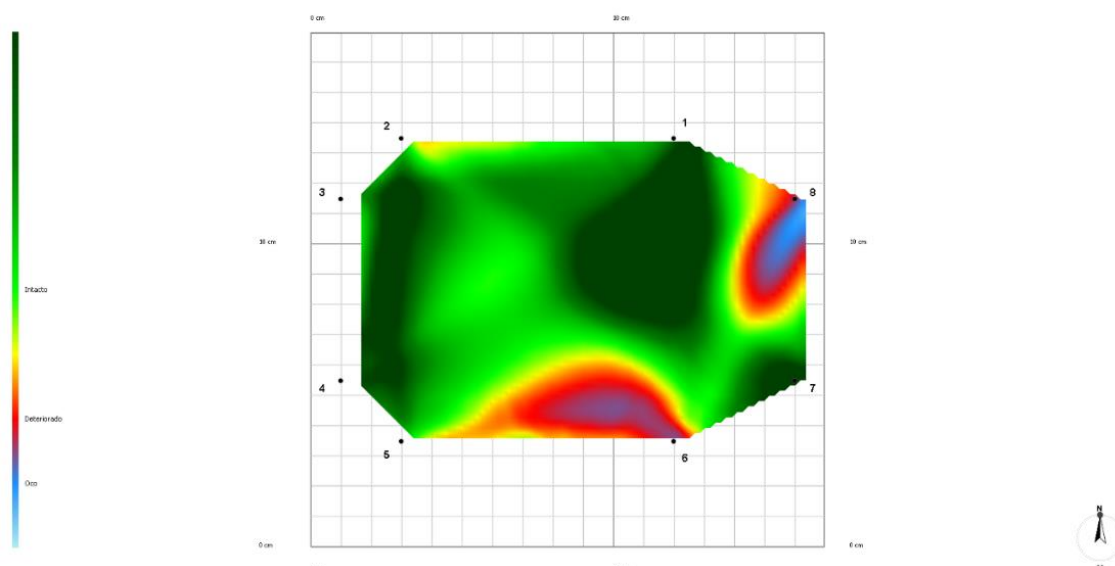


Figura 101: Resultado da tomografia acústica da região 10

Fonte: Autora, 2018.

Apesar da radiografia indicar que havia espaços de menor absorção de fótons na madeira como indicados na Figura 102, as degradações não foram bem delimitadas no material como nos métodos anteriores. Entretanto, foi possível identificar elementos metálicos fixados a madeira assim como resquícios de oxidação de elementos já removidos. As imperfeições de execução da peça não foram perceptíveis neste método.

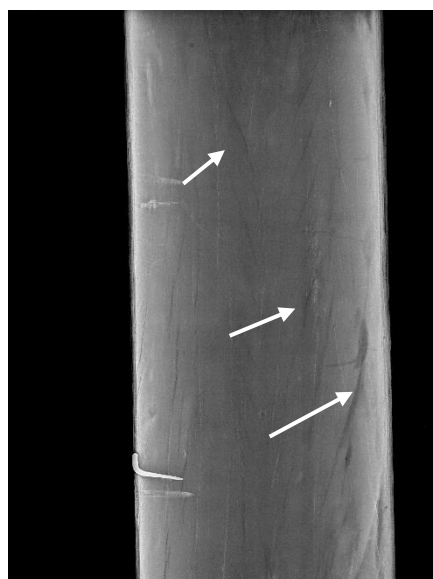


Figura 102: Radiografia da região 10.

Fonte: Autora, 2018.

- Região 11-a e 11-b:

Na inspeção visual da região apresentada na Figura 103 identificou-se danos abióticos e sujidade, fendilhamento, já os danos de origem bióticos encontrados foram a podridão branca, podridão marrom e galerias realizadas por insetos xilófagos.



Figura 103: Região 11.
Fonte: Autora, 2017.

Com os resultados termográficos obteve-se maior detalhamento da degradação da área indicando que a sujidade aparente está interferindo na absorção de calor indicando assim a degradação por fungos. Na Figura 104 há presença de dois objetos não identificados que não absorveram calor, circulos em branco, que se encontram dentro da madeira.

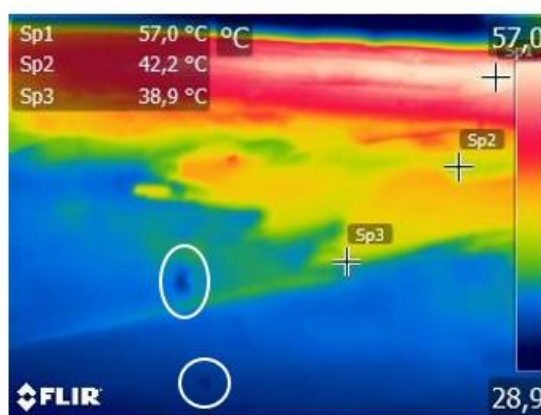


Figura 104: Resultado termográfico da região 11.
Fonte: Autora, 2017.

O resultado da tomografia apresentou áreas de degradações compatíveis as apresentadas pela termografia, uma vez que, as áreas tidas como degradadas e ocas localizam-se nas mesmas de maior absorção térmica. Com o tomógrafo não foi possível a inspeção tão detalhada do objeto dentro da madeira, entretanto, a região onde ele se localiza foi tida como oca, ou seja, sem densidade do material sadio.

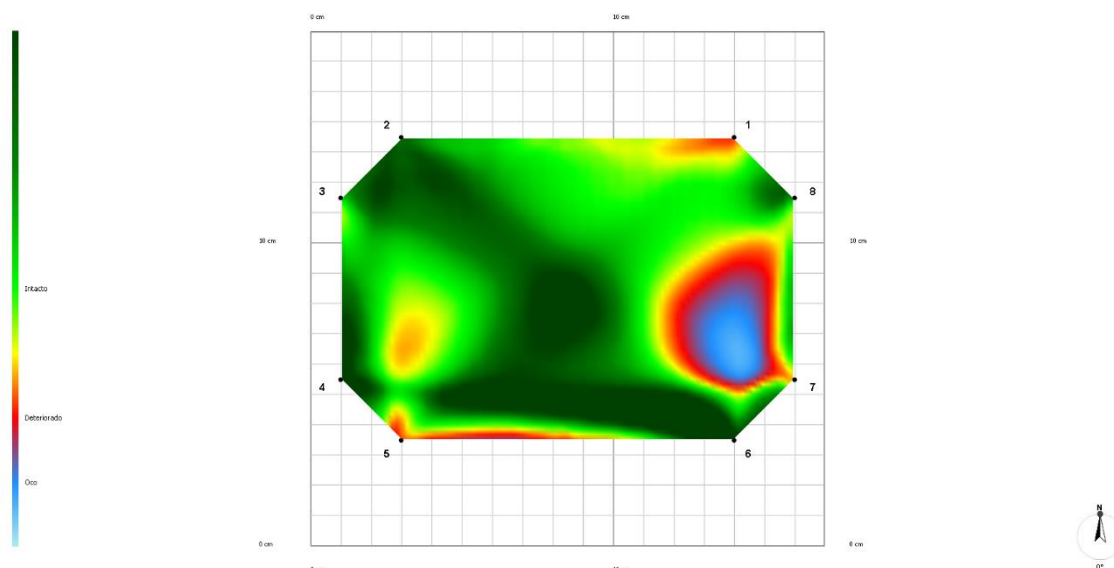


Figura 105: Resultado da tomografia da região 11.

Fonte: Autora, 2018.

O resultado radiográfico detalhou os resultados dos métodos anteriores visto a precisão na absorção dos fótons pelo material. O nível de degradação apresentado pelo raio-x é compatível aos outros dois métodos, entretanto, o diferencial da radiografia é sua precisão e nitidez.

Como indicado na Figura 106 as galerias realizadas dos insetos xilófagos estão presentes em toda a região sendo possível identificar a presença do objeto dentro da madeira. Observou-se também a presença de manchas brancas e degradações longitudinais.

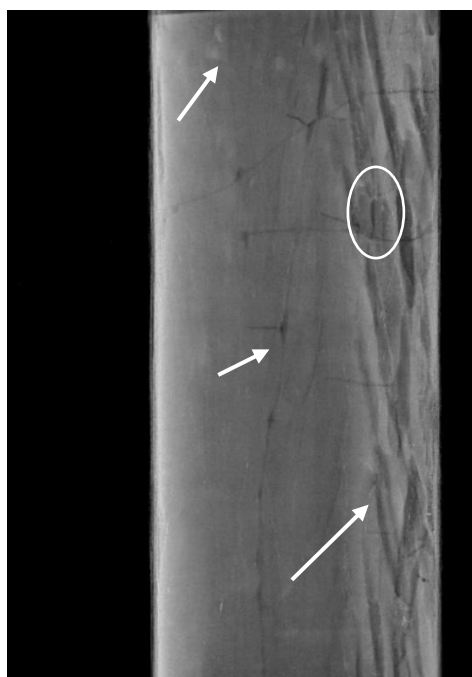


Figura 106: Radiografia da região 11.

Fonte: Autora, 2018.

- Região 12:

A ligação boca-de-lobo do caibro 2 na inspeção visual apresentou ataques abióticos o esfarelamento e deslocamento superficial, podridão e sujidade, e ataques bióticos dos insetos xilófagos e fungos.



Figura 107: Ligação boca-de-lobo da região 12.
Fonte: Autora, 2017.

Com a termografia ativa apresentada na Figura 108 constatou-se que os danos encontrados se concentram na região inferior da peça pois apresenta maior heterogeneidade e descontinuidade térmica.

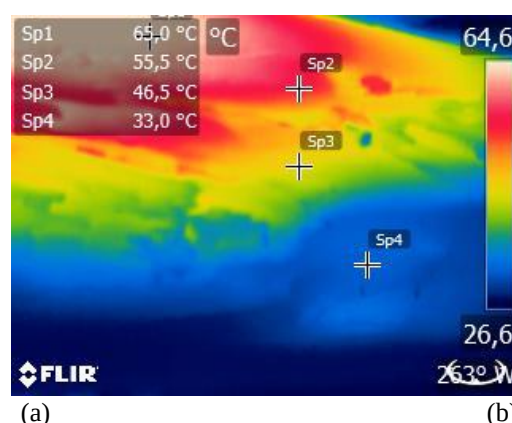


Figura 108: Área 12; Resultado termográfico da região 12.
Fonte: Autora, 2017.

O resultado tomográfico apresentou degradações na região inferior da seção transversal o que compatibiliza com a inspeção termográfica.

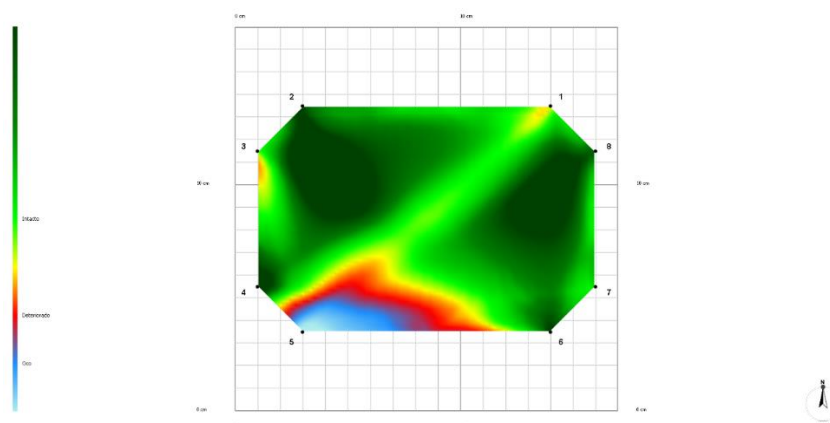


Figura 109: Resultado tomográfico da região 12.
Fonte: Autora, 2018.

O resultado da radiografia apresentou a dimensão da degradação indicada pelos métodos anteriores através da baixa absorção de fótons da área degradada como indicado na figura 110.

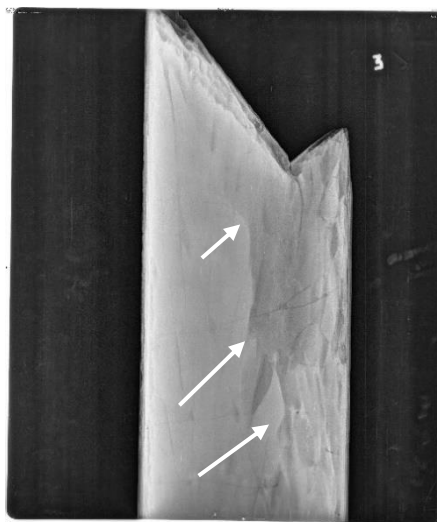


Figura 110: Resultado da radiografia da região 12.

Fonte: Autora, 2018.

Na inspeção visual da linha alta constatou-se a presença de danos de origem abiótico como o fendilhamento longitudinal, concentração de umidade nas ligações e esfarelamento das fibras. Dentre os danos inspecionados os que se concentravam nas ligações foram os mais agressivos, os danos de concentração de umidade resultaram em apodrecimento das fibras e esfarelamento da madeira como indicado na Figura 111.



Figura 111: Ligação direita entre a linha alta 1 e o caibro 2.

Fonte: Autora, 2017.

Os danos encontrados na ligação analisada da Figura 112 apresentaram as mesmas características dos danos identificados no entalhe da ligação do caibro 2, o ensaio termográfico apontou variação térmica de 85°C do ponto Sp1 para 55,7°C do ponto Sp3.

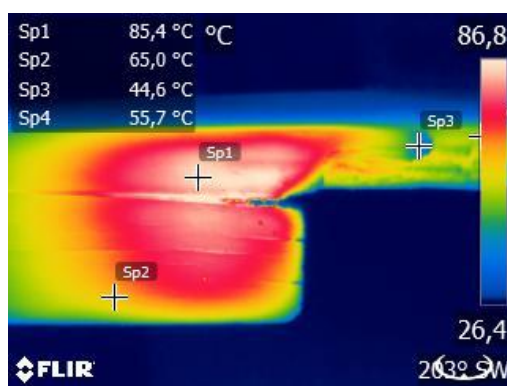


Figura 112: Resultado termográfico da ligação entre a linha alta 1 e o caibro 1.

Fonte: Autora, 2017.

O resultado da radiografia validou os resultados termográficos com maior precisão como indicado na Figura 113, apesar da radiografia não identificar o fendilhamento longitudinal o detalhamento da podridão já acusada pela termografia foi evidenciado através da baixa absorção de fotos na região de entalhe. A fragilidade da ligação foi evidenciada neste ensaio visto a baixa absorção de fótons na extremidade do entalhe, o que pode ter contribuído para a instabilidade da tesoura.

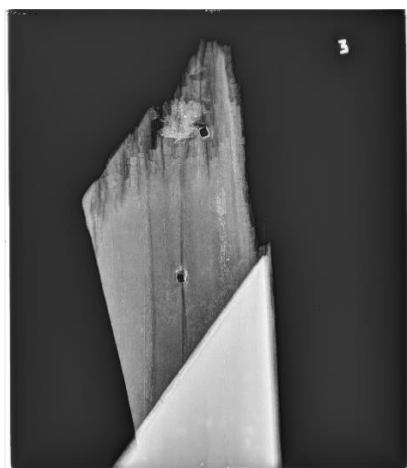


Figura 113: Resultado da radiografia da ligação entre a linha alta e o caibro 2.

Fonte: Autora, 2018.

Através da inspeção visual analisou-se que as demais regiões da linha alta 1 não apresentaram danos abióticos de concentração de umidade nem ataques bióticos de insetos xilófagos, entretanto, os fendilhamentos longitudinais foram encontrados em toda a peça como indicados na Figura 114.

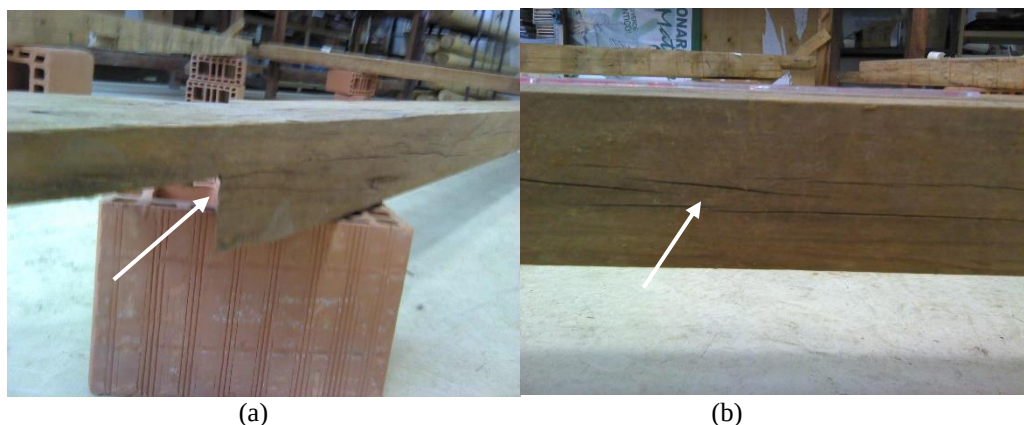


Figura 114: Regiões da linha alta 1: (a) ligação entre a linha alta 1 e o caibro 1; (b) região central da linha alta 1.

Fonte: Autora, 2017.

As análises termográficas confirmaram os levantamentos visuais dos danos, apresentando maior aquecimento nas fendas já identificadas na inspeção visual.

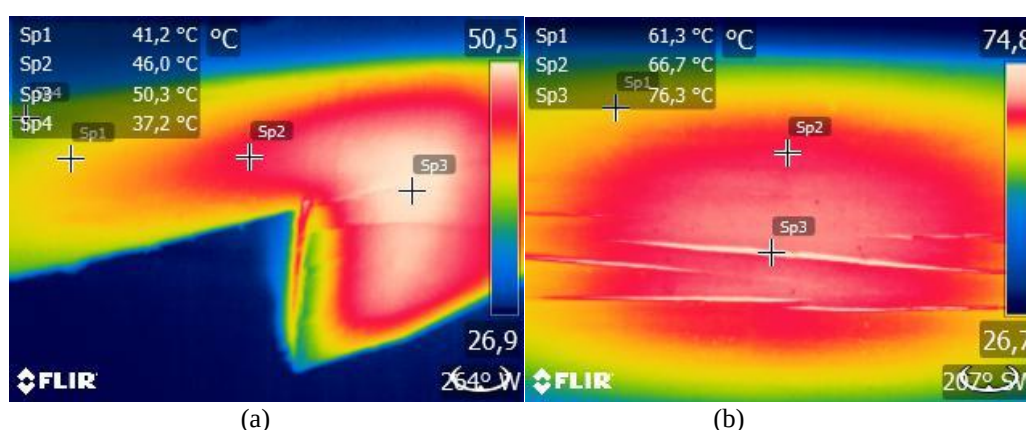


Figura 115: Resultado termográfico: (a) ligação entre a linha alta 1 e o caibro 1; (b) região central da linha alta 1.

Fonte: Autora, 2017.

Para a avaliação tomográfica acústica optou-se pela fixação dos transdutores nas extremidades dos entalhes das ligações, obtendo assim o resultado global do elemento. A opção por analisar o comprimento longitudinal e não somente uma única seção transversal foi tomada mediante a disponibilidade do equipamento em alcançar, devido o comprimento dos cabos dos transdutores, toda a peça. Apesar da modificação na aplicação do método o resultado foi compatível com as inspeções visuais e termográficas, uma vez que foram nas extremidades que o tomógrafo identificou danos como apresentado na Figura 116.

Contudo o resultado tomográfico apresentou maior detalhamento de inspeção interno pois ao centro da Figura 116 foram indicadas duas áreas de transição sadias para degradadas.

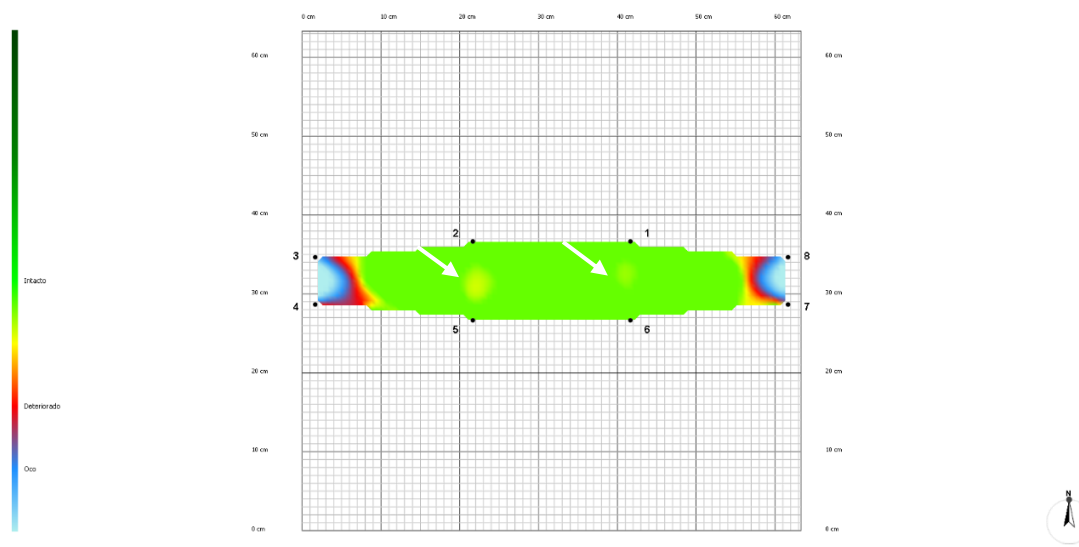


Figura 116: Resultado da tomografia acústica da linha alta 1.

Fonte: Autora, 2018.

A última inspeção radiográfica foi realizada ao centro da linha alta 1 e apresentou apenas linhas que foram relacionadas com os fendilhamentos longitudinais já identificados nos ensaios anteriores. Como indicado na Figura 117, a degradação interna apontada pela tomografia acústica ao centro da peça foi detectada pelo radio-x.

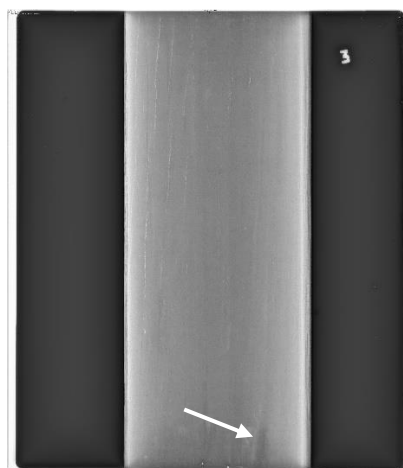


Figura 117: Resultado da Radiografia da região central da linha alta 1.

Fonte: Autora, 2018.

Contudo é importante destacar algumas considerações a cerca dos resultados obtidos:

- Com os resultados termográficos obtidos pode-se constatar que as regiões superaquecidas podem gerar ruídos térmicos, com valores finais superiores a todas as demais regiões, o que não são indicativos de áreas degradadas uma vez que a constância termográfica indica a integridade da densidade e a homogeneidade do material. Com isso, para uma leitura termográfica ativa correta, é fundamental uma análise da homogeneidade do aquecimento da madeira, pois as variações térmicas nas microrregiões são indicativas

de danos, já as constâncias térmicas, mesmo a temperaturas elevadas, indicam integridade do material.

- Os mapeamentos por propagação de ondas transversais proporcionam resultados locais, porém, contemplam toda a seção transversal analisada. Com a inserção de 16 transdutores é possível a propagação de ondas tanto longitudinal quanto transversalmente, entretanto, a extensão das peças e o acesso as mesmas na cobertura podem ser um inconveniente, por isso, o uso de extensores podem solucionar a questão.

- Com os resultados obtidos através da radiografia pode-se afirmar que as análises deste método são qualitativas, uma vez que, a estimativa de densidade se dá através da análise da escala dos tons de cinza. Constatou-se que a madeira sadia absorve fótons em proporções maiores que as regiões degradadas e que, mesmo os danos internos do material, são identificados através dos tons de cinza mais escuro devido a maior presença de ar e descontinuidade do material. Outro fator a ser considerado sobre o nível de detalhamento deste método é a identificação da oxidação transmitida pelos elementos metálicos para a madeira, permitindo assim, mesmo sem a existência do elemento na madeira no ato do ensaio, a identificação de sua fixação. A oxidação metálica não causa danos diretos na madeira.

4.7 Proposta de terapia para reabilitação estrutural

A proposta para a reabilitação da tesoura de caibro-armado baseia-se nas patologias das ligações e deformações encontradas nas alvenarias do estudo de caso aqui apresentado. Para esta proposta considerou-se que a tesoura seria reabilitada *in loco* sem a alteração ou remoção de quaisquer elementos, caracterizando assim a proposta de intervenção mínima desta tese. Para isso elaborou-se, através do *software* FTOOL da PUC-Rio, dois modelos comparativos entre os arranjos estruturais da tesoura de caibro-armado. A Figura 118 apresenta a configuração atual da tesoura, com apoios sobre ao frechais rígidos, e a Figura 119 apresenta a sugestão para solução do empuxo lateral da tesoura. Os apoios antes fixos (fig. 118) são liberados no eixo de x em um dos apoios, transformando uma estrutura hiperestática em uma isostática (fig. 119). As ligações superiores funcionam e permaneceram como rótulas.

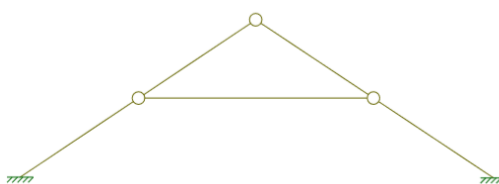


Figura 118: Configuração estrutural da tesoura de caibro-armado.

Fonte: Autora, 2019.

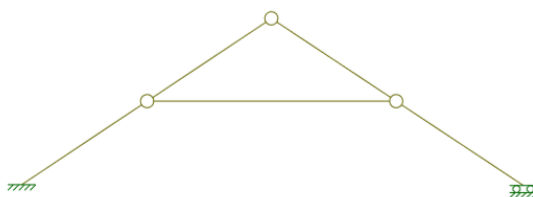


Figura 119: Configuração estrutural proposta para a tesoura de caibro-armado.

Fonte: Autora, 2019.

Para a adoção do modelo de reabilitação da Figura 119 há de se considerar o sistema construtivo das alvenarias subjacentes e suas respectivas espessuras. No Brasil, as alvenarias das edificações religiosas coloniais comumente são de adobe e possuem amplitude maior que as edificações religiosas portuguesas que detém a tesoura de caibro armado. As alvenarias de barro são mais frágeis e sensíveis aos deslocamentos do que as de cantaria, e se tratando de edificações religiosas, que não possuem nenhum sistema de travamento longitudinal devido à ausência de patamares, deve-se considerar a estabilidade da estrutura caso a caso. Em qualquer situação a reversibilidade da intervenção deverá sempre ser estimada, pois intervenções evasivas alteram o sistema construtivo e por fim desrespeitam o preceito de intervenção mínima.

5 CONCLUSÕES FINAIS

A elaboração de uma metodologia de inspeção não-destrutiva que investigue os danos, a historicidade e que seja viável as obras de intervenção são um desafio a disciplina de conservação e restauro de bens imóveis no Brasil. Há envoltórias, que se não entendidas como essenciais para a preservação do patrimônio material e imaterial, tendem a gerar patologias ao invés de sana-las.

A disciplina da história das construções é carente de pesquisas, o que resulta na degradação dos nossos sistemas construtivos, uma vez que, desconhecendo a origem a preservação pouco importa. O levantamento da historicidade das técnicas vai além da conservação dos edifícios, ela abarca o patrimônio material e imaterial, preserva o modo de se fazer e a identidade de uma cultura que outrora edificou um país. Com isso, esta tese contempla facetas da preservação do patrimônio, indo desde a investigação sobre a influência do uso da tesoura de caibro-armado no Brasil, as técnicas de inspeção e proposta para reabilitação.

O estágio em Portugal, mesmo que curto e realizado por recursos próprios, foi fundamental para constatar que foram os portugueses os responsáveis por aportarem o caibro-armado na época da colonização no Brasil. Entretanto, não se pode afirmar que a técnica é portuguesa, e tão pouco a sua origem, por isso, conclui-se que a técnica é de influência ibérica e sua origem ainda desconhecida.

Constata-se também que o caibro-armado é uma influência estrutural do período Românico português, ao qual as dimensões das edificações foram reproduzidas em Minas Gerais, mesmo com a opulência estilística do Barroco e Rococó tardios. Observa-se com isso que a engenharia utilizada nas coberturas das edificações religiosas não acompanhou os estilos arquitetônicos e suas tecnologias no Brasil, uma vez que em Portugal, já não se usara mais as tesouras de caibro-armado para coberturas mais complexas.

Considera-se que para as edificações religiosas, por se tratar de construções de vãos livres em seus interiores, principalmente em suas naves, onde há ausência de elementos para travamentos transversais, como por exemplo o pavimento, a cobertura possui também a função de travar a parte superior das alvenarias. É evidente que a espessura e a amarração no encontro das paredes são fatores fundamentais para o bom desempenho da estabilidade das tesouras.

Com os resultados alcançados esta tese apresenta a validação de inspeção entre três métodos não-destrutivos, a termografia ativa, tomógrafo acústico e o raio-x. Contudo é importante destacar que a inspeção inicial do estado fitossanitário das peças da tesoura foi de extrema importância, tal procedimento norteou a aplicação dos métodos nas regiões onde as patologias desenvolveram-se.

A identificação macroscópica da espécie da madeira é uma etapa importante da inspeção do material muitas vezes negligenciada. A importância de se avaliar os dados de módulo de elasticidade e densidade aparente de uma madeira sadia em relação a inspecionada, caracterizando os possíveis danos e perdas de resistência do material, resulta na escolha de uma terapia de reabilitação que atende os preceitos da compatibilização dos materiais e consequentemente da intervenção mínima.

Sobre a incidência dos danos faz-se importante destacar que para ambos os caibros, as patologias, tanto abióticas quanto bióticas, foram mais agressivas na região abaixo da ligação com a linha alta. Tal incidência se dá a fatores como deslocamento de telhas e exposição da madeira as intempéries.

Contudo com os resultados obtidos foi possível constatar que as áreas indicadas pela inspeção visual apresentaram patologias. Apesar do resultado congruente, os três

métodos apresentam informações complementares: A termografia infravermelha ativa reflexiva apresentou aquecimentos locais, não dispersando em sua face o gradiente térmico, destacando o aquecimento das regiões onde a massa do material apresentou perda, alteração ou inexistência. Já a tomografia acústica, demonstrou as regiões ainda sadias da seção transversal, e o raio-x realizou um mapeamento qualitativo da integridade da madeira. Todos os três métodos podem ser utilizados *in loco*, entretanto cada um apresentará sua particularidade de instrumentação, o que dependendo do estado de integridade da cobertura, pode ser um dificultador.

Conclui-se que os preceitos da intervenção mínima só podem ser respeitados mediante inspeção do estado da integridade do material de forma minuciosa, investigando a historicidade do sistema construtivo e adotando terapias que respeitem a técnica e que sejam estruturalmente reversíveis.

5.1 Sugestões para futuros trabalhos

Para a continuidade das pesquisas aqui iniciadas sugere-se como futuros trabalhos:

- A investigação da origem da tesoura de caibro-armado na Europa e seus desdobramentos na Península Ibérica;
- Redimensionamento das cargas considerando a área de influência de cada tesoura na resultante de deformação na alvenaria;
- Realização de modelagem numérica e ensaios mecânicos para proposta de intervenção apresentada nesta tese para a tesoura de caibro-armado;

6 REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABREU, Luciana Barbosa. **Ensaio não-destrutivo para avaliação da integridade de elementos estruturais de madeiras em construções históricas**. Tese apresentada a Universidade Federal de Lavras. Programas de Pós-Graduação em Ciência e Tecnologia da Madeira. Lavras, 2010.

ABREU, Luciana B. A.; LIMA, José T.; RABELO, Goivanni F.; GOMES, Francisco C.; TRUGILHO, Paulo F.; ELOY, Felipe S. **Avaliação não destrutiva de estruturas de madeiras em edifício histórico de Tiradentes, MG**. CERNE vol. 19 nº. 3 Lavras july/sept. 2013. ISSN 0104-7760

ALMEIDA, F. N. Frederico. **Mosteirinho de Paudalho**. Pernambuco [19-].

ALVES, R. C.; MARTINS, T.; CARRASCO, E. V. M. **Influência da densidade na velocidade de propagação da onda em sete espécies de madeira tropicais**. Natural Resources, Aquidabã, v.3, n.1, Set, Out, Nov, Dez. 2012, Jan, Fev 2013. ISSN:2237-9290.

ARAÚJO, Silvia M. S.; SOUZA, Vicente C. M.; GOUVÊIA, Antônio M. C. **Análise de risco de incêndio em cidades históricas brasileiras – A metodologia aplicada a cidade de Ouro Preto**. Re. Int. de Desastres Naturales, Accidentes e Infraestructura Civil. Vol. 5 (1) 55. 2005.

ARRIAGA, F.; PERAZA, F.; ESTEBAN, M.; BOBADILLA, I.; GARCÍA, F. **Intervención em esctructuras de mader**a. ISBN: 8487381243. Editora AITIM – Asociación de Investigación Técnica de las Industrias de la Madera, Madri, España, 2002.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 15521:2007, **Ensaio não-destrutivo – Ultra-som- Classificação mecânica de madeira serrada de dicotiledôneas**. Rio de Janeiro, 2007.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 7190:2010, **Projeto de estruturas de madeira**. Rio de Janeiro, nov. 2010.

BARBOSA, A. C. F. et al. **A new method to obtain good anatomical slides of heterogeneous plant parts.** IAWA Journal, Utrecht, v. 31, n.4, p. 373-383, 2010.

BARBOSA, Luciana; TARCÍSIO, José; RABELO, Giovanni Francisco; GOMES, Francisco Carlos; TRUGILHO, Paulo Fernando; ELOY, Felipe. **Avaliação não destrutiva de estrutura de madeiras em edifício histórico de Tiradentes, MG.** CERNE, vol. 19, nº:3, jul/set, 2013, pp. 481-487. Universidade Federal de Lavras. Lavras, Brasi. ISSN: 0104-7760.

BARTHOLOMEU, André. **Classificação de peças estruturais de madeira através do ultra-som.** Tese de doutorado. Feagri – UNICAMP, Campinas (SP), nov.,2001.

BOTELHO, Maria Leonor; RESENDE, Nuno. **Capela da senhora da Piedade da Quintã: Paredes.** In ROSAS, Lúcia, coord. cient. – **Rota do Românico.** Lousada: Centro de Estudos do Românico e do Território, 2014. Vol. 2, p. 389-402.

BOTOSSO, Paulo C. **Identificação macroscópica de madeiras: guia prático e noções básicas para o seu reconhecimento.** Colombo: Embrapa Florestas, 1ª edição, 2009. ISSN: 1679-2599.

BRAGA, Márcia. **História e evolução conceitual dos critérios do restauro arquitetônico. Unidade 1. Recomendações e Diretrizes para a adoção de princípios comuns sobre a conservação e restauração do patrimônio cultural na Europa – Apel** (*Acterus du patrimoine européen et legislation – 2001*).

BRANDI, Cesare. **Teoria da Restauração.** Artes e Ofícios. Ateliê editorial. Cotia, São Paulo. 2004.

BRANCO, Jorge; SANTOS, Ana; CRUZ, Paulo. **Asnas Tradicionais de Madeira: Evolução, comportamento e reforço com Materiais Compósitos.** Revista Portuguesa de Engenharia de Estrutura. p. 1 a 12. ISSN: 0870-984. Séri 2:3. maio, 2008.

BERNARDO, Janice. **Colônia Murici: Métodos para Diagnósticos em Projetos de Restauração e Preservação do Patrimônio Histórico.** Tese apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Florestal, Setor de Ciências Agrárias. Universidade Federal do Paraná. Curitiba, 2014.

BRITES, Ricardo José Delgado Sousa. **Avaliação de Segurança das Estruturas Antigas de Madeira**. Dissertação elaborada em colaboração com o Laboratório Nacional de Engenharia Civil para obtenção do grau de Doutor em Engenharia Civil pela Universidade do Minho. Portugal, 2011.

BRITO, Leandro D. **Patologia em Estruturas de Madeira: Metodologia de Inspeção e Técnicas de Reabilitação**. Tese apresentada ao Departamento de Engenharia de Estruturas da Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo. Área de Concentração Engenharia de Estruturas. São Carlos, 2014.

BROTO, C. **Enciclopedia Broto patologías de la construcción**. Barcelona: Links Internacional, 2005. 1396p. Disponível em: https://higieneyseguridadlaboralcvr.files.wordpress.com/2012/07/enciclopedia_broto_d_e_patologias_de_la_construccion.pdf . Data de acesso: junho/2017

CAMEIRA LOPES, M; FARIA, J.A. **Tipificação de soluções de reabilitação de estruturas de madeira em coberturas de edifícios antigos**. In PATORREB 2009. 3º Encontro sobre Patologia e Reabilitação dos Edifícios. FEUP, Porto, 18 a 20 de março de 2009, p. 403-408, Vol. 1, ISBN 978-972-752-109-8.

CANDIAN, Marcela; SALES, Almir. **Aplicação das técnicas não-destrutivas de ultrassom, vibração transversal e ondas de tensão para avaliação de madeira**. Revista Ambiente Construído, Porto Alegre, v. 9, n. 4, p. 83-98. Out./dez. 2009.

CARRASCO, E. V. M.; AZEVEDO JÚNIOR, A. P. **Avaliação não-destrutiva de propriedades mecânicas de madeiras através de ultrassom – fundamentos físicos e resultados experimentais**. Engenharia Civil. Guimarães, Portugal. V. 1, n. 16, p. 27-37, 2003.

CARRASCO, E. V. M. **Seminário do Concurso para titular do Departamento da Escola de Engenharia**. Universidade Federal de Minas Gerais. Belo Horizonte, 2016.

CARRASCO, E. V. M.; SOUZA, M. F.; PEREIRA, L. R. S.; VARGAS, C. B.; MANTILLA, J. N.R. **Determinação do módulo de elasticidade da madeira em função da inclinação das fibras utilizando tomógrafo acústico**. Revista Matéria. ISSN 1517-7076, artigo e-11935, 2017.

CAPUZ LLADRÓ, R; DIEZ BARRA, R; BOTELHO, J. FARIA, J. **Avaliação da capacidade resistente de estruturas de madeira com recurso a ensaios in-situ.** PATORREB 2006, 2º Encontro sobre Patologia e Reabilitação dos Edifícios. FEUP, Porto, 20 e 31 de março de 2006, pág. 139-148, Vol.1, ISBN 972-752-085-5.

CHAGAS, M. P.; ROQUE, R. M.; TOMAZELLO FILHO, M. **Manual de aplicação densitometria de raios-x em amostras de madeira.** Crad e Cred. 2005. 32 f. Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”. Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2005

COLIN, Sílvio. **Técnicas Construtivas do período Colonial, 2010.** Disponível em: <http://coisasdaarquitectura.wordpress.com/2010/09/06/tecnicas-construtivas-do-periodo-colonial-i/>. Data de acesso: junho/2017.

CÓMEZ, Rafael. **Una Aproximación al Arte Mudéjar.** Anales del Instituto de Investigaciones Estéticas. Volumen XIV, nº: 53, 1983.

CONFEA – Confederação Federal de Engenharia e Agronomia. **Decisão Normativa nº80, de 25 de maio de 2007.** Publicada no D.O.U, de 1º de junho de 2007 – Seção 1. P. 129 e 130.

CORTIZO, Eduardo Cabaleiro; BARBOSA, Marcos Pinotti; SOUZA, Luiz Antônio Cruz. **Estado da Arte da Termografia.** FORUM PATRIMÔNIO: Ambiente Construído e Patrimônio Sustentável. Belo Horizonte, v.2, n.2, mai/ago.2008.

CRUZ, H. **Inspeção, avaliação e conservação de estruturas de madeira.** 1^{as} Jornadas de Materiais de Construção, p. 215 – 227. Porto, 2011.

CUSTÓDIO, José de Arimathéia Cordeiro. **A arquitetura de defesa no Brasil Colonial.** Revista Discursos Fotográficos. Londrina, v.7, n10, p.173-194, jan/jun.2011.

DANGELO, A. G. D. **Cultura arquitetônica Minas Gerais e seus antecedentes em Portugal e na Europa: arquitetos, mestres de obras e construtores e o trânsito de cultura na produção de arquitetura religiosa nas Minas Gerais setecentistas.** Tese de Doutorado apresentada ao Programa de Pós-Graduação da Faculdade de Filosofia e Ciências Humanas, Departamento de História, da Universidade Federal de Minas Gerais, 2006.

DEL MENEZZI, Cláudio H. S.; SILVEIRA, Rafael R.; SOUZA, Mário R. **Estimativas das propriedades de flexão estática de seis espécies de madeiras amazônicas por meio da técnica não-destrutiva de ondas de tensão**. Revista Acta Amazônica. Vol. 40 (2) 2012: 325-332.

DE L'ORME, P. (1894). **L'oeuvre de Philibert de L'Orme comprenant Le premier tome de l'architecture et Les nouvelles inventions pour bien bastir et à petitz frais: reproductions en fac-similé par les procédés Motteroz**. Libraries-imprimeries réunies.

DIAS, Alfredo; CRUZ, Helena; MACHADO, José Saporiti; CUSTÓDIO, José; PALMA, Pedro. **Avaliação, Conservação e Reforço de Estruturas de Madeira**. Editora Verlog Dashofer. 1ª Edição. Setembro, 2009.

FAKOPP, **Manual do usuário**. Copyright © Fakopp Enterprise Bt, 2017.

FARIA, J. **Reabilitação de estruturas de madeira em Edifícios Históricos**. In Património. Estudos, nº3, 2002, IPPAR, ISSN 1645-2453, pp 8-13.

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., Anais. Lisboa. ISISE, 2005.

FITCHEN, J. **Building construction before mechanization**. The Massachusetts Institute of Technology, 1986.

FIGUEREDO, C. A. S.; BREMER, C. F.; CARRASCO, E. V. M. **Use of thermography as a non-destructive technique in the diagnosis of pathologies hidden in wood of old buildings**. In: II Congresso Latino-americano de Estruturas de Madeira e II Congresso Ibero-Latino-americano da Madeira na Construção, 2017, Buenos Aires. Anais II CLEM+CIMAD, 2017.

FIGUEIROA, Fabiola M. Z. **Avaliação de madeira de peroba-rosa por método não-destrutivo utilizado emissão de ondas de ultrassom para peças estruturais do patrimônio histórico**. Dissertação de Mestrado. Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. São Paulo, 2010.

FLIR SYSREMS. **Manual do utilizador**. São Paulo: Fir Systems, 2009.

GARCIA, J. R. R. **Potencialidades da termografia para o diagnóstico de patologias em edifícios**. Dissertação de Mestrado em Engenharia Civil. Área de especialização em Construções. Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto. Porto, 2014.

GATTO, Darci A.; GONÇALVES, Margarete R. F.; MATTOS, Bruno D.; CALEGARI, Leandro; STANGERLIN, Diego M. **Estimativa da deterioração da madeira de assoalho de prédio histórico por meio de ondas ultrassônicas**. CERNE, Vol.18, n.4, Lavras, oct. /dec. 2012. ISSN 0104-7760.

GOUVEIA, Antônio Maria Claret. **Análise de Risco de Incêndio em Sítios Históricos / Antônio Maria Claret Gouveia**. Brasília, DF: IPHAN /MONUMENTA, 2006. ISBN – 978-85-7334-037-2

IEPHA - Instituto Estadual de Patrimônio e Artístico de Mina Gerais. Livro de Tombo nº II. 1979.

IPHAN. Instituto do Patrimônio Histórico Artístico Nacional. **Relatório de Inspeção: Igreja São José/Ouro Preto-MG**. Processo: 0391/2002-98. Folha: 02. 2002.

IPHAN. Instituto do Patrimônio Histórico Artístico Nacional. **Manual de Conservação de Telhados**. Iphan, Brasília, 1999.

IPHAN. Instituto do Patrimônio Histórico Artístico Nacional. **Salvaguarda de Bens Registrados Patrimônio Cultural do Brasil**. Apoio e Fomento. Iphan, Brasília, 2017.

IPT. Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo. Disponível em: http://www.ipt.br/informacoes_madeiras/71.htm. Data de acesso: dezembro/2018.

JANKOWSKY, Ivaldo P.; GALINA, Inês C. M. **Secagem de Madeiras**, Apostila desenvolvida para o Projeto Piso de Madeira Sustentável – PIMADS. 2013.

JUNIOR, Luiz S. **Descrição macroscópica e microscópica da madeira aplicada na identificação das principais espécies comercializadas no Estado de São Paulo – Programas “São Paulo Amigo da Amazônia” e “Cadmadeira”**. Dissertação apresentada para obtenção do título de Mestre em Ciências, Programas: Recursos Florestais. Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz. Universidade de São Paulo, 2013.

LA PASTINA FILHO, José. **Manual de conservação de telhados**. Brasília: IPHAN / Monumenta, 2005.

LEITE, Maria Raquel Galvão. **Lunário Potiguar Edificado: Inventário de Tipologias Construtivas de Igrejas do Rio Grande do Norte**. Faculdade de Arquitetura da Universidade do Porto – FAUP. Mestrado em Metodologias de Intervenção no Patrimônio Arquitectónico. Porto, 2010.

LIMA, Rita de Cássia Fernandes; MAGNANI, Fábio Santana; NUNES, Renata. **Deteção de falhas em monumentos históricos de Olinda através de imagens por infravermelho – Uma análise preliminar**. Revista Brasileira de Arqueometria, Restauração e Conservação. Vol.1, Nº.6, pp343 – 346. AERPA editora, 2007.

LOPES, Miguel A. C.; **Tipificação de soluções de reabilitação de estruturas de madeiras em coberturas de edifícios antigos**. Dissertação de Mestrado. Departamento de Engenharia Civil da Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, 2007.

LOPES, Mário. **Estrutura sismo-resistente da gaiola pombalina: passado e futuro**. Conferência Internacional sobre Reabilitação de Estruturas Antigas de Alvenaria – CIRea 2012. Página 93 a 109. Lisboa, 2012.

LOPES, Pedro Filipe Garcia. **Estudo Comportamental de Asnas de Cobertura Palladianas**. Dissertação para obtenção do Grau de Mestre em Engenharia Militar. Academia Militar. Instituto Técnico de Lisboa. Portugal, 2014.

LOURENÇO, Paulo B.; MENDES, Nunes. **Reparação e Reforço da estrutura do coro**. ISESE, Universidade do Minho, Departamento de Engenharia Civil. Guimarães, 2014.

MACHADO, J. S.; DIAS, A.; CRUZ, H.; CUSTÓDIO, J.; PALMA, P. **Avaliação, Conservação e Reforço de Estruturas de Madeira**. 1ª edição, ISBN: 9789896420659. Editora Verlag Dashöfer. Portugal, 2009.

MACHADO, José S; FEIO, Artur O. **Avaliação de elementos estruturais de madeira: Desenvolvimentos recentes**. 5as Jornadas Portuguesas de Engenharia de Estruturas – JPÉE 2014.

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

MALHEIROS, Miguel. **São Mamede de Vila Verde: Construir uma igreja com as suas pedras**. Rota do Românico. 1º Edição, dezembro de 2011. Centro de Estudos do Românico e do Território. ISBN: 9789892027920.

MATAUCO, Enrique N. **A carpinter a de armar espanhola**. Editorial Munilla-Lería, ISBN-13: 978-84-89150-37-9. Madrid, 2008.

MARTINS, João Carlos S. **Tectos Portugueses do Sec. XV ao Sec. XIX**. Dissertação para obtenção do grau de Mestre em Recuperação e Conservação do Patrimônio Construído. Universidade Técnica de Lisboa. Instituto Superior Técnico. Setembro, 2008.

MARTINS, Juliana Furtado Arrobas; FIOROTI, Cesar Fabiano. **Avaliação de manifestações patológicas identificadas nas estruturas em madeira do centro de eventos IBC (Instituto Brasileiro do Café)**. REEC- Revista Eletrônica de Engenharia Civil. Volume 12, Nº3, 43-55. ISSN: 2179-0612. D.O.I. 10.5216. 2016.

MARTINS, S. F. M. F. **Estruturas de madeira – Inspeção e diagnóstico. Aplicação em Caso de Estudo**. Dissertação (Mestrado) Engenharia Civil – Área de Especialização Materiais, Reabilitação e Sustentabilidade da Construção – Escola de Engenharia, Universidade do Minho. Portugal, 2009.

MARTINS, Sandra C. F. **Arquitetura da Terra Roxa: Inspeções em peças de madeira de patrimônio histórico rural utilizando o ultrassom**. Tese de doutorado. Programa de Pós-Graduação em Arquitetura e Urbanismo. Escola de Engenharia de São Carlos. Universidade de São Paulo. São Carlos, set. 2011.

MARTITEGUI, Francisco Arriaga; SÁNCHEZ, Fernando Peraza; HERRERO, Miguel Esteban; MALDONADO, Ignacio Bobadila; FERNÁNDEZ, Francisco Gracia. **Intervención em estructuras de mader**a. Depósito Legal: M-46.312.2002. ISBN: 84-87381-24-3. Artes Gráficas Palermo, S.L. Madrid, 2002.

MELO JÚNIOR, J. C. F. **Aspectos anatômicos de madeiras históricas do período colonial do nordeste de Santa Catarina: elementos para conservação do patrimônio cultural**. Revista Confluências Culturais. v.1, n.1, p.70-84, 2012.

MENDES, Luiz Carlos; LOURENÇO, Líbia da Costa; ALVES, Vancleir Ribeiro; JORDY, João Cassim; LOURENÇO, Mychael Vinicius da Costa. **Coberturas em edificações históricas – análise arquitetônica, estrutural e de durabilidade**. VI

Congresso Internacional sobre Patologia y Recuperación de Estructuras – CINPAR. Argentina, 2010.

MIGUEL, Eleusy N. **O estudo de elementos do patrimônio arquitetônico ao alcance da sociedade: a relação das obras religiosas entre Portugal e Brasil, a influência portuguesa.** IX Mestres e Conselheiros Agentes Multiplicadores do Patrimônio. Belo Horizonte, 2017.

MILANI, Cleovir José; KRIPKA Moacir. **A identificação de patologias em pontes de madeira: Diagnóstico realizado no sistema viário do município de Pato Branco – Paraná.** REEC – Revista Eletrônica de Engenharia Civil. Nº 4, vOl. 1, 23-33, 2012.

MOREIRA, Maria Irene Nunes. **Tectos Decorativos em Madeira em Edifícios Patrimoniais Portugueses.** Dissertação apresentada para a colação de grau em Mestre em Engenharia Civil – Especialização em Construções. Faculdade de Engenharia. Universidade do Porto. Portugal, 2010.

MORESCHI, J. C. **Biodegradação e preservação da madeira.** 3 ed. Curitiba. Departamento de Engenharia e Tecnologia Florestal. Universidade Federal do Paraná. 2011. 33p.

MONTENEGRO, Gildo A. **Ventilação e cobertas: estudo teórico, histórico e desconstruído.** São Paulo: Edgard Blücher, 1984.

MOTTA, Sylvio Nelson Marlano. **Metodologia para caracterização dos processos construtivos e das patologias de edificações históricas: estudo de caso em Ouro Preto-MG.** Dissertação submetida ao Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal de Santa Catarina para obtenção do grau de Mestre em Engenharia Civil. Florianópolis, 2010.

MUÑOZ, Rosana; MAGALHÃES, Ana Cristina; OLIVEIRA, Mário Mendonça de. **Proposta de consolidação estrutural da Capela de Santana do Miradouro, na Bahia.** 3 Congreso Iberoamericano y XI Jornada de Técnicas de Restauracion y Conservacion del Patrimonio. Tópico 4 – nº 7.2013.

NATAL, Caion M. **Mário de Andrade em Minas Gerais: em busca das origens históricas e artísticas da nação.** Revista História Social, n.13, p. 195 – 207, 2007. ISSN: 2178-1141.

NEVES, André; HENRIQUES, Dulce F. **Confrence: CLB – MCS 2014** – 1º Congresso Luso-Brasileiro de Materiais de Construção Sustentável. Guimarães, Portugal.

NUNES, Larissa Corrêa Acatauassú. **Estruturas de Cobertura na Arquitetura Religiosa de Landi em Belém – PA. Avaliação de tipologia, comportamento estrutural e identificação das espécies vegetais.** Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Arquitetura e Urbanismo da Faculdade de Arquitetura da Universidade Federal da Bahia. Salvador, 2005.

OLIVEIRA, Fabiana Goia Rosa de; SALES, Almir. **Efeito da densidade e do teor de umidade na velocidade ultrassônica da madeira.** Revista Pesquisa e Tecnologia Minerva, 2 (1): p. 25 – 31. 2005.

OLIVEIRA, F. G. R.; CANDIANB, M.; LUCCHETTEB, F.F.; SALGONB, J. L.; SALESB, A. **A techinical note on the relationship between ultrasonic velocity and moisture content of Brazilian hardwood (Goupia glabra). Building and Environment**, Oxford, v.40, n.2, p.297-300, Feb. 2005.

OLIVEIRA, José Tarcísio da Silva. SOUZA, Leonard Chagas de Souza. LUCIA, Ricardo Marius Della. JÚNIOR, Wagner Patrício de Souza. **Influência dos Extrativos na Resistencia ao Apodrecimento de Seis Espécies de Madeira.** Revista Árvore, Viçosa - MG, v.29, n.5, p.819-826, 2005.

OLIVEIRA, M. MUÑOZ, R. MAGALHÃES A. **Proposta de consolidação estrutural de Nossa Senhora do Monte do Recôncavo.** Revista ALCONPAT. Volume 4, Nº3, Septiembre – Diciembre 2014, Páginas 228 – 236. ISSN 2007 – 6835.

OLIVEIRA, Raquel Diniz. **Teoria e prática da restauração.** Revista Eletrônica Patrimônio: Lazer & Turismo, v.6, n.7, jul.-ago.-set.2009, p.75-91. ISSN 1806-700X.

PALMA, Pedro Manuel Coutinho. **Ligações Tradicionais em Estruturas de Madeira: Avaliação experimental do seu comportamento mecânico.** Dissertação submetida para obtenção do grau de Mestre em Engenharia Civil pelo Instituto Superior Técnico no âmbito do protocolo de cooperação com o LNEC. Instituto Superior Técnico. Universidade Técnica de Lisboa. Julho, 2009.

PAULA, Marcella H.; MESQUITA, Robert R. S.; GONÇALVEZ, Joaquim C.; RIBEIRO, Edilene S.; SOUZA, Roberta S. **Utilização de métodos não-destrutivos para**

caracterização simplificada da madeira de cumaru (*Dipteryx odorata* Willd). Revista Biodiversidade – V. 15, N2, 2016.

PEREIRA, Renata Lopes. **Estruturas de Coberta da Arquitetura Religiosa em Pernambuco: Tipologia, patologia e intervenções.** Revista Brasileira de Arquitetura, Restauração e Conservação. Vol. 1, No.6, pp.332 – 337. Editora AERPA, 2007.

PEREIRA, Samuel Soares Camarinha. **Avaliação Experimental das Principais Propriedades Mecânicas de Peças Estruturais em Madeira Antiga.** Dissertação submetida para a colação de grau de Mestre em Engenharia Civil – Especialização em Construção Cívica. Faculdade de Engenharia. Universidade do Porto, 2009.

PEREIRA, Natália Biscaglia. **Restauro em coberturas em madeira: influência da decisão de projeto na preservação do patrimônio cultural.** Dissertação submetida ao Programa de Pós-Graduação em Arquitetura e Urbanismo da Universidade Federal de Santa Catarina. Florianópolis, 2011.

PEREIRA, Ricardo. **Apostila de Tomografia Computadorizada do Curso de Ciências Biológicas da Universidade Estadual de Goiás,** [201-?], p. 7.

PERTUZZATTI, Anderson; CONTE, Bruno; MISSIO, André L.; GATTO, Darci A.; HASELEIN, Clovis R.; SANTINI Elio J. **Influência da Umidade na Resistência da Madeira de Eucalipto a Impactos.** Revista Floresta e Ambiente; 24: e00092514. ISSN 2179-8087.

PROGRAMA MONUMENTA. **Caderno de Encargos: Cadernos técnicos 2.** Brasília: Ministério da Cultura, Programa Monumenta, 2005.

PRZYBYSZ, Marina e MACHADO, Gilmar; CHRISTOFORO, André Luis; SILVA, Marcio Rogério da; JUNIOR, Carlito Calil. **Resistência Biológica a Fungos Xilófagos da Madeira de Pinus Oocarpa Termorretrificada.** Revista Madeira: Arquitetura e Engenharia, v.14, n. 35, p.25 a 32. 2013. ISSN: 2237-7964.

RODRIGUES, Romana Margarida Silva Costa de Oliveira. **Construções Antigas de Madeira: Experiência de Obra e Reforço Estrutural.** Dissertação apresentada à Universidade do Minho, para obtenção do grau de Mestre em Engenharia Civil. 2004.

RODRIGUES, Menandro A. S.; SALES, Juscelino, C. **A madeira e suas patologias. Estudo de caso: Igreja Nossa Senhora das Mercês – Itapipoca/CE.** IX Congresso Internacional sobre Patologia y Recuperación de Estructuras. IX International Congress on Pathology and Repair of Structures. João Pessoa, 2013.

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

SANTOS, R. **A História da Arte Medieval em Portugal: A Capela de São Pedro de Balsemão.** [200?].

SARRAZOLA MARTINS, João; SOUSA GAGO, António; CALDAS, João; OLIVEIRA, Lina. **Telhados e tectos de asnaria, uma constante na construção portuguesa do gótico ao barroco.** Anais do I Congresso Internacional de História da Construção Luso-brasileira. Espiro Santo, 2013.

SEGURADO, João Emílio dos Santos. **Trabalhos de carpintaria civil.** 9.ed. ver. Lisboa: Livraria Bertrand, [196-?].

SILVA, Rosemaria A. **Sistema para análise da madeira utilizando método de propagação de ondas sonoras** Monografia apresentada como requisito parcial à conclusão do curso de Engenharia da Computação do Centro Universitário Positivo. Curitiba, 2006.

SILVA, J. Mendes; VICENTE, Romeu. **Degradation of Roofs In Old Cities Centre: situation, risks and mitigation strategies.** Cultural HELP 2014- ICORP Conference on Cultural Heritage and Loss Prevention, ICOMOS/ ICORP, Casa das Artes, Porto, 6-7 OCT 2014.

SILVEIRA, Livia H. C.; REZENDE Alba V.; VALE Ailton T. **Teor de umidade e densidade básica da madetira de nove espécies comerciais amazônicas.** Acta Amazonica. Vol. 43 (2) 2013: 179 -184.

SIQUEIRA, K. P. **Variabilidade da massa específica de Pinus taeda l. em diferentes classes de dítio.** Dissertação de Mestrado para obtenção do título de mestre em Engenharia Florestal. Universidade do Paraná, Curitiba, 2004.

SOUSA, Hélder S.; BRANCO, Jorge M.; LOURENÇO, Paulo B. **Da inspeção à avaliação de segurança na reabilitação de estruturas de madeira.** Seminário Intervir em Construções existentes de madeira, 2014.

SOUTO, Luciano Gustavo; BUENO, Liane da Silva; SILVA, Patrícia de Deus. **Técnicas construtivas utilizando madeira e sua evolução histórica.** Ignis – Revista de Engenharia e Inovação Tecnológica. Vol.05.Nº02. p. 62-76. 2016.

SPHAN. **Livro do Tombo Belas Artes.** Incrção. Nº 453 de 04/03/1960.

STUPP Ângela M.; PEREIRA, Giuliano F.; SCWEITZER, Vinicius R.; **Propriedades da madeira: Ensaio não-destrutivo.** I SEAFLORE – Semana de Aperfeiçoamento em Engenharia Florestal. Universidade Federal do Paraná. Curitiba, 2017.

SULTECH. **Manual de instruções TCS-75.** Sultech, 2018.

TARGA, Luiz A; BALLARIN, Adriano W; BIAGGIONI, Marco A. M. **Avaliação do módulo de elasticidade da madeira com uso de método não-destrutivo de vibração transversal.** Revista Engenharia Agrícola. Vol. 25, nº 2, Jaboticabal may/aug. 2005. ISSN 1809-4430.

TELLES, Pedro Carlos da Silva. **História da Engenharia no Brasil.** 2ed. Rio de Janeiro: editora Clube de Engenharia, 1987.

TEOBALDO, Izabela Naves Coelho. **Metodologias de Intervenção em Edificações antigas realizadas no Brasil e na Europa com possibilidade de utilização da estrutura metálica.** Revista Brasileira de Arqueometria, Restauração e Conservação. Vol. 1, Nº 5, pp. 226 – 231. 2007.

TEREZO, Rodrigo, F. **Propriedades mecânicas de madeiras utilizadas em estruturas históricas e contemporâneas estimadas por meio de ultra-som.** Dissertação de Mestrado. UFSC, 2004.

TINOCO, Jorge E. L. **Telhados tradicionais; Patologias, reparos e manutenção.** Revista Brasileira da Arquitetura Restauração e Conservação. Vol.1, nº.5, p.232 – 237. Editora AERPA, 2007.

TINOCO, Jorge E. L. **Diário de Obras. Boas Práticas.** Gestão de Restauro. CECI – Centro de Estudos Avançados da Conservação Integrada. Edição nº.05, 2014. Olinda, Pernambuco. ISSN: 1980-8259.

TIRAPELI, Percival. **Arte colonial: barroco e rococó.** São Paulo: Companhia Editora Nacional, 2066. (Coleção Arte Brasileira).

TOLEDO, Benedito L. **Esplendor do Barroco luso-brasileiro.** Cotia: Ateliê Editorial, 2012, 368.

TOMAZELLO, M.; LISI, C. S.; ROIG, F. A.; OLIVEIRA, J. T. S.; SILVA, J. C.; ROQUE, R. M.; BELLOTE, A. F. J. **A densitometria de raios x aplicada na análise da madeira de árvores de espécies tropicais e subtropicais.** In: Simpósio de Ciência e Tecnologia da Madeira do Estado do Rio de Janeiro, 1., 2008, Seropédica: UFRRJ, 2008.

VALLE, Ângela; TEREZO, Rodrigo Figueiredo; TELES, Carlos Dion de Melo. **Uso de técnicas não destrutivas no diagnóstico de patologias em estruturas de madeiras.** Revista Ciência e tecnologia de Materiais de Construção Civil. Vol. 1, n.2, p. 148-157, novembro, 2004.

VALSOUSA. Associação de Municípios do Vale do Sousa. Rota do Românico. Plano de Implementação e Dinamização Turística e Cultural da Rota do Romanico do Vale do Sousa. Disponível em: <https://www.rotadoromanico.com/vPT/footer/Paginas/FichaTecnica.aspx>. Acesso: 08/02/2019.

VASCONCELOS, Sylvio de. **Arquitetura no Brasil: Sistemas Construtivos.** Revisão e notas: Suzy P. Mello. 5. Ed. Universidade Federal de Minas Gerais. Série Patrimônio Cultura, n. 2. Belo Horizonte, 1979.

VITRUVIUS. **The architecture of Marcus Vitruvius Pollio, in ten books.** Translated from the latin by Joseph Gwilt, fsa. fras. John Weale, London, 1860.

ZENID, Geraldo José; CECCANTINI, Gregório C. T. **Identificação Macroscópica de Madeiras.** Laboratório de Madeira e Produtos Derivados. Centro de Tecnologia de Recursos Florestais. Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo – IPT. Setembro de 2007.

WORRAL, J. J. (2013) Wood Decay. **Fores and Shade Tree Pathology**. USDA Forest Service, Rocky Mountain Region. Forest Health Management. Colorado St. Disponível em: < <http://www.forestpathology.org/decay.html#terms> >. Acesso 03/12/2017.

Glossário

Conservação preventiva: A conservação preventiva consiste na realização de intervenções indiretas visando o retardamento da degradação e impedindo desgastes pela criação de condições otimizadas para a conservação dos bens culturais de forma que essas medidas forem compatíveis com a sua utilização social (BRAGA, 2001).

Cravos: Elementos metálicos de fixação para ligações em madeira muito comuns no século XVIII.

Manutenção: Manutenção (reposição das características originais da estrutura), envolvendo ações de conservação / reparação: traduz-se na recuperação, com regeneração e eventual beneficiação da estrutura existente sem variações substanciais do comportamento estrutural. Cabem neste âmbito ações gerais de limpeza e tratamento preservador curativo e/ou preventivo da madeira, a substituição pontual de elementos ou regiões de elementos deteriorados, a reparação de fendas, a reparação ou melhoramento das ligações estruturais e a solidarização geral da estrutura (DIAS *et al.*, 2009, p.109).

Tesouras Mudéjares: A palavra mudéjar deriva do árabe “muddayan” que significa enviado (CÓMEZ, 1983, p. 41).

Tirantes: Barras de ferro ancoradas nas paredes com a finalidade de absorver os empuxos deixando os esforços na alvenaria somente sobre forma de cargas verticais. (NUNES, 2005, p. 86).

Preservação: A preservação é um conjunto de medidas, desde intervenções físicas no bem cultural até políticas públicas de visam a preservação da historicidade do patrimônio material e imaterial (CONFEEA, 2007).

Reabilitação ou reconversão: requalificação envolvem ações de reforço da estrutura, com eventuais substituições locais, ou mesmo a sua reorganização e alteração, tendo em vista resolver deficiências da estrutura original, a sua inadequação a uma nova utilização ou as normas de segurança vigentes (DIAS *et al.*, 2009, p.109).

Reconstrução: Conjunto de técnicas baseado em evidências históricas indiscutíveis e destinado a construir de novo uma edificação ou parte dela que se encontre destruída, em razão de cataclismos ou guerras, ou que estejam na iminência de ser destruída e que possa ser desmontada e transportada para local mais seguro (CONFEA, 2007).

Restauro: O restauro constitui o momento metodológico do reconhecimento da obra de arte na sua consistência física e na dupla polaridade estético-histórica, tendo em vista a sua transmissão ao futuro (BRANDI, 2004).

Salvaguarda: Salvaguardar um bem cultural de natureza imaterial é apoiar sua continuidade de modo sustentável, atuar para melhoria das condições sociais e materiais de transmissão e reprodução que possibilitam sua existência (IPHAN, 2017).